

高功率级联抽运掺镱光纤激光器研究进展

肖 虎, 冷进勇*, 周 朴, 张汉伟, 许将明, 吴 坚, 刘泽金

国防科学技术大学光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073

摘要 针对半导体抽运的掺镱光纤激光器功率进一步提升面临的主要问题, 分析了级联抽运方案在实现更高功率输出方面的优势和不足。简要回顾了光纤级联抽运技术的发展历程, 重点介绍了掺镱光纤激光级联抽运的关键技术、研究现状和最新进展。针对级联抽运面临的抽运吸收和非线性效应问题, 分析了下一步的研究方案和技术路线。并对级联抽运技术有望获得的新应用进行了简要介绍。

关键词 激光器; 高功率光纤激光器; 级联抽运; 功率提升; 非线性效应

中图分类号 TN248.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201744.0201007

High Power Tandem-Pumped Yb-Doped Fiber Laser

Xiao Hu, Leng Jinyong, Zhou Pu, Zhang Hanwei, Xu Jiangming, Wu Jian, Liu Zejin

*College of Optoelectronic Science and Engineering, National University of Defense Technology,
Changsha, Hunan 410073, China*

Abstract In view of the principal limiting factors of semiconductor pump fiber laser for power raising, the advantages and disadvantages of tandem pump in the aspect of high power output are analyzed. The development of tandem pump scheme is briefly reviewed. The key techniques, research status and the latest progress of tandem pump Yb-doped fiber laser are presented in detail. In view of the tandem pump absorption and nonlinear effect, the next step research scheme and technical route are analyzed. The new application of tandem pump technology is briefly introduced.

Key words lasers; high power fiber laser; tandem pump; power raising; nonlinear effect

OCIS codes 140.3510; 140.3615; 140.3280; 190.5650

1 引 言

光纤激光器是指以光纤为增益介质的激光器。在世界上第一台激光器诞生后不久(1964年), 研究者便尝试以掺杂稀土元素的光纤作为激光器的增益介质^[1]。通过在光纤中掺杂不同元素的离子, 如钕、镱、钪、铥、铱、铟等, 来获得相应波段的激光输出^[2-6]。但早期的光纤激光器并非全光纤结构, 其抽运光需通过透镜系统耦合入掺杂光纤中^[1-3]。由于存在空间光学元件, 使得此时的光纤激光器在稳定性和可靠性方面相比固体激光器并无明显优势。随着光纤耦合半导体激光器(LD)的发展和光纤光栅、光纤合束器等器件研发工艺水平的提高, 光纤激光器的结构实现了全光纤化。全光纤化的光纤激光器结构更加紧凑, 对工作环境中的振动等干扰因素不敏感, 大大提高了激光器运行的稳定性和可靠性。正是由于光纤激光器转换效率高、结构紧凑、可靠性好, 光束质量优良等优势, 使其广泛应用于工业和国防等领域^[4-6]。近年来, 工业和国防领域对激光器输出功率的迫切需求推动了国内外大量研究机构对高功率光纤激光器的研究。

1.1 高功率光纤激光器的发展

掺稀土离子光纤激光器通常以 LD 为抽运源。光纤激光器和 LD 几乎出现在同一时间, 但由于将低亮

收稿日期: 2016-10-19; 收到修改稿日期: 2016-11-30

基金项目: 国家自然科学基金(61322505, 61405253)、教育部新世纪优秀人才支持计划

作者简介: 肖 虎(1986—), 男, 博士, 讲师, 主要从事高功率光纤激光器方面的研究。E-mail: xhwise@163.com

* 通信联系人。E-mail: lengjy@sina.com

度的半导体激光耦合入直径仅几个微米的纤芯中较为困难,因此光纤激光器在很长时间内只能实现较低功率的激光输出。1988年,Snitzer等^[7]提出了基于双包层光纤的抽运技术,改变了光纤激光器输出功率不高的局面。双包层光纤结构上分为纤芯、内包层和外包层三部分^[6]。外包层折射率低于内包层,因此满足全反射条件的抽运光可在内包层中传输。内包层的直径和数值孔径(NA)更大,便于高效率地耦合进更高功率的抽运光。包层抽运技术使光纤激光器输出功率实现了由毫瓦级到瓦量级的提升。1994年,Pask等^[8]首次实现了掺镱光纤的包层抽运,实验中得到了最高输出功率为0.5 W的1040 nm激光。1999年,Dominic等^[9]利用包层抽运实现了110 W的单模连续激光输出,使光纤激光器的输出功率突破了百瓦。但由于双包层光纤和LD制造工艺的限制,在此后几年里掺镱光纤激光的输出功率增长迟缓^[10]。随着9xx nm高功率LD和双包层光纤制造工艺的进一步发展,掺镱光纤激光器的输出功率再次迅速提升。2003年,南安普敦大学的Jeong等^[11]实现了世界上第一个千瓦级光纤激光输出。目前国内外许多机构都报道了基于LD抽运方案的千瓦乃至数千瓦的光纤激光器^[12-14]。与其他稀土离子相比,镱离子具有能级结构简单,无激发态吸收等特点,使得利用掺镱光纤更容易实现高功率输出^[5]。目前,掺镱光纤激光器的最高输出功率比其他掺稀土光纤离子激光器功率高1~2个量级^[6]。

1.2 光纤激光器功率提升面临的主要问题

2008年,Dawson等^[15]通过理论分析预言,LD抽运的单模掺镱光纤激光输出功率上限为36 kW,表明目前掺镱光纤激光器仍有巨大的功率提升空间。但事实上,LD直接抽运的掺镱光纤激光器近十年功率增长缓慢,多个瓶颈因素共同制约了光纤激光器功率的提升。

从掺镱光纤激光器发展历程中可以发现,抽运光亮度是限制光纤激光器功率提升的首要因素^[6]。在光纤的几何参数和数值孔径一定的前提下,抽运光亮度首先限制了可注入增益光纤的抽运光功率,进而决定了光纤激光器的功率提升能力。当LD的工艺水平受限,亮度无法明显改善时,LD直接抽运的光纤激光器输出功率将难以得到有效提升。

随着光纤激光器功率的增加,非线性效应对输出功率的限制愈发明显。对于宽谱光纤激光器而言,最主要的非线性效应为受激拉曼散射(SRS)效应^[15]。SRS使得部分激光功率通过拉曼频移转移到更长波段,不仅降低了激光器的转换效率,而且反向传输的拉曼光易造成光纤器件的损坏,严重影响系统的稳定性。

增益光纤内的热负荷是限制其功率提升的另一个主要因素。掺镱光纤激光器内热负荷的主要来源是激光跃迁产生的量子亏损^[15]。以976 nm抽运光转换为1080 nm激光为例,产生的量子亏损约为9.6%,即约9.6%的抽运光能量最终转换为光纤内的热负荷,此外能级间的无辐射跃迁和光纤的背景损耗使热负荷进一步增加。纤芯内的热量沉积使光纤温度随抽运功率的增加而不断升高,有可能引起涂覆层材料的老化或损伤^[6]。近年来,高功率光纤激光器内与热负荷相关的另一种效应——热致模式不稳定,引起了高功率光纤激光研究者的密切关注^[16-20]。热致模式不稳定在宏观上表现为当输出激光达到某一阈值功率时,激光光束质量发生明显退化。热致模式不稳定是光波场和折射率调制相互作用的结果,折射率调制由温度场导致,而温度场与光纤内的增益分布有关。模式不稳定产生的根源是热效应,而量子亏损是高功率掺镱光纤激光中最主要的热源^[19]。研究表明,热致模式不稳定阈值随纤芯直径和数值孔径的增加而降低^[20]。热致模式不稳定使纤芯内的基模激光转换为含有相当部分高阶模的激光,导致光束质量退化,限制光纤激光的实际应用。

增益光纤的光子暗化效应是影响高功率光纤激光器稳定性的一个重要因素。光子暗化效应表现为激光器输出功率随工作时间的增加而逐渐下降^[21]。光子暗化的速率与激光上能级反转粒子数呈正相关,上能级反转粒子数越多,光子暗化速率越快^[22]。

此外,光纤器件的承受功率也是限制光纤激光器功率提升的实际因素。在上述诸多因素的共同制约下,由LD直接抽运的单模光纤激光器输出功率仍未突破10 kW。国际上目前功率最高的光纤激光器(>10 kW)则是采用了级联抽运方案实现的^[23]。

2 掺镱光纤激光级联抽运技术基本概念

级联抽运又被称作二次抽运,其基本过程可由图1描述。与常规的一次抽运(如LD直接抽运)产生目

标激光(λ_s)输出不同,级联抽运方案首先使用波长为 λ_p (或其他波长)的抽运光进行第一次抽运,获得波长为 λ_m 的激光;与激光波长范围有关, λ_m 激光既可由掺稀土离子激光器产生,也可由其他类型激光器(如拉曼激光器)产生。波长为 λ_m 的激光作为抽运源进行第二次抽运产生目标激光(λ_s)。

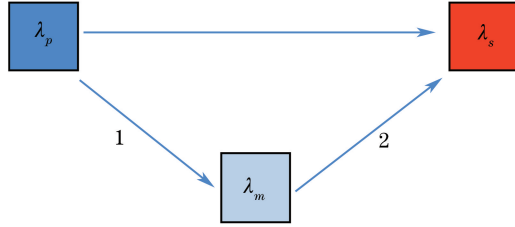


图 1 级联抽运方案示意图

Fig. 1 Schematic of tandem pump

与 LD 直接抽运相比,级联抽运主要有两方面的优势,首先是抽运源亮度显著提高。以光纤激光器为例,光纤输出激光的亮度 B 可表示为^[24]

$$B = \frac{P}{\pi^2 a^2 (NA)^2}, \quad (1)$$

式中 P 表示输出功率, a 为光纤的纤芯半径, NA 为纤芯数值孔径。以目前商品化的 9xx nm 高功率 LD 为例^[25-26],其光纤的典型参数为:纤芯直径为 105 μm ,纤芯 NA 为 0.22,输出功率小于 200 W。而一个 100 W 的光纤激光器输出光纤的典型参数为:纤芯直径为 10~15 μm ,数值孔径为 0.08。因此两者的亮度分别为 $0.16 \text{ W}/(\mu\text{m}\cdot\text{sr})^2$ 和 $63.3 \text{ W}/(\mu\text{m}\cdot\text{sr})^2$ 。在相同功率水平下,光纤激光的亮度比 LD 的亮度高 2~3 个量级。当使用光纤激光进行二次抽运时,抽运光亮度的提升,大幅提高了可注入双包层光纤的抽运光功率,有效缓解了 LD 抽运功率不足对激光器功率的限制。

级联抽运的另一个优势是可有效缓解光纤内的热负荷。与 LD 直接抽运相比,二次抽运时抽运光与信号光波长更加接近,降低了激光转换过程中的量子亏损。以 IPG 公司的 10 kW 光纤激光器为例^[23],二次抽运时的抽运光和输出激光波长分别为 1018 nm 和 1070 nm,对应的量子亏损为 5%,约为 976 nm LD 直接抽运时的 55%。量子亏损的减少可有效降低增益光纤内的热负荷,减轻热管理的压力并提高激光器的效率。与此同时,减少量子亏损还可有效提高热致模式不稳定阈值^[20]。此外理论分析表明,级联抽运还可降低光子暗化速率,延长增益光纤的使用寿命^[22]。

2009 年,IPG 公司公布了基于级联抽运方案的 10 kW 掺镱光纤激光器,充分展示了级联抽运方案在实现高功率输出方面的巨大优势。但事实上,级联抽运并非近几年才出现的新技术,自 20 世纪 90 年代以来,级联抽运技术便在光纤激光器中得到了应用。1993 年,为解决掺铒光纤抽运源亮度不高的问题,英国南安普敦大学的 Minelly 等^[27]使用 808 nm 的 LD 抽运双包层掺铒光纤,获得了 1053 nm 的激光,然后使用 1053 nm 的激光抽运掺铒共掺光纤。这是国际上首次公开报道的级联抽运方案。由于级联抽运方案在提高抽运光亮度方面的优势,因此在掺铒、掺铊、掺钕等光纤激光器中得到了广泛应用,国内外有大量文献对其进行了相关报道^[28-31],本文不再赘述。但有关掺镱光纤激光级联抽运的报道相对较少,近年来随着抽运源亮度等因素对输出功率的限制,级联抽运方案在高功率掺镱光纤激光器中的应用受到了密切关注。

3 掺镱光纤激光级联抽运关键技术及最新进展

对于掺镱光纤激光器,级联抽运在有效缓解抽运光亮度和热效应等对输出功率限制的同时,又引入了一系列问题,限制了其在高功率掺镱光纤激光器中的广泛应用。级联抽运方案需选择合适波长的激光进行二次抽运,若二次抽运激光的波长偏离镱离子的吸收峰,则将大大降低抽运光吸收系数。吸收系数的降低意味着需要增加掺镱光纤的长度、抽运光填充因子或掺杂浓度等以保证抽运光的充分吸收,但同时将不可避免地带来非线性效应阈值降低、光束质量退化等问题。

图 2 所示为镱离子在硅酸盐玻璃光纤中的典型吸收和发射截面曲线。镱离子在 976 nm 附近吸收系数最大,但高亮度的 976 nm 激光难以获得。在已知的诸多掺稀土离子光纤中,掺镱光纤是唯一能够产生

976 nm附近激光的增益介质。但掺镱光纤中产生 976 nm 激光极易伴随出现 1030~1060 nm 波段的寄生振荡,严重影响激光器的稳定性。2008 年,德国耶拿大学^[32]和法国德布罗意大学^[33]几乎同时报道了 977 nm 光纤激光器,输出功率为 94 W。但激光器增益介质为光子晶体光纤,未实现全光纤化。迄今为止,全光纤结构 980 nm (970~980 nm 波段)光纤激光最高输出功率仅为 5.5 W^[34]。

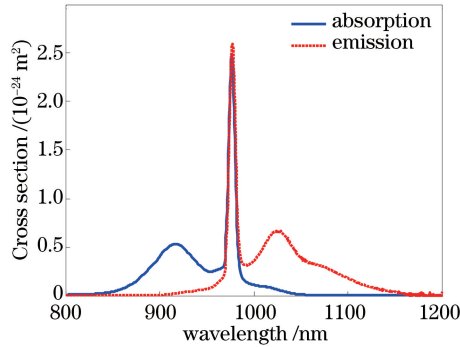


图2 镱离子在硅酸盐玻璃中的吸收发射截面

Fig. 2 Absorption and emission cross section of ytterbium ions in aluminosilicate host

镱离子的另一个吸收峰位于 915 nm 附近,且从图 2 中可知,镱离子在 900~970 nm 附近的吸收截面变化较小,因此可利用此波段的高亮度激光二次抽运掺镱光纤。目前已知掺镱增益介质可以产生 930~950 nm波段的激光,但钕离子的能级结构较为复杂,930 nm波段激光在与 1060 nm 和 1320 nm 放大自发辐射(ASE)的增益竞争中处于劣势,导致激光器效率较低^[35-37]。目前,全光纤结构的掺钕光纤激光器在 930 nm波段的最高输出功率仅为 2.7 W^[37]。受限于目前的功率水平,难以进行千瓦以上的级联抽运。此外,利用此波段激光抽运掺镱光纤还存在量子亏损较大的问题。

在难以获得高亮度的 976 nm 和 915 nm 波段激光的前提下,需考虑其他波长的激光作为抽运源。当掺镱增益介质以四能级方式运转时,其发射谱可覆盖 1000~1200 nm 的波长范围^[2]。目前掺镱光纤激光器的工作波长通常位于 1064~1080 nm 之间^[6],因此选择 1000~1060 nm 波段的激光进行二次抽运具有低量子亏损、高转换效率的优势。但镱离子对该波段激光的吸收较弱。1000~1060 nm 波段的激光可由 9xx nm 的 LD 直接抽运掺镱光纤产生。由于吸收发射截面的差异,1000~1030 nm 短波长激光的产生面临 ASE 的增益竞争。为抑制短波长激光器中的 ASE 和寄生振荡,通常需要缩短掺镱光纤长度,即以降低激光器效率为代价,且波长越短,激光器效率越低^[38]。合理选择用于二次抽运的光纤激光波长,不仅可提高激光器总体效率,还有利于缓解非线性效应的限制。以 1010 nm 和 1040 nm 光纤激光分别抽运掺镱光纤为例,1040 nm 更接近镱离子的发射谱峰值,因此 1040 nm 激光器的效率明显高于 1010 nm,并且 1040 nm 抽运时的量子亏损更小,光-光转换效率更高。但镱离子在 1010 nm 的吸收系数更高,在光纤长度相同时,1010 nm 的吸收效率更高。

文献^[38]在综合考虑了抽运光激光器效率、非线性效应等因素的前提下,定量计算得出级联抽运的最优波长位于 1020nm 附近。文献^[39]以激光器效率和光束质量为评价依据,通过仿真得出最优抽运波长位于 1020~1030 nm 附近。需要说明的是,最优抽运波长的确定与所使用掺镱光纤的吸收发射截面等参数取值有关。

3.1 短波长掺镱光纤激光器

由图 2 可知,镱离子在 980~1200 nm 波段的吸收截面随波长减小而增大,即产生短波长的激光需要更高的上能级粒子数,使得其他波长的自发辐射可获得较高的增益产生寄生振荡^[40]。在 2010 年之前,有关 1 μm波段短波长光纤激光的报道较少,且功率水平相对较低。1992 年,Allain 等^[41]利用波长为 910 nm 的 LD 抽运氟化物掺镱光纤,获得了功率为 100 mW 的 1020 nm 激光,光光转换效率为 63%。1993 年,Allain 等^[42]又利用波长为 850 nm 的钛宝石激光器抽运单包层掺镱光纤,产生了功率为 200 mW 的 1019 nm 激光,光光转换效率为 40%。1994 年,Pask 等^[43]以双包层掺镱光纤为增益介质,搭建了波长为 1020 nm 全光纤激光器。激光器的最大输出功率约为 400 mW,光光效率为 42%。2001 年,Kurkov 等^[44]报道了功率为

1.5 W的 1020 nm 激光器。激光器为全光纤结构,利用全玻璃双包层掺镱光纤作为增益介质,激光器斜率效率为 65%。2006 年,Seifert 等^[45]利用液氮冷却掺镱光纤,以增加镱离子在 1010 nm 附近的发射截面,采用这种方案,获得了功率大于 5 W 的 1014.8 nm 光纤激光,激光器的斜率效率为 33%。

近年来,在级联抽运应用需求的推动下,国内外多家研究机构开展了高功率短波掺镱光纤激光器理论和实验研究。研究表明,可采用增大掺镱光纤的纤芯包层比、缩短光纤长度、提高光栅反射率、减少光纤端面反馈等方法抑制 1030~1040 nm 附近的 ASE,以确保短波长激光器高效、稳定运行^[46-58]。表 1 所示为近 5 年国际上具有代表性的研究结果。目前文献中公开报道的短波长掺镱光纤激光器最高输出功率已接近 500 W,经功率合束后可提供数十千瓦的抽运能力^[52]。

表 1 短波长高功率掺镱光纤激光器研究进展

Table 1 Progress on high power, short wavelength, ytterbium doped fiber laser

Time	Affiliation	Structure	Wavelength /nm	Output power /W	Fiber geometric / μm	Ref.
2012	National University of Defense Technology, China	Monolithic oscillator	1018	85	15/130	[46]
		Monolithic amplifier	1018	113	30/250	
2013	Johannes Gutenberg-Universität, Germany	Bulk optics based amplifier	1015	10	25/400	[47]
2013	National University of Defense Technology, China	Monolithic oscillator	1018	309	30/250	[48]
2014	Friedrich-Schiller-Universität Jena, Germany	Monolithic amplifier	1009	146	90/283(PCF)	[49]
2015	National University of Defense Technology, China	Monolithic oscillator	1018	107.5	10/125	[50]
2015	China Academy of Engineering Physics	Monolithic oscillator	1018	155	15/130	[51]
2015	National University of Defense Technology, China	Monolithic oscillator	1018	476	30/250	[52]
2015	Clemson University, USA	Bulk optics based oscillator	1008~1020	52	50/420	[53]
2015	Soreq NRC, Israel	Monolithic oscillator	1018	230	10/125	[54]
2015	Laser Zentrum Hannover, Germany	Monolithic oscillator	1018	200	10/125	[55]
2015	DSO National Laboratories, Singapore	Monolithic oscillator	1018	403	25/250	[56]
2016	Beijing Oriental Sharp Laser Technology Co. LTD, China	Monolithic oscillator	1018	254	Unknown	[57]
2016	China Academy of Engineering Physics	Monolithic amplifier	1030	1010	25/400	[58]

3.2 高功率级联抽运

图 3 所示为 IPG 公司的 10 kW 激光器结构示意图^[59]。激光器为主振荡功率放大(MOPA)结构,种子激光器输出功率为 1 kW,中心波长为 1070 nm。放大级的抽运源为 47 个功率为 270 W 的 1018 nm 的光纤激光器,由 LD 抽运掺镱光纤产生。放大级的最高输出功率为 10.5 kW。由于 1018 nm 和 1070 nm 对应镱离子的同一条能带^[1],此方案又被称作同带抽运或带内抽运方案。需要说明的是,IPG 公司在放大级使用的掺镱光纤并非普通双包层光纤,而是抽运/增益一体化光纤。合束后的 1018 nm 激光由侧面耦合进入增益光纤。2012 年 6 月,IPG 公司在 Laser Optics 会议上报道了功率为 17 kW 的光纤激光器^[60]。利用多束 1018 nm 光纤激光抽运纤芯为 50 μm 的掺镱光纤,将功率为 4 kW 种子激光放大到了 17 kW。相关资料表明,目前 IPG 公司千瓦以上的光纤激光器均采用级联抽运的方式实现^[6],但 IPG 公司并未公布其技术细节。

在 IPG 公司公布了其 10 kW 激光器方案后,国际上已有多家研究机构研制出了高亮度的抽运源,但有关级联抽运的实验报道却较少。二次抽运时抽运激光的吸收效率是高功率级联抽运需要解决的另一个关键

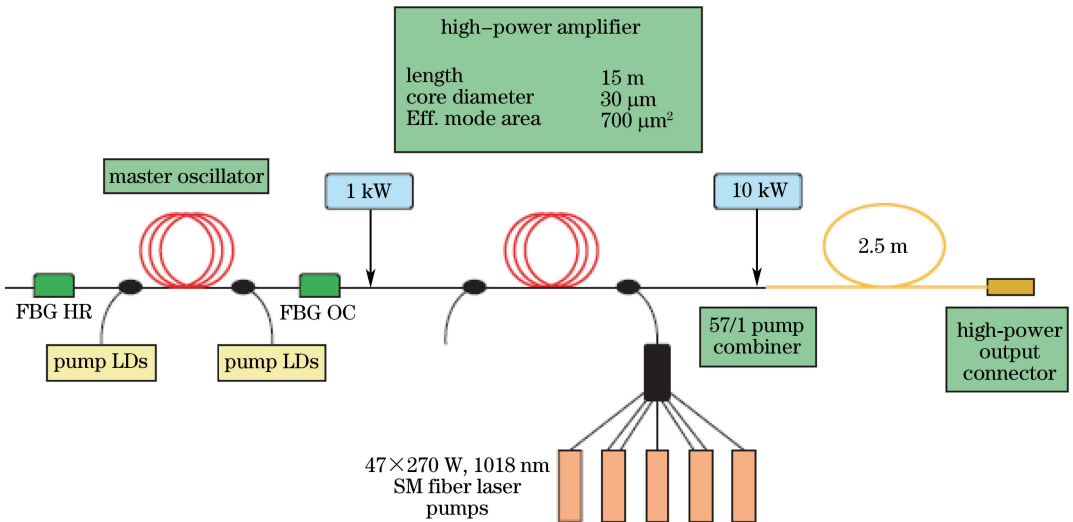


图 3 IPG 公司 10 kW 光纤激光器结构图^[60]

Fig. 3 Schematic of 10 kW fiber laser developed by IPG corporation

问题。以 1018 nm 激光级联抽运掺镱光纤为例，镱离子在 1018 nm 的吸收截面比其在 976 nm 吸收截面低约 1 个量级，基于 9xx nm 抽运光设计的常规掺镱光纤直接应用于高功率级联抽运，将面临吸收不充分的问题。

2011 年本课题组首次公开报道了级联抽运实验研究。功率为 566 mW 的 1018 nm 激光经波分复用器 (WDM) 注入长为 8.5 m 单模掺镱光纤中，得到的 1064 nm 信号光功率为 385 mW，斜率效率为 80%^[61]。2012 年南安普敦大学报道了全光纤结构的纤芯级联抽运实验结果^[62]。使用 1020 nm 光纤激光抽运掺镱光纤，将 1040 nm 种子光放大到了 2.5 W，斜率效率大于 95%，接近斯托克斯效率极限。2013 年，本课题组又使用双包层光纤进行了纤芯抽运的实验研究^[63]。单模的 1018 nm 和 1080 nm 激光经 WDM 注入长为 4 m 掺镱光纤中，获得了 18.6 W 的 1080 nm 激光输出。2016 年，德国汉诺威激光中心报道了基于纤芯级联抽运的单频光纤放大器^[64]。高亮度的 1018 nm 激光经波分复用器注入长度为 1.25 m 的双包层光纤中 (纤芯和包层直径分别为 10 μm 和 125 μm)，将功率为 15 W 的单频种子光放大到了 158 W，斜率效率为 86%。在上述实验中，为增强抽运吸收，均采用了纤芯抽运方案。但受限于当前 WDM 的承受功率及单台 1018 nm 激光器功率水平，难以实现千瓦级的功率输出。目前，高功率的级联抽运仍需立足于包层抽运。

2011 年德国耶拿大学公开报道了高功率包层级联抽运实验^[65]。将 1030 nm 盘片激光注入大模场光子晶体光纤，实现了 1071 nm 种子光的高功率放大。实验中受限于光子晶体光纤的功率承受能力，得到了最高功率为 1000 W 的 1071 nm 激光输出，斜率效率为 73%。耶拿大学还使用特制的大模场双包层掺镱光纤

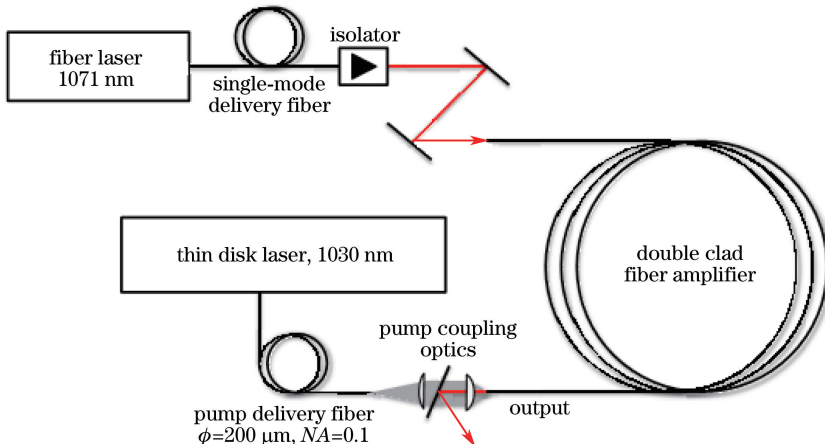


图 4 耶拿大学 2.9 kW 级联抽运光纤激光器实验装置^[65]

Fig. 4 Experimental setup of 2.9 kW tandem pump fiber laser by the Friedrich-Schiller Universität Jena

进行了级联抽运实验。掺镱光纤的纤芯和内包层直径分别为 $30\ \mu\text{m}$ 和 $100\ \mu\text{m}$ ，抽运光在波长 $976\ \text{nm}$ 处的吸收系数为 $28\ \text{dB/m}$ 。实验中掺镱光纤长度为 $12\ \text{m}$ ，抽运光吸收效率为 93.6% 。当注入 $1030\ \text{nm}$ 激光功率为 $4\ \text{kW}$ 时，产生了功率为 $2.9\ \text{kW}$ 的 $1071\ \text{nm}$ 激光输出。同年，德国斯图加特大学也利用 $1030\ \text{nm}$ 盘片激光器进行了高功率同带抽运实验研究^[66]，使用了与耶拿大学实验中相同的大模场双包层掺镱光纤。当注入抽运光功率为 $1264\ \text{W}$ 时，获得了功率为 $1008\ \text{W}$ 的 $1087\ \text{nm}$ 激光输出，光光转换效率为 80% ，输出光束质量因子 $M^2=2.4$ 。需要指明的是，这两个研究机构报道的级联抽运光纤激光器均为空间结构，抽运光和信号光需通过透镜系统注入掺镱光纤。

2015 年，本课题组报道了全光纤结构的高功率级联抽运光纤放大器，如图 5 所示^[53]。放大器抽运源为 $1018\ \text{nm}$ 光纤激光器，输出光纤为双包层光纤，纤芯和内包层直径分别为 $30\ \mu\text{m}$ 和 $250\ \mu\text{m}$ 。 $1090\ \text{nm}$ 种子激光和 $1018\ \text{nm}$ 抽运光经 $(6+1)\times 1$ 合束器注入特制的双包层掺镱光纤。为增加纤芯包层比以提高抽运光吸收系数，掺镱光纤的纤芯和内包层直径分别设计为 $30\ \mu\text{m}$ 和 $200\ \mu\text{m}$ 。低功率下测得 $1018\ \text{nm}$ 包层吸收系数约为 $0.5\ \text{dB/m}$ 。实验中使用了长为 $40\ \text{m}$ 掺镱光纤以充分吸收 $1018\ \text{nm}$ 抽运光。当注入掺镱光纤的 $1018\ \text{nm}$ 激光总功率为 $2375\ \text{W}$ 时，放大器输出的 $1090\ \text{nm}$ 激光功率为 $2140\ \text{W}$ （其 $M^2=1.9$ ）。放大器光光转换效率为 85.5% ，输出光谱中未观察到自发拉曼，表明非线性效应不是限制功率进一步提升的首要因素。由于级联抽运过程中量子亏损小，有效缓解了掺杂光纤内的热负荷。当放大器输出功率为 $2140\ \text{W}$ 时，掺镱光纤最高温度低于 $35\ ^\circ\text{C}$ （ $18\ ^\circ\text{C}$ 传导冷却）。

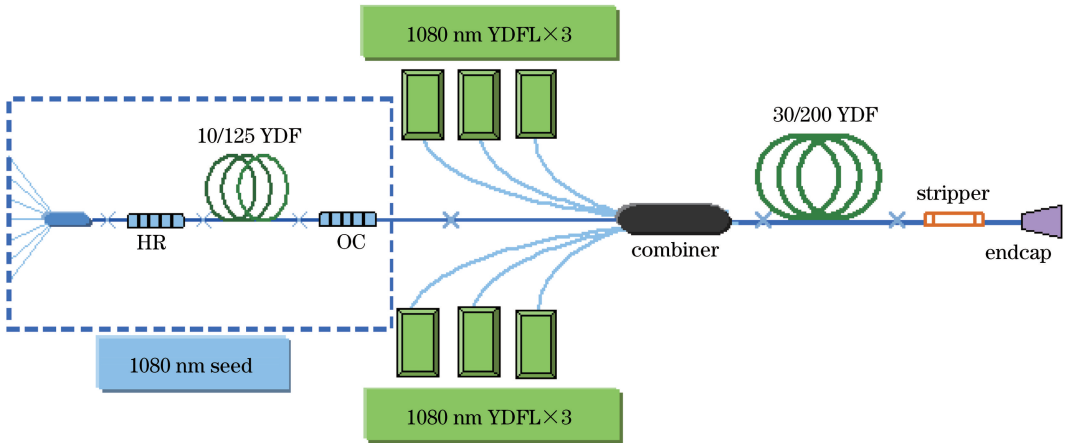


图 5 国防科大全光纤结构级联抽运光纤激光器

Fig. 5 All fiber tandem pump fiber laser demonstrated by NUDT

近期，本课题组又进行了更高功率的级联抽运实验研究。实验中通过功率合束的方式提高抽运光功率。放大级抽运源为 24 台 $1018\ \text{nm}$ 光纤激光器（纤芯和内包层直径分别为 $15\ \mu\text{m}$ 和 $130\ \mu\text{m}$ 的双包层光纤作增益）。 $1018\ \text{nm}$ 激光首先经 4×1 功率合束器耦合入多模光纤（纤芯和包层直径分别为 $105\ \mu\text{m}$ ， $125\ \mu\text{m}$ ），再由 $(6+1)\times 1$ 合束器注入双包层掺镱光纤。为降低抽运光插入损耗，提高合束器功率承受能力，此实验中使用的掺镱光纤内包层直径增加至 $250\ \mu\text{m}$ ，纤芯直径仍为 $30\ \mu\text{m}$ ，掺镱光纤长度为 $40\ \text{m}$ 。当注入抽运功率为 $3910\ \text{W}$ 时，获得了 $3510\ \text{W}$ 的激光输出，放大器斜率效率为 87.5% 。实验中对输出激光的时域特性和光斑形态进行了监测，未观测到明显的功率波动和光束质量退化，表明未出现热致模式不稳定。实验测得输出激光的 $M^2=1.98$ 。从最高功率时测得的光谱中可以观察到自发拉曼散射（ $1134\ \text{nm}$ 附近），表明功率继续提升将面临非线性效应的限制。

3.3 级联抽运面临的问题及解决方案

近年来，随着高功率短波长光纤激光器的发展，抽运源亮度不再是制约级联抽运掺镱光纤激光器功率提升的主要因素。抽运光的吸收效率和非线性效应，是限制级联抽运广泛应用于数千瓦掺镱光纤激光器的关键。

为提高掺镱光纤的抽运光吸收系数，文献[62-63]通过减小光纤内包层直径以增大抽运光填充因子；本课题组则使用了具有较大纤芯包层比的常规双包层光纤，并通过增加光纤长度确保抽运光的充分吸收。但两种方法均存在不足之处：减小光纤内包层直径将限制可耦合入掺镱光纤的抽运光功率；增加光纤长度则引

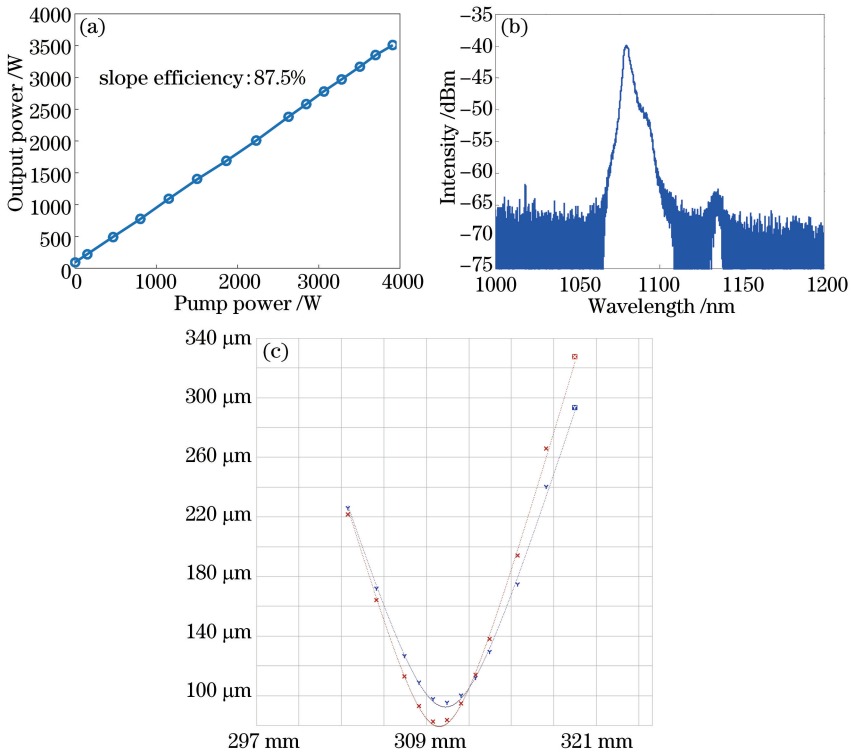


图 6 国防科大 3.5 kW 级联抽运光纤放大器实验结果。(a)输出功率;(b)功率 3510 W 时的输出光谱;(c)光束质量

Fig. 6 Experimental results of 3.5 kW fiber laser based on tandem pump of NUDT. (a) Output power; (b) output spectrum acquired at 3510 W; (c) beam quality

起非线性阈值的降低。因此,仅通过改变光纤的几何参数来提高吸收系数存在较大的局限性,还需从其他方面考虑增加掺镱光纤吸收系数的方法。

图 7 所示为镱离子的能级分布图,与 976 nm 和 1018 nm 吸收有关的激光下能级分别为 i 能级和 j 能级。在热平衡状态下,各能级粒子数服从玻尔兹曼统计分布^[67]

$$\frac{n_2}{n_1} = \exp\left(-\frac{E_2 - E_1}{k_B T}\right), \quad (2)$$

式中 n_1 、 n_2 表示两能级上的粒子数, E_1 、 E_2 为两能级的能量, k_B 为玻尔兹曼常数。(2)式可描述镱离子各子能级上的粒子数分布随温度的变化。随着温度的升高, i 和 a 能级上的粒子数减少,而 j 、 k 、 l 、 b 、 c 能级上的粒子数增加,镱离子的吸收发射特性将随各能级的粒子数而变化。以 976 nm 附近的吸收为例, i 能级粒子数的减少将导致 976 nm 吸收系数的降低。美国空军实验室^[68]测量了掺镱光纤在 976 nm 吸收系数随温度的变化,实验结果表明,当光纤的外部环境温度由 20 °C 升高至 80 °C 时,976 nm 抽运光的吸收效率明显下降。与之相反,由于 j 、 k 和 l 能级上粒子数随温度的升高而增加,1020~1100 nm 的吸收系数逐渐增强。因此,当利用 1018 nm 激光抽运掺镱光纤时,增加纤芯温度有利于抽运光的吸收。文献[69]实验研究了掺镱光纤吸收系数随光纤温度的变化。实验结果表明,随着温度的增加,放大器输出端残余 1018 nm 激光功率

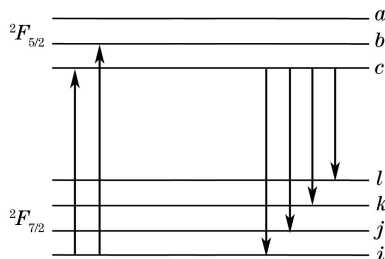


图 7 镱离子能级结构图

Fig. 7 Energy level diagram of Yb ions

逐渐降低。当掺镱光纤温度由 22 °C 升高至 302 °C 时,放大器效率由 58.7% 增加到 81.3%。实验结果表明,增加光纤温度有利于提高 1018 nm 抽运光吸收系数。在高功率光纤激光器中,量子亏损产生的热负荷可使纤芯温度升高,若能准确计算出此时光纤内的温度分布及吸收系数的变化,则可利用热效应有效缩短增益光纤的长度,提高 SRS 阈值。

在结构设计方面,中国工程物理研究院提出了包层渐变型双包层光纤^[70]。光纤的纤芯直径不变,内包层直径沿激光传播方向逐渐变小。这种设计可在不显著增大纤芯直径的条件下提高抽运光吸收系数,且使得光纤内的热分布更加均匀,为提高级联抽运的吸收效率提供了新思路。

4 级联抽运技术的新动向

除应用于高功率光纤激光器之外,高亮度抽运的优势使得级联抽运在获得特殊波长激光和高功率单频放大器等方面也具有重要应用价值。

4.1 980 nm 光纤激光

980 nm 激光在非线性频率转换和高亮度抽运等领域有着巨大的应用潜力。如 980 nm 光纤激光可倍频产生蓝光,应用于水下通信。此外,高亮度的 980 nm 光纤激光可用于抽运掺镱或掺铒光纤,实现高功率输出。但目前高功率、高亮度的 980 nm 激光难以获得。在掺镱光纤中,980 nm 附近的激光跃迁属于三能级系统,产生激光的下能态为基态。为产生 980 nm 的激光,需要将增益介质中约 50% 的下能级粒子抽运到上能级,而 1030~1060 nm 波段的激光工作于四能级系统,产生此波段的激光仅需 5% 左右的反转粒子数。为抑制四能级系统产生的 ASE,需提高增益介质抽运吸收效率,缩短光纤长度。采用纤芯抽运方案时,抽运光与镱离子重叠度高,吸收效率远高于包层抽运方案,更有利于 980 nm 激光产生^[71]。但受限于单模 LD 输出功率,采用单模 LD 直接抽运时得到的 980 nm 激光功率极为有限。为提高 980 nm 光纤激光器的输出功率,国内外一些研究机构进行了 980 nm 光纤激光级联抽运研究^[72-75]。利用 808 nm 多模 LD 抽运掺铒光纤产生高亮度的 915 nm 激光,再以 915 nm 激光纤芯抽运掺镱光纤获得 980 nm 激光。基于此方案,Bouchier 等^[73]得到了 2.1 W 的 978 nm 光纤激光。随着掺铒光纤制造工艺的完善,基于掺铒光纤二次抽运的 980 nm 光纤激光器功率有望获得大幅提升。

4.2 窄线宽激光放大

高功率窄线宽光纤激光在非线性频率转换、光束合成等领域具有广泛的应用需求。目前窄线宽激光的高功率放大主要受限于受激布里渊散射(SBS),而缩短光纤长度是抑制 SBS 的有效途径之一。短波掺镱光纤激光功率的迅速提升,为纤芯级联抽运提供了足够的抽运光。以文献[63]中的单频放大器为例,高亮度的 1018 nm 激光经 WDM 注入长度为 1.25 m 的双包层光纤纤芯(纤芯和内包层直径分别为 10 μm 和 125 μm)中,填充因子的增加大大提高了 1018 nm 的吸收系数。受限于抽运光功率,放大器最大输出功率为 158 W,斜率效率高于 73%(相对于注入抽运光)。由于光纤长度较短,实验中并未观察到 SBS。此外,高抽运吸收系数使光纤内沿轴向存在明显的温度梯度,进一步提高了 SBS 阈值。若增加掺镱光纤纤芯直径(20 μm)并优化掺镱光纤长度,则有望获得大于 500 W 的单频激光输出。与传统的通过相位调制抑制 SBS 相比,级联抽运方案可为全光纤系统,无需借助外部设备(相位调制器、信号发生器等),结构更为紧凑,更适用于对系统紧凑性要求更高的应用领域。

5 结 论

与 LD 直接抽运相比,级联抽运方案在抽运源亮度和系统热管理方面具有明显的优势,是提升光纤激光器输出功率的有效途径,近年来已广泛应用于掺镱、掺铒、掺钕、掺钐光纤激光器中,均实现了高功率输出。由于级联抽运方案中存在两次激光转换过程,其总体光光效率低于 LD 抽运方案。激光转换过程中损失的能量最终转换为热,但在级联抽运方案中,产生的热大部分分散在作为抽运源的多个中等功率光纤激光器中,较容易进行散热,并不会给系统带来巨大的热管理压力。对于高功率级联抽运,增益光纤长度增加和抽运功率提高过程中将面临的非线性效应问题是下一步研究的关键。

参 考 文 献

- [1] Koester C J, Snitzer E. Amplification in a fiber laser[J]. *Applied Optics*, 1964, 3(10): 1182-1186.
- [2] Paschotta R, Nilsson J, Tropper A C, *et al.* Ytterbium-doped fibre amplifiers [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1997, 33(7): 1049-1056.
- [3] Horley R, Norman S, Zervas M N. Progress and development in fibre laser technology [C]. *SPIE*, 2007, 6738: 67380K.
- [4] Limpert J, Roser F, Klingebiel S, *et al.* The rising power of fiber lasers and amplifiers[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2007, 13(3): 537-545.
- [5] Nilsson J, Payne D N. High-power fiber lasers[J]. *Science*, 2011, 332(6032): 921-922.
- [6] Richardson D J, Nilsson J, Clarkson W A. High power fiber lasers: current status and future perspectives[J]. *J Opt Soc Am B*, 2010, 27(11): B63-B92.
- [7] Snitzer E, Po H, Hakimi F, *et al.* Double-clad offset core Nd fiber laser [C]. *Optical Fiber Communication Conf.* 1988, PD5: 533-536.
- [8] Pask H M, Archambault J L, Hanna D C, *et al.* Operation of cladding-pumped Yb³⁺-doped silica fibre lasers in 1 μm region[J]. *Electronics Letters*, 1994, 30(11): 863-865.
- [9] Dominic V, Mac Cormack S, Waarts R, *et al.* 110 W fiber laser [C]. *Lasers and Electro-Optics, IEEE*, 1999, 35(14): 1158-1160.
- [10] Lou Qihong, Zhou Jun, Zhu Jianqiang, *et al.* Recent progress of high power fiber lasers [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, 35(2): 135-138.
楼祺洪, 周 军, 朱健强, 等. 高功率光纤激光器研究进展 [J]. *红外与激光工程*, 2006, 35(2): 135-138.
- [11] Jeong Y, Sahu J K, Williams R B, *et al.* Ytterbium-doped large-core fibre laser with 272 W output power [J]. *Electronics Letters*, 2003, 39(13): 1.
- [12] Yan P, Yin S, He J, *et al.* 1.1 kW Ytterbium monolithic fiber laser with assembled end-pump scheme to couple high brightness single emitters[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2011, 23(11): 697-699.
- [13] Khitrov V, Minelly J D, Tumminelli R, *et al.* 3 kW single-mode direct diode-pumped fiber laser [C]. *SPIE*, 2014, 8961: 89610V.
- [14] Yu H, Wang X, Tao R, *et al.* 1.5 kW, near-diffraction-limited, high-efficiency, single-end-pumped all-fiber-integrated laser oscillator [J]. *Applied Optics*, 2014, 53(34): 8055-8059.
- [15] Dawson J W, Messerly M J, Beach R J, *et al.* Analysis of the scalability of diffraction-limited fiber lasers and amplifiers to high average power [J]. *Optics Express*, 2008, 16(17): 13240-13266.
- [16] Eidam T, Wirth C, Jauregui C, *et al.* Experimental observations of the threshold-like onset of mode instabilities in high power fiber amplifiers [J]. *Optics Express*, 2011, 19(14): 13218-13224.
- [17] Ward B, Robin C, Dajani I. Origin of thermal modal instabilities in large mode area fiber amplifiers [J]. *Optics Express*, 2012, 20(10): 11407-11422.
- [18] Smith A V, Smith J J. Overview of a steady-periodic model of modal instability in fiber amplifiers [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2014, 20(5): 472-483.
- [19] Tao R, Ma P, Wang X, *et al.* Mitigating of modal instabilities in linearly-polarized fiber amplifiers by shifting pump wavelength [J]. *Journal of Optics*, 2015, 17(4): 045504.
- [20] Tao Rumao. Study of thermal-induced modal instabilities in high power narrow-linewidth fiber amplifiers with near diffraction-limited beam quality [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2015.
陶汝茂. 高功率窄线宽近衍射极限光纤激光放大器热致模式不稳定研究 [D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2015.
- [21] Koponen J J, Hoffman H J, Tammela S K T. Measuring photodarkening from single-mode ytterbium doped silica fibers [J]. *Optics Express*, 2006, 14(24): 11539-11544.
- [22] Codemard C A, Sahu J K, Nilsson J. Tandem cladding-pumping for control of excess gain in ytterbium-doped fiber amplifiers [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2010, 46(12): 1860-1869.
- [23] Stiles E. New developments in IPG fiber laser technology [C]. *Proceedings of the 5th International Workshop on Fiber Lasers*, 2009.
- [24] Strohmaier S, Tillkorn C, Olschowsky P, *et al.* High-power, high-brightness direct-diode lasers [J]. *Optics and Photonics News*, 2010, 21(10): 24-29.
- [25] 北京大族天成半导体. 半导体激光器模块 [EB/OL]. [2016-09-21]. http://www.tc-semi.com/products_index/FrontComContent_list01-1345770208143ContId=5&.comContentId=5.html.
- [26] 北京凯普林光电科技有限公司. 光纤耦合半导体激光器 [EB/OL]. [2016-09-21]. <http://www.bwt-bj.com/cn/>

- product/list_9_19.html.
- [27] Minelly J D, Laming R I, Townsend J E, *et al.* High-gain fibre power amplifier tandem-pumped by a 3 W multi-stripe diode[C]. Optical Fiber Communications Conference, 1992.
- [28] Zhang J, Fromzel V, Dubinskii M. Resonantly cladding-pumped Yb-free Er-doped LMA fiber laser with record high power and efficiency[J]. Optics Express, 2011, 19(6): 5574-5578.
- [29] Lim E L, Alam S, Richardson D J. Optimizing the pumping configuration for the power scaling of in-band pumped erbium doped fiber amplifiers[J]. Optics Express, 2012, 20(13): 13886-13895.
- [30] Geng J, Wang Q, Luo T, *et al.* Single-frequency narrow-linewidth Tm-doped fiber laser using silicate glass fiber[J]. Optics Letters, 2009, 34(22): 3493-3495.
- [31] Wang X, Zhou P, Zhang H, *et al.* 100 W-level Tm-doped fiber laser pumped by 1173 nm Raman fiber lasers[J]. Optics Letters, 2014, 39(15): 4329-4332.
- [32] 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.
- [33] Roeser F, Jauregui C, Limpert J, *et al.* 94 W 980 nm high brightness Yb-doped fiber laser[J]. Optics Express, 2008, 16(22): 17310-17318.
- [34] 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[C]. SPIE, 2016, 9728: 97281C.
- [35] Yoo S, Soh D B S, Kim J, *et al.* Analysis of W-type waveguide for Nd-doped fiber laser operating near 940 nm[J]. Optics Communications, 2005, 247(1): 153-162.
- [36] Laroche M, Bartolacci C, Cadier B, *et al.* Generation of 520 mW pulsed blue light by frequency doubling of an all-fiberized 978 nm Yb-doped fiber laser source[J]. Optics Letters, 2011, 36(19): 3909-3911.
- [37] Laroche M, Bartolacci C, Hervé G, *et al.* All-fiber Yb-doped CW and pulsed laser sources operating near 980nm[C]. Advanced Solid-State Photonics, Optical Society of America, 2011: ATuB9.
- [38] Xiao Hu. Study on tandem pumping technology of Ytterbium-doped fiber lasers[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2012.
肖 虎, 掺镱光纤激光级联抽运技术研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2012.
- [39] Hao Jinping, Yan Ping, Xiao Qirong, *et al.* Optical properties of ytterbium-doped tandem-pumped fiber oscillator[J]. Chinese Physics B, 2013, 23(1): 014203.
- [40] Kurkov A S. Oscillation spectral range of Yb-doped fiber lasers[J]. Laser Physics Letters, 2006, 4(2): 93-102.
- [41] Allain J Y, Monerie M, Pognant H. Ytterbium-doped fluoride fibre laser operating at 1.02 μm [J]. Electronics Letters, 1992, 28(11): 988-989.
- [42] Allain J Y, Bayon J F. Ytterbium-doped silica fiber laser with Intracore Bragg gratings operating at 1.02 μm [J]. Electronics Letters, 1993, 29(3): 309-310.
- [43] Pask H M, Archambault J L, Hanna D C, *et al.* Operation of cladding-pumped Yb³⁺-doped silica fibre lasers in 1 μm region[J]. Electronics Letters, 1994, 30(11): 863-865.
- [44] Kurkov A, Medvedkov O I, Paramonov V M, *et al.* High-power Yb-doped double-clad fiber lasers for a range of 0.98-1.04 μm [C]. Optical Amplifiers and Their Applications, Optical Society of America, 2001: OWC2.
- [45] Seifert A, Sinther M, Walther T, *et al.* Narrow-linewidth, multi-watt Yb-doped fiber amplifier at 1014.8 nm [J]. Applied Optics, 2006, 45(30): 7908-7911.
- [46] Xiao H, Zhou P, Wang X L, *et al.* High power 1018 nm monolithic Yb³⁺-doped fiber laser and amplifier[J]. Laser Physics Letters, 2012, 9(10): 748.
- [47] Steinborn R, Koglbauer A, Bachor P, *et al.* A continuous wave 10 W cryogenic fiber amplifier at 1015 nm and frequency quadrupling to 254 nm [J]. Optics Express, 2013, 21(19): 22693-22698.
- [48] Xiao H, Zhou P, Wang X L, *et al.* High power 1018 nm ytterbium doped fiber laser with an output power of 309 W [J]. Laser Physics Letters, 2013, 10(6): 065102.
- [49] Beier F, Otto H J, Jauregui C, *et al.* 1009 nm continuous-wave ytterbium-doped fiber amplifier emitting 146 W [J]. Optics Letters, 2014, 39(13): 3725-3727.
- [50] Jiang M, Zhou P, Xiao H, *et al.* A high-power narrow-linewidth 1018 nm fiber laser based on a single-mode-few-mode-single-mode structure[J]. High Power Laser Science and Engineering, 2015, 3(3): 1-4.
- [51] Wang Yanshan, Sun Yinhong, Ma Yi, *et al.* Experimental study on high brightness 1018 nm Ytterbium doped fiber laser[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(1): 0102007.
王岩山, 孙殷宏, 马 毅, 等. 高亮度 1018 nm 光纤激光实验研究[J]. 中国激光, 2015, 42(1): 0102007.
- [52] Xiao H, Leng J, Zhang H, *et al.* High-power 1018 nm ytterbium-doped fiber laser and its application in tandem pump

- [J]. *Applied Optics*, 2015, 54(27): 8166-8169.
- [53] Gu G, Liu Z, Kong F, *et al.* Highly efficient ytterbium-doped phosphosilicate fiber lasers operating below 1020 nm[J]. *Optics Express*, 2015, 23(14): 17693-17700.
- [54] Ottenhues C, Theeg T, Hausmann K, *et al.* Single-mode monolithic fiber laser with 200 W output power at a wavelength of 1018 nm[J]. *Optics Letters*, 2015, 40(21): 4851-4854.
- [55] Glick Y, Sintov Y, Zuitlin R, *et al.* Single mode 1018 nm fiber laser with power of 230 W[C]. *SPIE*, 2015, 9728: 97282T.
- [56] Seah C P, Ng T Y, Chua S L. 400 W Ytterbium-doped fiber oscillator at 1018 nm[C]. *Advanced Solid State Lasers*. Optical Society of America, 2015: ATu2A. 33.
- [57] Zhang Xiujuan, Duan Yunfeng, Zhao Shui, *et al.* Experimental study on high efficient all-fiber lasers at 1018 nm[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(4): 0414002.
张秀娟, 段云锋, 赵水, 等. 高效率 1018 nm 全光纤激光器实验研究[J]. *光学学报*, 2016, 36(4): 0414002.
- [58] Sun Yinhong, Ke Weiwei, Feng Yujun, *et al.* 1030 nm kilowatt-level ytterbium-doped narrow linewidth fiber amplifier [J]. *Chinese J Lasers*, 2016, 43(6): 0601003.
孙殷宏, 柯伟伟, 冯昱骏, 等. 1030 nm 千瓦级掺镱光纤窄线宽激光放大器[J]. *中国激光*, 2016, 43(6): 0601003.
- [59] Injeyan H, Pflug G C, Vespucci M T. High power laser handbook[M]. New York: McGraw-Hill, 2011.
- [60] Ferin A, Gapontsev V, Fomin V, *et al.* 17 kW CW laser with 50 μm delivery[C]. 6th International Symposium on High-Power Fiber Lasers and Their Applications. 2012.
- [61] Xiao Hu, Leng Jinyong, Wu Wuming, *et al.* High efficiency tandem-pumped fiber amplifier[J]. *Acta Physica Sinica*, 2011, 60(12): 124207.
肖虎, 冷进勇, 吴武明, 等. 同带抽运高效率光纤放大器[J]. *物理学报*, 2011, 60(12): 124207.
- [62] Yao T, Ji J, Sahu J K, *et al.* Tandem-pumped ytterbium-doped aluminosilicate fiber amplifier with low quantum defect [C]. *CLEO: Science and Innovations*, Optical Society of America, 2012: CM4N. 7.
- [63] Jiang Man, Xiao Hu, Zhou Pu, *et al.* High power and low quantum-defect Yb-doped fiber amplifier based on tandem pumping[J]. *Acta Physica Sinica*, 2013, 62(4): 044210.
姜曼, 肖虎, 周朴, 等. 高功率、低量子亏损同带抽运掺镱光纤放大器[J]. *物理学报*, 2013, 62(4): 044210.
- [64] Theeg T, Ottenhues C, Sayinc H, *et al.* Core-pumped single-frequency fiber amplifier with an output power of 158 W [J]. *Optics Letters*, 2016, 41(1): 9-12.
- [65] 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.
- [66] Popp A, Voss A, Graf T, *et al.* Thin-disk laser-pumping of ytterbium-doped fiber laser[J]. *Laser Physics Letters*, 2011, 8(12): 887.
- [67] Zhou Bingkun. Laser principle[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2003: 14-15.
周炳琨. 激光原理[M]. 北京: 国防工业出版社, 2003: 14-15.
- [68] Henry L J, Shay T M, Hult D W, *et al.* Thermal effects in narrow linewidth single and two tone fiber lasers[J]. *Optics Express*, 2011, 19(7): 6164-6176.
- [69] Zhang B, Zhang R, Xue Y, *et al.* Temperature dependence of ytterbium-doped tandem-pumped fiber amplifiers[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2016, 28(2): 159-162.
- [70] Huang Z, Tang X, Lin H, *et al.* Tapered cladding diameter profile design for high-power tandem-pumped fiber lasers [J]. *Laser Physics*, 2016, 26(5): 055101.
- [71] 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): 1113.
- [72] 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.
- [73] 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.
- [74] Li P, Zou S, Zhang X, *et al.* A 980nm Yb-doped single-mode fiber laser pumped by a 946nm Q-switched Nd:YAG laser[J]. *Optics & Laser Technology*, 2010, 42(8): 1229-1232.
- [75] Laroche M, Bartolacci C, Hervé G, *et al.* All-fiber Yb-doped CW and pulsed laser sources operating near 980 nm[C]. *Advanced Solid-State Photonics*, Optical Society of America, 2011: ATuB9.