

高功率线偏振掺镱光纤激光器性能调控技术研究进展

闫平^{1,2*}, 吴与伦^{1,2}, 李丹^{1,2}, 王祎³, 肖起榕^{1,2}, 巩马理^{1,2}

¹清华大学精密仪器系光子测控技术教育部重点实验室, 北京 100084;

²清华大学精密仪器系精密测试技术及仪器国家重点实验室, 北京 100084;

³清华大学未央书院, 北京 100084

摘要 线偏振光纤激光器相比于随机偏振光纤激光器, 在相干探测、相干合成、偏振合成及非线性频率变换等方面有广泛的应用, 因此近年来受到特别关注。本文先对近几年国内外的线偏振光纤激光器研究成果进行简要总结, 再针对该类激光器的偏振控制技术、光谱控制技术 & 光束质量控制技术进行归纳和评述。

关键词 线偏振光纤激光器; 偏振消光比; 掺镱光纤; 光谱控制; 光束质量

中图分类号 TN248.1 文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS230733

1 引言

光纤激光器具有结构简单、光束质量好、效率高等优点, 是目前激光器领域的研究重点之一。其中, 线偏振光纤激光器作为光纤激光器的一大类别, 其输出的激光具有线性偏振性, 一般采用偏振消光比 (PER) 来衡量。高 PER 的线偏振光纤激光器在相干合成及偏振合成^[1-2]、非线性频率变换^[3-5]及相干探测^[6]等方面具有广泛的应用, 尤其在相干合成和偏振合成方面, 是实现超高功率激光输出的重要手段, 因此提升单个线偏振光纤激光器的输出功率对于固定光谱范围内的光纤激光功率提升具有重要意义。

掺镱光纤激光器在众多稀土掺杂光纤激光器中最容易实现高功率输出, 目前随机偏振输出掺镱光纤激光器的单纤功率已经达到 20 kW 以上^[7]。近年来, 国内外多个研究机构针对线偏振掺镱光纤激光器展开研究, 主要采用振荡器种子源的主控振荡器功率放大器 (FOL-MOPA) 和单频激光相位调制种子源的主控振荡器功率放大器 (SFL-MOPA) 两种方案, 目前单纤输出功率已经超过 4.5 kW, 并且基本能够获得窄线宽的光谱。

在对线偏振光纤激光器进行功率提升的过程中, 无论是 FOL-MOPA 方案还是 SFL-MOPA 方案, 均需要采用一系列措施来优化激光器的输出参数。由于线偏振光纤激光器的主体结构要求能够线偏振起振并维

持一段时间, 因此相比于随机偏振光纤激光器, 线偏振光纤激光器在提升功率且同时保持高质量激光输出方面面临一定的挑战, 其中的一些物理机理也有所区别。因此, 本文将从 PER 控制、光谱控制 (含非线性问题) 及光束质量控制等方面介绍目前在线偏振光纤激光器中广泛采用的技术手段。

2 线偏振掺镱光纤激光器研究进展简述

近十年, 国内外诸多研究团队将线偏振光纤激光器的功率不断提升, 目前除了输出光谱为单频的线偏振光纤激光器外, 2017 年以来的线偏振掺镱光纤激光器功率均已达到 kW 级以上, 如表 1 所示。已有研究采用的结构主要为 SFL-MOPA, 且近两年其功率已被提升至 4 kW 以上; FOL-MOPA 结构早年有部分研究, 但是受限于受激拉曼散射 (SRS) 效应, 其功率在 2020 年达到 3 kW 之后无更多报道。

下面针对在线偏振光纤激光器功率提升中克服各类非线性效应、偏振恶化以及模式恶化问题, 详细介绍获得偏振性稳定、光谱和光束质量高的输出激光的技术手段。

3 线偏振光纤激光器的偏振控制技术

3.1 概述

线偏振光纤激光器与随机偏振光纤激光器的最显

收稿日期: 2023-03-29; 修回日期: 2023-05-19; 录用日期: 2023-06-12; 网络首发日期: 2023-07-04

基金项目: 国家自然科学基金 (61875103, 62122040, 62075113)

通信作者: *pyan@mail.tsinghua.edu.cn

表 1 线偏振掺镱光纤激光器的研究进展
Table 1 Research development of linearly polarized Yb-doped fiber lasers

Year	Institution	Structure	Wavelength / nm	Power / kW	3 dB linewidth	PER / dB	M^2	Ref
2017	CAEP	FOL-MOPA	1064	1.09	0.024 nm	14.5	1.1	[8]
2017	NUDT	FOL-MOPA	1064	1.02	0.3 nm	14	1.24	[9]
2017	NUDT	SFL-MOPA	1064	2.43	0.255 nm	18.3	/	[10]
2018	IPG	SFL-MOPA	1064	2	0.113 nm	>20	<1.1	[11]
2018	NUDT	FOL-MOPA	1064	1.1	0.177 nm	13.8	1.25	[12]
2019	CAEP	SFL-MOPA	1064	2.62	0.121 nm	14.2	<1.3	[13]
2019	CAEP	SFL-MOPA	1064	1.5	0.049 nm	>13	1.14	[14]
2020	CAEP	FOL-MOPA	1064	3.08	0.2 nm	>11.6	1.45	[15]
2020	NUDT	SFL-MOPA	1064	0.3	<0.035 pm	>10.6	1.26	[16]
2020	CAEP	SFL-MOPA	1064	2.5	0.121 nm	14	1.3	[17]
2020	U-Bordeaux	SFL-MOPA	1064	0.365	0.05 nm	17	<1.1	[18]
2021	CAEP	SFL-MOPA	1064	3.25	~0.075 nm	15	1.22	[19]
2022	NUDT	SFL-MOPA	1064	3.96	0.62 nm	13.9	1.41	[20]
2022	CAEP	SFL-MOPA	1064	4.45	0.08 nm	17.7	1.28	[21]
2022	NUDT	SFL-MOPA	1064	4.5	0.33 nm	10.3	1.55	[22]

著区别就是线偏振光纤激光器输出的激光具有良好的线偏振性。为了维持激光的偏振性,此类激光器的主体构成基本为保偏光纤及保偏光纤器件。目前最常用的保偏光纤是熊猫型保偏光纤,即PANDA光纤,通过在纤芯的两侧设计具有更大热膨胀系数的应力棒,从而在纤芯中产生不均匀分布的应力,改变平行于应力棒方向与垂直于应力棒方向的纤芯折射率,形成双折射。此种设计使得光纤在受到一般扰动后能够维持此类型的双折射,故沿着这两个方向的偏振态就不会发生改变^[23]。纤芯的中心与应力棒中心连成的轴具有折射率高、光速慢的特点,被称为慢轴,而垂直于该直线的光轴被称为快轴。在线偏振光纤激光器中,一般都选取慢轴光作为输出光。

在实际情况中,受到保偏光纤的各种内在或外在因素的影响,线偏振光纤激光器也无法实现完全的线性偏振输出,为此定义PER来表征线偏振光纤激光器的偏振性^[24]。双折射的大小将会直接影响保偏光纤抵抗干扰的能力,因此目前已有很多科研人员探索计算保偏光纤双折射的方法^[23, 25-26],这对后续的模式恶化计算有重要的意义。

现有研究讨论的保偏光纤中激光偏振态的内外部影响因素主要包括横向受力^[27-34]、光纤扭转^[35-39]、光纤受热^[22, 32, 40]、各向异性散射过程^[41-42]以及非线性过程^[43-47]。这些过程都会影响纤芯的折射率分布,从而影响保偏光纤的偏振主轴,最终导致偏振模式耦合,降低线偏振激光的PER。因此,通过各种手段提升保偏光纤的双折射,滤除或转化快轴光,便能够提升输出激光的PER。

3.2 线偏振光纤激光振荡器

对于高功率线偏振光纤激光器的两种种子源方

案,单频调制的种子源本身会采用一个mW量级功率的单频线偏振光源,因此只需要在后续放大过程中抑制偏振恶化即可。对于基于光纤布拉格光栅(FBG)的振荡器而言,由于其快轴和慢轴均能够支持线偏振激光传输,因此在构建振荡器时,需要采用一些方法控制输出的线偏振激光仅在慢轴起振。

为了实现慢轴起振,控制振荡器中快、慢轴的光损耗是一种方案。通过弯曲盘绕,能够拉开快、慢轴线偏振光的损耗差距,只要控制合适的弯曲半径,就能够实现慢轴起振。2018年,清华大学通过采用分布式弯曲盘绕的方式实现了慢轴线偏振光纤激光输出,并且通过测试多种盘绕半径优化了振荡器的结构,实验原理图^[48]如图1所示。最终该振荡器实现了功率为44 W的线偏振光纤激光输出,光光效率为57.9%,PER高达21.6 dB。

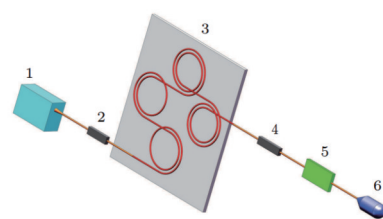


图 1 弯曲盘绕慢轴起振原理图^[48]

Fig. 1 Choosing slow-axis linearly polarized laser output by coiling fiber^[48]

该类型的振荡器由于存在弯曲选模,因此对慢轴光也存在损耗,光光效率低,并且所产生的热量高。但是其对光纤光栅等光纤器件没有要求,故不会受到外界因素的影响,输出激光稳定,PER高。

另一种实现慢轴起振的方案利用了保偏 FBG 对快、慢轴反射光谱的差异性。由于快、慢轴的折射率不同,因此在相同的光栅周期下具有不同的中心反射波长。在设计高反光栅(HR-FBG)和低反光栅(OC-FBG)的中心波长时人为安排偏差,使得高反光栅的快轴反射谱对应低反光栅的慢轴反射谱,此时再将低反光栅与增益光纤 90° 熔接,便可以得到慢轴输出的线偏振光纤激光器。2015 年,天津大学使用此方案实现了功率为 1 W 的线偏振激光输出,最终经过两级放大实现 520 W 线偏振激光输出,其原理图^[49]如图 2 所示。此后该方案被广泛运用到以振荡器为种子源的线偏振光纤激光器中。2017 年国防科技大学研制的 1 kW 线偏振光纤激光器^[9]以及 2020 年中国工程物理研究院研制的 3.08 kW 线偏振光纤激光器^[15]等均采用该类型的振荡器。

这种方案具有很高的光光效率,且增益光纤产热低,容易实现高功率激光输出。然而,其对光纤光栅的要求高,若光栅受到环境温度等的影响,会产生波长漂移,此时容易出现退偏或功率不稳的现象。

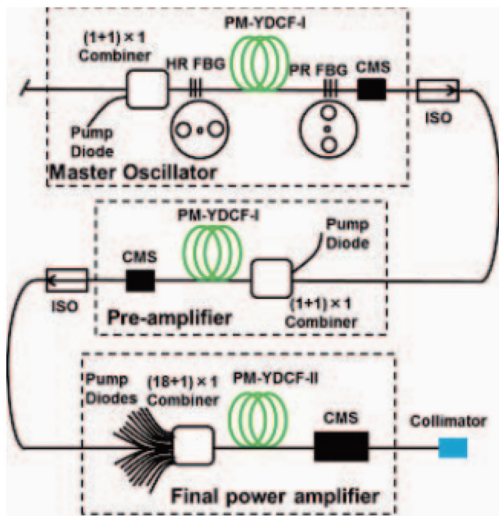


图 2 垂直熔接方案实现线偏振光纤激光振荡器原理图^[49]

Fig. 2 Realizing linearly polarized laser output by orthogonal splicing^[49]

3.3 放大级偏振控制方案

一个高 PER 的种子源是实现高功率线偏振光纤激光器的基础,然而只有在放大过程中控制住偏振恶化才能维持高 PER 的激光输出。目前针对激光放大的偏振恶化理论及抑制方案均有广泛的研究。

弯曲选偏也是放大级中常用的偏振控制方法。2007 年,都柏林理工学院计算了标准单模光纤(SMF28)在输入波长为 1500~1600 nm、盘曲半径为 8~13 mm 条件下 TE、TM 模的弯曲损耗,揭示了不同偏振模在弯曲状态下具有不同的损耗,并且该计算结果与实验结果相符,这就为后续弯曲偏振选模打下了基础^[50]。

2015 年,国防科技大学进一步研究了保偏光纤中不同偏振模的弯曲损耗,并绘制了损耗曲线^[51],如图 3 所示。在此理论指导下,通过将放大级 20/400 μm 的保偏增益光纤盘绕成圆环状对偏振进行控制,实现了 1.5 kW 线偏振光纤激光输出,PER 为 13.8 dB。

2016 年,麻省理工学院林肯实验室在实验中使用特殊的三包层增益光纤进行功率放大,最内层为玫瑰状熔融石英包层,中间为掺氟玻璃包层,最外层为镀金涂层,其中镀金涂层使得光纤能够在更高温度下工作,同时具有更好的散热能力,在相同泵浦功率下温度更低,进而可以在放大器中使用相对更短的增益光纤来达到相同的增益水平。实验中将 4 m 长的该种镀金光纤以 13 cm 直径进行盘绕,用 kW 级泵浦光进行双向泵浦,可达到的最高输出功率为 3.1 kW,并保持光束质量因子 $M^2 < 1.15$ ^[52]。

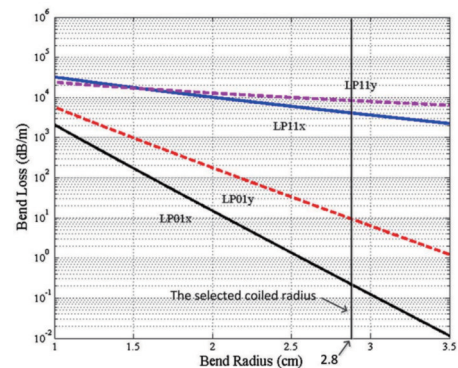


图 3 偏振相关的弯曲损耗曲线^[51]

Fig. 3 Calculated bending loss curves relative to polarization^[51]

2020 年,中国工程物理研究院设计的线偏振光纤激光器在主放大器部分采用弯曲选模方法,将 20/400 μm 的保偏增益光纤以约 10 cm 直径盘绕在铝板上。在输出功率放大至最大值 3.08 kW 的过程中,PER 保持在 11.6 dB 以上^[15]。同年,OFS 实验室报道了一种使用具有双层纤芯的高阶模保偏光纤:内芯用于传输基模,便于与传统光纤进行熔接;外层用于高阶模传输,对于实验中所选取的 LP_{04} 模具有超过 2200 μm^2 的超大模场。实验中使用长度为 10 m 的该种高阶模保偏光纤,在盘曲直径为 60、40、20 cm 时可以分别实现 PER 为 12.2 dB、10.5 dB、8.2 dB 的 LP_{04} 模激光输出,实验原理如图 4 所示,表明弯曲选模方法同样适用于超大模场光纤^[53]。

除了通过滤除快轴光实现 PER 的提升外,从 PER 恶化的影响因素上下手也是常规思路之一,其中,热致退偏是一个显著的影响因素。当温度升高时,保偏光纤的双折射下降^[25],从而导致光纤抵抗内外部扰动的能力下降,产生更强的偏振耦合,耦合系数与双折射的平方成反比^[26]。

2022 年,清华大学结合保偏光纤的偏振耦合系数

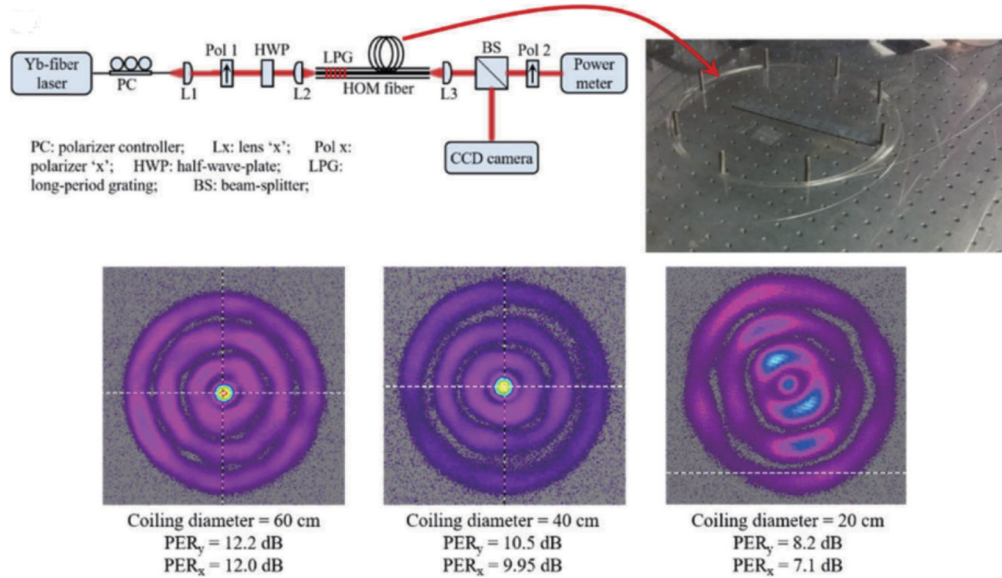


图 4 超大模场保偏光纤弯曲选偏原理^[53]

Fig. 4 Polarization choosing of super large mode area PM fiber by coiling^[53]

与速率方程,研究了线偏振光纤激光放大级中由热量产生的双折射退化对最终输出激光的 PER 的影响,并比较了直接泵浦和级联泵浦的偏振恶化情况。结果表明,由于级联泵浦的光纤长度比直接泵浦的光纤长度

大很多,故其最终输出激光的 PER 不如直接泵浦方式。但是级联泵浦方式的产热量低,恶化速度较慢,因此高掺光纤在高功率级联泵浦方式下的输出激光 PER 有可能超过直接泵浦方式^[54],如图 5 所示。

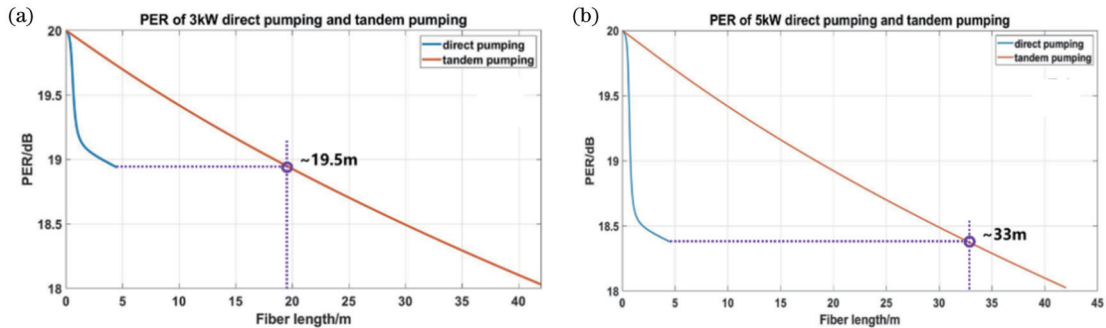


图 5 3 kW 和 5 kW 情况下两种泵浦方式的输出 PER 对比^[54]。(a) 3 kW; (b) 5 kW

Fig. 5 Comparison of output PER under 3 kW and 5 kW for two pumping schemes^[54]. (a) 3 kW; (b) 5 kW

主动和被动偏振控制也是常见的维持偏振态的手段,例如,采用非保偏结构实现线偏振光纤激光器,则一般需要采用主动偏振控制技术。2019年,中国工程物理研究院采用基于保偏器件实现的线偏振光纤种子源和搭配有主动偏振控制方案的非保偏光纤放大器实现了高功率线偏振激光输出,整体实验系统如图 6 所示。实验使用现场可编程门阵列(FPGA)接收光电探测器(PD)信号,并通过随机并行梯度插值(SGPD)算法对偏振控制器进行优化,可实现的最大输出功率为 1093 W,线宽为 6.5 GHz,光束质量因子 M^2 约为 1.1, PER 约为 14.5 dB^[8]。

2018年,IPG公司采用相位调制的单频半导体分布式反馈(DFB)激光器作为种子源,配合保偏放大器和非保偏放大器进行功率放大,分别实现了 2 kW 和

2.5 kW 激光输出,其中保偏放大器的输出激光 PER 可达 20 dB 以上,而非保偏放大器通过对种子的主动偏振控制,其输出激光的 PER 也可达到 16~17 dB^[11]。

被动偏振控制不需要进行人为的偏振干预,其可通过内置的偏振器件被动实现,保偏和非保偏结构都适用,但目前应用不广泛,在此列出一些例子供参考。

2021年,浙江大学通过在单模光纤的FBG对中加入保偏增益光纤和偏振分光棱镜(PBS)构成振荡器,经放大后实现了 PER 高达 35 dB,线宽仅 4.5 kHz、功率为 2.5 W 的线偏振单频激光输出^[55],原理如图 7 所示。由于单模光纤本身具有弱双折射,因此激光在其中传输时偏振态会出现周期性变化,利用此规律以及 PBS 的偏振选择特性,可以选出特定纵模的特定偏振态进行放大,从而实现极高偏振性激光输出。

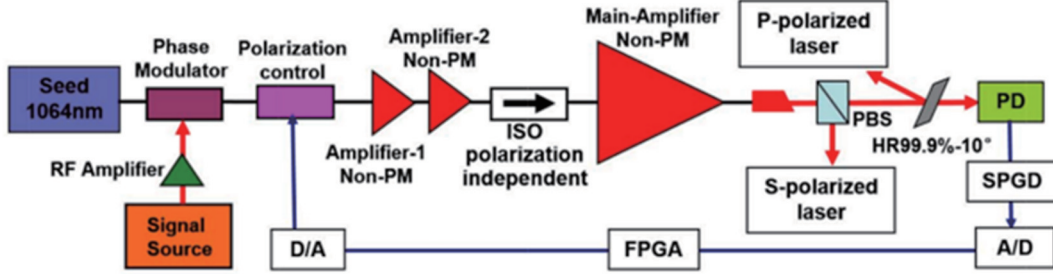


图 6 主动偏振控制实现线偏振激光输出^[8]

Fig. 6 Realizing linearly polarized fiber laser output by active polarization control method^[8]

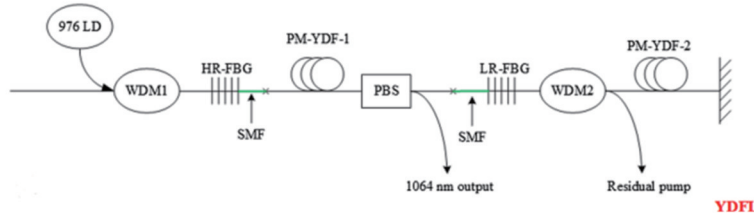


图 7 利用 PBS 和单模光纤实现单频线偏振激光输出^[55]

Fig. 7 Realizing single frequency linearly polarized fiber laser output by combining PBS and single mode fiber^[55]

2003年,加利福尼亚大学的研究团队对熊猫光纤施加周期性微弯,发现通过调节合适的外力、周期和应力棒方向,可以对特定波长的特定偏振态实现纤芯模和包层模的耦合^[56],因此推测,周期性微弯可以用于偏振滤波,配合包层光剥除器实现特定偏振态的滤除。

2011年,印度国家物理实验室通过采用半波片和1/4波片进行偏振补偿,实现了高精度的保偏光纤空间光耦合^[57],因此可以推测,将波片组合内嵌到线偏振激光系统中,应当也有此类效果,可用于一些需要特殊偏振控制的方案。

除了偏振控制手段外,设计高双折射的保偏光纤也是提高PER的可行方案之一。光纤激光中高阶模的存在,导致标称的双折射系数并不能代表真实情况。

一般情况下,除了应力棒方向的 LP_{11} 高阶模的双折射略高于基模外,其余模式的双折射都低于基模,因此高阶模的偏振耦合更为严重^[58]。另外,在一些特殊应用中,需要使用一些特种光纤来实现保偏效果,因此也需要进行特殊设计。

2018年,华中科技大学对熊猫型少模保偏光纤的偏振维持能力进行了测量。在对熊猫型光纤的几何参数进行优化后,经计算得到其线性偏振模的模间折射率差 Δn_{eff} 和每个线性偏振模的双折射 δn_{eff} 均大于 1×10^{-4} ,能有效避免临近模式耦合。实验使用40 m长的该光纤对各模式进行单模传输,光纤在一定的外力扭转下仍可保持输出的 LP_{01} 、 LP_{11} 、 LP_{02} 、 LP_{21} 模式的PER在20 dB以上^[58],计算得到的参数如图8所示。

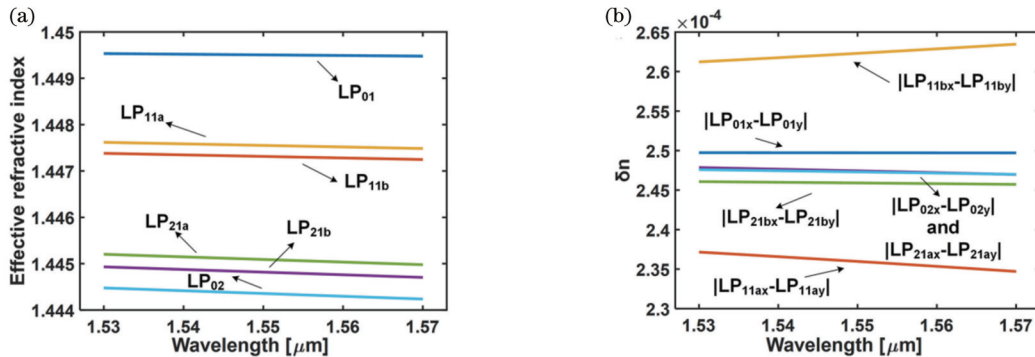


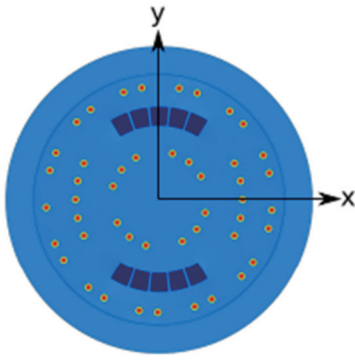
图 8 保偏光纤各个模式的有效折射率及双折射系数^[58]。(a)有效折射率;(b)双折射系数

Fig. 8 Effective refractive index and birefringence of all the PM fiber modes^[58]. (a) Effective refractive index; (b) birefringence

2020年,里尔大学设计了一种保偏的像素型分布的布拉格光子晶体光纤,如图9所示,通过在常规光纤中设计掺锗的应力棒以及B型掺杂区,实现了纤芯直径为35 μm的保偏光纤,该光纤的PER可以达到

30 dB以上,并且在弯曲直径为20 cm时实现单模输出^[59]。

2019年,哈尔滨工程大学提出了“叶型”纤芯保偏光纤^[60],其截面结构如图10所示。通过在传统的熊猫

图9 特种保偏光子晶体光纤^[59]Fig. 9 Specialty polarization maintaining photonic crystal fiber^[59]

型或领结型保偏光纤基础上将纤芯改为非对称形状,可以在应力棒引入的应力致双折射上叠加由纤芯各向异性引入的几何致双折射。在优化各项参数后进行模拟,熊猫型光纤的双折射可达 7.6921×10^{-4} ,领结型光纤的双折射可达 7.732×10^{-4} 。

4 线偏振光纤激光器的光谱及非线性控制技术

4.1 概述

随机偏振光纤激光器中,各类非线性的作用将会恶化输出激光光谱,其中主要包括光谱的非线性展宽、SRS效应、受激布里渊散射(SBS)效应及调制不稳定性等。这些非线性过程在线偏振光纤激光器中也广泛存在,并且部分具有更加显著的效果。

非线性展宽主要为三阶克尔效应导致的展宽,具体机理包括自相位调制(SPM)、交叉相位调制(XPM)及四波混频(FWM)、SRS、SBS等^[12]。其中SPM、XPM及FWM除了导致线宽变宽外,其强烈的偏振相关性还会影响输出激光的偏振性^[8],该物理过程主要出现在FOL-MOPA结构中^[8-9, 12, 15]。SRS效应会导致部分光功率转移到长波方向,在此过程中量子亏损增加,从而降低激光器效率,产生更多热量。由于线偏振激光的拉曼增益要远大于随机偏振激光^[61],因此线偏

振光纤激光器中更容易产生SRS效应,并且FOL-MOPA结构中信号光在主放大级进行功率放大时会发生线宽展宽,导致SRS在与SBS的竞争中更占优势,因此SRS容易发生在FOL-MOPA结构中^[12]。SBS会将信号光向后端散射,且容易产生脉冲,在降低激光器效率的同时威胁器件的安全。SBS效应主要发生在极窄线宽的激光传输中,由于SFL-MOPA结构在放大过程中几乎没有光谱展宽,因此SBS对其威胁巨大^[16-17, 62]。调制不稳定性是由非线性和色散共同作用产生的,会在光谱的信号峰周边产生边带,在保偏光纤中也会出现,但其影响相对较小,因此不是本文讨论的重点^[63]。

由于光谱成分会影响偏振合成的效率^[2],因此目前线偏振光纤激光器光谱控制的目的是在维持高功率线偏振输出的同时,尽可能地减少其他光谱成分并抑制非线性光谱展宽效应。为解决这一问题,本文将从种子源和放大级构造两个方面介绍目前主流的控制手段,这些手段与非保偏的窄线宽激光器也有共通之处。

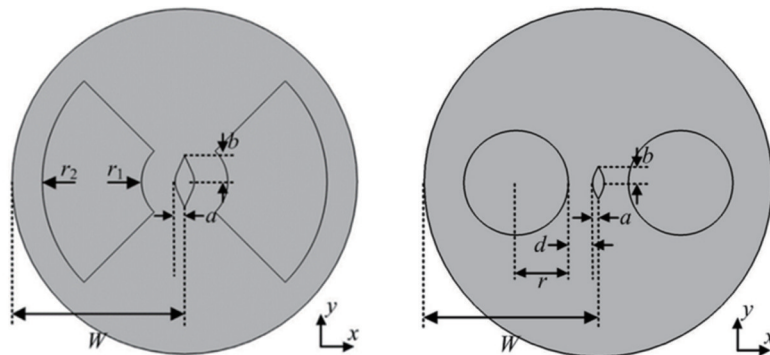
4.2 种子源的光谱及非线性控制技术

种子源一般功率较低,基本不会产生其他光谱成分,因此目前种子源主要的光谱控制目标为限制输出带宽。通过技术手段,SFL-MOPA结构和FOL-MOPA结构都能达成此目标。

4.2.1 SFL-MOPA结构

线偏振单频激光器种子源输出偏振性好、线宽为kHz量级,但是输出功率低。经过相位调制,将其线宽展宽,在抑制SBS的同时可以抑制后续放大过程中的光谱展宽^[10]。

早在2015年,采用SFL-MOPA结构实现窄线宽线偏振光纤激光输出的技术便已经相当成熟。国防科技大学采用线宽为20 kHz、输出功率为40 mW的单频线偏振激光种子经过铌酸锂相位调制器后,将线宽扩展至约5.4 GHz。调制信号采用频率为100 MHz、峰值电压为36 V的正弦波,如图11所示。经过多级放大后,输出的560 W线偏振激光线宽小于5 GHz,表明在放大过程中基本没有出现线宽展宽^[62]。随着功率的提

图10 非对称纤芯保偏光纤^[60]Fig. 10 Asymmetric core polarization maintaining fiber^[60]

升,后续放大出现的SBS问题要求调制系统有更加严格的设计。

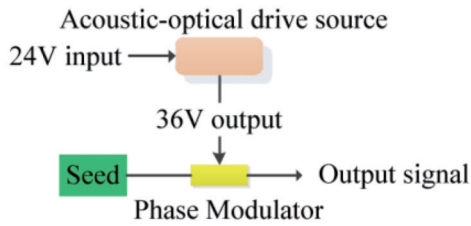


图 11 正弦信号相位调制示意图^[62]

Fig. 11 Sinusoidal signal phase modulation^[62]

4.2.2 FOL-MOPA 结构

窄线宽线偏振光纤振荡器是另一主要的种子源,其构造主要由一对保偏FBG以及对应的保偏光纤和泵浦源构成。目前实现窄线宽输出或放大级光谱控制的主流方案包括短腔法、窄线宽光栅法及特殊腔型构造法等。

2018年,中国工程物理研究院采用短腔法构建了线偏振光纤激光种子源,输出功率为10 W,谐振腔总长仅为2 m^[12],如图12所示。由于腔长极短,在振荡器中激光所受的非线性作用长度较短,并且拥有很宽的纵模间隔(50 MHz,约0.189 pm),在后续放大过程中

可以有效减弱非线性作用^[64]。最终该振荡器输出的3 dB线宽仅为0.04 nm,远低于高反光栅和输出(OC)光栅的线宽^[12]。

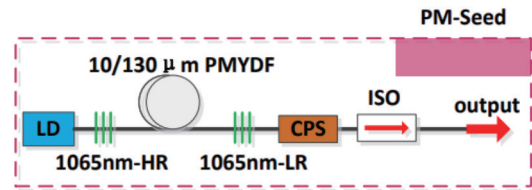


图 12 线偏振光纤振荡器,长度仅为2 m^[12]

Fig. 12 Linearly polarized fiber oscillator with 2 m cavity length^[12]

2020年,中国工程物理研究院在短腔法的基础上运用极窄线宽的光栅对进一步压制线宽,通过采用3 dB带宽仅为0.05 nm的输出光栅,在维持功率基本不变的情况下进一步将种子源的输出3 dB线宽压缩至0.0307 nm,20 dB线宽也仅有0.0325 nm^[15]。

除此以外,特殊腔型构造法也可以用于振荡器的输出光谱控制。2017年,国防科技大学采用单模-多模-单模的腔型实现了约45 W线偏振光纤激光输出,3 dB带宽约为0.044 nm^[9],其结构如图13所示。多模光纤的存在,使得振荡器中非线性系数更低。



图 13 单模-多模-单模振荡器结构^[9]

Fig. 13 Single mode-multi mode-single mode oscillator construction^[9]

综上所述,虽然线偏振种子源的光谱线宽将会影响放大级的输出线宽,但是其并不是最终输出光谱形状的决定因素,放大级中的光谱及非线性控制变得十分重要。

4.3 放大级的光谱及非线性控制技术

虽然种子源的输出光谱成分可以通过一系列措施得到控制,但是在放大级,随着功率的大幅增长,需要额外的措施来应对各类非线性效应,从而维持相对纯净的光谱输出。

4.3.1 选用合适的泵浦方式抑制非线性光谱展宽

在常规激光器中,相比于正向泵浦,后向泵浦及双向泵浦方式放大级内的激光功率平均值低,因此非线性强度低,通过采用后向或双向泵浦可以有效地抑制光谱展宽^[65],这也同样适用于线偏振光纤激光器,并已经被广泛采用。2021年,中国工程物理研究院采用后向泵浦方式实现了3.25 kW极窄线宽的线偏振光纤激光输出,输出线宽仅为20 GHz^[19]。2022年,国防科技大学采用双向泵浦方式实现了3.96 kW线偏振激光输

出,如图14所示,线宽在放大过程中从0.48 nm增大至0.62 nm,虽然其效果不及后向泵浦,但也成功控制了线宽展宽^[20]。另外,近年的其他研究成果也采用了双向或后向泵浦^[16-17, 21-22],表明该技术已经成熟。

4.3.2 SBS抑制

由于SFL-MOPA结构的种子输出带宽极窄,因此会产生严重的SBS效应,还有可能引发自脉冲问题^[14, 19, 66]。在多年的研究过程中,有多种方法可以加强对SBS的抑制作用。

2019年,国防科技大学在进行SFL-MOPA结构的激光放大过程中,采用滤波的白噪声作为调制源,将种子信号光的带宽限制在约1.8 GHz,此时SBS阈值为827 W,之后调制带宽得到略微提升,此时的SBS不再成为限制因素,信号功率为900 W时模式不稳定性(MI)成为新的限制因素^[67]。该实验结果表明,控制合适的调制带宽有助于抑制SBS。

2021年,诺思罗普·格鲁曼公司报道了一种采用复合注入方式抑制SBS效应的线偏振光纤激光器。

通过将振幅调制(AM)和频率调制(FM)同时注入一个相位调制的种子,如图 15 所示,这样在光纤的大部分长度下,FM 的作用会导致种子带宽较宽、SBS 效应弱。然而,由 AM 导致的 SPM 作用所产生的非线性相移可以抵消该作用,使得被展宽的带宽在光纤长度下

逐渐压缩。只要严格控制二者的强度和光纤长度,便可以使得输出时二者的作用相互抵消,最终实现无 SBS 的窄线宽输出。最终,该团队实现了 780 W 线偏振激光输出,线宽为 5.9 GHz,相比于未加注入抑制时的系统,SBS 强度变为 1/7^[68]。

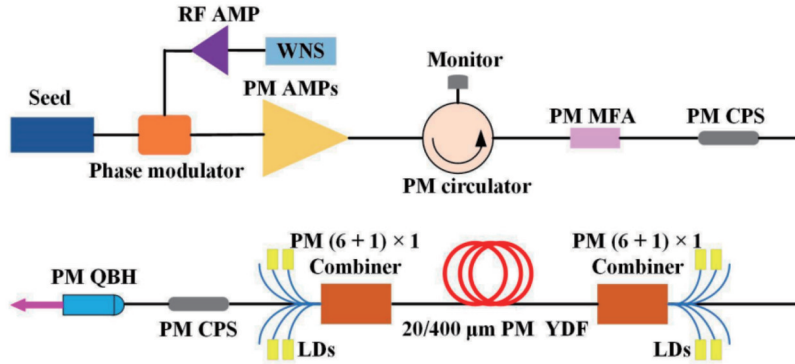


图 14 3.96 kW 双向泵浦方案^[20]

Fig. 14 3.96 kW bidirectional pumping configuration^[20]

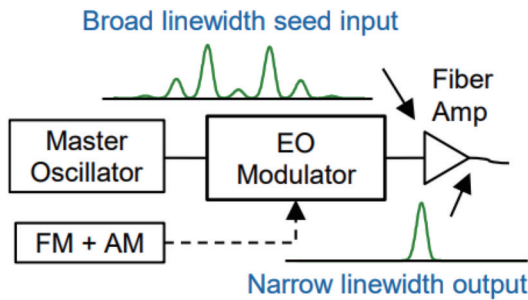


图 15 AM 及 FM 复合注入示意图^[68]

Fig. 15 Schematic of AM and FM combined injection^[68]

2017年,中国工程物理研究院采用白噪声调制的常规种子源进行激光放大,发现输出激光中含有强烈的自脉冲,推断其产生原因可能为白噪声随机性导致存在部分高功率密度的光谱成分,从而诱发二阶 SBS 效应^[66]。2019年,在白噪声调制的线偏振种子源的放大中,中国工程物理研究院采用后向泵浦方案、大模场无源光纤以及增加种子线宽的方法,最终实现了无自脉冲的 1.5 kW 线偏振光纤激光输出,输出带宽为 13 GHz^[14]。2021年,通过进一步优化调制源,采用随机波形发生器产生调制信号(采样率为 25 GSa/s,带宽为 13.5 GHz),并在设置射频放大器高功率放大(27 dBm)的同时降低半波电压(2 V),中国工程物理研究院得到了 20 GHz、20 dB 均方根(RMS)线宽的平顶光谱种子源。最终该种子源的功率被放大至 3.25 kW 而没有出现 SBS 和自脉冲效应^[19],其光谱演化如图 16 所示。

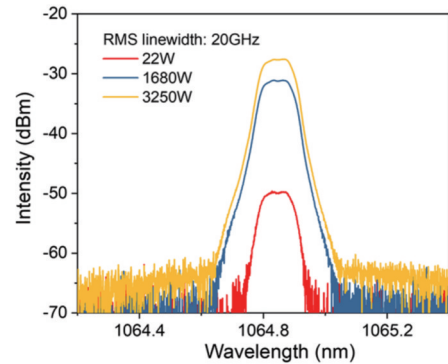


图 16 3.25 kW 无 SBS 和自脉冲的光谱演化^[19]

Fig. 16 3.25 kW spectrum evolution without SBS and self-pulsing^[19]

2016年,国防科技大学采用三级调制的方法将单频种子展宽并成功抑制了 SBS 效应,最终实现了 1.89 kW 线偏振激光输出,其 SBS 阈值为单级调制的 2.5 倍以上^[69]。2020年,中国工程物理研究院进一步

在两级调制的基础上研究了调制信号的选择方法,其实验原理如图 17 所示。通过尝试将 4 种带宽的白噪声源安装在两个调制器上,最终在选择其中两个调制信号并进行串联后,将单频信号源带宽扩展至 32 GHz,自脉冲阈值大于 2.62 kW^[17]。

除了针对调制系统的研究外,还可以设计特种光纤来抑制 SBS。2020年,国防科技大学采用锥形保偏增益光纤进行线偏振激光放大,如图 18 所示。对于线宽小于 9.3 MHz 的线偏振激光器,SBS 阈值超过 300 W^[16]。

总而言之,为抑制 SFL-MOPA 结构中的 SBS 效应,一般需要从调制信号的选择、调制级数的选择,以及泵浦方式和光纤选择上着手。

4.3.3 SRS 抑制

对于 FOL-MOPA 结构的线偏振光纤激光器,在放大级中受四波混频等非线性效应影响严重,因此线宽容易展宽,但同时也自发抑制了 SBS 效应。然而,

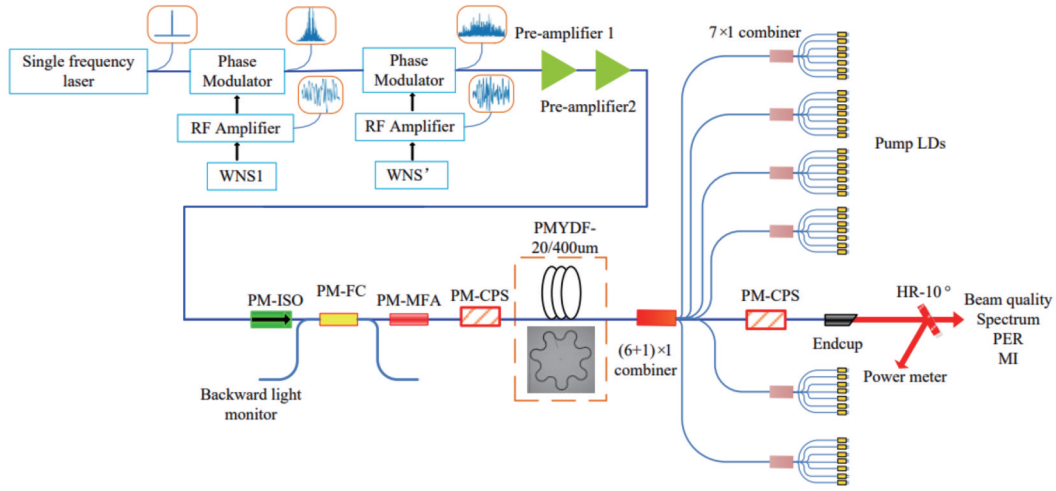


图 17 二级调制单频种子源抑制自脉冲实验原理图^[17]

Fig. 17 Self-pulsing suppressed single frequency seed by two stage phase modulation^[17]

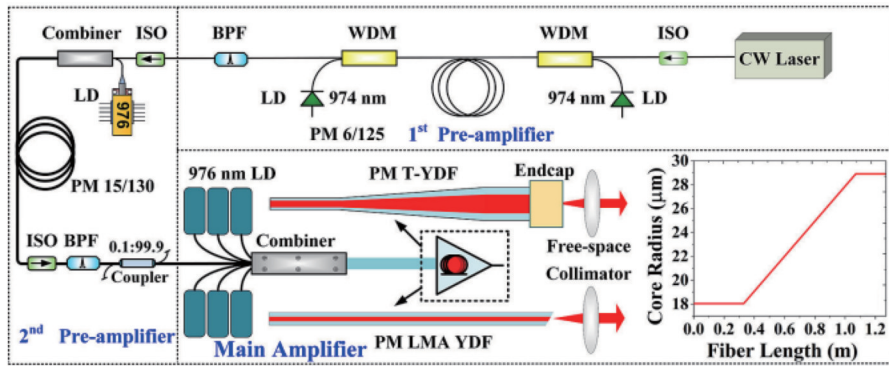


图 18 利用锥形保偏光纤放大系统抑制 SBS^[16]

Fig. 18 SBS suppression by using tapered polarization-maintaining fiber in amplifiers^[16]

由于 SRS 过程是偏振相关的,因此对于线偏振激光器,其所受的 SRS 增益系数比常规激光器大得多^[61, 70-71]。虽然这种特性可以用于实现线偏振拉曼激光输出^[72]和获得超连续谱^[73],但是在常规波段的线偏振激光器中需要被抑制。

事实上,随机偏振光纤激光器中的 SRS 抑制方法也基本适用于线偏振光纤激光器。对于放大器,降低输入的拉曼噪声是重要的抑制方案。在之前提到的国防科技大学构造的单模-多模-单模振荡器中,采用了更粗的增益光纤,使得整个腔内的拉曼散射强度下降,能够对拉曼噪声有一定的抑制作用^[9]。另外,在随机偏振光纤激光器中采用倾斜啁啾光栅(CTFBG)的方案也具有应用到线偏振光纤激光器中的可能性^[74-76]。

种子源的时域稳定性也极大地影响了放大级中的拉曼增益。2020年,中国工程物理研究院发现在随机偏振光纤激光器中采用振荡器作为种子源的情况下,其产生的脉冲强度更大,放大级中产生的拉曼功率更高,其用于对比分析的原理图^[77]如图 19 所示。

除此以外,采用后向泵浦方案^[19]、使用非线性系数更低的光纤、控制合适的光纤长度等在常规激光器中

使用的方案也同样适用于线偏振光纤激光器中 SRS 的抑制,在此就不作展开。

5 线偏振光纤激光器的模式控制技术

5.1 概述

在高功率光纤激光器中,放大级采用的光纤一般都不是单模光纤,因此在激光放大的过程中会产生高阶模,使得输出光束质量恶化。这个过程同样存在于线偏振光纤激光器中,并且由于线性偏振光的相干性很好,所产生的模间干涉作用将更加强烈,会引发更严重的问题。

在光纤激光器中,光束质量恶化,即高阶模产生的主要原因包括热致模式耦合和外力致模式耦合,其中热致模式耦合还会导致横模不稳定性(TMI)。外力导致模式耦合的主要原因为外力的光弹效应导致光纤内部折射率分布产生差异,从而导致光纤不同位置的本征模场发生变化,产生模式耦合^[78-79]。热致模式耦合则是热致折射率变化导致的模式耦合,此过程中基模和高阶模之间可能达成模式干涉,从而产生热致折射率光栅。在动态光栅和模式干涉满足相位匹配后,能

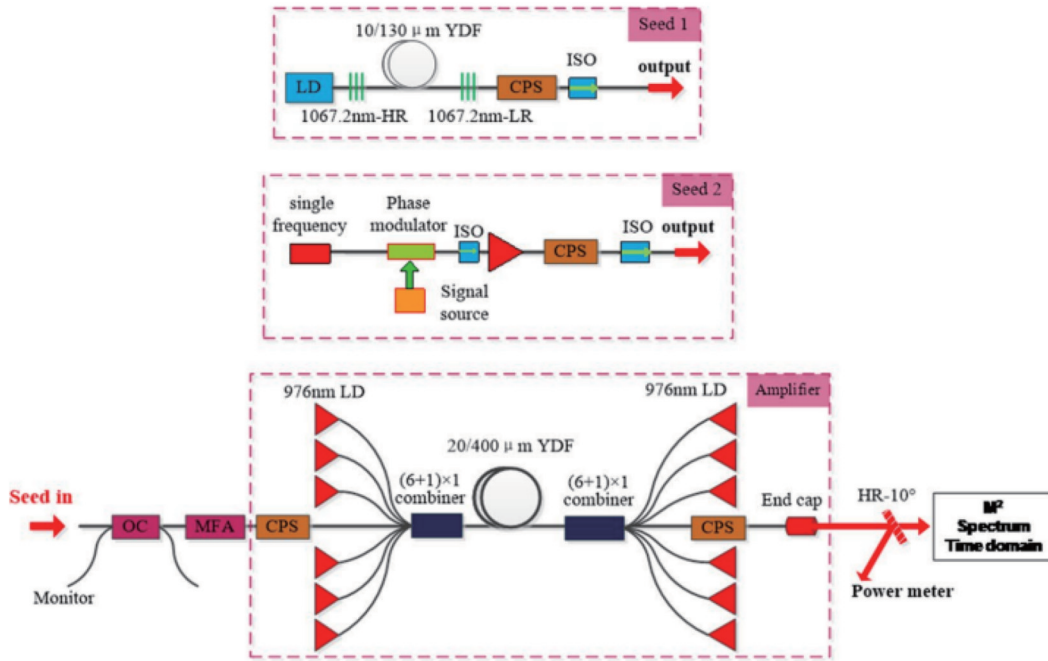


图 19 探究不同种子时域稳定度对 SRS 影响的原理图^[77]

Fig. 19 Investigation of impact on SRS under different seed time domain stability^[77]

量便能够在不同模式间流动,此时横模表现出强烈的不稳定^[80-85]。无论是哪种过程,研究模式恶化时都需要使用模式耦合方程来计算不同模式之间的能量交换^[86]。由于高阶模主要出现在放大级中,因此控制光束质量的措施一般针对激光放大过程。

5.2 模式控制技术

光纤弯曲时,不仅能够选择合适的偏振态,还可以拉开不同模式之间的损耗,图 3 所示的计算结果表明,通过弯曲可以抑制高阶模,因此光纤弯曲在随机偏振光纤激光器中应用广泛^[87]。

2017 年,国防科技大学通过将主放大级的光纤分段分别盘绕在直径为 9 cm 和 16 cm 的水冷圆柱筒

上,研究了不同盘绕方案对最终 TMI 阈值的影响。在将所有光纤盘绕在直径为 9 cm 的圆柱筒之后, TMI 阈值达到 2.43 kW 以上,表明控制主放大级的光纤弯曲能够有效优化输出光束的质量^[10],如图 20 所示。

值得注意的是,由于保偏光纤的结构与常规光纤不同,因此北京邮电大学的课题组对保偏光纤的弯曲进行了研究,通过光束传输算法计算了可能造成的光学损伤。结果表明,在弯曲半径较大的情况下,保偏光纤的弯曲与常规光纤基本没有区别,当弯曲半径降至 2 cm 时,保偏光纤损伤的概率大幅上升,且与弯曲方向无关^[88]。

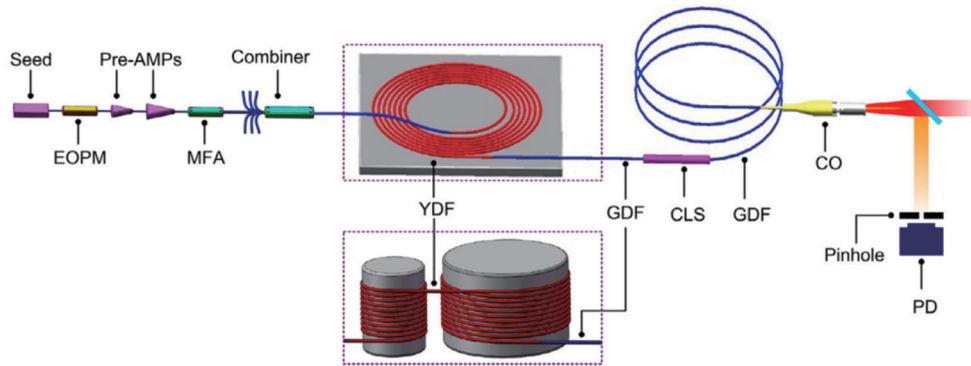


图 20 主放大器弯曲选模原理图^[10]

Fig. 20 Mode selection by coiling fiber in the main amplifier stage^[10]

对于 TMI,其主要诱因是光纤中的热积累,因此要尽量避免光纤激光放大级中的热量集中。采用双向泵浦和后向泵浦的方式,可以降低放大级中积累的热量,从而提高 TMI 的阈值。

在 2022 年国防科技大学的 3.96 kW 线偏振光纤激光器的研究中,研究团队在采用主放大器光纤盘绕的同时,测试了泵浦方案对 TMI 阈值的影响。在采用后向和前向泵浦的情况下,最终 TMI 阈值的测试结果

分别为 2.39 kW 和 1.76 kW, 如图 21 所示。根据理论仿真结果, 相比于纯后向泵浦, 双向泵浦在 TMI 抑制方面更有成效, 因此该团队最终选用双向泵浦作为主放大器的泵浦方案^[20]。

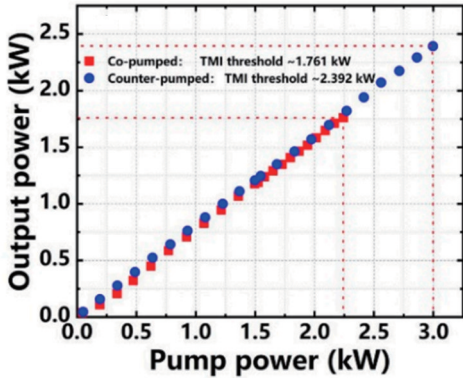


图 21 前向泵浦和后向泵浦的 TMI 阈值测试结果^[20]

Fig. 21 TMI threshold test results under forward and backward pumping^[20]

通过调节放大级的泵浦源以及提升注入种子源的功率, 也能够一定程度上抑制放大级的 TMI 效应。2019 年, 国防科技大学制备输出功率为 827 W、线宽为 1.9 GHz 的线偏振光纤激光器, 在此过程中, 通过将注入主放大器的种子源功率提升至 100 W 来提高牵引, 同时提升放大级的增益饱和, 从而提高 TMI 阈值。另外, 该团队还采用 915 nm 泵浦来进一步抑制 TMI 的发生。整套系统的原理图^[67]如图 22 所示。

除此以外, 对主放大器进行泵浦调制也可能是一个抑制 TMI 的方案。2018 年, 耶拿大学阿贝光子学中心研究发现, 在 TMI 阈值之上, 通过对泵浦功率进行调制, 可以消除模式相干形成的折射率光栅, 从而阻止模式间的能量转换, 实现光斑稳定输出。该方法利用不同泵浦功率下折射率光栅的周期及强度不同的特性, 通过使泵浦功率处于动态变化中, 可以让光栅也时刻发生变化, 在时间尺度上降低功率转换强度。该团队最终在实验中实现的结果^[89]如图 23 所示。

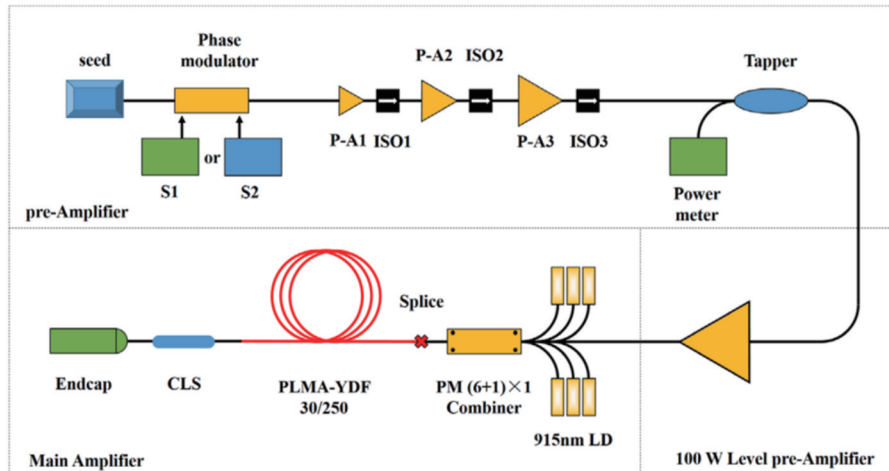


图 22 915 nm 泵浦的高功率种子源注入线偏振光纤激光器原理图^[67]

Fig. 22 915 nm LD pumped linearly polarized fiber laser with high power seed injection^[67]

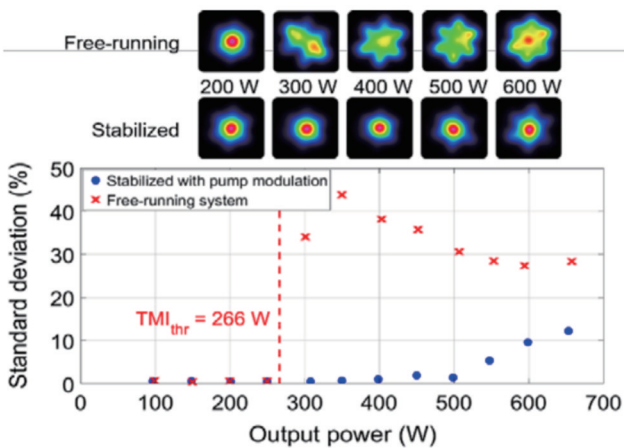


图 23 泵浦调制实现 TMI 抑制的实验结果^[89]

Fig. 23 TMI suppression by pumping modulation^[89]

6 总结与展望

线偏振光纤激光器由于其独特的偏振特性, 具有良好的应用前景, 然而线偏振的特性使其在激光放大过程中的物理过程与随机偏振光纤激光器有所区别, 其输出的功率、线宽、光束质量和偏振性均非常重要, 因此, 线偏振光纤激光器输出参数控制的相关技术成为研究热点。

为实现线偏振激光输出, 除了采用主动偏振控制外, 各级系统均需要采用保偏器件和保偏光纤, 单频调制源主要要求单频源具有高 PER, 而振荡器则需要采用垂直熔接或者盘绕选偏起振的方式实现高 PER 输出。在放大级中, 采用光纤弯曲滤除快轴光是主要措施, 辅助的方案包括降低热量、减弱热致退偏作用、主动偏振控制、被动偏振控制如起偏器, 以及设计特殊高

双折射光纤等。目前 3 kW 及以上的线偏振光纤激光器中, FOL-MOPA 结构的 PER 可以达到 11 dB 以上, 而 SFL-MOPA 结构的 PER 一般在 15 dB 以上。

在线偏振光纤激光器的线宽控制方面: 对于单频调制的种子源方案, 主要通过调节调制信号的带宽和调制技术实现 SBS 抑制和输出线宽的均衡, 同时避免自脉冲问题; 对于 FBG 振荡器的方案, 主要通过短腔法和窄线宽光栅达成压制线宽的效果, 且种子源的时域稳定性和拉曼噪声强度也对后续放大的非线性作用有显著影响。对于放大级, 在采用后向或者双向泵浦的同时增大光纤纤芯直径可以有效抑制非线性过程和 SRS 效应, 另外 CTBFG 也可以用于抑制 SRS 效应。目前对于 FOL-MOPA 结构, SRS 抑制比均在 20 dB 以上, 而 SFL-MOPA 结构的 SBS 阈值已经能控制到 4 kW 以上。

在输出光束质量的控制以及 TMI 抑制方面, 主要方案仍为采用弯曲选模来抑制高阶模的产生, 辅助方案包括提升种子源功率、选择合适的泵浦源以及对泵浦源进行调控等。目前该效应是主要限制线偏振光纤激光器功率提升的主要因素之一。

除了以上提到的相关技术在线偏振光纤激光器中得到广泛应用和验证外, 还有部分技术, 例如全光纤起偏器、泵浦调制技术等仅被运用在光纤传感或者随机偏振光纤激光器中, 这也表明为了提升线偏振光纤激光器的输出质量, 可以积极从其他领域吸取可能有用的技术。

相比于随机偏振光纤激光器, 线偏振光纤激光器最核心的要点是实现高线性偏振度激光输出。目前 FOL-MOPA 的线偏振光纤激光器的 PER 相对较低, 严重的 SRS 效应和非线性效应及其产生的热量是导致 PER 下降的主要因素, 继续优化光纤制造技术, 提升光纤双折射, 改进光纤盘绕方案, 同时降低主放大级产生的热量, 将有望提升 FOL-MOPA 结构的输出激光 PER 到 15 dB 乃至 17 dB 以上; SFL-MOPA 结构由于非线性效应不严重, 其 PER 主要受到主放大级产生热量的影响, 除优化光纤参数外, 采用同带泵浦可能是一种有潜力的优化方案, 未来 SFL-MOPA 结构的 PER 有望在 4 kW 以上突破 18 dB。

对于目前高功率线偏振掺镱光纤激光器的受限机理, 基于振荡器的线偏振光纤激光器的受限机理为 SRS 和 TMI, 而基于单频激光相位调制的线偏振光纤激光器的受限机理为 SBS 和 TMI。目前 SRS 在非线偏振光纤激光器中已有成熟的抑制手段, 移植到线偏振光纤激光器中能够有效对抗 SRS 效应; 对于 SBS 效应, 通过调制信号频率、放大级数的选择, 可实现输出激光功率稳定提升, SBS 效应能够得到有效抑制, 这对于未来的发展是一个积极的信号。然而, 目前主要的问题在于 TMI 效应, 无论何种方案, TMI 都是首要抑制功率提升的问题, 其导致当前基于振荡器的线偏振

光纤激光功率停滞在 3 kW 附近, 基于单频相位调制的线偏振光纤激光功率未冲破 4.5 kW。虽然已有手段抑制 TMI 的发生, 但抑制效果有限, 近年来, 各种方案倾向于在现有技术上进行微调, 仅能够一次将功率提升数百瓦。

鉴于当前技术状态, 为提升输出功率, 未来高功率线偏振掺镱光纤激光器的研究将会在两个方面加强: 其一, 继续优化现有技术, 如盘绕方案、光纤选择与优化、复合信号调制方法、泵浦方案等, 使输出功率能够突破 5 kW, 并同时保持较高的 PER、适当的线宽和良好的光束质量; 其二, 针对 TMI 产生机制, 探寻新的抑制技术, 可从热产生机理、模式耦合机理方面构思新的方法, 实现功率大幅提升。

综上所述, 高功率线偏振掺镱光纤激光器已经获得长足发展, 目前, 窄线宽线偏振光纤激光器的输出功率达到 4.5 kW 水平。如果能够采取一系列技术, 如合适的泵浦调制、光纤热控制、特种低非线性系数光纤以及全光纤偏振控制等, 进一步抑制线偏振光纤激光器中的非线性以及 TMI 效应, 高品质的线偏振掺镱光纤激光器输出功率还有很大的提升空间。

参 考 文 献

- [1] Yang Y, Geng C, Li F, et al. Combining module based on coherent polarization beam combining[J]. *Applied Optics*, 2017, 56(7): 2020-2028.
- [2] Zhu Y C, Li P X, Li C Y, et al. Quantizing the coherent polarization beam combination from temporal, spatial, and spectral domains[J]. *Proceedings of SPIE*, 2021, 11849: 118490E.
- [3] Park E, Oh Y, Park J, et al. Efficient second harmonic generation of a Yb fiber-based amplified stimulated emission source[J]. *Optics Communications*, 2022, 517: 128313.
- [4] Millot G, Wabnitz S. Nonlinear polarization effects in optical fibers: polarization attraction and modulation instability[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2014, 31(11): 2754-2768.
- [5] Gapontsev V, Avdokhin A, Kadwani P, et al. SM green fiber laser operating in CW and QCW regimes and producing over 550 W of average output power[J]. *Proceedings of SPIE*, 2014, 8964: 896407.
- [6] Tröbs M, Barke S, Theeg T, et al. Differential phase-noise properties of a ytterbium-doped fiber amplifier for the Laser Interferometer Space Antenna[J]. *Optics Letters*, 2010, 35(3): 435-437.
- [7] 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.
Lin A X, Xiao Q R, Ni L, et al. Domestic YDF active fiber realizes single fiber 20 kW laser output[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(9): 0916003.
- [8] Jiao K R, Shu J A, Shen H A, et al. Fabrication of kW-level chirped and tilted fiber Bragg gratings and filtering of stimulated Raman scattering in high-power CW oscillators[J]. *High Power Laser Science and Engineering*, 2019, 7(2): e31.
- [9] Jiang M, Ma P F, Huang L, et al. kW-level, narrow-linewidth linearly polarized fiber laser with excellent beam quality through compact one-stage amplification scheme[J]. *High Power Laser Science and Engineering*, 2017, 5(4): e30.
- [10] Su R T, Tao R M, Wang X L, et al. 2.43 kW narrow linewidth

- linearly polarized all-fiber amplifier based on mode instability suppression[J]. *Laser Physics Letters*, 2017, 14(8): 085102.
- [11] Platonov N, Yagodkin R, De La Cruz J, et al. Up to 2.5-kW on non-PM fiber and 2.0-kW linear polarized on PM fiber narrow linewidth CW diffraction-limited fiber amplifiers in all-fiber format[J]. *Proceedings of SPIE*, 2018, 10512: 105120E.
- [12] Wang Y S, Chang Z, Sun Y H, et al. 47 GHz narrow linewidth linear polarized fiber amplifier injected by a simple fiber oscillator laser seed source[J]. *Proceedings of SPIE*, 2018, 10811: 108110B.
- [13] 王岩山, 马毅, 孙殷宏, 等. 2.62 kW, 30 GHz 窄线宽线偏振近衍射极限全光纤激光器[J]. *中国激光*, 2019, 46(12): 1215001. Wang Y S, Ma Y, Sun Y H, et al. 2.62-kW, 30-GHz linearly polarized all-fiber laser with narrow linewidth and near-diffraction-limit beam quality[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(12): 1215001.
- [14] Chang Z, Wang Y S, Sun Y H, et al. 1.5 kW polarization-maintained Yb-doped amplifier with 13 GHz linewidth by suppressing the self-pulsing and stimulated Brillouin scattering[J]. *Applied Optics*, 2019, 58(23): 6419-6425.
- [15] Wang Y S, Ke W W, Peng W J, et al. 3 kW, 0.2 nm narrow linewidth linearly polarized all-fiber laser based on a compact MOPA structure[J]. *Laser Physics Letters*, 2020, 17(7): 075101.
- [16] Huang L, Lai W C, Ma P F, et al. Tapered Yb-doped fiber enabled monolithic high-power linearly polarized single-frequency laser[J]. *Optics Letters*, 2020, 45(14): 4001-4004.
- [17] Wang Y S, Feng Y J, Ma Y, et al. 2.5 kW narrow linewidth linearly polarized all-fiber MOPA with cascaded phase-modulation to suppress SBS induced self-pulsing[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2020, 12(3): 1502815.
- [18] Dixneuf C, Guiraud G, Bardin Y V, et al. Ultra-low intensity noise, all fiber 365 W linearly polarized single frequency laser at 1064 nm[J]. *Optics Express*, 2020, 28(8): 10960-10969.
- [19] Wang Y S, Sun Y H, Peng W J, et al. 3.25 kW all-fiberized and polarization-maintained Yb-doped amplifier with a 20 GHz linewidth and near-diffraction-limited beam quality[J]. *Applied Optics*, 2021, 60(21): 6331-6336.
- [20] Ren S A, Ma P F, Li W, et al. 3.96 kW all-fiberized linearly polarized and narrow linewidth fiber laser with near-diffraction-limited beam quality[J]. *Nanomaterials*, 2022, 12(15): 2541.
- [21] 王岩山, 彭万敬, 王珏, 等. 4.45 kW 窄线宽线偏振近单模全光纤激光器[J]. *中国激光*, 2022, 49(18): 1816003. Wang Y S, Peng W J, Wang J, et al. 4.45 kW narrow linewidth linear polarization near single mode all-fiber laser[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2022, 49(18): 1816003.
- [22] 任帅, 陈益沙, 马鹏飞, 等. 4.5 kW, 0.33 nm 近单模窄线宽保偏光纤激光器[J]. *强激光与粒子束*, 2022, 34(6): 133. Ren S, Chen Y S, Ma P F, et al. 4.5 kW, 0.33 nm near-single-mode narrow linewidth polarization-maintained fiber laser[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2022, 34(6): 133.
- [23] Liu J H, Liu Y F, Xu T H. Analytical estimation of stress-induced birefringence in panda-type polarization-maintaining fibers[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2020, 32(24): 1507-1510.
- [24] Sears F M. Polarization-maintenance limits in polarization-maintaining fibers and measurements[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1990, 8(5): 684-690.
- [25] Chu P, Sammut R. Analytical method for calculation of stresses and material birefringence in polarization-maintaining optical fiber[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1984, 2(5): 650-662.
- [26] Takada K, Okamoto K, Sasaki Y, et al. Ultimate limit of polarization cross talk in birefringent polarization-maintaining fibers[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 1986, 3(10): 1594-1603.
- [27] Tsubokawa M, Higashi T, Negishi Y. Mode couplings due to external forces distributed along a polarization-maintaining fiber: an evaluation[J]. *Applied Optics*, 1988, 27(1): 166-173.
- [28] Shi C X. Polarization coupling power in single-mode single-polarization optical fibers[J]. *Optics Letters*, 1989, 14(24): 1374-1376.
- [29] Shi C X, Okoshi T. Polarization cross talk and guided-mode coupling loss with broadband light sources in a single-polarization single-mode optical fiber[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 1993, 10(4): 583-589.
- [30] Rashleigh S C, Ulrich R, Burns W K, et al. Polarization holding in birefringent single-mode fibers[J]. *Optics Letters*, 1982, 7(1): 40-42.
- [31] Lee K S, Cho J Y. Polarization-mode coupling in birefringent fiber gratings[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2002, 19(8): 1621-1631.
- [32] Okamoto K, Hosaka T, Eda T. Stress analysis of optical fibers by a finite element method[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1981, 17(10): 2123-2129.
- [33] Takada K, Okamoto K, Noda J. Polarization mode coupling with a broadband source in birefringent polarization-maintaining fibers[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 1985, 2(5): 753-758.
- [34] Cancellieri G, Fantini P, Tilio M. Single-mode single-polarization fibers: effects of a residual polarization coupling[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 1985, 2(11): 1885-1890.
- [35] Yang F, Fang Z J, Pan Z Q, et al. Orthogonal polarization mode coupling for pure twisted polarization maintaining fiber Bragg gratings[J]. *Optics Express*, 2012, 20(27): 28839-28845.
- [36] Feldman S F, Weinberger D A, Winful H G. Polarization instability in a twisted birefringent optical fiber[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 1993, 10(7): 1191-1201.
- [37] El-Khozondar H J, Muller M S, El-Khozondar R J, et al. Polarization rotation in twisted polarization maintaining fibers using a fixed reference frame[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2009, 27(24): 5590-5596.
- [38] Malykin G B, Pozdnyakova V I. Linear transformation of the polarization modes in coiled optical spun-fibers with strong unperturbed linear birefringence. I. nonresonant transformation[J]. *Optics and Spectroscopy*, 2018, 124(3): 360-372.
- [39] Przhiyalkovskiy Y V, Starostin N I, Morshnev S K, et al. Polarization dynamics of light propagating in bent spun birefringent fiber[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2020, 38(24): 6879-6885.
- [40] Mousavi S L, Sabaeian M. Thermal stress-induced depolarization loss in conventional and panda-shaped photonic crystal fiber lasers[J]. *Brazilian Journal of Physics*, 2016, 46(5): 481-488.
- [41] Nakazawa M, Horiguchi T, Tokuda M, et al. Measurement and analysis on polarization properties of backward Rayleigh scattering for single-mode optical fibers[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1981, 17(12): 2326-2334.
- [42] Kong F T, Stolen R H, Dong L A. Quantum-defect-assisted polarization mode coupling in a fiber amplifier[C]//Conference on Lasers and Electro-Optics, June 5-10, 2016, San Jose, California. Washington, D.C.: Optica Publishing Group, 2016: SM2Q.1.
- [43] Ahmed S U, Handerek V A, Rogers A J. Phase-matched polarization coupling in high-birefringence fibers through the optical Kerr effect[J]. *Optics Letters*, 1992, 17(9): 643-645.
- [44] Winful H G. Self-induced polarization changes in birefringent optical fibers[J]. *Applied Physics Letters*, 1985, 47(3): 213-215.
- [45] Crosignani B, Daino B, Di Porto P. Depolarization of light due to the optical Kerr effect in low-birefringence single-mode fibers[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 1986, 3(8): 1120-1123.
- [46] Winful H G. Polarization instabilities in birefringent nonlinear media: application to fiber-optic devices[J]. *Optics Letters*,

- 1986, 11(1): 33-35.
- [47] Bononi A, Vannucci A, Orlandini A, et al. Degree of polarization degradation due to cross-phase modulation and its impact on polarization-mode dispersion compensators[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2003, 21(9): 1903-1913.
- [48] Huang Y S, Xiao Q R, Li D, et al. All-fiber linearly polarized laser oscillator by fiber coiling loss control[J]. *Chinese Physics B*, 2018, 27(4): 044201.
- [49] Shi W, Fang Q, Fan J L, et al. High power monolithic linearly polarized narrow linewidth single mode fiber laser at 1064 nm [C]//2015 11th Conference on Lasers and Electro-Optics Pacific Rim (CLEO-PR), August 24-28, 2015, Busan, Republic of Korea. New York: IEEE Press, 2016.
- [50] Wang Q A, Rajan G, Wang P F, et al. Polarization dependence of bend loss for a standard singlemode fiber[J]. *Optics Express*, 2007, 15(8): 4909-4920.
- [51] Huang L, Ma P F, Tao R M, et al. 1.5 kW ytterbium-doped single-transverse-mode, linearly polarized monolithic fiber master oscillator power amplifier[J]. *Applied Optics*, 2015, 54(10): 2880-2884.
- [52] Yu C X, Shatrovov O, Fan T Y, et al. Diode-pumped narrow linewidth multi-kilowatt metalized Yb fiber amplifier[J]. *Optics Letters*, 2016, 41(22): 5202-5205.
- [53] Ahmad R, Abedin K S, Yan M F, et al. Polarization-maintained propagation of a $2200 \mu\text{m}^2$ effective-area higher-order-mode in a bent optical fiber[J]. *Optics Express*, 2020, 28(6): 8400-8406.
- [54] Wu Y L, Xiao Q R, Li D, et al. Thermal induced polarization coupling in double-cladding linearly polarized fiber lasers[J]. *Optics Communications*, 2022, 512: 128036.
- [55] Qi Z N, Yin T C, Jiang X G, et al. Narrow-linewidth high-efficiency single-frequency ytterbium-doped fiber laser with highly linear polarization at 1064 nm[J]. *Applied Optics*, 2021, 60(10): 2833-2838.
- [56] Lin C H, Li Q, Lee H P. Periodic microbending-induced core-to-cladding mode coupling in polarization-maintaining fibers[J]. *Optics Letters*, 2003, 28(12): 998-1000.
- [57] Arora P, Agarwal A, Gupta A S. Simple alignment technique for polarisation maintaining fibres[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2011, 82(12): 125103.
- [58] Fu S N, Wang Y L, Cui J X, et al. Panda type few-mode fiber capable of both mode profile and polarization maintenance[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2018, 36(24): 5780-5785.
- [59] Vanvincq O, Habert R, Cassez A, et al. Polarization-maintaining and single-mode large mode area pixelated Bragg fiber[J]. *Optics Letters*, 2020, 45(7): 1946-1949.
- [60] Li H Y, Li X Y, Zhang Y, et al. Design of high birefringence stress-induced polarization-maintaining fiber based on utilizing geometrical birefringence[J]. *Optical Fiber Technology*, 2019, 53: 102065.
- [61] Stolen R. Polarization effects in fiber Raman and Brillouin lasers [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1979, 15(10): 1157-1160.
- [62] Ran Y, Tao R M, Ma P F, et al. 560 W all fiber and polarization-maintaining amplifier with narrow linewidth and near-diffraction-limited beam quality[J]. *Applied Optics*, 2015, 54(24): 7258-7263.
- [63] Ahsan A S, Agrawal G P. Vector modulation instability in birefringent graded-index multimode fibers[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2020, 38(1): 201.
- [64] Wang Y S, Peng W J, Sun Y H, et al. Effect of the number of longitudinal modes on spectral broadening in a high power fiber amplifier[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2018, 30(12): 1107-1110.
- [65] Huang Y S, Xiao Q R, Li D, et al. 3 kW narrow linewidth high spectral density continuous wave fiber laser based on fiber Bragg grating[J]. *Optics & Laser Technology*, 2021, 133: 106538.
- [66] Zha C W, Peng W J, Wang X J, et al. Self-pulsing in kilowatt level narrow-linewidth fiber amplifier with WNS phase-modulation[J]. *Optics Express*, 2017, 25(17): 19740-19751.
- [67] Meng D R, Lai W C, He X B, et al. Kilowatt-level, mode-instability-free, all-fiber and polarization-maintained amplifier with spectral linewidth of 1.8 GHz[J]. *Laser Physics*, 2019, 29(3): 035103.
- [68] Goodno G D. Linewidth narrowing of a high power polarization maintaining fiber amplifier using nonlinear phase demodulation [C]//Conference on Lasers and Electro-Optics, May 9-14, 2021, San Jose, California. Washington, D. C.: Optica Publishing Group, 2021: SM4K.1.
- [69] Ma P F, Tao R M, Su R T, et al. 189 kW all-fiberized and polarization-maintained amplifiers with narrow linewidth and near-diffraction-limited beam quality[J]. *Optics Express*, 2016, 24(4): 4187-4195.
- [70] Jauregui C, Limpert J, Tünnermann A. Derivation of Raman threshold formulas for CW double-clad fiber amplifiers[J]. *Optics Express*, 2009, 17(10): 8476-8490.
- [71] Dougherty D J, Kärtner F X, Haus H A, et al. Measurement of the Raman gain spectrum of optical fibers[J]. *Optics Letters*, 1995, 20(1): 31-33.
- [72] Song J X, Wu H S, Ye J, et al. High power linearly polarized Raman fiber laser with stable temporal output[J]. *Photonic Sensors*, 2019, 9(1): 43-48.
- [73] Ye J, Xu J M, Song J X, et al. Power scalability of linearly polarized random fiber laser through polarization-rotation-based Raman gain manipulation[J]. *Optics Express*, 2018, 26(18): 22894-22903.
- [74] Song H Q, Yan D L, Wu W J, et al. SRS suppression in multi-kW fiber lasers with a multiplexed CTFBG[J]. *Optics Express*, 2021, 29(13): 20535-20544.
- [75] Tian X, Zhao X F, Wang M, et al. Effective suppression of stimulated Raman scattering in direct laser diode pumped 5 kilowatt fiber amplifier using chirped and tilted fiber Bragg gratings[J]. *Laser Physics Letters*, 2020, 17(8): 085104.
- [76] Lin W X, Desjardins-Carrière M, Sévigny B, et al. Raman suppression within the gain fiber of high-power fiber lasers[J]. *Applied Optics*, 2020, 59(31): 9660-9666.
- [77] Wang Y S, Peng W J, Ke W W, et al. Influence of seed instability on the stimulated Raman scattering of high power narrow linewidth fiber amplifier[J]. *Optical and Quantum Electronics*, 2020, 52(4): 193.
- [78] Liu F, Cao D L, Guo X A, et al. Intermodal interference of LP₀₁ and LP₁₁ modes in panda fibers[J]. *Chinese Optics Letters*, 2012, 10(6): 60602-60605.
- [79] Schulze C, Brüning R, Schröter S, et al. Mode coupling in few-mode fibers induced by mechanical stress[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2015, 33(21): 4488-4496.
- [80] Hansen K R, Alkeskjold T T, Broeng J, et al. Theoretical analysis of mode instability in high-power fiber amplifiers[J]. *Optics Express*, 2013, 21(2): 1944-1971.
- [81] Zervas M N. Transverse mode instability, thermal lensing and power scaling in Yb³⁺-doped high-power fiber amplifiers[J]. *Optics Express*, 2019, 27(13): 19019-19041.
- [82] Tao R M, Ma P F, Wang X L, et al. Comparison of the threshold of thermal-induced mode instabilities in polarization-maintaining and non-polarization-maintaining active fibers[J]. *Journal of Optics*, 2016, 18(6): 065501.
- [83] Kong F T, Xue J W, Stolen R H, et al. Direct experimental observation of stimulated thermal Rayleigh scattering with polarization modes in a fiber amplifier[J]. *Optica*, 2016, 3(9): 975-978.
- [84] Xie L H, Zhang C, Liu Y, et al. Experimental investigation of quasi-static mode degradation in a high power large mode area fiber amplifier[J]. *Optics Express*, 2021, 29(6): 7986-7997.
- [85] Ward B. Theory and modeling of photodarkening-induced quasi

- static degradation in fiber amplifiers[J]. *Optics Express*, 2016, 24(4): 3488-3501.
- [86] Naderi S, Dajani I, Madden T, et al. Investigations of modal instabilities in fiber amplifiers through detailed numerical simulations[J]. *Optics Express*, 2013, 21(13): 16111-16129.
- [87] Schermer R T. Mode scalability in bent optical fibers[J]. *Optics Express*, 2007, 15(24): 15674-15701.
- [88] Zhai R D, Zhao H Y, Jia B N, et al. Bending induced fiber damage resistance of panda polarization-maintaining fiber[J]. *Proceedings of SPIE*, 2022, 12169: 121699D.
- [89] Jauregui C, Stihler C, Tünnermann A, et al. Pump-modulation-induced beam stabilization in high-power fiber laser systems above the mode instability threshold[J]. *Optics Express*, 2018, 26(8): 10691-10704.

Performance Control Techniques of High-Power Linearly Polarized Yb-Doped Fiber Lasers

Yan Ping^{1,2*}, Wu Yulun^{1,2}, Li Dan^{1,2}, Wang Yi³, Xiao Qirong^{1,2}, Gong Mali^{1,2}

¹Key Laboratory of Photonics Control Technology of the Ministry of Education, Department of Precision Instrument, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

²State Key Laboratory of Precision Measurement Technology and Instruments, Department of Precision Instrument, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

³Weiyang College, Tsinghua University, Beijing 100084, China

Abstract

Significance Compared with conventional optical fiber lasers, linearly polarized fiber lasers are widely used in coherent detection, coherent combination, polarization combination, and nonlinear frequency transformation. Therefore, linearly polarized fiber lasers have received special attention in recent years. Although the power of linearly polarized fiber lasers has been significantly improved in recent years, its power level is still far from that of randomly polarized fiber lasers. Because of the polarization characteristics of the linearly polarized fiber laser, its nonlinear effect and thermal effect are different from those of conventional lasers, and polarization deterioration needs to be considered additionally. Therefore, the spectrum, polarization, and beam quality of the output laser need to be strictly controlled in the process of boosting power. In recent years, the power boosting process of linearly polarized fiber lasers mainly includes two types of system structures. One based on an oscillator stage and amplifier stage is called FOL-MOPA, and the other based on a phase-modulated single-frequency laser and amplifier stage is called SFL-MOPA. The output power of these two configurations has reached more than 3 kW and even more than 4 kW for SFL-MOPA. In the process of power breakthrough, a series of problems that will lead to the deterioration of output parameters should be dealt with. In recent years, various research teams have accumulated many effective methods.

Progress Firstly, in terms of spectral control and spectral linewidth control, stimulated Brillouin scattering (SBS) suppression and stimulated Raman scattering (SRS) suppression are mainly considered in linearly polarized fiber lasers. According to the difference in system structures, the nonlinear problems in SFL-MOPA and FOL-MOPA structures are different. Because there is no phase control in the FOL-MOPA structure, the spectral linewidth in the amplifier stage will be naturally broadened by self-phase modulation (SPM), cross-phase modulation (XPM), and four-wave mixing (FWM), so the SBS effect will hardly occur unless the linewidth is too narrow. Since the SBS effect is weakened, and SRS gain has obvious polarization-dependent characteristics, the SRS effect is particularly prominent in the FOL-MOPA structure. To solve this problem, various teams have explored methods such as controlling seed source structure to suppress Raman noise, utilizing Raman filtering instruments, adopting a backward pumping scheme, and designing gain fiber, which can suppress the SRS effect to some extent. In addition, the SFL-MOPA structure suppresses the linewidth broadening of the amplifier stage through phase modulation, which results in a serious SBS process. In order to suppress this process, designing seed source modulation signals, adjusting the number of modulation stages, injecting composite signals, and inventing special optical fibers can be effective.

Secondly, in view of the polarization deterioration in the amplification process of linearly polarized fiber lasers, there have been intermittent studies since the invention of polarization-maintaining fibers. Although polarization-maintaining fibers have natural high birefringence, they are limited by fabrication and environment. Under the interference of internal and external factors such as temperature, external force, and nonlinearity, a decline in polarization-maintaining ability is inevitable. In addition, its fast axis and slow axis can both support the operation of linearly polarized lasers, so polarization

mode selection is needed. Linearly polarized fiber laser seed source is the basis for realizing high-power linearly polarized fiber lasers. For the FOL-MOPA structure, the main schemes include winding gain fiber to select modes in slow axis and vertical splicing of gain fiber and fiber grating. For the SFL-MOPA structure, the technology of realizing an mW-level seed source with high polarization extinction ratio (PER) is mature at present. In fact, the focus of polarization control is on the amplifier stage. Because of the large heat generated by the amplifier stage, the birefringence of polarization-maintaining fibers will decrease, resulting in intensified mode coupling, so reducing heat generation is a major control method. In addition, bending mode selection, active polarization control, fiber polarizers, or special polarization-maintaining fibers are also proposed to deal with polarization deterioration.

Finally, linearly polarized fiber lasers will suffer from more serious mode deterioration and transverse mode instability (TMI) effects. The suppression methods are the same as that of conventional fiber lasers in both system configurations. The main methods include increasing high-order mode loss, using a bidirectional pumping scheme to disperse heat, improving seed power with high beam quality, using a special pumping source, etc. However, the research on the TMI effect is still controversial at present, so the related theoretical and experimental research needs to be improved.

Conclusions and Prospects Apart from polarization control, the spectral control and mode control schemes of linearly polarized fiber lasers are similar to those of conventional fiber lasers. In fact, all the methods mentioned in this paper are used in conventional fiber lasers, but not all the technologies used in conventional fiber lasers are applied to linearly polarized fiber lasers, so linearly polarized fiber lasers have a broad exploration space. In terms of polarization control, the current research is mainly limited by fiber structure and fiber control. If the research idea can be extended to the optical fiber device and system structure, more discoveries can be made.

Key words linearly polarized fiber lasers; polarization extinction ratio; Yb-doped fiber; spectrum control; beam quality