

中国激光

980 nm 波段连续光纤激光器的研究进展

陈毛妮¹, 曹润秋^{1,2,3*}, 黄值河^{1,2,3}, 陈金宝^{1,2,3}

¹ 国防科技大学前沿交叉学科学院, 湖南 长沙 410073;

² 高能激光技术湖南省重点实验室, 湖南 长沙 410073;

³ 大功率光纤激光湖南省协同创新中心, 湖南 长沙 410073

摘要 980 nm 波段掺镱光纤激光器在高亮度抽运源和蓝绿光源方面具有广泛的应用前景。首先介绍了 980 nm 波段连续光纤激光器的研究价值、研究难点。然后,介绍了国内外研究机构在 980 nm 波段连续光纤激光器和放大器方面的研究进展和存在的问题。最后对 980 nm 波段连续光纤激光器和放大器未来发展方向进行探讨。

关键词 激光器; 光纤激光器; 掺镱光纤; 光纤放大器; 斜率效率

中图分类号 TN248

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202148.0401013

1 引言

光纤激光器具有体积小、光束质量好、转换效率高优点,在通信、工业、医疗等领域^[1]得到了越来越广泛的应用。近些年来,980 nm 波段掺镱光纤激光器得到了广泛的关注,这是因为该激光器不仅可以通倍频产生蓝绿光^[2-3],还可以作为有更高亮度的抽运源,抽运掺铒和掺镱光纤,获得更高功率的激光输出^[4-5]。

但是,实现高功率 980 nm 波段的激光输出难度很大。一方面,根据镱离子能级结构特点,想要获得 980 nm 波段的激光输出至少要实现 50% 的粒子数反转,需要高抽运光功率,使得 980 nm 波段增益阈值高,才可实现激光输出。而对于 1030 nm 波段,只需要 5% 以上的粒子数反转,其增益阈值低于 980 nm 波段,这会导致严重的增益竞争,影响 980 nm 波段的激光输出效率。另一方面,在石英基质中,镱离子的吸收和发射截面在 980 nm 波段差别较小,使得镱离子在 980 nm 波段存在强发射的同时还存在着强吸收。且被吸收的 980 nm 波段激光会进一步作为 1030 nm 波段光场处的抽运光,产生 1030 nm 波段的放大自发辐射(ASE),使得 980 nm 波段出光更加困难^[6]。

不过,虽然难度大,但广泛的应用前景还是促进了大量研究工作的开展。早期 980 nm 波段连续激光器的输出功率较低,限制了应用,人们通过脉冲激光器提升峰值功率,并通过倍频对其实现了蓝绿激光输出。现阶段,980 nm 波段脉冲光纤激光器已成为一个重要的研究方向,国际上已经实现了毫焦量级纳秒激光^[7]、微焦量级皮秒激光^[8]、十纳焦量级飞秒激光^[9]的输出;国内相关研究机构也在相关领域开展了重要工作,已实现了 980 nm 波段纳秒、皮秒甚至飞秒脉冲的输出^[10-14],为进一步研究奠定了基础。虽然 980 nm 波段脉冲光纤激光器的研究不断向前推进,但人们对该波段连续光纤激光器输出功率提升的追求从未停止,特别是其在抽运源方面的应用^[15],使得连续光研究备受关注。

文献^[16-17]对 980 nm 波段光纤激光器的早期研究进展进行了梳理和综述。这些文献表明:掺镱光纤设计对 980 nm 波段光纤激光器具有重要意义。特别是在 2008 年,Röser 等^[18-19]分别利用超大纤芯光子晶体光纤,实现了功率为 94 W 的近单模 980 nm 波段连续激光输出。这是人类历史上首次实现百瓦量级的 980 nm 波段连续掺镱光纤激光器,尽管该激光器采用空间光结构,体积较大、稳定性较差,但对于 980 nm 波段连续掺镱光纤激光器

收稿日期: 2020-06-22; 修回日期: 2020-07-29; 录用日期: 2020-08-10

*E-mail: jq_cao@126.com

的发展仍具有里程碑意义。国内相关研究开展较晚,发展相对滞后,输出功率水平限制在瓦量级,如何进一步提升功率面临挑战。

不过,这些文献主要对 2011 年之前的研究进展进行了综述,随着研究的不断推进,980 nm 波段连续光纤激光器近年来又取得了显著进展。本文将着重对 2011 年后 980 nm 波段连续光纤激光器的发展进行综述,以连续光功率提升为主线,通过技术方案和相关实验结果分析,梳理 980 nm 波段连续掺镱光纤激光器的研发思路,并对 980 nm 波段连续掺镱光纤激光器的发展前景进行展望。

2 980 nm 波段掺镱光纤激光器研究进展

2.1 研究进展回顾

首先,简要回顾一下 2011 年之前的研究进展。对 980 nm 波段连续掺镱光纤激光器的研究开始于 20 世纪 80 年代。1989 年, Hanna 等^[20]采用单模掺镱光纤,获得了斜率效率为 67%、功率为 9.3 mW 的 974 nm 连续激光输出,这是首次对 980 nm 波段连续掺镱光纤激光器的报道。2000 年, Zenteno 等^[21-22]采用单模掺镱光纤分别获得了功率为 0.65 W^[21]和 0.5 W^[22]的 980 nm 波段连续激光输出。为了解决单模单包层光纤抽运功率受限的问题,2003 年, Ylä-Jarkko 等^[23]通过设计外包层为空气孔的 JAC(jacketed air-clad)掺镱光纤,增加抽运光的耦合效率,最终获得了功率为 3.5 W、波长为 977 nm 的激光输出。随着光纤技术的进步,双包层掺镱光子晶体光纤应用到光纤激光器中,大大提高了激光器的输出功率。2008 年, Röser 等^[18]使用掺镱棒状光子晶体光纤,在双向抽运时获得光束质量因子为 2.2、功率为 94 W 的 980 nm 波段连续激光输出。同年, Boulet 等^[19]使用相同的光纤,获得了斜率效率为 48%、光束质量因子小于 1.2、功率为 94 W 的 977 nm 连续激光输出。

国内对 980 nm 波段掺镱光纤激光器的研究开始较晚。2009 年, Zou 等^[24]使用芯径为 6 μm、长为 36.5 cm 的单模掺镱光纤,以自制的 946 nm 固体激光器作为抽运源,采用级联抽运方法获得了斜率效率为 75%、功率为 1.32 W 的 980 nm 波段连续单模激光输出。

这一阶段的研究主要集中在光纤结构的优化设计和其实验验证上,这得益于 1998 年 Nilsson 等^[25]的理论研究。该研究指出:增加双包层掺镱光纤的

纤芯包层直径比,有利于 980 nm 波段激光的输出。在该结论的指导下,通过优化双包层光纤,将 980 nm 波段光纤激光器的功率水平提升到百瓦量级。不过,受限于光纤器件的发展水平,这一阶段的实验验证主要采用空间光耦合结构,这使得激光器系统稳定性较差、结构也不够紧凑。同时,国内相关研究处于起步阶段,相关研究与国际领先水平相比差距明显。

2.2 最新研究进展

将重点介绍 2011 年后的高功率 980 nm 波段连续掺镱光纤激光器的研究进展。

2.2.1 国外关于 980 nm 波段掺镱光纤振荡器研究进展

2014 年, Leich 等^[26]通过使用长度为 0.95 m、纤芯直径为 126~10 μm 的锥形光纤(数值孔径 NA 为 0.15),以 915 nm 二极管作为抽运源,得到了效率为 31%、功率为 10 W 的 976 nm 单模激光输出。其光纤截面和折射率剖面如图 1 所示,实验装置如图 2 所示。该实验采用了锥形光纤,一方面可以将抽运光直接注入到光纤纤芯中,通过纤芯抽运方式提高效率;另一方面随着锥形光纤芯径的减小,高阶模将损耗掉,只能输出低阶模,提高了光束质量,但同时效率有所下降。相比于之前实验,该次实验通过光纤拉锥和光纤光栅相结合,提升了系统全光纤化程度,向全光纤结构迈进一步,但抽运光注入仍采用空间光耦合方式,全光纤化程度有待进一步提升。

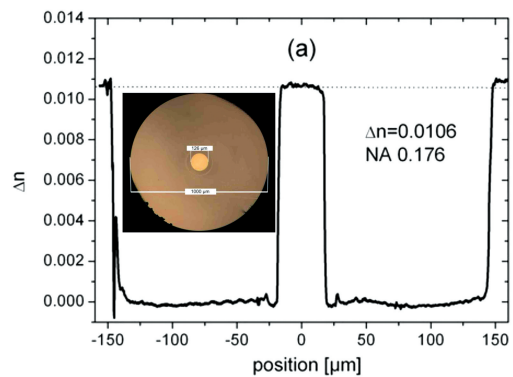


图 1 光纤截面及其折射率剖面^[26]

Fig.1 Fiber cross section and its refractive index profile^[26]

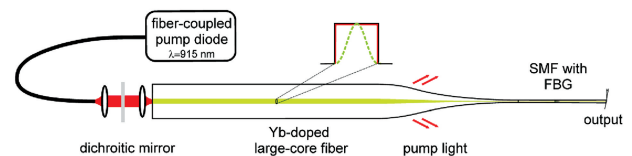


图 2 976 nm 锥形光纤激光器^[26]

Fig. 2 976-nm tapered fiber laser^[26]

为进一步实现系统的全光纤化, Aleshkina 等^[27]对光纤结构进行设计, 提出一种 W 型纤芯折射率分布的掺镱光纤, 纤芯直径为 $28\ \mu\text{m}$, 包层边长为 $80\ \mu\text{m}$ (方形包层), 芯径与包层直径之比为 0.31, 其光纤折射率剖面如图 3 所示。利用该光纤搭建的激光器, 获得了波长为 $977\ \text{nm}$ 、功率为 $5.5\ \text{W}$ 的连续单模激光输出, 斜率效率为 25%。激光器结构如图 4 所示, 该激光器的优点是所采用的掺镱光纤的折射率分布为 W 型, 减小了截止波长, 以便实现单模传输, 而且弯曲敏感度较低, 并且采用的环型掺杂方法提高了激光器的效率。此外, 还通过将包层边长减小到 $80\ \mu\text{m}$, 进一步提升了纤芯包层比, 以提升

效率。不过, 较小的包层尺寸会降低抽运光的耦合效率, 不利于输出功率的提升。

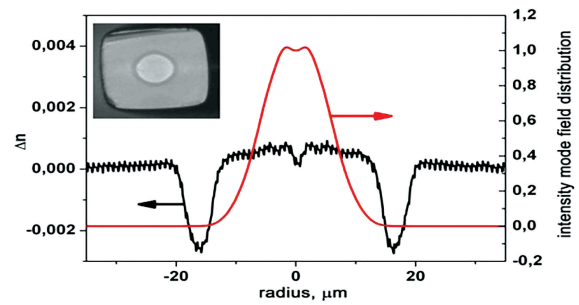


图 3 W 型光纤折射率剖面^[27]

Fig. 3 Refractive index profile of W-profile fiber^[27]

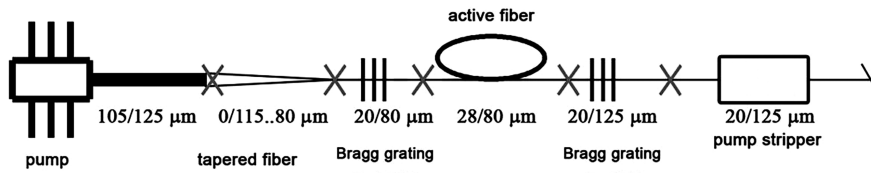


图 4 $977\ \text{nm}$ W 型掺镱光纤激光器^[27]

Fig. 4 977-nm W-profile Yb-doped fiber laser^[27]

为进一步降低光纤的弯曲敏感度, 设计出更加紧凑的激光器, 在 2018 年, Aleshkina 等^[28]设计了一种马鞍形光纤, 该光纤可看作是一种新型锥形光纤, 该研究团队将纤芯直径由 $20\ \mu\text{m}$ 逐渐拉锥至 $12\ \mu\text{m}$, 方形包层由 $80\ \mu\text{m} \times 80\ \mu\text{m}$ 逐渐拉锥至 $50\ \mu\text{m} \times 50\ \mu\text{m}$, 其折射率剖面图如图 5 所示。利用此光纤设计的激光器, 在最大功率为 $65\ \text{W}$ 、波长为 $915\ \text{nm}$ 的半导体二极管抽运下, 得到了斜率效率为 18.4%、功率为 $10.6\ \text{W}$ 的 $976\ \text{nm}$ 连续激光输出。激光器结构如图 6 所示, 该激光器和文献^[27]相比, 其有源光纤折射率分布仍为 W 型, 但较小的模场直径降低了光纤的弯曲敏感度, 其弯曲直径从 $30\ \text{cm}$ 降低到 $19\ \text{cm}$, 且功率提高至 $10.6\ \text{W}$ 。但该激光器

由于所采用的鞍形光纤包层直径减小, 增大了对抽运光的损耗, 导致效率仅为 18.4%。

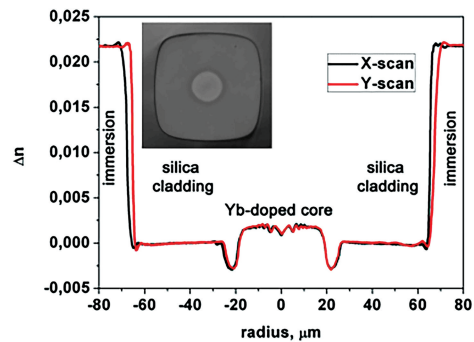


图 5 鞍形光纤折射率剖面图^[28]

Fig. 5 Refractive index profile of saddle-shaped fiber^[28]

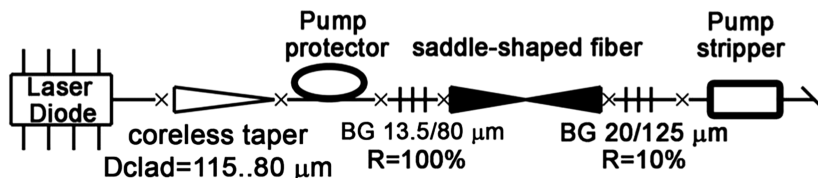


图 6 $976\ \text{nm}$ 鞍形掺镱光纤激光器^[28]

Fig. 6 976-nm saddle-shaped Yb-doped fiber laser^[28]

上述几种方案通过对双包层掺镱光纤的波导结构进行设计, 提升了 $980\ \text{nm}$ 波段激光的输出功率、效率及光束质量。除了双包层光纤外, 光子晶体光纤也是研究重点之一。如前所述, 百瓦级 $980\ \text{nm}$ 波段光纤激光器最早就是利用棒状光子晶体光纤实现的^[18-19]。除了棒状光子晶体光纤外, 另一种可用

于 $980\ \text{nm}$ 光纤激光器的光子晶体光纤是实芯光子带隙光纤。实芯光子带隙光纤的全反射导光机制与传统光纤不同, 通过在包层中引入高折射率的介质柱, 其纤芯折射率低于包层的有效折射率。该光纤通过带隙效应来导光, 即频率位于包层光子带隙内的光只能在纤芯中传播。早在 2008 年, Pureur

等^[29]将光子带隙光纤应用于 980 nm 波段光纤激光器,通过设计,其在 1030 nm 波段处具有高损耗,而在 980 nm 波段处能保持良好的传输,较好地抑制了 1030 nm 波段的 ASE,有利于 980 nm 波段的激光输出。利用该光子带隙光纤搭建激光器,实现了斜率效率为 65%、功率为 140 mW 的 977 nm 连续激光输出。不过,尽管实验预示了光子带隙光纤的前景,但该实验采用的是纤芯抽运方式,限制了抽运耦合效率,使得输出功率较低。

此后,相关研究处于停滞状态,直到 2018 年,Matniyaz 等^[30]优化了光子带隙光纤,利用纤芯/包层直径为 25/125 μm 的双包层全固态光子带隙光纤(内包层 NA 为 0.46),获得了功率为 27.8 W 的 976 nm 激光输出,相对于注入抽运功率和吸收抽运功率的斜率效率分别为 36.3% 和 75.6%。相比于 2008 年的实验^[29],该实验采用了包层抽运方式,大大提高了抽运光的耦合效率,从而提高了输出功率,此外,该实验还通过掺镱磷酸盐光纤抑制了光子暗化效应。但由于该全固态光子带隙光纤在弯曲时,

纤芯中基模的能量会逐渐耦合到超模带上,若弯曲直径太小,弯曲损耗会大大增加,而该激光器的增益光纤要想获得更高的效率,必须减小增益光纤的弯曲损耗,但这又会导致该增益光纤弯曲直径较大。

为解决该问题,该团队通过对光纤进行优化,在长度为 9.5 m 的增益光纤下,得到效率为 54%、光束质量因子为 1.24、最高输出功率为 38 W 的连续激光输出^[31]。和文献[30]相比,该掺镱光纤不仅增加了对抽运光的吸收(由文献[30]的 0.7 dB/m 到该光纤的 1.76 dB/m),而且在大大降低弯曲损耗的同时,也将弯曲直径由 20 cm 减小到 10 cm,提高了效率。2019 年,又在 200 W 功率激光器的抽运下获得了斜率效率为 62.7%、功率为 84 W 的 978 nm 连续激光输出^[32]。其增益光纤的截面和实验装置如图 7 所示,光束质量因子为 1.12,其吸收抽运功率效率为 94%,达到了量子极限。但基于以上几种方案的激光器采用空间光耦合结构,在系统的全光纤化方面有待提高。

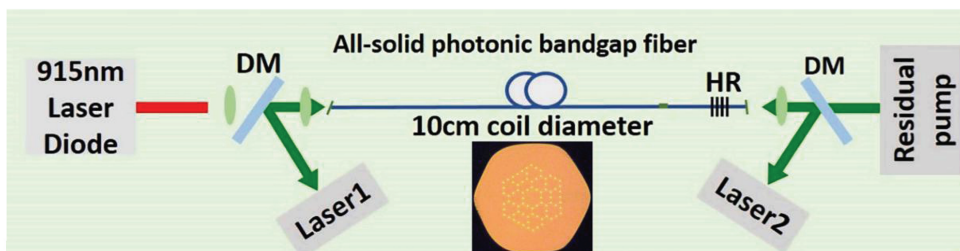


图 7 基于全固态光子带隙光纤的 978 nm 激光器及其光纤截面图^[32]

Fig. 7 978-nm all-solid photonic bandgap fiber laser and its fiber cross section^[32]

为进一步实现系统的全光纤化,该团队^[33]对基于掺镱双包层全固态光子带隙光纤的激光器进行进一步研究,实验装置如图 8 所示,该实验通过采用掺镱光纤来吸收反向传输的信号光,实现了效率为 63%、功率为 151 W 的 978 nm 单模连续激光输出,

光束质量因子为 1.2。该激光器在近单模 980 nm 波段光纤激光器中创造了新的功率记录。与使用空间光耦合的文献[32]相比,在效率几乎不变的情况下,该激光器不仅实现了系统的全光纤化,还将最大输出功率提高了约 1 倍。

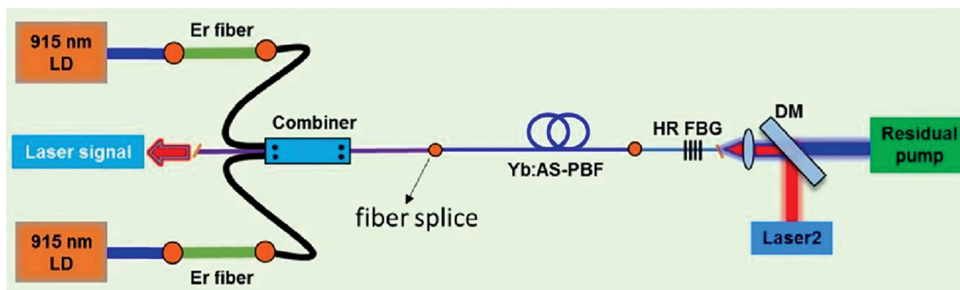


图 8 功率为 151 W 的 978 nm 掺镱光纤激光器^[33]

Fig. 8 978-nm Yb-doped fiber laser with 151-W output power^[33]

综上所述,近些年来,国外对 980 nm 波段连续掺镱光纤振荡器的研究除了光纤设计的优化外,在激光器系统的全光纤化方面也取得了长足进步,其典型方案如表 1 所示。目前利用全固态双包层光子带隙光纤,全光纤化结构的 980 nm 波段单模连续激光输出的功率已达 151 W。不过,由于全固态光子带隙光纤结构复杂、拉制难度大,基于双包层掺镱

光纤优化设计的 980 nm 波段光纤振荡器也是一个重要的研究方向。现阶段,通过采用拉锥和 W 型双包层掺镱光纤,实现了 10 W 量级的 980 nm 波段激光输出,但是抽运光功率受限和效率较低是该方案普遍存在的问题。如何进一步优化双包层掺镱光纤,以实现功率和效率的提升是该方向下一步研究的重点。

表 1 国外关于 980 nm 波段光纤振荡器的研究进展

Table 1 Research progress of fiber oscillator near 980 nm abroad

Research group	Fiber type	Fiber size	Lasing wavelength /nm	Output power /W, slope efficiency /%	Year	Reference
Germany, Leibniz Institute of Photonic Technology (IPHT)	Tapered Yb-doped fiber	Core diameter: 160–10 μm	976	10, 31	2014	[26]
Russia, Fiber Optics Research Center of the Russian Academy of Sciences	W-profile Yb-doped fiber	Core diameter: 20 μm Square cladding: 80 $\mu\text{m} \times 80 \mu\text{m}$	977	5.5, 25	2016	[27]
	Saddle-shaped Yb-doped fiber	Core diameter: 20–12 μm Square cladding: 80 $\mu\text{m} \times 80 \mu\text{m}$ –50 $\mu\text{m} \times 50 \mu\text{m}$	976	10.6, 18.4	2018	[28]
USA, Clemson University	Yb-doped all-solid double-cladding photonic bandgap fiber	Core/cladding diameter: 25/125 μm	976	27.8, 36.3	2018	[30]
		Corner-to-corner distance: 24/131 μm	977	38, 54	2019	[31]
		Side-to-side distance: 21/124 μm	978	84, 62.7	2019	[32]
			978	151, 63	2019	[33]

上面的介绍主要集中在光纤振荡器上,其优点在于:使用光纤光栅构成谐振腔,利用光纤光栅的波长选择特性,通过控制光纤光栅的中心反射率,以抑制 1030 nm 波段处的 ASE,有利于 980 nm 波段激光的输出。除振荡器外,另一个研究方向就是放大器,一方面采用主振荡功率放大(MOPA)结构,放大器可实现振荡器功率的进一步增大;同时,放大器还可以通过种子光调节输出特性。但是由于放大器中缺少了诸如光纤光栅的波长选择器件,1030 nm 波段的 ASE 抑制难度加大,与振荡器结构相比,实现 980 nm 波段的激光输出更为困难。

2.2.2 国外关于 980 nm 波段掺镱光纤放大器研究进展

2017 年,Wu 等^[34]通过掺镱磷酸盐双包层光纤对 976 nm 单频激光功率进行研究,以功率为 200 mW 的 976.9 nm 单频半导体激光器作为种子源,

在 70 W 抽运功率下,获得了 3.41 W 的最大输出功率(光纤长度为 7 cm),其斜率效率为 6.8%,信噪比为 21.1 dB。光纤截面及实验结构如图 9 所示,该实验证明了掺镱磷酸盐光纤不仅具有光子暗化效应低、无浓度淬灭等特性,而且掺镱的磷酸盐石英光纤的发射截面与普通的石英光纤有所不同,其发射截面的峰值位置蓝移到 976 nm 附近,与普通石英光纤(在 978 nm 附近)相比,更有利于 976 nm 激光输出。不过,由于实验中磷酸盐光纤的纤芯包层直径比小,效率较低。

为进一步提高效率,Aleshkina 等^[35]对基于掺镱磷酸盐光纤的放大器进行了进一步研究,采用两种纤芯/包层直径分别为 60/140 μm 、95/125 μm 的掺镱磷酸盐双包层光纤搭建了 976 nm 光纤激光放大系统。纤芯/包层直径为 95/125 μm 的光纤折射率剖面图如图 10 所示,实验装置如图 11 所示,通过实验研究,在纤芯/包层直径为 95/125 μm 的掺镱

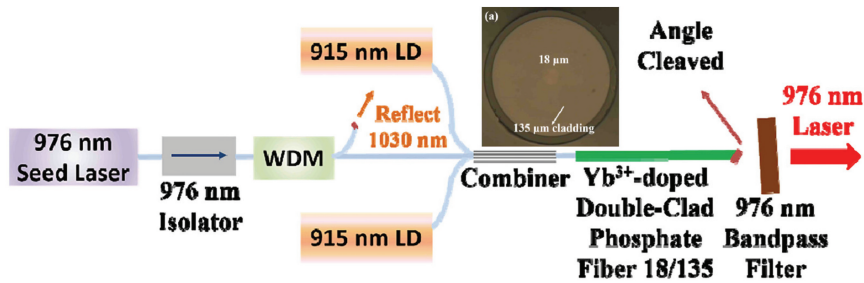


图 9 976 nm 掺镱磷酸盐双包层光纤放大器及其光纤截面^[34]

Fig. 9 976-nm Yb-doped phosphate double-clad fiber amplifier and its fiber cross section^[34]

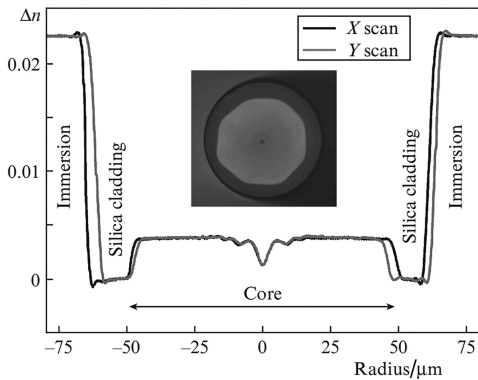


图 10 纤芯/包层直径为 95/125 μm 的光纤折射率剖面图^[35]

Fig. 10 Refractive index profile of fiber with core/cladding diameter of 95/125 μm^[35]

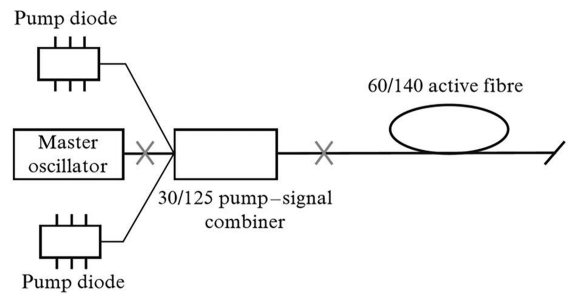


图 11 976 nm 掺镱磷酸盐光纤激光放大系统^[35]

Fig. 11 976-nm Yb-doped phosphate fiber laser amplification system^[35]

光纤中,获得了输出功率约为 34 W、效率为 66% 的 976 nm 连续激光输出,和文献[34]相比,提高了光纤的纤芯包层直径比,效率得到了提升。该文献还通过数值研究表明,当有源光纤的纤芯直径和包层直径之比为 0.7~1 时,抽运转效率最高,可达 70% 以上。不过,由于纤芯尺寸的增加,该激光器无法保证单模输出,因此光束质量有待进一步优化。

为获取更高功率的单模连续激光输出,2020 年,Valero 等^[36]设计了 MOPA 结构的放大器,通过

纤芯/包层直径为 35/125 μm 的大模场掺镱磷酸盐光纤,在最大抽运功率 215 W 下,获得了斜率效率为 19%、输出功率为 39 W 的 976 nm 连续近单模窄线宽激光输出。实验结构如图 12 所示,通过凹陷内包层设计光纤,增强了高阶模的弯曲损耗,提高了光束质量。该放大器在 5 个功率为 50 W 的抽运二极管同向抽运下,获得了 39 W 的输出功率,是迄今报道的 980 nm 波段 MOPA 结构掺镱光纤放大器近单模窄线宽连续激光输出的最大功率。

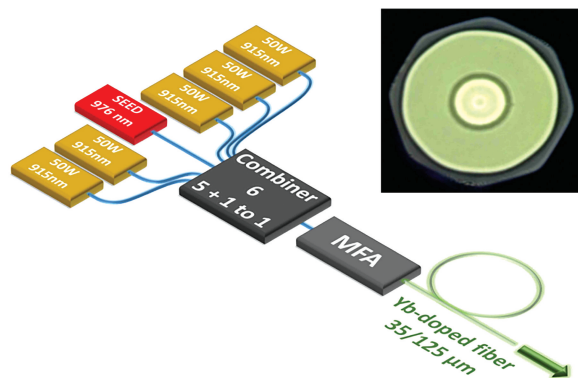


图 12 39 W 主振荡功率放大器及其光纤截面^[36]

Fig. 12 Master oscillator power amplifier with 39-W output power and its fiber cross section^[36]

综上所述,现阶段 980 nm 波段光纤放大器主要使用的是掺镱双包层磷酸盐光纤,获得波长为 976 nm 的激光输出,近些年各研究机构的研究进展如表 2 所示。相关研究可分为两个方向:其一是单模放大器的研究,通过对掺镱光纤的优化设计,在保证(近)单模输出的前提下,提升输出功率和效率,目前已实现功率为 39 W 的 976 nm 激光输出,但效率

较低,如何进一步提升效率是该方向下一步的研究重点;其二是多模光纤放大器的研究,该研究方向是通过增加纤芯尺寸,提升掺镱光纤的纤芯包层直径比,从而实现高效率的 976 nm 激光输出,目前,利用该方案已经实现了 66% 的斜率效率,输出功率也达 30 W 以上,如何在保证效率的条件下,提升光束质量是该方向的下一步研究重点。

表 2 国外关于 980 nm 波段光纤放大器的研究进展

Table 2 Research progress of fiber amplifiers near 980 nm abroad

Research group	Fiber type	Core/cladding diameter / μm	Lasing wavelength /nm	Output power/W, slope efficiency /%	Year	Reference
USA, University of Arizona	Yb-doped double-cladding phosphate fiber	18/135	976	3.41, 6.8	2017	[34]
Russia, Fiber Optics Research Center of the Russian Academy of Sciences	Yb-doped double-cladding phosphate fiber	95/125	976	34, 66	2017	[35]
France University of Bordeaux	Yb-doped double-cladding phosphate fiber	35/125	976	39, 19	2020	[36]

2.2.3 国内研究进展

将介绍国内在 980 nm 波段连续光纤激光器方面的研究进展。2011 年之后,很多国内研究机构开始了 980 nm 波段掺镱光纤激光器的研究。

2012 年, Li 等^[37]在前期工作的基础上,对 980 nm 波段光子晶体光纤激光器进行了研究,该激光器采用 MOPA 结构,采用纤芯/包层直径为 40/

170 μm 的双包层光子晶体光纤作为放大器的增益介质,得到了功率为 1.21 W 的 980 nm 连续激光输出,并基于该激光器进行了倍频研究,实现了 51 mW 功率的蓝绿光输出。其光纤截面及实验装置如图 13 所示。但是,该实验仍采用空间耦合方式,如何实现激光系统的全光纤化有待进一步研究。

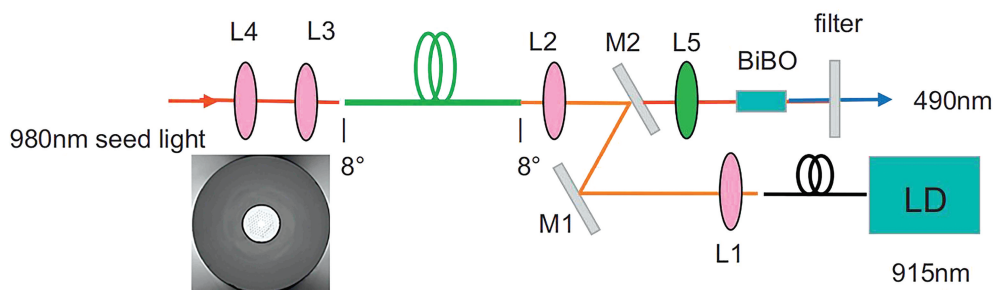


图 13 980 nm 光子晶体光纤放大器及其倍频系统^[37]

Fig. 13 980-nm photonic crystal fiber amplifier and its frequency doubling system^[37]

2013 年, Liu 等^[38]使用纤芯/包层直径为 15/130 μm 的双包层掺镱光纤,对利用常规光纤实现 980 nm 波段激光输出的可行性进行了概念验证性研究,通过搭建光纤振荡器,将 915 nm 激光二极管作为抽运源,在最大抽运功率为 18.5 W 的条件下,获得了功率为 0.9 W 的 977.4 nm 激光输出,验证了利用纤芯/包层直径为 15/130 μm 的双包层掺镱

光纤实现 980 nm 波段激光输出的可行性。随后,该团队将抽运光功率增加到 24.5 W,并通过优化光纤长度,将输出功率提升到 1.73 W,光-光转换效率为 7%^[39]。实验结构如图 14 所示,该激光器的优点是实现了全光纤化,但由于光纤的低纤芯包层直径比和低抽运功率,激光器的输出功率和效率较低。

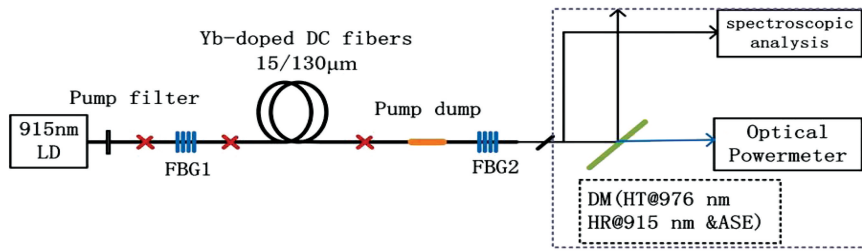


图 14 功率为 1.73 W 的 977 nm 光纤激光器^[39]

Fig. 14 977-nm fiber laser with 1.73-W output power^[39]

同年,王睿星^[40]开展了关于 980 nm 波段光纤放大器的研究,该实验使用激光二极管作为种子光源,种子光功率为 320 mW,输出波长为 974 nm。通过使用光纤长度为 14.5 cm、纤芯/包层直径为 60/130 μm 的高掺杂掺镱光纤,获得了功率为 2.65 W

的 974 nm 激光输出,效率为 16.7%。放大器结构如图 15 所示,该实验证明了提高纤芯包层直径比有利于提高 980 nm 波段激光输出的功率和效率,不过效率仍然较低,有待进一步提升。

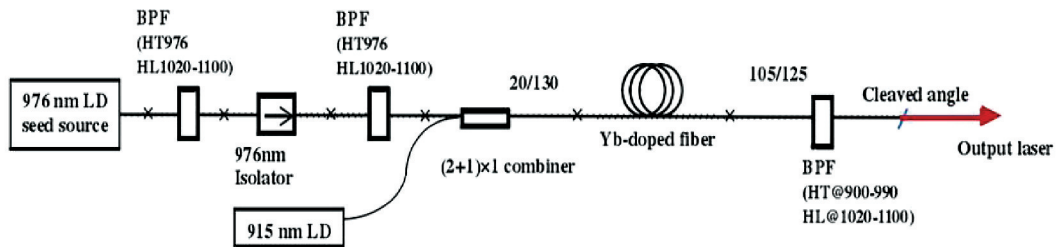


图 15 功率为 2.65 W 的 980 nm 波段光纤放大器结构^[40]

Fig. 15 980-nm fiber amplifier with 2.65-W output power^[40]

为探索效率较低的原因,Yu 等^[41]对 980 nm 波段光纤放大器输出特性进行了进一步研究,实验装置如图 16 所示,在该实验中仍采用纤芯/包层直径为 60/130 μm 的掺镱双包层光纤,不同的是,对种子光的注入方式进行了调整,直接将种子光注入到包层中,从而实现了种子光对掺杂区域的充分覆盖,保证了纤芯增益的有效提取,最终获得了功率为

6.8 W 的 980 nm 激光输出,斜率效率为 32%。效率较前期的实验结果有了显著提升。该研究表明:除了纤芯包层直径比,信号光在增益光纤中的填充对放大器的输出也有着重要影响。该实验还发现:该放大器除了在 1030 nm 波段产生 ASE,在 985 nm 波段附近也产生了较强的 ASE,后者在放大器的设计中需要引起重视。

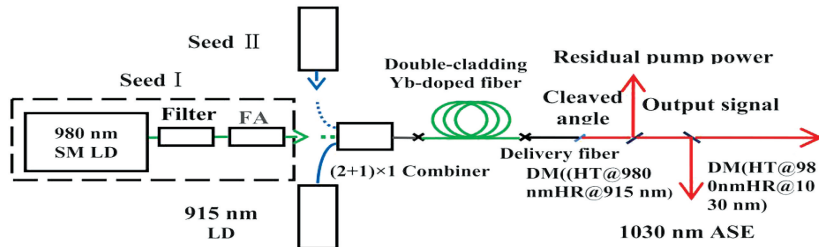


图 16 功率为 6.8 W 的 980 nm 波段光纤放大器结构图^[41]

Fig. 16 980-nm fiber amplifier with 6.8-W output power^[41]

2015 年,Wang 等^[42]设计了一种紧凑型的 980 nm 波段光纤激光器,其结构如图 17 所示,该激光器采用纤芯/包层直径分别为 20/130 μm 和 60/130 μm 的两种双包层掺镱光纤,获得了转换效率为 32.4%、输出功率为 16.7 W 的 981.7 nm 连续激光输出。该实验再次证实了较大的纤芯包层直径比有

利于抑制 ASE。该激光器的优点是实现了全光纤结构,结构简单,并且通过使用较大纤芯包层直径比的双包层光纤,抑制了 1030 nm 波段的 ASE,转换效率和输出功率都有了提升。但由于放大器 and 种子源共用同一个抽运光,限制了抽运功率,输出功率提升潜力受限。

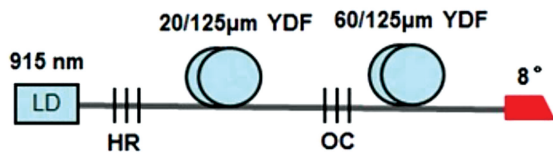


图 17 功率为 16.7 W 的 981.7 nm 掺镱光纤激光器^[42]
 Fig. 17 981.7-nm Yb-doped fiber laser with 16.7-W output power^[42]

为了进一步提高 980 nm 波段输出激光的功率和效率,2019 年,杜赫庭等^[43]对放大器进行了优化设计,通过采用双向抽运方式,提高系统的抽运光耦合能力,同时通过优化掺镱光纤的设计,提升系统的效率。实验中采用纤芯/包层直径为 60/130 μm 的双包层掺镱光纤,采用 976 nm 稳波长激光二极管作为种子源,采用 915 nm 激光二极管作为抽运源,在种子光功率为 3 W、抽运功率为 315 W 的条件下,获得了功率为 113 W、斜率效率为 45% 的激光输出。装置示意图如图 18 所示,这是国际上首次利用双包层掺镱光纤实现百瓦量级光纤放大器的实验验证。该放大器的优点是实现了全光纤结构,通过优化光纤设计和抽运方案,该放大器的输出功率和效率得到了较大的提升,并且为下一步的功率提升奠定了基础。但大纤芯的使用使得该放大器的光束质量和亮度提升受到了一定限制。

国内研究机构关于 980 nm 波段光纤激光器的

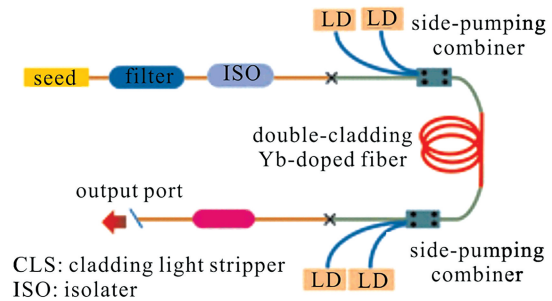


图 18 百瓦级全光纤主振荡功率放大器^[43]

Fig. 18 100-W-level all-fiber main oscillator power amplifier^[43]

典型方案如表 3 所示。可以看出,近年来国内对 980 nm 波段连续掺镱光纤放大器的研究有了长足的进步。通过对 980 nm 波段连续光纤放大器不断进行研究,在国际上首次实现了百瓦级的 980 nm 波段连续光纤放大器的实验验证,为下一步功率的提升奠定了基础。但振荡器的研究仍有较大差距,主要是因为国内仍采用普通双包层掺镱光纤,其纤芯尺寸过大,导致光纤光栅的刻写困难,限制了振荡器方面研究工作地开展;此外,国内特种光纤研制水平不足也是限制相关研究开展的另一个重要因素,如果特殊结构光纤、全固态光子带隙光纤等掺杂光子晶体光纤研制水平得到提升,无疑会大大推动相关研究的发展。此外,如何基于国内现有的光纤拉制工艺,通过不断优化双包层光纤设计,实现输出特性提升也是一个重要的研究方向。

表 3 国内 980 nm 波段光纤激光器的研究进展

Table 3 Research progress of fiber laser near 980 nm in China

Research group	Fiber type	core/cladding diameter/μm	Lasing wavelength/nm	Output power/W, slope efficiency/%	Year	Reference
Beijing University of Technology	Yb-doped double-cladding photonic crystal fiber	40/170	980	1.21, Slope efficiency is not mentioned	2012	[37]
National University of Defense Technology	Yb-doped double-cladding fiber	15/130	977	1.73, 7	2013	[39]
National University of Defense Technology	Yb-doped double-cladding fiber	60/130	974	2.65, 16.7	2013	[40]
National University of Defense Technology	Yb-doped double-cladding fiber	60/130	980	6.8, 32	2016	[41]
China Academy of Engineering Physics	Yb-doped double-cladding fiber	60/130	981.7	16.7, 32.4	2015	[42]
National University of Defense Technology	Yb-doped double-cladding fiber	60/130	976	113, 45	2019	[43]

3 结论与展望

980 nm 波段连续掺镱光纤振荡器和放大器在

近十几年来得到了迅速发展。通过国外的研究进展可以看出,国外的研究目标是实现高功率、高效率的近单模输出。国外的研究主要集中在振荡器上,通

通过对光纤进行优化设计,配合光纤光栅的滤波效果,抑制 1030 nm 波段 ASE,从而实现输出特性的优化。目前,相关研究的功率记录是利用全固态掺镱光子带隙光纤进行的,通过光子带隙光纤的优化设计,在保证 980 nm 波段单模传输的前提下,增强 1030 nm 波段 ASE 的抑制,实现了 151 W 的功率输出。该结果也验证了光子带隙光纤在 980 nm 波段光纤激光器应用方面的优势。不过,掺镱光子带隙光纤的控制难度大,无商业产品,这限制了相关研究。而基于双包层掺镱光纤的研究,由于双包层光纤控制技术成熟,容易获取,也成为一个重要的研究方向。现阶段,国外研究主要对双包层光纤进行优化设计,在保证近单模输出的同时提升输出功率和效率。目前实现的功率水平限制在 10 W 量级,且输出的效率较低(不超过 30%)。

在放大器的研究方面,主要采用双包层掺镱光纤,这是因为放大器不需要光纤光栅,无需考虑纤芯增大对光纤光栅刻写的影响,这也为纤芯的设计提供了空间。国外研究分为两个方向。一是在保证近单模的条件下,通过优化光纤设计,实现高功率的激光输出。目前实现的最高功率为 40 W 量级,但输出效率较低,不足 20%。二是采用多模光纤,通过增加纤芯的尺寸提升纤芯包层直径比,抑制 1030 nm 波段的 ASE,这一研究的主要应用背景是 980 nm 波段高亮度级联抽运源。现阶段,使用纤芯/包层直径为 95/125 μm 的掺镱双包层光纤实现了大于 30 W 的功率输出,斜率效率达 66%。

在国内研究方面,相关研究主要集中在放大器的研究上,这主要受限于国内光纤的研制水平。不过,随着近年来光纤和器件研制水平的提升,相关研究已取得了长足进步。特别是在放大器方面,通过光纤的优化和系统的设计,首次实现了百瓦量级的功率输出,这标志着相关研究的水平达到了国际领先水平,同时,也为进一步的功率提升奠定了基础。不过,该系统仍采用的是多模光纤,这限制了光束质量的提升,如何提升光束质量也将成为下一步重点研究方向。虽然国内在放大器方面取得重要突破,但在振荡器研究方面,国内研究未有显著进展,这也将是下一步研究的重点方向之一。此外,国内特种光纤的控制能力提升也将对相关研究的发展起到重要的推动作用。

参 考 文 献

- [1] Norman S, Zervas M N, Appleyard A, et al. Latest development of high-power fiber lasers in SPI [J]. Proceedings of SPIE, 2004, 5335: 229-237.
- [2] Bouchier A, Lucas-Leclin G, Georges P, et al. Frequency doubling of an efficient continuous wave single-mode Yb-doped fiber laser at 978 nm in a periodically-poled MgO: LiNbO₃ waveguide [J]. Optics Express, 2005, 13(18): 6974-6979.
- [3] Peng X L, Yang C S, Deng H Q, et al. Research progress of blue-green single-frequency laser [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(7): 071606.
彭秀林, 杨昌盛, 邓华秋, 等. 蓝绿光单频激光器研究进展 [J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(7): 071606.
- [4] Muro K, Fujimoto T, Okada S, et al. High power 980nm pump laser diodes with decoupled confinement hetero-structure [C] // Optical Amplifiers and Their Applications, July 1, 2001, Stresa, Italy. Washington, D.C.: OSA, 2001: OMB2.
- [5] Shu Q, Li C Y, Lin H H, et al. 2 kW class antireflection fiber laser with oscillator-amplifier integration [J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(8): 0801004.
舒强, 李成钰, 林宏奂, 等. 2 kW 抗反射振荡-放大一体化光纤激光器 [J]. 中国激光, 2018, 45(8): 0801004.
- [6] Jelger P, Engholm M, Norin L, et al. Degradation-resistant lasing at 980 nm in a Yb/Ce/Al-doped silica fiber [J]. Journal of the Optical Society of America B, 2010, 27(2): 338-342.
- [7] Bouillet J, Dubrasquet R, Médina C, et al. Millijoule-class Yb-doped pulsed fiber laser operating at 977 nm [J]. Optics Letters, 2010, 35(10): 1650-1652.
- [8] Selvas, R, Sahu J K, Nilsson J, et al. Q-switched 980 nm Yb-doped fiber laser [C] // 2012 Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO), May 19-22, 2002, Long Beach, California, United States. Washington, D.C.: OSA, 2002: CThR6.
- [9] Machinet G, Lhermite J, Lecaplain C, et al. Highenergy mode-locked fiber laser at 976nm [C] // Advances in Optical Materials, February 13-16, 2011, Istanbul, Turkey. Washington, D.C.: OSA, 2011: AwA29.
- [10] He J, Du S T, Wang Z W, et al. Linearly-polarized short-pulse AOM Q-switched 978 nm photonic crystal fiber laser [J]. Optics Express, 2013, 21(24): 29249-29254.
- [11] Li P X, Liang B X, Zhang M M, et al. 978 nm 1.24 ps ultra-short pulsed large mode area photonic crystal fiber laser [J]. Optics Communications, 2015, 352: 19-24.

[1] Norman S, Zervas M N, Appleyard A, et al. Latest

- [12] Zhang Y, Zhu J Q, Li P X, et al. All-fiber Yb-doped fiber laser passively mode-locking by monolayer MoS₂ saturable absorber [J]. Optics Communications, 2018, 413: 236-241.
- [13] Su N, Li P X, Yao C F, et al. Passively mode-locked Yb-doped all-fiber oscillator operating at 979 nm and 1032 nm with the single wall carbon nanotubes as SA [J]. Optik, 2019, 198: 163282.
- [14] Yi S J, Zhou Y, Dai Y T, et al. Core-pumped all-normal-dispersion ytterbium-doped femtosecond fiber laser around 976 nm [C] // Conference on Lasers and Electro-Optics, June 5-10, 2016, San Jose, California. Washington, D.C.: OSA, 2016: JTu5A.84.
- [15] Luo X X, Xi X M, Shi C, et al. 3 kW near-single-mode all-fiber amplifier based on 20/400 μm gain fiber and its long time operation characteristics [J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(2): 0201004.
罗雪雪, 奚小明, 史尘, 等. 基于 20/400 μm 增益光纤的 3 kW 近单模全光纤放大器及其长时工作特性 [J]. 中国激光, 2019, 46(2): 0201004.
- [16] Li P X, Yang C, Yao Y F, et al. Research progress of 980 nm fiber laser [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50(10): 100001.
李平雪, 杨春, 姚毅飞, 等. 980 nm 光纤激光器的研究进展 [J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(10): 100001.
- [17] Liu Y, Cao J Q, Xiao H, et al. Current status and future perspective of 980 nm fiber lasers [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2012, 49(8): 080007.
刘莹, 曹润秋, 肖虎, 等. 980 nm 光纤激光器发展现状与展望 [J]. 激光与光电子学进展, 2012, 49(8): 080007.
- [18] Röser F, Jauregui C, Limpert J, et al. 94W 980 nm high brightness Yb-doped fiber laser [J]. Optics Express, 2008, 16(22): 17310-17318.
- [19] Bouillet J, Zaouter Y, Desmarchelier R, et al. High power ytterbium-doped rod-type three-level photonic crystal fiber laser [J]. Optics Express, 2008, 16(22): 17891-17902.
- [20] Hanna D C, Percival R M, Perry I R, et al. Continuous-wave tunable and superfluorescent operation of a monomode ytterbium-doped fiber laser [C] // Advanced Solid State Lasers 1989, May 1, 1989, Cape Cod, Massachusetts. Washington, D.C.: OSA, 1989: JJ1.
- [21] Zenteno L A, Minelly J D, Dejneka M, et al. 0.65 W single-mode Yb-fiber laser at 980 nm pumped by 1.1 W Nd: YAG [C] // Advanced Solid State Lasers, February 13, 2000, Davos, Switzerland. Washington, D.C.: OSA, 2000: MD7.
- [22] Minelly J D, Zenteno L A, Dejneka M J, et al. High power diode pumped single-transverse-mode Yb fiber laser operating at 978 nm [C] // Optical Fiber Communication Conference, March 7, 2000, Baltimore, Maryland, United States. Washington, D.C.: OSA, 2000: FD2.
- [23] Ylä-Jarkko K H, Selvas R, Soh D B S, et al. A 3.5 W 977 nm cladding-pumped jacketed air-clad ytterbium-doped fiber laser [C] // Advanced Solid-State Photonics, February 2-5, 2003, San Antonio, Texas. Washington, D.C.: OSA, 2003: 103.
- [24] Zou S, Li P, Wang L, et al. 980 nm Yb-doped single-mode fiber laser and its frequency-doubling with BIBO [J]. Applied Physics B, 2009, 95(4): 685-690.
- [25] Nilsson J, Minelly J D, Paschotta R, et al. Ring-doped cladding-pumped single-mode three-level fiber laser [J]. Optics Letters, 1998, 23(5): 355-357.
- [26] Leich M, Jäger M, Grimm S, et al. Tapered single-mode Yb-fiber laser at 976 nm [C] // Specialty Optical Fibers, July 27-31, 2014, Barcelona, Spain. Washington, D.C.: OSA, 2014: SoM3B.6.
- [27] Aleshkina S S, Likhachev M E, Lipatov D S, et al. 5.5 W monolithic single-mode fiber laser and amplifier operating near 976 nm [J]. Proceedings of SPIE, 2016, 9728: 97281C.
- [28] Aleshkina S S, Levchenko A E, Medvedkov O I, et al. Photodarkening-free Yb-doped saddle-shaped fiber for high power single-mode 976-nm laser [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2018, 30(1): 127-130.
- [29] Pureur V, Bigot L, Bouwmans G, et al. Ytterbium-doped solid core photonic bandgap fiber for laser operation around 980 nm [J]. Applied Physics Letters, 2008, 92(6): 061113.
- [30] Matniyaz T, Kalichevsky-Dong M T, Hawkins T W, et al. Single-mode Yb-doped double-clad all-solid photonic bandgap fiber laser generating 27.8 W at 976 nm [C] // Advanced Solid-State Photonics, November 4-8, 2018, Boston, Massachusetts. Washington, D.C.: OSA, 2018: AM6A.28.
- [31] Matniyaz T, Kalichevsky-Dong M T, Hawkins T W, et al. Diffraction-limited Yb-doped double-clad all-solid photonic bandgap fiber laser at 976 nm [J]. Proceedings of SPIE, 2019, 10897: 108970V.
- [32] Matniyaz T, Li W, Kalichevsky-Dong M, et al. Highly efficient cladding-pumped single-mode three-level Yb all-solid photonic bandgap fiber lasers [J]. Optics Letters, 2019, 44(4): 807-810.
- [33] Li W S, Matniyaz T, Gafsi S, et al. 151 W monolithic diffraction-limited Yb-doped photonic bandgap fiber laser at ~ 978 nm [J]. Optics Express, 2019, 27(18): 24972-24977.

- [34] Wu J W, Zhu X S, Temyanko V, et al. Yb³⁺-doped double-clad phosphate fiber for 976 nm single-frequency laser amplifiers [J]. *Optical Materials Express*, 2017, 7(4): 1310-1316.
- [35] Aleshkina S S, Bardina T L, Lipatov D S, et al. Factors reducing the efficiency of ytterbium fibre lasers and amplifiers operating near 0.98 μm [J]. *Quantum Electronics*, 2017, 47(12): 1109-1114.
- [36] Valero N, Feral C, Lhermite J, et al. 39 W narrow spectral linewidth monolithic ytterbium-doped fiber MOPA system operating at 976 nm [J]. *Optics Letters*, 2020, 45(6): 1495-1498.
- [37] Li P X, Zhong G S, Liu Z, et al. 980 nm Yb-doped double-clad photonic crystal fiber amplifier and its frequency doubling [J]. *Optics & Laser Technology*, 2012, 44(7): 2202-2205.
- [38] Liu Y, Cao J Q, Xiao H, et al. Study on the output properties of fiber lasers operating near 980 nm [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2013, 30(2): 266-274.
- [39] Wang R X, Liu Y, Cao J Q, et al. Experimental study on the all-fiberized continuous-wave ytterbium-doped laser operating near 980 nm [J]. *Applied Optics*, 2013, 52(24): 5920-5924.
- [40] Wang R X. Study on output characters of fiber amplifiers operating near 980 nm [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2013: 3-8. 王睿星. 980 nm 波段光纤放大器输出特性研究 [D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2013: 3-8.
- [41] Yu Y, An Y Y, Cao J Q, et al. Experimental study on all-fiberized continuous-wave Yb-doped fiber amplifier operating near 980 nm [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2016, 28(4): 398-401.
- [42] Wang Y S, Ke W W, Ma Y, et al. The design and experiment research of high brightness all-fiberized ytterbium doped laser operating near 980 nm [J]. *Proceedings of SPIE*, 2015, 9671: 96710U.
- [43] Du H T, Liu A M, Cao J Q, et al. 100 W power output by self-developed 976 nm all fiber laser [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2019, 31(10): 103211. 杜赫庭, 刘爱民, 曹润秋, 等. 自主研发的 976 nm 波段全光纤激光器实现了 100 W 量级功率输出 [J]. *强激光与粒子束*, 2019, 31(10): 103211.

Research Progress on Continuous-Wave Fiber Lasers Operating Around 980 nm

Chen Maoni¹, Cao Jianqiu^{1,2,3*}, Huang Zhihe^{1,2,3}, Chen Jinbao^{1,2,3}

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

² Hunan Key Laboratory of High Energy Laser Technology, Changsha, Hunan 410073, China;

³ Hunan Collaborative Innovation Center of High Power Fiber Laser, Changsha, Hunan 410073, China

Abstract

Significance Yb-doped fiber lasers operating around 980 nm have attracted much attention because of their extensive application as high-brightness pumping sources. In addition, Yb-doped fiber lasers operating at this wavelength are potential sources for blue-green light. They can generate blue light around 488 nm for underwater communications and sensing by frequency doubling. However, it is challenging to achieve a high brightness with Yb-doped fiber lasers operating near 980 nm. The main reasons for this are that Yb-doped fiber lasers when operating near 980 nm not only have a high pumping threshold but also have serious gain competition with the amplified spontaneous emission (ASE) at around 1030 nm. A number of studies have been conducted on achieving high brightness with these lasers because of their wide application potential. The output power of continuous-wave (CW) Yb-doped fiber lasers operating near 980 nm was previously low, which limited their applicability. Researchers have enhanced their peak power by pulsing, realizing blue-green light output by frequency doubling. Although development of pulsed Yb-doped fiber lasers is advancing, people are still aiming to achieve a higher output power with CW fiber lasers. Early research progresses of CW Yb-doped fiber lasers operating near 980 nm have been reviewed in Ref. [16] and Ref. [17]. However, these studies only review the research progress before 2011. In recent years, significant progress has been made with CW Yb-doped fiber lasers operating near 980 nm. In this study, the development of CW Yb-doped fiber lasers operating near 980 nm after 2011 is reviewed. The technical schemes and important experimental results are summarized and discussed. The future development of CW Yb-doped fiber lasers operating near 980 nm is also discussed.

Progress In recent years, research outside China on CW Yb-doped fiber oscillators operating near 980 nm has involved optimization of the fiber design and significantly progressed fiberization of the fiber laser system. Thus far, an output power of 151 W at 978 nm with slope efficiency of 63% has been achieved with a CW single-mode all-fiber oscillator operating near 980 nm. In this scheme, the high output power was obtained by using a Yb-doped, all-solid, double-cladding photonic bandgap fiber. However, because of the complex structure of the Yb-doped all-solid double-cladding photonic bandgap fiber, optimizing the design of this fiber will also be an important research direction. Most recently, a scheme based on a Yb-doped fiber with core and inner cladding diameters varying along the fiber length in the shape of a saddle has been used for a fiber oscillator. This oscillator achieves a continuous output power of 10.6 W at 976 nm with laser slope efficiency of 18.4%. Compared with the Yb-doped all-solid double-cladding photonic bandgap fiber, the saddle-shaped double-cladding Yb-doped fiber is easier to fabricate. However, the limited pump power and low efficiency are common problems in this kind of scheme. Improving the output power and slope efficiency by further optimizing the double-cladding Yb-doped fiber should be the next research focus in this direction. In addition to fiber oscillators, fiber amplifiers operating near 980 nm are also important. With the main oscillator power amplifier (MOPA) structure, the amplifier can achieve higher output power. Furthermore, the amplifier with the MOPA structure allows for flexibility with the chosen seed laser. At present, double-cladding phosphate fiber is mainly used in CW Yb-doped fiber amplifiers, and the output wavelength is around 976 nm. There are two research directions for fiber amplifiers operating near 980 nm. First, with regards to single-mode amplifiers, based on the optimization design of Yb-doped fibers, improving the output power and slope efficiency are research focuses. The latest single-mode amplifier reported has achieved an output power of 39 W at 976 nm with laser slope efficiency of 19%. In this scheme, the slope efficiency of the amplifier is low. Therefore, increasing the slope efficiency will be the emphasis of future research. Second, for multimode fiber amplifiers, the research direction has been to achieve high efficiency output power by increasing the core-cladding diameter ratio of the fiber. More recently, the achieved output power of this kind of fiber amplifier has been over 30 W with a slope efficiency of 66%. The emphasis of future research will be to improve the beam quality together with the efficiency.

Nationally, there has been significant research progress on CW Yb-doped fiber lasers in recent years. Most recently, a CW output power of 113 W at 976 nm with a slope efficiency of 45% has been achieved. It is the first time that a 100-W fiber amplifier operating near 980 nm has been achieved, and it provides an important basis for the next step of power upscaling. With regards to fiber oscillators operating near 980 nm, progress is relatively poor because of limitations with the fabrication technology of special Yb-doped fibers (e.g., Yb-doped photonic bandgap fibers). In addition, another important research direction is optimization of the design of the double-cladding fiber based on current fiber fabrication technology to improve the output characteristics.

Conclusion and Prospect In summary, the development of CW Yb-doped fiber oscillators and amplifiers operating near 980 nm has progressed rapidly in the past 10 years, where those with an output power around 100 W have been demonstrated. However, scaling up of the output power is still a challenge. The design and fabrication of Yb-doped fibers will also play an important role in the future development of fiber lasers operating near 980 nm.

Key words lasers; fiber laser; ytterbium-doped fiber; laser amplifier; slope efficiency

OCIS codes 140.3510; 140.3615; 140.3280