

1 μm 波段低量子亏损光纤激光研究进展 (特邀)

许将明¹, 张 扬¹, 马小雅¹, 叶 俊^{1,2,3}, 柯延钊¹, 李思成¹, 梁峻锐¹,
何俊鸿¹, 黄良金^{1,2,3}, 潘志勇^{1,2,3}, 姚天甫^{1,2,3}, 冷进勇^{1,2,3}, 周 朴^{1*}

(1. 国防科技大学 前沿交叉学科学院, 湖南 长沙 410073;

2. 国防科技大学 南湖之光实验室, 湖南 长沙 410073;

3. 国防科技大学 高能激光技术湖南省重点实验室, 湖南 长沙 410073)

摘 要: 量子亏损对高功率光纤激光器内的废热产生和光光转换效率具有重要影响, 光纤激光器输出功率的提升过程可以视为不断与量子亏损作斗争的过程。文中梳理了近年来 1 μm 波段低量子亏损光纤激光的重要进展, 重点介绍了稀土掺杂增益和拉曼增益两种体制的光纤激光器在实现低量子亏损输出方面的工作。在稀土掺杂光纤激光器中, 采用级联泵浦、多组分掺杂、强泵浦等技术可降低激光器的量子亏损, 其中量子亏损 $\leq 1\%$ 的掺镱光纤激光器已实现 400 mW 功率输出。在拉曼光纤激光器中, 通过采用特殊掺杂、泵浦光谱调控、增益竞争抑制等技术, 量子亏损 $\leq 1\%$ 的拉曼光纤激光器已实现百瓦级功率输出, 并成功验证包层泵浦方案的可行性, 表明其在实现高功率低量子亏损输出方面具有重要潜力。

关键词: 光纤激光器; 高功率; 低量子亏损; 掺镱光纤激光; 拉曼光纤激光

中图分类号: TN248 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20230267

0 引 言

光纤激光器是指以光纤作为工作介质的激光器, 具有光束质量好、转换效率高、热管理方便、结构紧凑、可柔性操作等优势, 是激光与光电子学等领域的研究前沿和热点, 并在生物医疗、智能制造、能源勘探和国防安全等领域得到广泛应用^[1-5]。近年来, 随着增益光纤、无源器件、泵浦光源性能的不提高, 以及热管理、非线性效应调控等技术的快速发展, 光纤激光器的输出功率水平得以飞速提升, 特别是 1 μm 波段光纤激光器的表现尤为突出。2009 年, 1 μm 波段高功率光纤激光器实现单模万瓦级功率输出; 2013 年, 实现单纤 20 kW 级激光输出, 但多年来功率量级尚无进一步突破的报道^[6-11]。研究表明, 热致模式不稳定、热透镜等热效应是限制高功率光纤激光器性能进一步提升的重要因素之一^[12-15]。

量子亏损 (Quantum Defect, QD) 表示激光增益过

程中泵浦光子与信号光子之间的能量差, 是高功率光纤激光器内废热的重要来源之一^[16-18]。降低量子亏损可减少光纤激光器中的产热, 提高热致模式不稳定等效应的发生阈值, 以及激光器的光光转换效率, 提升系统长期运行安全性。1995 年, Zellmer 等^[19]报道了首个十瓦级光纤激光输出; 该激光器基于掺镱光纤构建, 泵浦光波长和信号光波长分别约为 810 nm 和 1060 nm, 对应量子亏损约为 23.58%。1999 年, Dominic 等^[20]基于掺镱光纤实现了首个百瓦级光纤激光器; 其泵浦光波长和信号光波长分别为 915 nm 和 1120 nm, 量子亏损约为 18.30%。2004 年, Jeong 等^[21]报道了首个千瓦级掺镱光纤激光器; 该激光器泵浦光波长和信号光波长约为 975 nm 和 1100 nm, 量子亏损约为 11.36%。为了降低光纤激光器中的量子亏损和热负载, 提高泵浦亮度, 实现高功率输出, 研究人员提出级联泵浦方案。2009 年, IPG Photonics 公司^[6, 22]基于级

收稿日期: 2023-05-05; 修订日期: 2023-06-11

基金项目: 国家自然科学基金项目 (61635005, 61905284)

作者简介: 许将明, 男, 副研究员, 博士, 主要从事高功率光纤光源光谱特性调控方面的研究。

通讯作者: 周朴, 男, 研究员, 博士, 主要从事激光科学与技术等方面的研究。

联泵浦方案实现了首台万瓦级光纤激光器;其泵浦波长和信号波长分别为 1018 nm 和 1070 nm, 相应量子亏损约为 4.86%。可以说, 光纤激光器功率提升的过程也是不断与废热等作“斗争”的过程;量子亏损作为高功率光纤激光器中废热的重要来源之一, 其降低方法自然受到研究人员的广泛关注。文中主要梳理近年来在进一步减小 1 μm 波段光纤激光器量子亏损方面的研究工作 (为了描述方便, 文中约定低量子亏损光纤激光器的量子亏损 $\leq 4.50\%$ 、超低量子亏损光纤激光器的量子亏损 $\leq 1\%$), 以期为促进高功率光纤激光器性能发展提供参考。

1 掺镱光纤激光器

1 μm 波段光纤激光的最高输出功率由掺镱光纤激光器实现。在降低掺镱光纤激光器量子亏损方面, 研究人员开展了大量工作, 如通过级联泵浦技术获得低量子亏损掺镱光纤激光, 采用强泵浦、多组分掺杂等技术实现超低量子亏损掺镱光纤激光输出等。

1.1 低量子亏损掺镱光纤激光器

级联泵浦又叫同带泵浦或二次泵浦, 即以半导体激光器泵浦的光纤激光器作为二次泵浦源耦合到掺杂光纤中提供增益、获得激光输出^[23-24]。与半导体激光直接泵浦方案相比, 采用级联泵浦技术的光纤激光器可以减小激光器中泵浦光波长与信号光波长间隔、降低量子亏损引入的废热, 提升泵浦激光的亮度, 实现对激光器中的热效应的抑制, 提高其功率提升潜力。该技术最早应用于掺铒光纤激光器中, 此后还在掺铊、掺铟等光纤激光器中得到应用^[25-27]; 在基于级联泵浦技术的 1 μm 波段掺镱光纤激光器中, 研究人员尝试采用较长波长的泵浦光、较短波长的信号光以减小激光器的量子亏损。

2011 年, 德国耶拿大学的 Wirth 等^[28] 设计了基于级联泵浦技术的空间结构光纤放大器, 结构如图 1 所示。利用 1030 nm 盘片激光器泵浦大模场双包层掺镱光纤, 成功得到 2.9 kW 1071 nm 光纤激光, 对应的量子亏损为 3.83%, 斜率效率为 73%。

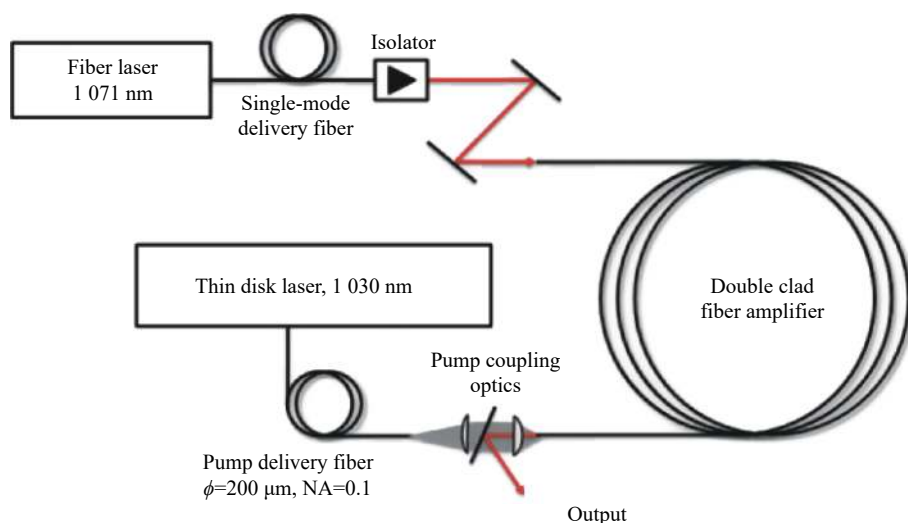


图 1 2.9 kW 级联泵浦光纤放大器结构示意图^[28]

Fig.1 Experimental layout of the 2.9 kW tandem-pumped fiber amplifier^[28]

2012 年, 英国南安普顿大学的 Yao 等^[29] 搭建全光纤结构的光纤放大器, 利用掺镱铝硅酸盐光纤作为增益介质, 通过级联泵浦技术, 输出 2.5 W 1040 nm 光纤激光, 斜率效率超过 90%, 量子亏损仅为 1.92%。2014 年, 该课题组的 Chang 等^[30] 将级联泵浦掺镱光纤放大器的输出功率提高至 5.7 W, 量子亏损保持在 1.9% 左右, 对应斜率效率为 64%, 实验结构如图 2 所

示。此外, 他们测量出具有量子亏损为 2% 的级联泵浦磷酸盐掺镱光纤放大器纤芯的产热量为 3%, 这是首次对光纤激光纤芯内热负载的测量。

2018 年, 笔者单位的 Ma 等^[31] 搭建了如图 3 所示的级联泵浦全光纤窄线宽光纤放大器, 其采用主振荡器功率放大器 (MOPA) 结构, 种子激光为输出功率为 60 mW 的低噪声、单频 (线宽低于 20 kHz) 1064 nm

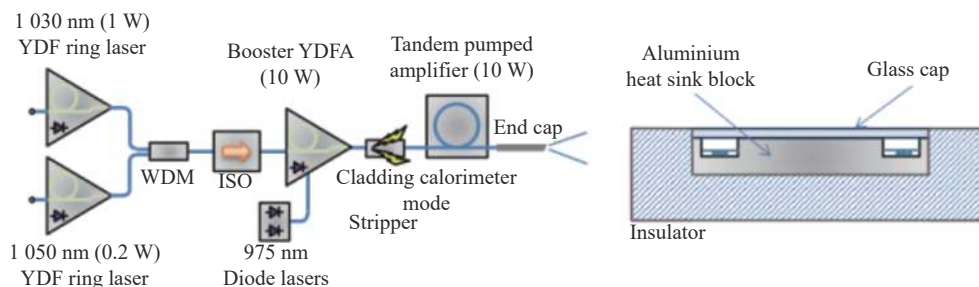


图 2 级联泵浦磷酸盐掺铈光纤放大器结构示意图^[30]

Fig.2 Experimental scheme of the tandem-pumped ytterbium-doped phosphosilicate fiber amplifier^[30]

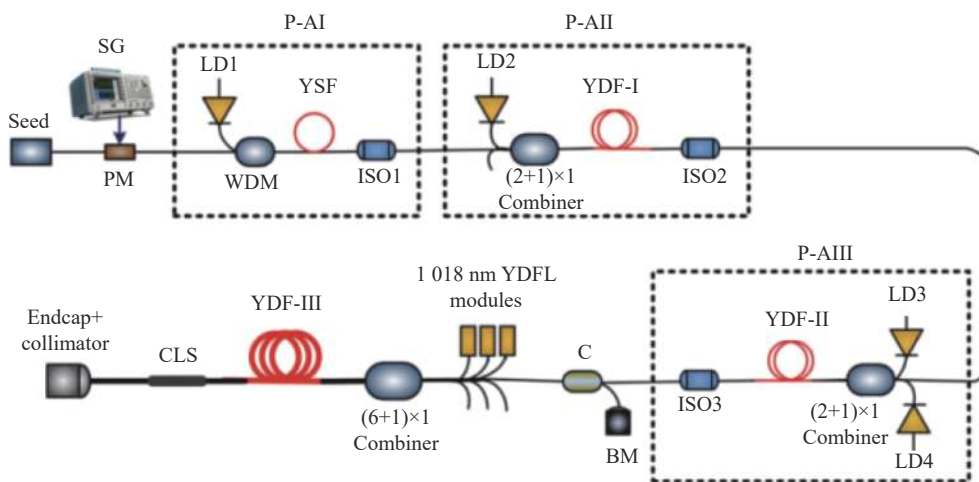


图 3 级联泵浦全光纤窄线宽 MOPA 光纤放大器^[31]

Fig.3 Experimental setup of the tandem-pumped all-fiber narrow linewidth amplifier^[31]

光纤激光, 通过调制和三级放大后注入大模场双包层掺铈光纤 (纤芯/内包层直径 30/250 μm) 中, 泵浦源采用总输出功率可达 6 kW 的 1018 nm 全光纤激光器, 成功获得线宽为 0.89 nm、最高功率接近 4 kW 的光纤激光输出, 对应的量子亏损为 4.32% 左右, 光束质量因子 M^2 为 1.86。

1.2 超低量子亏损掺铈光纤激光器

采用级联泵浦技术可有效降低 1 μm 波段掺铈光纤激光器的量子亏损, 但总体来说难以实现超低量子亏损 ($QD \leq 1\%$) 光纤激光输出。为了进一步降低掺铈光纤激光器的量子亏损, 研究人员还开展了基于强泵浦、多组分掺杂等方面的研究工作。

2007 年, 日本福井大学的 Matsubara 等^[32] 报道了如图 4 所示的空间结构超低量子亏损掺铈光纤激光器。使用半导体激光器 (中心波长 978 nm, 输出功率 290 mW) 泵浦一段单模掺铈光纤 (纤芯/包层直径 6.2/125 μm , 长度 90 mm), 通过构建强泵浦条件 ($\sim 1 \text{ MW}/\text{cm}^2$), 分别实现了 980.6 nm 和 983 nm 的光纤

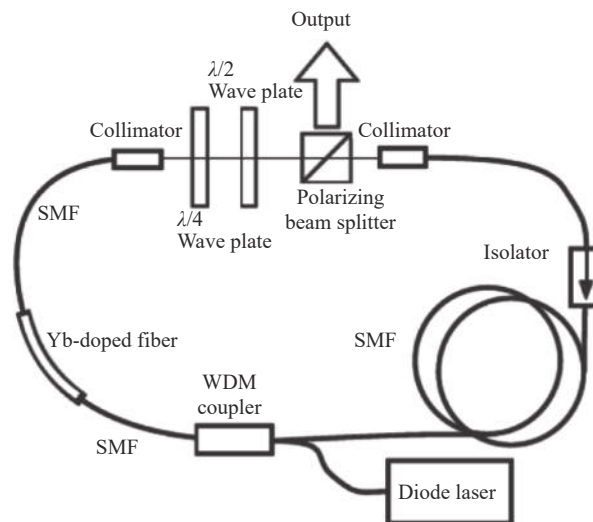


图 4 空间结构超低量子亏损掺铈光纤激光器系统结构图^[32]

Fig.4 Experimental structure of the spaceborne ytterbium-doped low quantum defect fiber laser^[32]

激光输出, 对应量子亏损分别低至 0.26% 和 0.5%, 其中 983 nm 光纤激光的输出功率为 18 mW、斜率效率为 15%。

2014 年,英国南安普顿大学的 Yao 等^[33]对双包层掺镱铝硅酸盐光纤激光器和放大器的量子亏损极限进行理论研究,指出量子亏损与光纤的纤芯-内包层面积比有很大关系,该面积比越小,激光器越容易实现较低的量子亏损输出。在纤芯泵浦情况下,掺镱光纤激光器可达到的最低量子亏损为 0.6%。

2018 年,美国伊利诺伊大学的 Yu 等^[34]报道了一种量子亏损<1% 的光纤激光器,其增益光纤为自制的掺镱多组分氟硅酸盐光纤。搭建了由半导体激光器泵浦的光纤激光谐振腔,结构如图 5 所示。在 976.6 nm 和 981 nm 泵浦波长条件下,该光纤激光器分别输出了约 400 mW 的 985.7 nm 激光和约 150 mW 的 989.8 nm 激光,转换效率分别为 62.1% 和 56.8%,对应的量子亏损分别为 0.92% 和 0.90%。

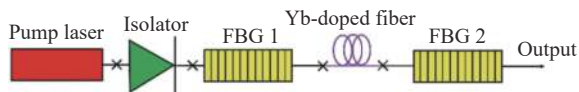


图 5 掺镱多组分氟硅酸盐光纤激光器实验结构图^[34]

Fig.5 Experimental setup of the low quantum defect laser via ytterbium-doped multicomponent fluorosilicate fiber^[34]

2021 年,该课题组首次采用双波长脉冲泵浦掺镱氟硅酸盐光纤,其两个泵浦波长分别为由半导体激光器输出的 976.6 nm 斯托克斯泵浦波长和掺镱光纤激光器输出的 989.6 nm 反斯托克斯泵浦波长,成功产生了 985.6 nm 光纤激光,对应量子亏损低至 0.51%^[35]。

总的来说,基于级联泵浦方案的低量子亏损掺镱光纤激光器已实现数千瓦功率输出,但是目前公开报道的最低量子亏损为 1.92%,难以进一步降低。基于多组分掺杂、强泵浦等方案可实现超低量子亏损光纤激光输出,但是目前公开报道的最高输出功率仅为 400 mW。

2 拉曼光纤激光器

拉曼光纤激光器利用无源光纤中的受激拉曼散射 (SRS) 提供增益,信号光波长主要受限于泵浦光波长,具有增益带宽较宽、波长可调谐、无光子暗化、结构简单等特点^[36-41]。此外,与传统的半导体泵浦掺镱光纤激光器相比,工作在 1 μm 波段的拉曼光纤激光器具有较小的量子亏损 (以泵浦光波长为 1070 nm 为例,利用硅基光纤中的受激拉曼散射提供增益可获得 1120 nm 左右的信号光,量子亏损约为 4.46% 左右)。因此,拉曼光纤激光器也是获得 1 μm 波段低量子亏损光纤激光的重要技术方案。

2.1 低量子亏损拉曼光纤激光器

近年,随着掺镱光纤激光技术及相关亮度增强技术的发展,拉曼光纤激光器的输出功率快速提升^[42-47]。

在基于阶跃折射率无源光纤的低量子亏损拉曼光纤激光器方面,欧洲南方天文台的 Feng 等^[48]于 2009 年利用中心波长 1070 nm、最高输出功率 200 W 的掺镱光纤激光泵浦 30 m 硅基光纤,首次实现了百瓦级拉曼光纤激光输出,其实验结构如图 6 所示。在泵浦功率增长到 180 W 时,该激光器成功实现 153 W 的 1120 nm 拉曼光纤激光输出,对应量子亏损为 4.46%,转换效率达到 85%。2018 年,笔者单位 Zhang 等^[49]利用 1070 nm 掺镱光纤激光器泵浦半开腔结构随机拉曼光纤激光器,实现 491 W 功率输出。该激光器信号光波长为 1120 nm,对应的量子亏损为 4.46%。2022 年,笔者单位 Zhang 等^[50]利用可调谐放大的自发辐射 (ASE) 光源后向泵浦拉曼光纤激光器,获得低量子亏损的随机拉曼光纤激光输出。该激光器最高输出功率 11.71 W,泵浦光波长 1066 nm、信号光波长 1080 nm,对应量子亏损为 1.3%。

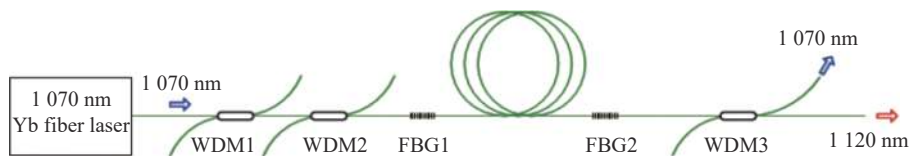


图 6 首台百瓦级低量子亏损拉曼光纤激光器结构示意图^[48]

Fig.6 The experimental layout of the first hundred-watt-level low quantum defect Raman fiber laser^[48]

此外,基于渐变折射率光纤的拉曼光纤激光器也以其亮度提升能力和光束净化效果得到了国内外研

究人员的广泛关注和深入研究^[51-55]。目前,基于渐变折射率光纤的拉曼激光器的最高输出功率已达到

3 kW, 由笔者单位 Chen 等^[56]于 2021 年实现。该激光器结构如图 7 所示, 采用金属铝涂覆层的拉曼光纤搭建, 最终获得了 3083 W 输出功率, 在 2364 W 功率时输出 M^2 为 3.12, 在最高功率条件下输出 M^2 为 5.72, 对应的亮度提升倍数分别为 9 和 2.9 左右; 泵浦光波长为 1080 nm、信号光波长为 1130 nm, 对应量子亏损为 4.42%。

在包层泵浦低量子亏损拉曼光纤激光器方面, 英国南安普顿大学 Yao 等^[57]于 2015 年设计并制作了一款双包层拉曼光纤 (纤芯/内包层直径 14.6 μm /38 μm , 数值孔径 0.1/0.3), 并利用这款光纤搭建了由 975 nm 半导体激光器泵浦的空间结构拉曼光纤激光器 (结构如图 8 所示), 得到了 6 W 1019 nm 激光输出, 对应的量子亏损为 4.32%。2018 年, 以色列 Soreq NRC 研究中心 Glick 等^[58]采用三包层硅基光纤 (纤芯/内包层直径 25 μm /45 μm , 数值孔径 0.065/0.22) 光纤搭建了拉曼激光器, 其中泵浦源为 1070 nm 大模场光纤激光器, 被动光纤长度为 80 m, 成功实现了 1.2 kW 的 1120 nm

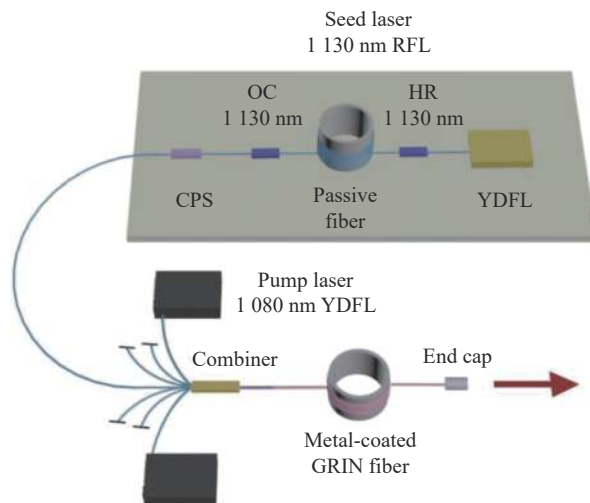


图 7 3 kW 渐变折射率光纤拉曼激光器结构示意图^[56]

Fig.7 Experimental scheme of the 3 kW Raman amplifier based on metal-coated graded-index passive fiber^[56]

拉曼光纤激光输出, 光束质量因子 M^2 为 2.75, 亮度提升了 7 倍左右, 对应转换效率为 85%, 量子亏损为 4.46%。这是目前包层泵浦低量子亏损拉曼光纤激光器的最高输出功率记录。

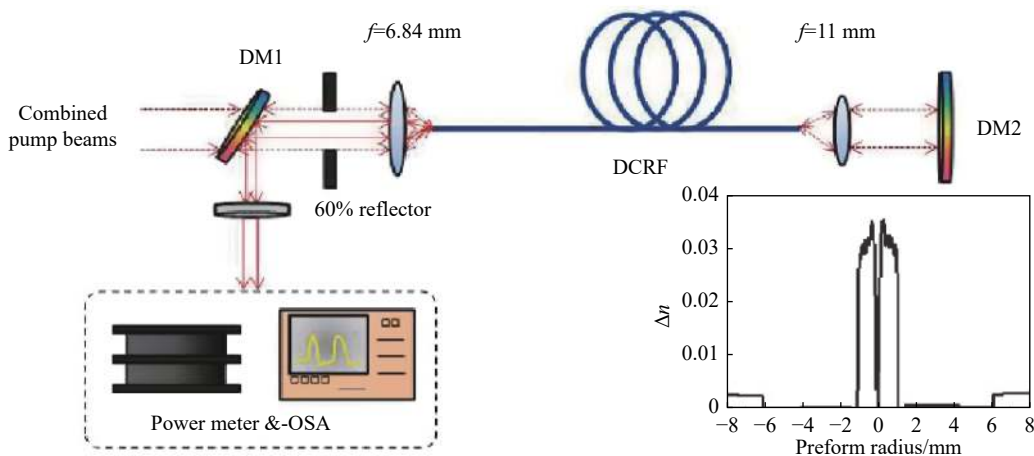


图 8 空间结构包层泵浦拉曼光纤激光器结构示意图^[57]

Fig.8 Experimental structure of the spaceborne cladding-pumped Raman fiber laser^[57]

2020 年, 笔者单位的 Chen 等^[59]报道了首台全光纤包层泵浦拉曼放大器。该放大器由总功率 170 W 的 1130 nm 激光光源提供种子激光, 利用输出功率超过 3 kW 的 1080 nm 光纤激光器去泵浦自制的三包层硅基光纤 (纤芯/内包层/外包层直径 31 μm /55.55 μm /360 μm , 数值孔径 0.06/0.22/0.46, 光纤长度 38 m), 成功得到 762.6 W 激光输出, 最佳光束质量因子 M^2 为

1.9, 对应的量子亏损为 4.42%。

2.2 超低量子亏损拉曼光纤激光器

由于硅基光纤的拉曼增益谱较宽、在低频移区有较弱的增益, 研究人员报道了基于硅基光纤的超低量子亏损拉曼光纤激光器工作。2008 年, 加拿大拉瓦尔大学的 Bélanger 等^[60]利用 1064 nm 的掺铥光纤激光器作为泵浦源, 一段长度为 125 m 的单模光纤提供拉

曼增益, 波长可调谐光纤布拉格光栅提供反馈, 实现了中心波长 1075 nm、量子亏损约为 1% 的光纤激光输出, 但其最高功率仅为 1.1 W。2023 年, 笔者单位的 Ma 等^[61] 利用可调谐超荧光光源泵浦基于硅基光纤的拉曼光纤激光器, 通过优化硅基光纤长度和低反光栅反射率等参数, 实现量子亏损 0.56%、输出功率 6.2 W、斜率效率 47.7% 的拉曼光纤激光输出。总的来说, 硅基光纤在低频移区的拉曼增益相对较弱, 受增益竞争因素制约, 基于硅基光纤的超低量子亏损拉曼光纤激光器的输出功率仍未突破十瓦量级。

此外, 掺磷光纤的拉曼增益谱中除了具有与硅元素相关的 13.2、14.7 THz 频移的增益峰, 以及与磷元素相关的 ~40 THz 频移的增益峰, 还具有因振动态密度过剩而存在的频移约为 3 THz 左右的玻色峰^[62-63], 如图 9 所示。在此基础上, 笔者单位设计实现了基于掺磷光纤中玻色峰的超低量子亏损 ($QD \leq 1\%$) 拉曼光纤激光器。

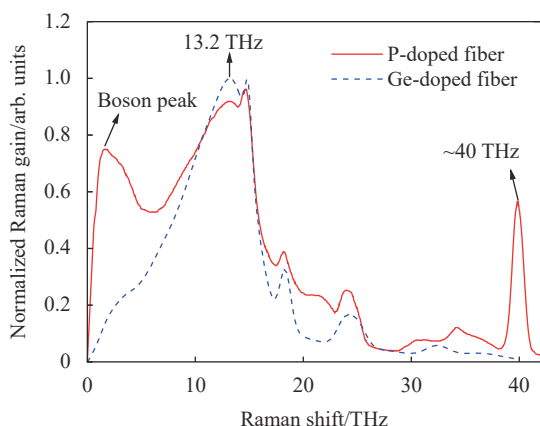


图 9 掺磷光纤与掺锗光纤的拉曼增益谱对比^[63]

Fig.9 The normalized Raman gain spectra of phosphorus-doped fiber and germanium-doped fiber^[63]

2.2.1 玻色峰的形成机理

玻色峰通常指非晶材料中太赫兹频率附近的超出德拜定律的过剩振动态密度, 可以在其子散射谱、拉曼散射谱以及热导率谱中观测到。玻色峰的研究历史可以追溯到 20 世纪 50 年代。1949 年, 英国牛津大学的 Berman^[64] 在测量非晶玻璃材料的热导率时发现, 在温度 10 K 时其导热率比晶体材料低几个数量级。1953 年, 印度科学院的 Krishnan 等^[65] 在测量石英玻璃的拉曼散射谱时发现, 相比于晶体材料, 石英

玻璃在频移 30~120 cm^{-1} 有较强的拉曼散射峰, 即为玻色峰。在过去的几十年里, 研究人员围绕非晶材料中玻色峰的产生机理开展了大量研究^[66-69]。1986 年, 俄罗斯科学研究院 Malinovsky 等^[70] 对非晶材料中的玻色峰展开了理论与实验研究, 他们认为玻色峰的产生与玻璃材料微观结构的中程有序度有关。此外, 他们通过实验发现, 相较于制备时缓慢退火冷却的玻璃材料, 在冰水中骤然退火冷却的玻璃材料有着更强的玻色峰, 如图 10 所示。

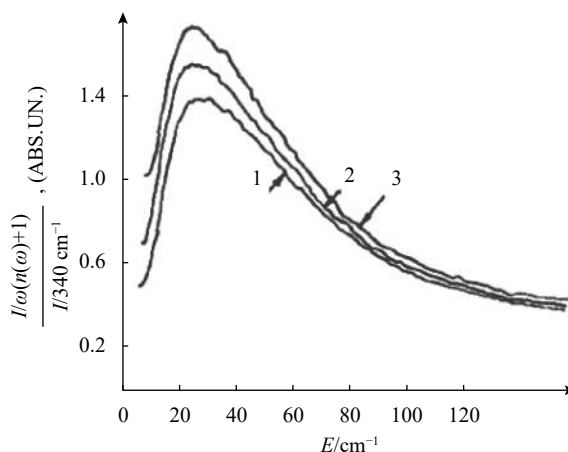


图 10 不同退火条件下三硫化二砷玻璃的拉曼增益谱: (1) 缓慢退火冷却; (2) 空气中直接退火; (3) 冰水中骤然退火^[70]

Fig.10 The Raman gain spectra of As_2S_3 glasses: (1) Well annealed sample; (2) Quenched in the air; (3) Quenched in ice water^[70]

1996 年, 西班牙 Fayos 等^[71] 通过测量并对比乙醇在液态、晶态、非晶态等不同状态下的静态结构因子, 证实了玻色峰与材料微观结构的中程有序度之间的关联。1997 年, 英国剑桥大学的 Dove 等^[72] 通过对比非晶氧化硅与方石英的弹性中子散射谱推断玻色峰源于一种横向声学振动模式。2004 年, 美国伦斯勒理工大学 Schroeder 等^[73] 研究了环境温度与压强对不同玻璃材料中玻色峰的影响, 通过测量不同温度与压强下玻璃材料的拉曼散射谱, 他们发现玻色峰的强度随温度升高而增强, 而玻色峰的频移则随压强增大而增大。2012 年, 墨西哥 Salceda-Delgado 等^[74] 从理论仿真与实验测量两方面同时分析了掺磷硅基光纤中磷元素的浓度对其拉曼增益谱的影响。图 11 给出了不同掺杂浓度下掺磷硅基光纤的拉曼增益谱, 可以看出, 低频移区玻色峰的强度随着磷元素浓度的增加而

增加。该实验结果对掺磷硅基光纤中玻色峰的调控有重要指导意义。

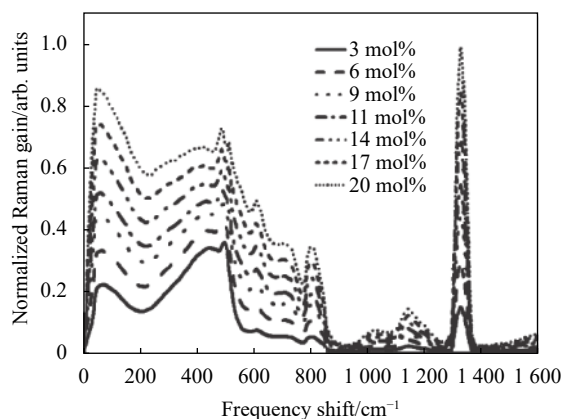


图 11 不同掺磷浓度下光纤的拉曼增益谱^[74]

Fig.11 The Raman gain spectra of phosphosilicate fiber for different P_2O_5 concentrations^[74]

2019 年, 法国巴黎综合理工学院 Shcheblanov 等^[69]基于 Classical Molecular Dynamics (CMD) 与 Reverse Monte Carlo (RMC) 等理论模型分别对磷酸盐玻璃中的中子谱、X 射线谱、拉曼增益谱、近红外吸收谱以振动态密度谱进行了仿真计算与实验验证, 研究结果表明相较于 CMD 模型, 基于 RMC 模型的仿真计算结果与实验测量结果吻合更好。

图 12 给出了基于 RMC 模型计算得到的振动态密度谱及其中各个峰所对应的振动模式。他们认为磷酸盐玻璃中低频移区的玻色峰起源于单个 PO_4 四面体晶胞的旋转振动。

2022 年, 日本东京大学 Hu 等^[75]对三种二维玻璃材料的振动特性进行了理论分析与仿真计算。他们首先计算材料的横向与纵向振动态密度, 横向振动态中, 在玻色峰频率附近有明显的过剩振动态, 纵向振

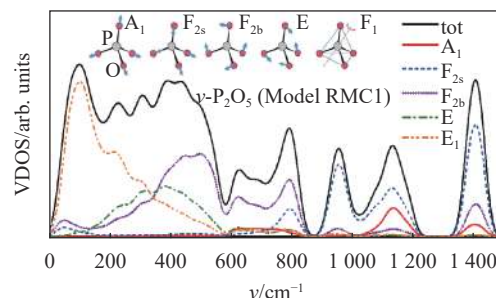
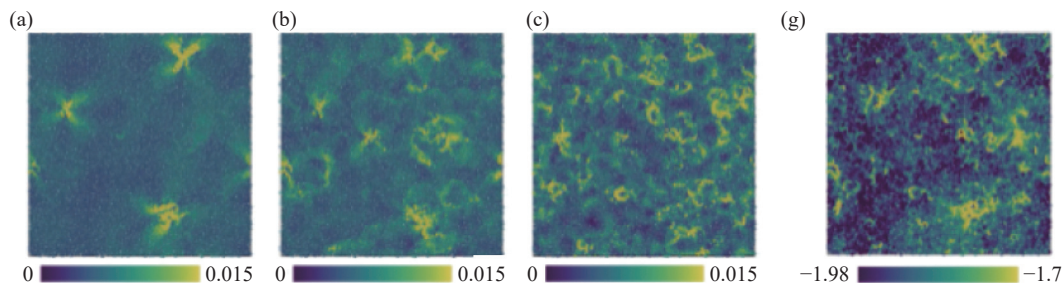


图 12 磷酸盐玻璃的振动态密度谱及对应振动模式^[69]

Fig.12 The vibration density states spectra of P_2O_5 glass and the related vibration modes^[69]

动态中则未出现, 由此推断玻色峰源于横向振动态。随后, 对横向振动态中扩展态与准局域态的占比及场分布进行计算, 在玻色峰频率附近, 准局域态密度更高, 其场分布更随机, 进一步推断玻色峰源于横向准局域振动态。进一步的, 他们计算了不同 q 值时横向与纵向动态结构因子, 对于横向动态结构因子, 不同 q 值时, 玻色峰附近均有一个明显的特征峰; 而纵向动态结构因子中, 不存在该固定特征峰, 该结果进一步证实了玻色峰源于横向准局域振动态。最后, 为了探究玻色峰的准局域态产生原因, 他们计算了粒子对不同频率过剩振动态密度的贡献的场分布, 仿真结果如图 13 所示。根据图示仿真结果, 他们推断玻色峰源于线状和环状分子基团的横向准局域振动。2023 年, 英国格拉斯哥大学 Jimenez 等^[76]通过对液态四正丁氧基硅烷的振动模式进行实验表征与分子动力学模拟计算, 推断其玻色峰源于约 20 个分子基团的准局域振动。

总的来说, 目前主流观点认为玻色峰源于材料中数十个分子组成的基团的准局域振动。但是, 对玻色峰的形成机理及调控方法尚未形成统一认识, 亟需开展进一步的深入研究。



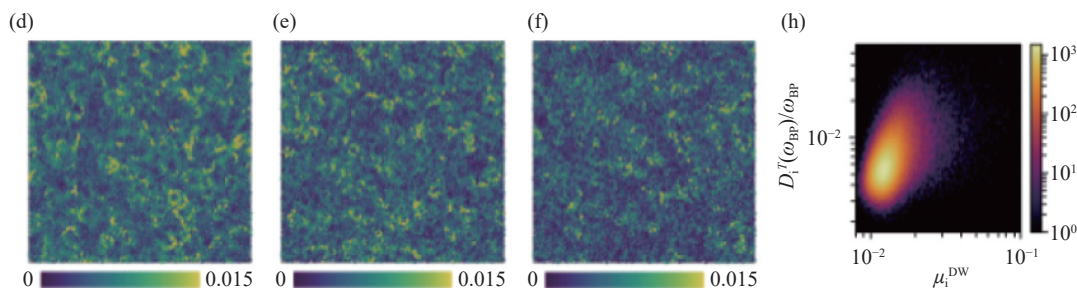


图 13 不同频率下粒子过剩振动动态密度贡献的场分布^[75]

Fig.13 The spatial distribution of the contribution of each particle to the excess vibration modes for different frequencies^[75]

2.2.2 基于玻色峰增益的超低量子亏损拉曼光纤激光器

2020 年,笔者单位 Zhang 等^[77]搭建了如图 14 所示的基于掺磷光纤的超低量子亏损拉曼光纤激光器。利用掺磷光纤中 3.65 THz 频移的玻色峰提供增益,采用中心波长为 1066 nm 的 ASE 光源作为泵浦源,获得了 12.5 W 的 1080 nm 激光输出,对应的量子亏损

为 1.3%,转换效率为 67.2%,光谱纯度高达 96.03%。另外,通过将泵浦波长优化至 1072 nm,该激光器获得 10.7 W 的 1080 nm 拉曼激光输出,光谱纯度达到 82.82%,量子亏损低至 0.74%。这项工作首次从实验上验证了基于掺磷光纤的玻色峰实现超低量子亏损拉曼激光输出的可行性。

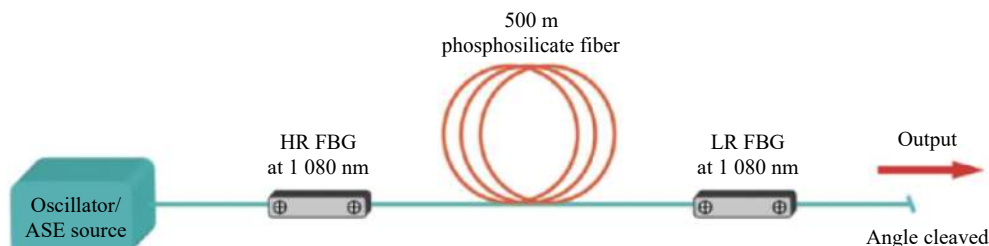


图 14 基于掺磷光纤的纤芯泵浦超低量子亏损拉曼激光器结构示意图^[77]

Fig.14 Experimental layout of the phosphosilicate fiber based low quantum defect Raman laser^[77]

2021 年,笔者单位 Ma 等^[78]通过进一步优化泵浦光波长、线宽,以及谐振腔低反光栅反射率、掺磷光纤长度等系统参数,实现了最高功率 100.9 W 的光纤激光输出,泵浦光波长 1069.5 nm、信号光波长 1080 nm,对应的量子亏损为 0.97%。该研究还指出:较宽的泵浦带宽会降低掺磷光纤中硅基拉曼增益峰的增益、抑制增益竞争和高阶拉曼效应、促进信号光功率提升;较高反射率的低反光栅可提高信号光在谐振腔内的功率密度,促进泵浦功率吸收转化,但同时也促进了高阶拉曼效应的产生,从而使低量子亏损信号光的功率降低;输出功率的提升主要受限于高阶拉曼效应、三波混频效应等非线性效应和增益竞争。

2022 年, Ma 等^[79]开展了包层泵浦超低量子亏损拉曼光纤激光器的可行性研究。搭建包层泵浦拉曼激光器,采用可调谐 ASE 光源提供泵浦光,利用纤芯/

包层直径为 10 μm/20 μm 的三包层掺磷光纤提供拉曼增益,分析比较了包层/纤芯泵浦方案对超低量子亏损拉曼光纤激光输出性能的影响。实验结果表明,采用纤芯泵浦方案时得到的信号光功率比包层泵浦方案低、效率也较低,这可能是不同泵浦方案时光纤内部光束传输路径不同(如图 15 所示)、功率分布特性不同,进而导致非线性效应发生差异所致。通过优化激光器工作参数,获得最低量子亏损为 0.78%、对应功率为 23.7 W 的包层泵浦超低量子亏损拉曼光纤激光输出。同年,笔者单位 Zhang 等^[80]还研究了泵浦方向等因素对拉曼光纤激光器中拉曼辅助的四波混频、高阶非线性效应阈值、光谱纯度等的影响,提出基于后向泵浦获得高光谱纯度超低量子亏损拉曼光纤激光输出的方案。该研究可为超低量子亏损拉曼光纤激光器性能优化提供重要参考。

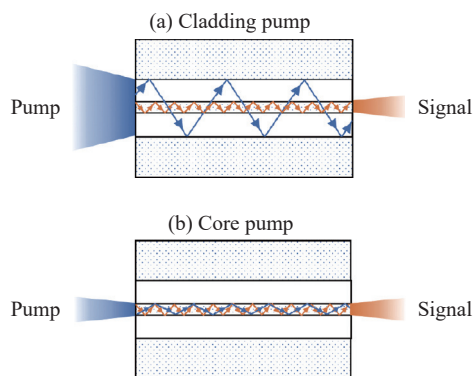


图 15 不同泵浦方案时光纤内部光束传输示意图, (a) 包层泵浦, (b) 纤芯泵浦^[79]

Fig.15 Schematic diagrams of laser transmission in different pump schemes: (a) cladding pumping and (b) core pumping^[79]

3 结 论

目前, $1\ \mu\text{m}$ 波段低量子亏损光纤激光主要采用稀土掺杂增益和拉曼增益两种体制。在稀土掺杂光纤激光器中,通过采用级联泵浦、多组分掺杂、强泵浦等技术实现了量子亏损的降低,量子亏损 $\leq 1\%$ 的掺镱光纤激光器已实现 400 mW 功率输出;在拉曼光纤激光器方面,通过采用特殊掺杂、泵浦光谱调控、增益竞争抑制等技术,量子亏损 $\leq 1\%$ 的拉曼光纤激光器已实现百瓦级功率输出。后续工作中,通过优化光纤掺杂组分、调控增益谱、采用包层泵浦技术等,有望进一步降低光纤激光器的量子亏损,获得高功率、高效率的超低量子亏损光纤激光输出,并拓展其在低噪声、高稳定性等方面的性能。

参考文献:

- [1] Richardson D J, Nilsson J, Clarkson W A. High power fiber lasers: current status and future perspectives (Invited) [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2010, 27(11): B63-B92.
- [2] Johan N, Payne D N. High-power fiber lasers [J]. *Science*, 2011, 332(6032): 921-922.
- [3] Shi W, Schulzgen A, Amezcua R. Fiber lasers and their applications: introduction [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2017, 34(3): FLA1.
- [4] Xiao Qirong, Tian Jiading, Li Dan, et al. Tandem-pumped high-power ytterbium-doped fiber lasers: progress and opportunities [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(15): 1501004. (in Chinese)

- [5] Zhou Pu. Review on the discipline of high power fiber laser in China[J/OL]. *Infrared and Laser Engineering*, (2023-03-24) [2023-06-20]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/12.1261.TN.20230323.1736.006.html>.
- [6] O'Connor M, Gapontsev V, Fomin V, et al. Power scaling of SM fiber lasers toward 10 kW [C]//Conference on Lasers and Electro-Optics, 2009: CThA3.
- [7] Shiner B. The impact of fiber laser technology on the world wide material processing market [C]//Conference on Lasers and Electro-Optics: Applications and Technology, 2013: AF2J.1
- [8] 林傲祥, 肖起榕, 倪力, 等. 国产 YDF 有源光纤实现单纤 20 kW 激光输出[J]. *中国激光*, 2021, 48(9): 0916003.
- [9] 肖虎, 潘志勇, 陈子伦, 等. 基于自研光纤和器件实现 20 kW 高光束质量激光稳定输出[J]. *中国激光*, 2022, 49(16): 1616002.
- [10] Yi Yongqing, Liu Jun, Shen Yize, et al. Homemade 20 kW Yb-doped double-cladding fiber for tandem pumping [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2022, 49(7): 0706002. (in Chinese)
- [11] Xi Xiaoming, Yang Baolai, Zhang Hanwei, et al. 20 kW monolithic fiber amplifier directly pumped by LDs [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2023, 35(2): 021001. (in Chinese)
- [12] Huber G, Kränkel C, Petermann K. Solid-state lasers: status and future (Invited) [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2010, 27(11): B93-B105.
- [13] Jauregui C, Limpert J, Tünnermann A. High-power fibre lasers [J]. *Nature Photonics*, 2013, 7(11): 861-867.
- [14] Zervas M N, Codemard C A. High power fiber lasers: A review [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2014, 20(5): 219-241.
- [15] Zhou Shouhuan. The heat managements of the solid-state lasers [J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2005, 22(4): 497-509. (in Chinese)
- [16] Bowman S R. Low quantum defect laser performance [J]. *Optical Engineering*, 2016, 56(1): 011104.
- [17] Karimi M. Contribution of different factors in heat production in Yb³⁺-doped fiber laser: a review [J]. *Optical Engineering*, 2022, 61(11): 110902.
- [18] Yu N J, Ballato J, Digonnet M J F, et al. Optically managing thermal energy in high-power Yb-doped fiber lasers and amplifiers: A brief review [J]. *Current Optics and Photonics*, 2022, 6(6): 521-549.
- [19] Zellmer H, Willamowski U, Tünnermann A, et al. High-power cw neodymium-doped fiber laser operating at 9.2 W with high beam quality [J]. *Optics Letters*, 1995, 20(6): 578-580.
- [20] Dominic V, Maccormack S, Waarts R, et al. 110 W fibre laser

- [J]. *Electronics Letters*, 1999, 35(14): 1158-1160.
- [21] Jeong Y, Sahu J K, Payne D N, et al. Ytterbium-doped large-core fiber laser with 1.36 kW continuous-wave output power [J]. *Optics Express*, 2004, 12(25): 6088-6092.
- [22] Eric S. New developments in IPG fiber laser technology [C]//Proceedings of the 5th International Workshop on Fiber Lasers, 2009: 4-6.
- [23] Zhou P, Xiao H, Leng J, et al. High-power fiber lasers based on tandem pumping [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2017, 34(3): A29.
- [24] Xiao Hu. Study on tandem pumping technology of ytterbium-doped fiber lasers [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2012. (in Chinese)
- [25] Jebali M A, Maran J-N, Laroche S. 264 W output power at 1 585 nm in Er-Yb codoped fiber laser using in-band pumping [J]. *Optics Letters*, 2014, 39(13): 3974-3977.
- [26] Creedon D, Johnson B R, Setzler S D, et al. Resonantly pumped Tm-doped fiber laser with >90% slope efficiency [J]. *Optics Letters*, 2014, 39(3): 470-473.
- [27] Jin X, Lou Z, Chen Y, et al. High-power dual-wavelength Ho-doped fiber laser at $> 2 \mu\text{m}$ tandem pumped by a $1.15 \mu\text{m}$ fiber laser [J]. *Scientific Reports*, 2017, 7: 42402.
- [28] Wirth C, Schmidt O, Kliner A, et al. High-power tandem pumped fiber amplifier with an output power of 2.9 kW [J]. *Optics Letters*, 2011, 36(16): 3061-3063.
- [29] Yao T, Ji J, Sahu J, K, et al. Tandem-pumped ytterbium-doped aluminosilicate fiber amplifier with low quantum defect [C]//Conference on Lasers and Electro-Optics. 2012: CM4N.7.
- [30] Chang Y M, Yao T, Jeong H, et al. 3 % thermal load measured in tandem-pumped ytterbium-doped fiber amplifier [C]//Conference on Lasers and Electro-Optics: Laser Science to Photonic Applications. 2014: 1-2.
- [31] Ma P, Xiao H, Meng D, et al. High power all-fiberized and narrow-bandwidth MOPA system by tandem pumping strategy for thermally induced mode instability suppression [J]. *High Power Laser Science and Engineering*, 2018, 6(4): e57.
- [32] Matsubara S, Uno K, Nakajima Y, et al. Extremely low quantum defect oscillation of Ytterbium fiber laser by laser diode pumping at room temperature [C]//Advanced Solid-State Photonics. 2007: TuB4.
- [33] Yao T, Ji J, Nilsson J. Ultra-low quantum-defect heating in ytterbium-doped aluminosilicate fibers [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2014, 32(3): 429-434.
- [34] Yu N, Cavillon M, Kucera C, et al. Less than 1% quantum defect fiber lasers via ytterbium-doped multicomponent fluorosilicate optical fiber [J]. *Optics Letters*, 2018, 43(13): 3096-3099.
- [35] Yu N, Desai K V, Mironov A E, et al. Reduced quantum defect in a Yb-doped fiber laser by balanced dual-wavelength excitation [J]. *Applied Physics Letters*, 2021, 119(14): 141105.
- [36] Feng Y. High power Raman fiber lasers: recent progress [J]. *Frontiers in Optics*, 2015: FTh2F.1.
- [37] Arun S, Choudhury V, Prakash R, et al. High power, tunable, continuous-wave fiber lasers in the L-band using cascaded Raman amplifiers [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2018, 30(15): 1412-1415.
- [38] Balaswamy V, Ramachandran S, Supradeepa V R. High-power, cascaded random Raman fiber laser with near complete conversion over wide wavelength and power tuning [J]. *Optics Express*, 2019, 27(7): 9725-9732.
- [39] Zhang L, Jiang H, Cui S, et al. Versatile Raman fiber laser for sodium laser guide star [J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2014, 8(6): 889-895.
- [40] Yin T, Qi Z, Chen F, et al. High peak-power and narrow-linewidth all-fiber raman nanosecond laser in $1.65 \mu\text{m}$ waveband [J]. *Optics Express*, 2020, 28(5): 7175-7181.
- [41] Stolen R H, Ippen E P, Tynes A R. Raman oscillation in glass optical waveguide [J]. *Applied Physics Letters*, 1972, 20(2): 62-64.
- [42] 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.
- [43] Emori Y, Tanaka K, Headley C, et al. High-power cascaded Raman fiber laser with 41 W output power at 1 480 nm band [C]//Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO), 2007: 1-2.
- [44] Cumberland B A, Popov S V, Taylor J R, et al. $2.1 \mu\text{m}$ continuous-wave Raman laser in GeO_2 fiber [J]. *Optics Letters*, 2007, 32(13): 1848-1850.
- [45] Feng Y, Taylor L R, Calia D B, et al. 39 W narrow linewidth Raman fiber amplifier with frequency doubling to 26.5 W at 589 nm [C]//Frontiers in Optics, Optical Society of America, 2009: PDPA4.
- [46] 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.
- [47] Zhou Pu, Yao Tianfu, Fan Chencheng, et al. 50 th anniversary of raman fiber laser: History, progress and prospect (Invited) [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2022, 51(1): 20220015. (in Chinese)
- [48] Feng Y, Taylor L R, Calia D B. 150 W highly-efficient Raman

- fiber laser [J]. *Optics Express*, 2009, 17(26): 23678-23683.
- [49] 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.
- [50] Zhang Y, Li S C, Ye J, et al. Low quantum defect random Raman fiber laser [J]. *Optics Letters*, 2022, 47(5): 1109-1112.
- [51] Baek S H, Roh W B. Single-mode Raman fiber laser based on a multimode fiber [J]. *Optics Letters*, 2004, 29(2): 153-155.
- [52] Flusche B M, Alley T G, Russell T H, et al. Multi-port beam combination and cleanup in large multimode fiber using stimulated Raman scattering [J]. *Optics Express*, 2006, 14(24): 11748-11755.
- [53] 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.
- [54] Wang W, Huang L, Leng J, et al. Beam cleanup of the stimulated Raman scattering in grade-index multi-mode fiber [J]. *Chinese Optics Letters*, 2014, 12(S2): S21401.
- [55] Babin S A. High-brightness all-fiber Raman lasers directly pumped by multimode laser diodes [J]. *High Power Laser Science and Engineering*, 2019, 7(1): 01000e15.
- [56] 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*, 2021, 39(6): 1785-1790.
- [57] Yao T, Harish A V, Sahu J K, et al. High-power continuous-wave directly-diode-pumped fiber Raman lasers [J]. *Applied Sciences*, 2015, 5(4): 1323-1336.
- [58] 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.
- [59] 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.
- [60] 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.
- [61] Ma X Y, Zhang Y, Ye J, et al. Pure silica fiber Raman gain enabled high-power low-quantum defect fiber laser [J]. *Optics and Laser Technology*, 2023, 158: 108833.
- [62] Shintani H, Tanaka H. Universal link between the boson peak and transverse phonons in glass [J]. *Nature Materials*, 2008, 7(11): 870-877.
- [63] Dong J, Zhang L, Zhou J, et al. More than 200 W random Raman fiber laser with ultra-short cavity length based on phosphosilicate fiber [J]. *Optics Letters*, 2019, 44(7): 1801-1804.
- [64] Berman R. Thermal conductivity of glasses at low temperatures [J]. *Physical Review*, 1949, 76(2): 315.
- [65] Krishnan R. S. The scattering of light in fused quartz and its Raman spectrum [C]//Proceedings of the Indian Academy of Sciences-Section A, Springer India, 1953: 377-384.
- [66] Ren S, Zong H X, Tao X F, et al. Boson-peak-like anomaly caused by transverse phonon softening in strain glass [J]. *Nature Communications*, 2021, 12(1): 5755.
- [67] Yang J, Wang Y J, Ma E, et al. Structural parameter of orientational order to predict the boson vibrational anomaly in glasses [J]. *Physical Review Letters*, 2019, 122(1): 015501.
- [68] Wang L J, Ninarello A, Guan P F, et al. Low-frequency vibrational modes of stable glasses [J]. *Nature Communications*, 2019, 10: 26.
- [69] Baggioli M, Zaccane A. Universal origin of boson peak vibrational anomalies in ordered crystals and in amorphous materials [J]. *Physical Review Letters*, 2019, 122(14): 145501.
- [70] Malinovsky V K, Sokolov A P. The nature of boson peak in Raman scattering in glasses [J]. *Solid State Communications*, 1986, 57(9): 757-761.
- [71] Fayos R, Bermejo F J, Dawidowski J, et al. Direct experimental evidence of the relationship between intermediate-range order in topologically disordered matter and discernible features in the static structure factor [J]. *Physical Review Letters*, 1996, 77(18): 3823-3826.
- [72] Dove M T, Harris M J, Hannon A C, et al. Floppy modes in crystalline and amorphous silicates [J]. *Physical Review Letters*, 1997, 78(6): 1070-1073.
- [73] Schroeder J, Wu W M, Apkarian J L, et al. Raman scattering and boson peaks in glasses: temperature and pressure effects [J]. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2004, 349: 88-97.
- [74] Salceda-delgado G, Martinez-rios A, Ilan B, et al. Raman response function and Raman fraction of phosphosilicate fibers [J]. *Optical and Quantum Electronics*, 2012, 44(14): 657-671.
- [75] Hu Y C, Tanaka H. Origin of the boson peak in amorphous solids [J]. *Nature Physics*, 2022, 18(6): 669-677.
- [76] Gonzalez-jimenez M, Barnard T, Russell B A, et al. Understanding the emergence of the boson peak in molecular glasses [J]. *Nature Communications*, 2023, 14(1): 215-215.
- [77] Zhang Y, Xu J, Ye J, et al. Ultralow-quantum-defect Raman laser based on the boson peak in phosphosilicate fiber [J]. *Photonics Research*, 2020, 8(7): 1155-1160.
- [78] Ma X Y, Ye J, Zhang Y, et al. Hundred-watt-level phosphosilicate Raman fiber laser with less than 1% quantum

- defect [J]. *Optics Letters*, 2021, 46(11): 2662-2665. 10: e8.
- [79] Ma X Y, Xu J M, Ye J, et al. Cladding-pumped Raman fiber laser with 0.78% quantum defect enabled by phosphorus-doped fiber [J]. *High Power Laser Science and Engineering*, 2022, [80] Zhang Y, Xu J M, Li S C, et al. Phosphosilicate fiber-based low quantum defect Raman fiber laser with ultrahigh spectral purity [J]. *Nanomaterials*, 2022, 12(9): 1490.

Research progress of low-quantum-defect fiber laser at 1 μm band (*invited*)

Xu Jiangming¹, Zhang Yang¹, Ma Xiaoya¹, Ye Jun^{1,2,3}, Ke Yanzhao¹, Li Sicheng¹, Liang Junrui¹, He Junhong¹, Huang Liangjin^{1,2,3}, Pan Zhiyong^{1,2,3}, Yao Tianfu^{1,2,3}, Leng Jinyong^{1,2,3}, Zhou Pu^{1*}

(1. College of Advanced Interdisciplinary Studies, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;

2. Nanhu Laser Laboratory, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;

3. Hunan Provincial Key Laboratory of High Energy Laser Technology, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract:

Significance Power scalability of fiber lasers have attracted a great deal of attention for its remarkable features, such as excellent beam quality, high conversion efficiency, flexible operation, and wide applications in biomedicine, intelligent manufacturing, energy exploration, defense and security. However, there have been no reports of significant operation power breakthroughs of near-single-mode fiber laser since the first demonstration of 10 kW-level system in 2009. The wasted heat accumulation, which can induce thermal lens and transverse mode instability effects, is one of the most important limitation factors. Quantum defect, defined as $(1-\lambda_p/\lambda_s)$, where λ_p is the pump wavelength and λ_s is the lasing wavelength, has always been a key parameter in high-power fiber lasers. High quantum defect not only limits the conversion efficiency but also increases the thermal load in fiber lasers. In hence, much research on low quantum defect fiber laser has been reported in the past decades.

Progress This paper first introduces the performance exploration of high-power fiber laser at 1 μm band, including the power scaling and corresponding quantum defect decrease. It can be said that the power scaling progress of fiber lasers is also a continuous struggle against waste heat and other factors. As to low quantum defect fiber laser, the reported works mainly focus on two different technical schemes based on rare earth doped fiber and passive fiber. For the convenience of description, this article stipulates that the quantum defect of low quantum defect fiber lasers is $\leq 4.50\%$, and the quantum defect of ultra-low quantum defect fiber lasers is $\leq 1\%$.

Then, ytterbium-doped fiber lasers with low quantum defect are summarized. In 2011, Wirth et al. demonstrated a 2.9 kW fiber laser operating at 1 071 nm that is tandem-pumped by a 1 030 nm thin-disk laser, and the corresponding quantum defect is about 3.83% (Fig.1). In 2014, Chang et al. presented a fiber laser with a maximal output power of 5.7 W and a quantum defect of 1.9% (Fig.2). To further reduce the quantum defect of fiber lasers, some specially designed active fibers and high pumping intensity methods are adopted. For example, in 2018, Yu et al. demonstrated a 400 mW-level fiber lasers with less than 1% quantum defect via ytterbium-doped multicomponent fluorosilicate fibers (Fig.5).

Additionally, Raman fiber lasers with low quantum defect are reviewed. Based on common silicon fiber, a maximal power of 3 kW-level with a quantum defect of 4.42% (Fig.7) and a maximal power of 6.2 W with a quantum defect of 0.56% were achieved. To further improve the operation power of ultra-low quantum defect

fiber laser, the scheme enabled by boson peak in phosphosilicate fiber was presented and realized by Zhang et al. in 2020 (Fig.14). In 2021, Ma et al. demonstrated a 100 W-level ultra-low quantum defect fiber laser with a quantum defect of 0.97%. What's more, cladding pump scheme was also been validated (Fig.15).

Conclusions and Prospects The important progress of low quantum defect fiber laser operating at 1 μm band is reviewed. And the manuscript mainly focuses on two different technical schemes based on rare earth doped fiber and passive fiber. In rare earth doped fiber based lasers, the utilization of tandem-pumping, multi-component doping and strong pumping schemes can reduce the quantum defect, and the related ytterbium-doped fiber lasers with quantum defect $\leq 1\%$ have achieved 400 mW-level output power. In Raman fiber lasers, the maximal output power of 100 W-level with a quantum defect of $\leq 1\%$ has been demonstrated with the aid of techniques such as special doping, pump spectrum regulation, and gain competition suppression. The feasibility of cladding pumping scheme has also been verified successfully, indicating its significant potential in achieving high-power and low quantum loss output.

Key words: fiber laser; high power; low quantum defect; ytterbium-doped fiber laser; Raman fiber laser

Funding projects: National Natural Science Foundation of China (61635005, 61905284)