

高功率单频主振荡光纤功率放大器研究进展

胡旭东 宁提纲 裴丽 李晶 周倩

(北京交通大学全光网络与现代通信网教育部重点实验室, 北京 100044)

摘要 高功率单频主振荡光纤功率放大器在相干合束、引力波传感器、自由空间光通信、测距、激光雷达、非线性频率转换等有广泛应用。综述了高功率单频主振荡光纤功率放大器的国内外研究进展,分析了高功率单频光纤放大器关键技术,如种子激光源、受激布里渊散射与放大自发辐射噪声的抑制技术,指出了千瓦量级的主振荡光纤功率放大器未来的研究方向。

关键词 光纤放大器;单频;主振荡光纤功率放大器;布里渊散射;放大自发辐射噪声

中图分类号 TN248

OCIS 140.3510 140.4480

文献标识码 A

Progress of High Power Single Frequency Master Oscillator Fiber Power Amplifier

Hu Xudong Ning Tigang Pei Li Li Jing Zhou Qian

(*Key Laboratory of All Optical Network & Advanced Telecommunication Network,
Ministry of Education, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China*)

Abstract High power single frequency master oscillator fiber power amplifier is required for many applications such as coherent beam combination, gravitational wave sensors, free space optical communications, range finding, lidar and nonlinear frequency conversion. The progress of high power single frequency master oscillator fiber power amplifier is reviewed. The key techniques including seed source, stimulated Brillouin scattering suppression and amplified spontaneous emission suppression are analyzed in detail. The research trends of kilowatt levels single frequency master oscillator fiber power amplifier are pointed out.

Key words fiber amplifier; single frequency; master oscillator fiber power amplifier; Brillouin scattering; amplified spontaneous emission

1 引言

相对于传统固体激光器,光纤激光器由于具有结构紧凑、效率高、光束质量高及散热性好等优点,因而得到了广泛研究^[1~3]。在许多应用中,如相干合束、引力波传感器、自由空间光通信、测距、激光雷达、非线性频率转换等需要高功率单频纵模高质量激光源。虽然目前单模光纤激光器实现了千瓦量级的高功率激光输出^[4],且具有衍射受限的光束质量,然而这种高功率光纤激光器的频谱线宽在数纳米量级^[4],对于上述应用需要的窄线宽单频激光源的应用而言显得太宽了。而单独采用光纤激光器虽然目前已经实现了线宽在 2 kHz 以内的单频激光输出,但其功率却在百毫瓦量级^[5],不能满足高功率的需要。因此,采用主振荡光纤功率放大(MOPA)技术实现线宽窄高功率单频高质量激光,是一个很好的选择。高功率单频主振荡光纤功率放大器采用线宽窄高光束质量单频激光器作为种子源,通过双包层或特种掺稀土光纤一级或多级放大,实现

收稿日期: 2009-07-22; **收到修改稿日期:** 2009-11-23

基金项目: 国家自然科学基金(60837002)、北京市自然科学基金(4082024)、新世纪优秀人才支持计划(NCET-06-0076)、留学回国人员基金(教外 2008890)、教育部博士点基金(200800040002)和北京交通大学校科技基金(2006XM003)资助课题。

作者简介: 胡旭东(1978—),男,博士研究生,主要从事高功率光纤激光器与放大器方面的研究。

E-mail: huxudongqychen@163.com

导师简介: 宁提纲(1968—),男,博士,教授,博士生导师,主要从事光纤通信、光纤激光器、光纤微波传输、光纤传感等方面的研究。E-mail: tgning@bjtu.edu.cn (通信联系人)

高功率高光束质量的单频激光。

2 国内外研究进展

2007年,孙鑫鹏等^[6]建立了半导体抽运的掺镱双包层单频放大器,当入纤抽运光功率为49.6 W,种子源信号光功率为200 mW,10 m双包层光纤,实现了16.1 W的激光输出。种子源为自行研制的单块非平面环形腔振荡器(NPRO),产生功率为700 mW的1064 nm单频连续激光,光束腰半径为70 μm ,光束质量因子 M^2 为1.06,双包层光纤采用D型光纤,内包层直径为400 μm ,圆缺处为320 μm ,数值孔径为0.37,纤芯的直径为30 μm ,数值孔径为0.06。这种高功率主振荡单频光纤放大器结构可简单表达为:单块非平面环形腔激光器+双包层掺镱光纤,如图1所示^[6]。

1994年,G. A. Ball等^[7]报道了有效功率为60 mW,带有噪声抑制的单频主振荡放大器。单频激光种子源由2.5 cm的掺钕短腔光栅光纤激光器构成,而其增益作用的光纤则是由19 m长,增益为2.8 dB/m的光纤构成,此时种子激光源的功率在80 μW ,而增益光纤也非双包层光纤,因此,输出功率级别仅在毫瓦量级。这种结构可简单表达为:掺钕短腔光栅光纤激光器+19 m长单包层增益光纤。1999年,I. Zawischa等^[8]实现了5.5 W的单频激光输出,光束质量因子 M^2 约为1.1,其结构为单块钕镱NPRO作为种子激光源,30 m长的双包层掺钕光纤作为功率放大器,结构示意图如图2所示^[8]。实现输出功率从几十毫瓦量级至瓦量级的提升,主要原因是双包层光纤的发明。上述结构可简单表达为:单块钕镱非平面环形振荡器+双包层掺钕光纤。孙鑫鹏等^[6]的实验方案与此方案非常接近。

2002年,P. Weßels等^[9]提出了一种低的放大自发辐射噪声的单频主振荡光纤放大器系统,其结构示意图如图3所示。比较图2与图3不难发现,主要区别就在其功率放大的增益光纤上,这里采用的增益光纤为大模场双包层掺镱光纤。大模场光纤的芯层直径为10 μm ,芯层数值孔径为0.07,D型内包层,直径为400 μm ,数值孔径为0.38,其主振荡单频种子光源为单块钕镱NPRO或可调谐的掺镱环形光纤激光器,当采用钕镱NPRO时输出功率约为800 mW,而激光波长为1064 nm,线宽为2 GHz,最大抽运功率为17 W时,输出功率为9.3 W,放大自发辐射(ASE)与激光放大信号的功率比值为 1×10^{-4} 。而当主振荡单频种子光源为可调谐的掺镱环形激光器,其激光波长在1035~1105 nm之间,可调谐激光线宽为3 GHz,抽运功率为15 W时,在1035~1105 nm之间获得大于8 W输出功率,最大输出功率9.3 W,ASE与激光放大信号的功率比值在 $4 \times 10^{-5} \sim 7 \times 10^{-5}$ 。实验结果显示输出功率越高,ASE越低。

2003年,A. Liem等^[10]报道的主振荡光纤放大器的输出功率提高至百瓦量级,其结构如图4所示。采用NPRO作为种子激光源,产生1.6 W的1064 nm的单频激光,内部有相应电路来抑制谐振弛豫振荡引起的噪声,工作线宽为2~3 kHz,9.4 m长掺镱大模场双包层光纤作为增益光纤,模场直径为28 μm ,芯层数值孔径为0.06,D型内包层直径为400 μm ,包层数值孔径为0.38,双包层光纤的两端抛光8°,以抑制放大的受激

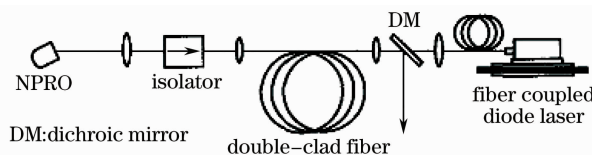


图1 掺镱双包层单频光纤放大器结构

Fig. 1 Schematic setup of the single-frequency double-clad Yb-doped fiber amplifier

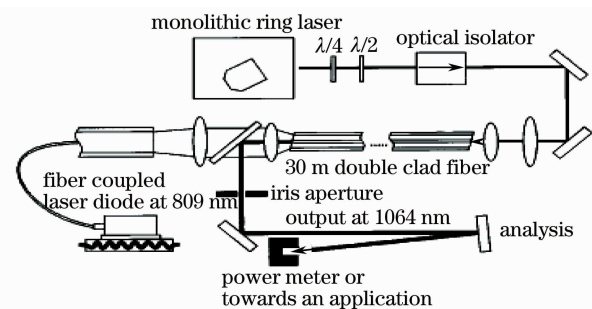


图2 掺钕双包层单频光纤放大器结构

Fig. 2 Schematic setup of the single-frequency double-clad Nd-doped fiber amplifier

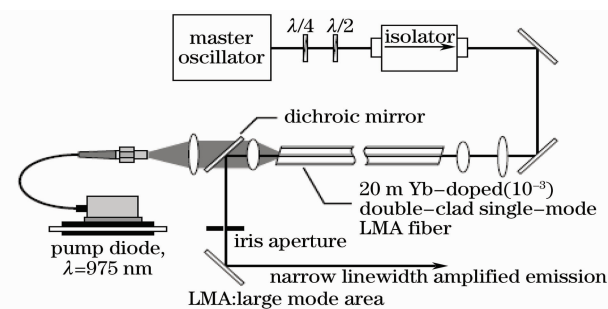


图3 低放大自发辐射噪声的单频主振荡光纤功率放大器结构

Fig. 3 Schematic setup of the single-frequency master-oscillator fiber power amplifier with low amplified emission

辐射与高功率光纤放大器中的寄生激励,通过卷曲来高阶纵模的弯曲损耗,得到 118 W 的单频激光输出,斜率效率约为 70%,放大的自发辐射噪声与激光信号功率比约为 2×10^{-4} ,光束质量因子 M^2 在 1.1 左右。

2005 年, Y. Jeong 等^[11]提出了一种可调谐的单频单模主振荡光纤功率放大器,其主要结构如图 5 所示。这种结构不同于种子激光源+双包层光纤放大器,而是当种子激光源功率很小时,在种子激光源与双包层光纤放大器之间加了一个用作前置放大器的掺铒光纤放大器(EDFA)。这样结构就演化为:种子激光源(功率为毫瓦量级)+前置放大器(功率为瓦量级)+后一级大芯双包层光纤放大器。图 5 中的种子激光源为可调谐的半导体激光器,型号为 Santec TLS-210,输出偏振的单频种子激光,线宽小于 1 MHz,可调谐波长为 1530~1610 nm 之间,最大输出功率为 10 mW。用作前置放大器的掺铒光纤放大器为南安普敦光子公司的商用光纤放大器,将种子激光功率放大至 1.8 W。后一级大芯双包层光纤为 10 m 长的钕镱共掺光纤构成,芯层直径为 30 μm ,芯层数值孔径为 0.2, D 型内包层直径为 650 μm ,包层数值孔径为 0.48,双包层光纤端面切割角度以消除信号反馈,在输入的抽运功率为 473 W,在 1546~1566 nm 波长调谐时,输出功率均超过 125 W,在 1563 nm 波长输出功率达到最大值 151 W,光束质量因子 M^2 为 1.1。

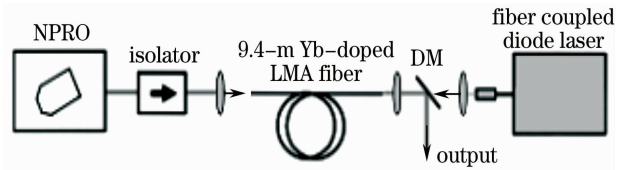


图 4 单频大模场面积掺铒光纤放大器结构

Fig. 4 Schematic setup of the single-frequency Yb-doped large mode area fiber amplifier

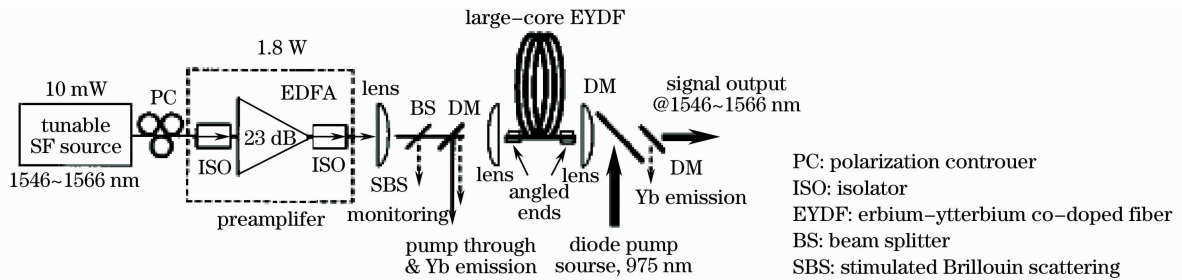


图 5 带预放大器的单频主振荡钕镱共掺光纤功率放大器实验示意图

Fig. 5 Experimental setup of the single-frequency maser-oscillator Er-Yb doped fiber power amplifier with preamplifier

2006 年, M. Hildebrandt 等^[12]报道了一种单频主振荡光子晶体光纤(PCF)放大器,种子源为钕镱非平面环形振荡器,输出 1.4 W 的 1064 nm 的单频激光,集成的法拉第隔离器保护种子源免受来自光纤的光破坏,4.2 m 长的光子晶体光纤作为功率放大器,光子晶体光纤纤芯在 1060 nm 处的模场直径为 $(22 \pm 3) \mu\text{m}$,芯层数值孔径为 0.04,光子带隙光纤空气孔直径为 0.22 μm ,空气孔间距为 11 μm ,3 个中心空气孔以形成三角形的掺铒光纤芯层,环绕此结构的抽运包层直径为 $(225 \pm 10) \mu\text{m}$,其数值孔径约为 0.6,光子晶体光纤卷绕在直径为 25 cm 的金属盘上,以确保单模工作,光纤两端通过加热塌陷空气孔密封,并抛光为 8° ,其结构如图 6 所示。当半导体激光最大抽运功率为 195 W 时,输出的放大的单频信号光功率为 148 W, ASE 与输出信号光功率比值为 8×10^{-5} ,光束质量因子 M^2 在 1.12~1.17 之间。2007 年, J. Yoonchan 等^[13]报道了一种输出功率提高到 500 W 的单频主振荡光纤放大器,其结构如图 7 所示。

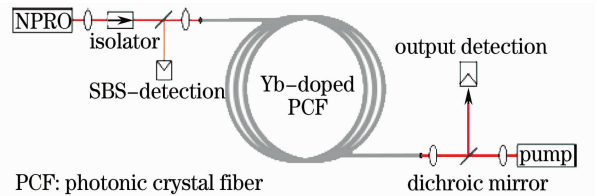


图 6 单频主振荡掺铒光子晶体光纤功率放大器实验示意图

Fig. 6 Experimental setup of the single-frequency maser-oscillator Yb-doped photonic crystal fiber power amplifier with preamplifier

比较图 5 与图 7,两种单频主振荡光纤功率放大器结构非常相似,都是在种子激光源与双包层光纤中间加入光纤放大器,不同的是图 7 中的光纤放大器由 3 台掺铒光纤放大器(YDFA)构成。这样,种子激光到达最后一级功率放大器的功率为 7 W。种子激光源为平面偏振的掺铒光纤分布反馈布拉格(DFB)激光器,输出功率为 80 mW,波长为 1060 nm,线宽为 60 kHz。若后一级光纤功率放大器采用 SPI 激光公司的保偏光纤时,其芯层直径为 25 μm ,芯层数值孔径为 0.06, D 型内包层直径为 380 μm ,内包层数值孔径为 0.48,芯层双

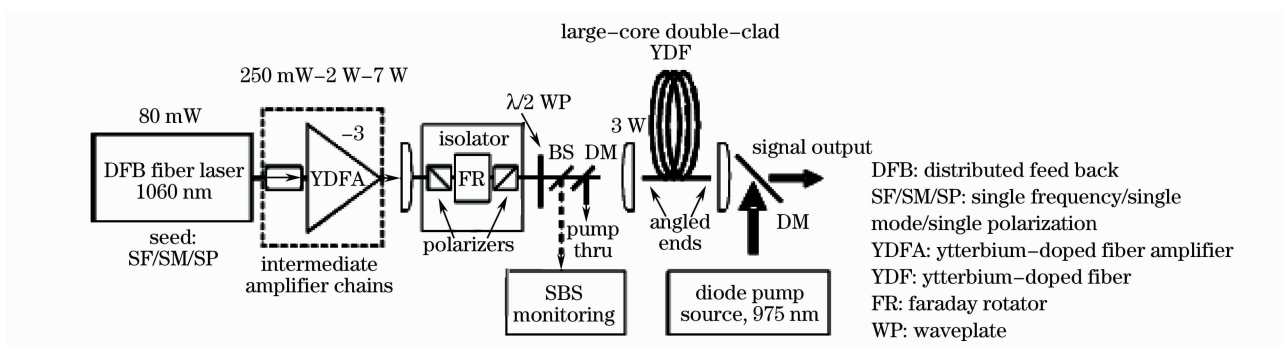


图7 带多级中间放大器的单频主振荡掺镱光纤功率放大器实验示意图

Fig. 7 Experimental setup of the single-frequency maser-oscillator Yb-doped fiber power amplifier with intermediate amplifier chains

折射为 2×10^{-4} , 光纤长度为 6.5 m, 能量吸收率约为 2 dB/m, 输出功率达到 402 W, 光束质量因子 M^2 小于 1.1, 此时尚未到达受激布里渊散射(SBS)的阈值。若后一级光纤功率放大器采用南安普敦大学光电子研究中心的非保偏光纤时, 光纤芯层直径为 $43 \mu\text{m}$, 芯层数值孔径为 0.09, D型内包层直径为 $650 \mu\text{m}$, 内包层数值孔径为 0.48, 光纤长度为 9 m, 能量吸收率约为 1.5 dB/m, 当输出功率达到 500 W 时, 发现受激布里渊散射的出现, 此时输出信号光束质量因子 M^2 约为 1.6。

2009年, G. D. Goodno 等^[14]实现了输出激光功率为 608 W, 光束质量因子 M^2 为 1.05 ± 0.03 的单频掺钍光纤放大器, 其设计方案如图 8 所示。此方案与图 7 结构基本一样, 均可简单表达为: 种子激光源 + 多级中间放大器 + 最后一级大芯双包层光纤功率放大器。在此方案中, 采用分布反馈半导体激光器作为种子源, 输出功率为 3 mW, 激光波长为 2040 nm, 线宽小于 5 MHz, 内装的布儒斯特棱镜有 20 nm 的带宽, 用来对放大的自发辐射噪声进行滤波, 采用三级保偏掺钍光纤激光器作为预放大器, 将输出功率提高至 16 W, 最后一级光纤放大器, 采用 3.1 m 长, 非保偏双包层为掺质量分数 4% 的钍光纤构成, 其中掺钍光纤芯径为 $25 \mu\text{m}$, 包层直径为 $400 \mu\text{m}$, 数值孔径为 0.08, 归一化的频率为 3.1, 通过将光纤卷曲为直径为 10 cm, 使之单模工作。

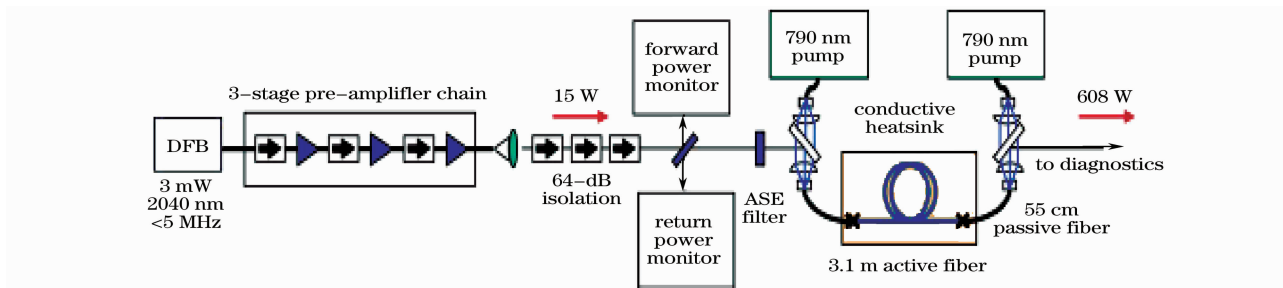


图8 带三级预放大器的单频主振荡掺钍光纤功率放大器实验示意图

Fig. 8 Experimental setup of the single-frequency maser-oscillator Thorium-doped fiber power amplifier with three-stage pre-amplifier chains

3 关键技术分析

通过分析单频主振荡光纤放大器的发展, 不难看出, 光纤放大器的结构形式由几十毫瓦量级输出功率的掺铒短腔光纤光栅激光器 + 单包层增益光纤结构形式, 发展到现在输出功率超过 400 W 的单频种子激光源 + 多级中间光纤放大器 + 最后一级的大芯双包层光纤放大器的形式。而种子激光源也由单一的短腔光纤激光器发展到瓦级非平面环形振荡器或毫瓦量级的半导体激光器或线宽在几十赫兹的单频光纤激光器。作为最后一级的功率放大器的增益光纤也由最初的普通单包层掺稀土光纤演化为大芯双包层掺稀土光纤。单频光纤放大器功率提高的障碍主要是受激布里渊散射与放大的自发辐射噪声的影响, 下面将对种子激光源、受激布里渊散射与放大的自发辐射噪声三方面的关键技术做进一步的分析。

3.1 种子激光源

在百瓦量级的单频光纤放大器种子激光源中,NPRO无疑受到广泛的关注。NPRO最先由 T. J. Kane 等^[15]报道。其工作原理是通过内在的光学半导体增强单向性,从而得到单频激光。由于热光效应,NPRO单轴向模的输出功率值一般在4 W以下。比较图1与图4不难发现,最后输出功率的区别就在于NPRO输出功率的高低。NPRO单频激光线宽2~3 kHz,其缺点是缺乏波长可调性、偏振特性不详。

单频光纤激光器因为其结构紧凑、线宽窄、良好偏振特性、波长可调谐而成为研究的热点。G. A. Ball 等^[7]首先报道的主振荡光纤放大器,就考虑到了采用短腔掺铒光纤激光器作为单频种子源。J. Yoonchan 等^[13]报道的输出功率超过400 W的偏振单频放大激光输出的种子源选择的也是单频光纤激光。2003年,C. Spiegelberg 等^[5]报道了一种铒镱共掺短腔光纤激光器,高掺杂浓度的铒镱共掺光纤增益达到5 dB/cm,长度为2 cm,有源光纤两端为两个频谱窄的无源光纤布拉格光栅,其中用作输出端的光栅为保偏布拉格光栅,在抽运功率为550 mW时,输出功率达到120 mW,输出波长为1535 nm,线宽为2 kHz。2007年,Y. Shen 等^[16]报道了线宽小于1 kHz的10 mW量级输出功率单频掺铒短腔光纤激光器。输出波长随温度的变化可调谐。2008年,G. Weihua 等^[17]报道了一种环形腔混合布里渊掺铒单频光纤激光器,输出功率达到40 mW,信噪比大于50 dB,输出波长为1053 nm,线宽为50 kHz。

由于单频光纤激光器掺稀土离子的不同,可有多种输出波长,且输出波长可调谐、线宽窄,容易与中间级光纤放大器连接等优点,商用产品不断出现,受到越来越多的重视^[18~20]。

半导体激光器因为技术成熟、输出波长与功率稳定,也是单频光纤放大器种子激光源的选择之一。Y. Jeong 等^[11]采用的种子激光源为日本 Santec 公司的型号为 TLS-210 可调谐的半导体激光器,调谐波长范围为1546~1566 nm。G. D. Goodno 等^[14]实现的输出功率608 W单频激光放大器,选用的就是德国 Sacher 公司的型号为 DFB-03-BF 的半导体激光器,当然,其缺点是波长不可调谐,线宽在兆赫兹范围。

选择商用激光器或自制激光器,关键取决于需要放大的波长范围。通常,NPRO输出的激光波长为1064 nm,仅仅适合作为掺铒光纤放大器的种子源,而半导体光纤激光器与单频光纤激光器适用范围很广,当对线宽与偏振特性要求时,需要优先选用单频光纤激光器。

3.2 受激布里渊散射的抑制

受激布里渊散射过程是一种在光纤内发生的非线性过程,可经典描述为抽运波、斯托克斯波通过声波进行的非线性相互作用,抽运波通过电致伸缩产生声波,然后引起介质折射率的周期性调制。临界抽运功率 $P_{cr} \approx 21A_{eff}/(g_{B,eff}L_{eff})$, 式中 A_{eff} 为有效模场面积, $g_{B,eff}$ 为有效布里渊增益系数, L_{eff} 为有效光纤长度^[21]。因此可提高临界抽运功率,提高光纤的受激布里渊散射阈值功率,实现对光纤受激布里渊散射的抑制。

通过减小有效布里渊增益系数实现单频激光的功率放大,主要措施有通过空间纵向或横向使光纤的材料组成、压力或温度发生变化。Joshua E. Rothenberg 等^[22]从实验上证实了通过大芯双包层光纤压力梯度变化来使受激布里渊散射增益展宽实现抑制布里渊散射。

温度发生变化减小有效布里渊增益系数从而提高受激布里渊散射的阈值功率在文献中得到了体现^[10,11]。J. Yoonchan 等^[13]在最后一级的功率放大器通过反向抽运目的是减小有效光纤长度,同时得到沿增益光纤的自持近似指数温度梯度变化,从而降低有效布里渊增益系数。G. D. Goodno 等^[14]则在最后一级的功率放大器将增益光纤嵌入在一个低热阻抗散热器上,实验表明,短的抽运与增益光纤的无源引线引起高的无受激布里渊散射最大信号功率,这实际上是通过短的无源引线,从而获得陡峭的温度梯度,降低了有效布里渊增益系数。V. I. Kovalev 等^[23]从理论上分析了抽运吸收引起的掺稀土双包层光纤中的非均匀分布对受激布里渊散射的抑制,结果表明,适当选择抽运源的一边有源光纤的温度变化如大于等于300 K,有源光纤长度足够短,如小于6 m,受激布里渊散射将不是单频光纤放大器的限制因素。

采用受激布里渊散射抑制光纤也是提高受激布里渊散射的阈值功率的一种方法。当光场与声场重叠区域最小时,受激布里渊散射将明显受到抑制。S. Gray 等^[24]应用此原理通过精心选择光纤中芯层与包层的掺杂来实现,具体为在芯层中按照选定的剖面掺 Al_2O_3 与 GeO_2 以分离光场与电场。芯层直径为39 μm ,六边内包层直径为420 μm ,外包层直径为520 μm ,芯层数值孔径为0.05,内包层数值孔径为0.30, Yb_2O_3 的掺杂质量分数为1%,内包层976 nm抽运吸收为3.2 dB/m。布里渊增益系数可降低到 $0.9 \times 10^{-11} W^{-1}$ 。

当大模场双包层光纤取 8.5 m, 得到 502 W 的单频窄线宽输出, 并通过理论分析, 有希望使单频窄线宽输出功率提高到千瓦量级。

提高芯层直径也是提高受激布里渊散射阈值功率的方法。A. Liu 等^[25]通过理论分析得到芯层直径增倍, 同时减小芯层数值孔径时, 将能得到高光束质量的高的受激布里渊散射的阈值功率。若选用受激布里渊散射受限的光纤, 同时取大芯光纤, 如光纤长度为 7 m, 布里渊增益系数为 $1 \times 10^{-11} \text{ W}^{-1}$, 芯层直径为 30 μm , 内包层直径为 400 μm , 在光纤端面温度相差 100 $^{\circ}\text{C}$ 下将能实现无受激布里渊散射超过 2400 W 输出功率。还发现反向抽运时优于正向抽运, 从而在理论上解释了大多数实验方案采用反向抽运的原因。

Joshua E. Rothenberg 等^[22]通过理论与实验发现, 无论是否采用优化的受激布里渊散射抑制光纤, 联合温度与压力梯度变化导致的光纤最佳受激布里渊增益展宽效果几乎是一致的。说明采用简单的联合温度与压力梯度变化是很有前途的方案。

3.3 放大器自发辐射噪声的抑制

一般说来, 放大器的自发辐射噪声与种子激光的波长、大芯光纤的掺稀土离子的光谱有关, 通常在单一稀土离子的大芯光纤中, 放大器的自发辐射噪声不是制约单频主振光纤放大器输出功率提高的因素^[9]。通过改善大芯光纤的稀土离子的光谱、使用滤波器等方式, 可以抑制不需要的自发辐射噪声。在文献^[11]铽共掺光纤主振功率放大器中, 由于在高功率时铽离子自发辐射增长很快, 即使大芯铽共掺光纤两端切成一定角度, 在铽离子吸收带里功率仍可能超过 70 W。改善光纤掺稀土离子的光谱, 如缩短铽离子的荧光衰退时间、缩短铽离子的寿命, 将会抑制放大器的自发辐射噪声。通过内装的布儒斯特棱镜用作 20 nm 带通滤波器, 实现对放大器的自发辐射噪声进行滤波^[14]。

4 结 论

虽然, 千瓦量级的大功率单频主振荡光纤放大器尚未见报道, 但是, 通过分析实现千瓦量级的大功率单频主振荡光纤放大器将指日可待。目前研究的重点是找到大芯双包层光纤材料与结构设计、光纤长度与抽运增益特性, 光纤的温度与压力变化的综合策略, 实现受激布里渊阈值的最大化。非常有前途的光纤压力变化实施方案, 将是抑制受激布里渊散射多种方案中重要的研究方案。种子激光源的选用与大芯双包层掺稀土离子有关, 窄线宽单偏振输出将会使光纤放大器的最后输出特性得到改善。通过滤波器实现对放大器的自发辐射噪声将是一个简单可行的策略。单频单偏振窄线宽的千瓦量级的大功率单频主振荡光纤放大器, 对相干合束输出功率的提高非常关键, 使兆瓦量级的相干合束单频激光输出成为可能, 具有重大的科学与工业应用意义, 如激光武器的开发、精密工业制造技术等。

参 考 文 献

- 1 Ning Tigang, Pei Li, Hu Xudong *et al.*. Dual-wavelength of single polarized fiber laser based on common active fiber[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(12): 1868~1871
宁提纲, 裴 丽, 胡旭东 等. 单偏振双波长非保偏有源掺杂光纤激光器[J]. *中国激光*, 2008, **35**(12): 1868~1871
- 2 Zhang Chi, Hu Minglie, Song Youjian *et al.*. Mode-locked large-mode-area photonic crystal fiber laser with simple cavity configuration[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(1): 100~103
张 驰, 胡明列, 宋有建 等. 简化腔结构的大模场面积光纤锁模激光器[J]. *中国激光*, 2009, **36**(1): 100~103
- 3 Hu Xudong, Ning Tigang, Chen Qingyan *et al.*. A rapid optimization algorithm of mirror reflectivity in high power fiber lasers[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(11): 2827~2831
胡旭东, 宁提纲, 陈青艳 等. 高功率光纤激光器端面反射系数快速优化算法[J]. *中国激光*, 2009, **36**(11): 2827~2831
- 4 Y. Jeong, J. Sahu, D. Payne *et al.*. Ytterbium-doped large-core fiber laser with 1.36 kW continuous-wave output power [J]. *Opt. Express*, 2004, **12**(25): 6088~6092
- 5 C. Spiegelberg, J. Geng, Y. Hu *et al.*. Compact 100 mW fiber laser with 2 kHz linewidth [C]. *Optical Fiber Communications Conference*, 2003. PD45
- 6 Sun Xinpeng, Zhao Changming, Yang Suhui *et al.*. Experimental study of a 16.1 W output 1064 nm CW single frequency fiber amplifier[J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2007, **27**(6): 532~535
孙鑫鹏, 赵长明, 杨苏辉 等. 16.1 W 输出 1064 nm 连续单频光纤放大器的实验研究[J]. *北京理工大学学报*, 2007,

- 27**(6): 532~535
- 7 G. A. Ball, C. E. Holton, G. Hull-Allen *et al.*. 60 mW 1.5 μm single-frequency low-noise fiber laser MOPA[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 1994, **6**(2): 192~194
 - 8 I. Zawischa, K. Plamann, C. Fallnich *et al.*. All-solid-state neodymium-based single-frequency master-oscillator fiber power-amplifier system emitting 5.5 W of radiation at 1064 nm[J]. *Opt. Lett.*, 1999, **24**(7): 469~471
 - 9 P. Weßels, M. Auerbach, C. Fallnich *et al.*. Narrow-linewidth master oscillator fiber power amplifier system with very low amplified spontaneous emission[J]. *Opt. Commun.*, 2002, **205**(1-3): 215~219
 - 10 A. Liem, J. Limpert, H. Zellmer *et al.*. 100-W single-frequency master-oscillator fiber power amplifier[J]. *Opt. Lett.*, 2003, **28**(17): 1537~1539
 - 11 Y. Jeong, J. K. Sahu, D. B. S. Soh *et al.*. High-power tunable single-frequency single-mode erbium:ytterbium codoped large-core fiber master-oscillator power amplifier source[J]. *Opt. Lett.*, 2005, **30**(22): 2997~2999
 - 12 M. Hildebrandt, M. Frede, P. Kwee *et al.*. Single-frequency master-oscillator photonic crystal fiber amplifier with 148 W output power[J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(23): 11071~11076
 - 13 J. Yoonchan, J. Nilsson, J. K. Sahu *et al.*. Power scaling of single-frequency ytterbium-doped Fiber master-oscillator power-amplifier sources up to 500 W[J]. *IEEE Selected Topics in Quantum Electronics*, 2007, **13**(3): 546~551
 - 14 G. D. Goodno, L. D. Book, J. E. Rothenberg *et al.*. Low-phase-noise, single-frequency, single-mode 608 W thulium fiber amplifier[J]. *Opt. Lett.*, 2009, **34**(8): 1204~1206
 - 15 T. J. Kane, R. L. Byer. Monolithic, unidirectional single-mode Nd:YAG ring laser[J]. *Opt. Lett.*, 1985, **10**(2): 65~67
 - 16 Y. Shen, Y. Qiu, B. Wu *et al.*. Short cavity single frequency fiber laser for in-situ sensing applications over a wide temperature range[J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(2): 363~370
 - 17 G. Weihua, R. M. John. Single-frequency hybrid Brillouin-ytterbium fiber lasers[J]. *Opt. Lett.*, 2009, **34**(20): 3131~3132
 - 18 P. Lee, K. Ji Won, Z. Zhaowei *et al.*. High-power single-frequency thulium-doped fiber master-oscillator power-amplifier at 1943 nm[C]. *Conference on Lasers and Electro-Optics-International Quantum Electronics Conference*, 2009. CTHV1
 - 19 L. Yin-Wen, S. Supriyo, J. D. Michel *et al.*. 10-Watt, single-mode, single-frequency, 1.03 μm Yb³⁺-doped phosphate fiber amplifier[C]. *Conference on Lasers and Electro-Optics-Quantum Electronics and Laser Science Conference and Photonic Applications Systems Technologies*, 2008. CFS1
 - 20 G. Denis, P. Nicholai, M. Mikhail *et al.*. 20 W single-frequency fiber laser operating at 1.93 μm [C]. *Conference on Lasers and Electro-Optics-Quantum Electronics and Laser Science Conference and Photonic Applications Systems Technologies*, 2007. DFI5
 - 21 G. P. Agrawal. *Nonlinear Fiber Optics*[M]. 3th ed. New York: Academi Cpress, 2001. 360~361
 - 22 Joshua E. Rothenberg, Peter A. Thielen, Michael Wickham *et al.*. Suppression of stimulated Brillouin scattering in single-frequency multi-kilowatt fiber amplifiers[J]. *Proc. SPIE*, 2008, **6873**: 687300
 - 23 V. I. Kovalev, R. G. Harrison. Suppression of stimulated Brillouin scattering in high-power single-frequency fiber amplifiers[J]. *Opt. Lett.*, 2006, **31**(2): 161~163
 - 24 S. Gray, A. Liu, D. T. Walton *et al.*. 502 Watt, single transverse mode, narrow linewidth, bidirectionally pumped Yb-doped fiber amplifier[J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(25): 17044~17050
 - 25 A. Liu, X. Chen, M. J. Li *et al.*. Comprehensive modeling of single frequency fiber amplifiers for mitigating stimulated Brillouin scattering[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2009, **27**(13): 2189~2198