

布里渊光纤激光器的研究及发展前景

杨秀清¹, 郑义², 李继军¹, 迎春¹

(1. 内蒙古工业大学理学院物理系, 内蒙古 呼和浩特 010051; 2. 北京交通大学理学院, 北京 100044)

摘要: 介绍了布里渊光纤激光器的原理、研究进展, 并讨论了其发展前景: 光子晶体光纤由于特殊的光纤结构和应力, 可以同时产生具有不同 Stokes 频移的多种模式 SBS, 在设计多波长布里渊光纤激光器上颇具优势; 高重复频率的多波长超短光脉冲光纤激光器和高功率单频光纤激光器, 是布里渊光纤激光器的发展方向; 利用各种特种光纤的 SBS 效应, 是制作高稳定的布里渊光纤激光器的有效方法之一。

关键词: 受激布里渊散射; 布里渊光纤激光器; 光子晶体光纤

中图分类号: TN248.1 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-5078.2012.07.002

Progress and development prospects of Brillion fiber laser

YANG Xiu-qing¹, ZHENG Yi², LI Ji-jun¹, YING Chun¹

(1. Department of Physics, Inner Mongolia University of Technology, Huhhot 010051, China;
2. Institute of Science, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: In this paper, a review on the Brillion fiber laser and the development prospects are presented. Photonic crystal fiber (PCF) as a new type of specialty fiber, possesses unique structure and stress and has obvious advantage in realizing multi-wavelength Brillion fiber laser. Brillion fiber laser are developed into high-repetition-rate and multi-wavelength, high-power and single frequency. Furthermore, taking advantage of specialty fiber, Brillion fiber laser with high stability are generated.

Key words: SBS; Brillion fiber laser; photonic crystal fiber

1 引言

受激布里渊散射(SBS)是光纤中一种典型的非线性现象,具有低阈值功率、超窄线宽增益和极高的转换效率等优点,被广泛应用于激光技术领域。20世纪六、七十年代,伴随着光纤通信技术及光纤制造工艺的发展,1976年,Hill等^[1]人报道了基于SBS的光纤激光器。布里渊光纤激光器由于其极窄的线宽、极好的相干性和多波长稳定输出的能力,在光纤陀螺、光纤传感、密集波分复用(DWDM)以及相干光通信系统中具有广泛的应用,是目前国际上激光技术研究的热点之一。本文介绍了布里渊光纤激光器的原理、研究进展,分析了光子晶体光纤在设计多波长布里渊光纤激光器上的优势,讨论了布里渊光纤激光器的发展方向,并且提出了制作高稳定的布

里渊光纤激光器的有效方法。

2 原理

SBS过程可表述为泵浦光、斯托克斯光通过声波发生的非线性相互作用。泵浦光通过电致伸缩产生声波,引起介质折射率的周期性调制。泵浦引起的折射率光栅通过布拉格衍射散射泵浦光,产生一个与泵浦光有较精确频移的窄线宽信号,即斯托克斯频移。SBS可以看成仅仅是在泵浦光存在的情况下在电致伸缩材料中使斯托克斯经历了一个光增益的过程。若一个频率为 ω_s 的信号光与一个频率为

基金项目: 内蒙古工业大学校基金项目(No. X200928)资助。

作者简介: 杨秀清(1979-),女,讲师,硕士,主要从事激光技术方面的研究。E-mail: xqqyang@163.com

收稿日期: 2011-10-27; 修订日期: 2011-12-07

ω_p 的连续泵浦光共同在光纤中传播,只要频率差 $\omega_p - \omega_s$ 位于布里渊增益带宽内,信号光就会由于布里渊增益而被放大。在光纤两端加上具有适当反射率的反射镜,对光纤内由受激布里渊散射产生的斯托克斯光提供反馈,就会形成激光振荡。典型布里渊光纤激光器主要由三部分组成:产生斯托克斯光的增益介质,使斯托克斯光得到反馈并在介质中进行放大的光学谐振腔和激发增益介质的泵浦源。

3 研究进展

目前,布里渊光纤激光器的研究方向主要包括:布里渊调 Q 光纤激光器、多波长布里渊光纤激光器和布里渊窄线宽光纤激光器。

3.1 布里渊调 Q 光纤激光器

脉冲光纤激光器作为一种新型光源在激光测距、光通信及光传感等领域具有广阔的应用前景。在某些应用场合,为了兼顾灵敏度、测量精度和最长监测距离,脉冲光源要求具备低重复频率、窄脉冲宽度和高功率的特点。对于普通调 Q 光纤激光器,提高峰值功率的一个有效途径是减少与腔长成正比的脉冲宽度,但是缩短腔长势必减少腔内能量的储存,从而降低脉冲峰值功率。1996年,S. V. Chernikov等^[2]提出一种利用瑞利散射和受激布里渊散射实现的被动调 Q 光纤激光器。由于光纤中的SBS具有相位共轭、脉宽压缩、阈值低和后向散射等优点,可有效地提高激光的输出峰值功率,改善光束质量。不足的是,与其他被动调 Q 激光器一样,瑞利散射和受激布里渊散射实现的被动调 Q 光纤激光器的输出不稳定,表现为脉冲峰值功率和重复周期都有较大的抖动。为了解决这一问题,2003年,南开大学的樊亚仙等^[3]提出在瑞利散射和受激布里渊散射实现的被动调 Q 光纤激光器中采取脉冲泵浦方式,令所有脉冲具有相同的起始条件,得到了稳定的脉冲输出。同时,吕福云和樊亚仙等^[4]对包层泵浦调 Q 光纤激光器的SBS调 Q 、声光主动调 Q 以及主被动混合调 Q 进行了一系列实验研究,得到了脉宽2 ns、峰值功率200 kW、重复频率为千赫兹的稳定脉冲输出,实验所得结果比外国同类腔结构的调 Q 光纤激光器输出峰值功率高了一个量级。

3.2 多波长布里渊光纤激光器

近年来,多波长光纤激光器因其在光纤传感、光谱分析仪以及系统检测领域的广泛应用而备受关注,特别是随着密集波分复用(DWDM)技术的发展,多波长光纤激光器由于其结构简单、易于与光纤连接等特点而成为光通信系统中的重要光源。在室

温下实现稳定的多波长光纤激光器的方法很多,其中最关键的技术是如何抑制掺杂光纤的均匀增益展宽效益。

多波长布里渊光纤激光器是一种新型的多波长光纤激光器。在1996年由Gregory等^[5]提出,利用激光器中SBS的非线性增益可以有效地抑制EDF的均匀加宽机制,通过多级SBS级联在室温下实现稳定的、窄线宽、等间隔的多波长输出。近年来,国内上海交通大学进行该方面的研究工作,取得了很大的进展。2005年,Song和Zhan等^[6]提出一种自激发的多波长布里渊光纤激光器。利用萨尼亚克(Sagnac)反射镜的滤波作用和SMF中Rayleigh的动态分布反馈效应,在没有窄线宽布里渊泵浦的情况下,实现了自激发多波长输出。2007年,Zhang等^[7]提出一种可调谐的自激发的多波长布里渊光纤激光波长。通过调节双折射萨尼亚克(Sagnac)环境的滤波特性,可以调谐多波长布里渊光纤激光波长,波长间隔等于布里渊频移。利用Sagnac环境的直接透射输出,还能提高多波长布里渊光纤激光器的转换效率和输出功率。2008年,Huang等^[8]报道了具有约200波长输出,调谐波长可达到约45 nm的多波长布里渊光纤激光器。南开大学的司立彬等^[9]报道了大功率多波长可转换双包层光纤激光器,在25 W的976 nm激光泵浦下,得到功率为6 W的多波长输出。

3.3 布里渊窄线宽光纤激光器

窄线宽光纤激光器是光纤激光器的一个主要研究方向,它以线宽窄、低噪声等优点而广泛应用于光纤传感、光纤遥感以及光纤通信等领域。如果只允许一个纵模振荡,则形成单频激光器,其输出光具有极高的时间相干性。目前,研究人员已经提出了多种压窄线宽的方法,主要有3种^[10]:①用波长选择器件(如可调滤波器、布拉格光栅、光纤环形镜、偏振控制器等)限制增益谱内起振的纵模数,让满足特定条件的少数激光频率的光振荡起来,起到压窄线宽的作用;②饱和吸收体法;③非相干技术法。

布里渊窄线宽光纤激光器利用受激布里渊散射作为增益介质,将激光器的激射模式限制在带宽只有约20 GHz的布里渊增益区内,得到线宽很窄,甚至只有几赫兹的激光输出,成为窄线宽光纤激光器研究中很有前途的发展方向。2008年陈伟等^[11]提出了一种具有多环形腔(MRC)和光纤布拉格光栅可调谐滤波器(FBG-TF)相结合的单纵模布里渊掺铒光纤激光器。实验得到了在1550 nm处功率为

4 dBm 信噪比(SNR) > 60 dB 线宽小于 1.5 kHz 的稳定单纵模输出光。

4 发展前景

(1) 研究基于光子晶体光纤(PCF)的多波长布里渊光纤激光器。密集波分复用(DWDM)技术的成熟对多波长光纤激光器的性能提出了更高的要求。为了进一步提高通信容量,波分复用系统的通道数增加,需要多波长光纤激光器输出的波长数越来越多。目前已经报道的多波长布里渊光纤激光器都具有较窄的增益频谱,因此限制了更多波长的激光振荡。光子晶体光纤(PCF),又叫作多孔光纤(HF)、微结构光纤(MF),是一种由单一材料构成,包层中具有周期性微米量级空气孔结构的新型光纤。2006年,P. Dainese等^[12]研究了光子晶体光纤中的SBS,他们发现由于特殊的光纤结构和应力,这种光纤可以产生多种声波模式,导致同时产生具有不同Stokes频移的多种模式SBS,因此在设计多波长布里渊光纤激光器上颇具优势。光子晶体光纤的特殊性质,不仅拓展了SBS的频率产生范围,还能探索出一系列特殊应用。

(2) 利用SBS效应与锁模技术相结合,研究高重复频率的多波长超短光脉冲光纤激光器。高重复频率的多波长超短光脉冲与其他短脉冲光源相比,具有谱宽较宽、稳定性较好及宽带相干性的优点,因而被广泛应用于光通信、全光再生、光相干层析及光频率测量等领域。被动锁模是利用光纤或其他元件中的非线性光学效应实现锁模的,是产生超短光脉冲的一种行之有效的方法。利用掺杂光纤的增益带宽,理论上可直接产生飞秒光脉冲。基于SBS的布里渊光纤激光器是实现多波长激光输出的关键技术,它与锁模技术相结合,实现高重复频率的多波长超短光脉冲光纤激光器,是布里渊光纤激光器研究发展的重要方向之一。

(3) 发展高功率布里渊单频光纤激光器。在高功率光纤激光器谐振腔中,由于激光的高强度和相干性,使入射光在光纤中各类自发随机涨落的散射能够与后续入射光发生干涉,最终形成光强与入射光相当的散射光,即产生受激散射效应。光纤中受激布里渊散射与受激瑞利散射的产生机制相同,二者不同的是受激瑞利散射是一种弹性散射,而受激布里渊散射是一种非弹性散射。因此受激布里渊散射与受激瑞利散射是不可分割的,在光纤谐振腔中会同时产生受激布里渊散射与受激瑞利散射。受激瑞利散射为谐振腔提供了附加反馈,不仅受激布里

渊散射的阈值迅速降低,还使输出激光的线宽大幅度压窄。利用SBS效应实现单频激光输出,是窄线宽光纤激光器的一个发展方向。

(4) 利用各种特种光纤的SBS效应,制作高稳定的布里渊光纤激光器。增益介质和激光腔的设计仍是制作高性能、低成本的布里渊光纤激光器的关键。普通单模光纤(SMF)就可以作为布里渊增益介质,但是普通光纤的非线性系数较小,导致了较小的布里渊增益。为了提高激光输出功率,布里渊光纤激光器一般采用掺铒光纤放大器(EDFA)作为增益介质,将单模光纤中的非线性布里渊增益和EDFA中线性增益两者结合起来补偿谐振腔的损耗,构成布里渊掺铒光纤激光器。近年来,随着制备技术的发展,产生了各种不同材料的单模光纤。由于材料组分不同,不同光纤的布里渊频移、线宽和增益系数有较大差异。其中硫族化合物光纤^[13]、亚碲酸盐玻璃光纤^[14]和铋光纤^[15]由于具有非常高的非线性系数,可以大幅降低SBS阈值,从而大幅度缩短布里渊光纤激光器的光纤长度,只需几米就可实现稳定的布里渊激光输出,消除了布里渊光纤激光器中EDF过长而产生的对环境敏感等因素,使得输出波长更加稳定而且易于调谐,是制作高稳定的布里渊光纤激光器的有效方法之一。

参考文献:

- [1] K O Hill, B S Kawasaki, D C Johnson. CW Brillouin laser [J]. Appl. Phys. Lett. 1976 28(10): 608-609.
- [2] S V Chernikov, J R Taylor, D V Gapontsev, et al. Q-switching of $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ doped fiber laser using backscattering from a fiber ring interferometer [C]. Pacific Rim Conference on Lasers and Electro-Optics, CLEO-Technical Digest, 1996: 529-530.
- [3] Fan Yaxian, Lu Fuyun, Hu Shuling, et al. 105 kW peak-power double-clad fiber laser [J]. IEEE Photon. Technol. Lett. 2003 15(5): 652-654.
- [4] Lü Fuyun, Fan Yaxian, Wang Hongji, et al. Experimental study of cladding pumped Q-switched fiber laser [J]. Chinese J. Laser 2003 30(12): 1057-1060. (in Chinese)
吕福云, 樊亚仙, 王宏杰, 等. 包层泵浦调Q光纤激光器的实验研究 [J]. 中国激光, 2003, 30(12): 1057-1060.
- [5] Gregory J Cowle, Dmitrii Yu. Stepanov, Multiple wavelength generation with Brillouin/erbium fiber lasers [J]. IEEE Photon. Technol. Lett. 1996 8(11): 1465-1467.
- [6] Y J Song, L Zhan, J H Ji, et al. Self-seeded multiwave-

- length Brillouin-erbium fiber laser [J]. *Opt. Lett.*, 2005, 30(5): 486–488.
- [7] Z X Zhang, L Zhan, Y X Xia. Tunable self-seeded multi-wavelength Brillouin-erbium fiber laser with enhanced power efficiency [J]. *Opt. Express*, 2007, 15: 9731–9736.
- [8] Y Huang, L Zhan, J H Ji, et al. Multiwavelength self-seeded Brillouin-erbium fiber laser with 45 nm tunable range [J]. *Opt. Commun.* 2008, 281(3): 452–456.
- [9] Si Libin, Fu Shenggui, Jia Xiujie, et al. High power switchable multi-wavelength double-lad fiber laser [J]. *Acta Photonica Sinica* 2008, 37(2): 209–211. (in Chinese)
司立彬, 付圣贵, 贾秀杰, 等. 大功率多波长可转换双包层光纤激光器 [J]. *光子学报*, 2008, 37(2): 209–211.
- [10] Gao Xuesong, Gao Chunqing, Song Xueyong, et al. Study on key technology of narrow-linewidth fiber laser [J]. *Laser & Infrared* 2006, 36(6): 441–444. (in Chinese)
高雪松, 高春清, 宋学勇, 等. 窄线宽光纤激光器关键技术研究 [J]. *激光与红外* 2006, 36(6): 441–444.
- [11] Chen Wei, Zhang Yan, Ren Min, et al. Experimental study of single-longitudinal-mode Brillouin erbium-doped fiber laser [J]. *Acta Optica Sinica* 2008, 28(9): 1740–1744. (in Chinese)
陈伟, 张艳, 任民, 等. 单纵模布里渊掺铒光纤激光器的实验研究 [J]. *光学学报* 2008, 28(9): 1740–1744.
- [12] P Dainese, P St J Russell, N Joly, et al. Simulated Brillouin scattering from multi-GHz-guided acoustic photons in nanostructured photonic crystal fibre [J]. *Nature Phys.* 2006, 2: 388–392.
- [13] C Florea, M Bashkansky, Z Dutton, et al. Stimulated Brillouin scattering in single-mode As_2S_3 and As_2Se_3 chalcogenide fibers [J]. *Opt. Express*, 2006, 14(25): 12063–12070.
- [14] K S Abedin. Stimulated Brillouin scattering in single-mode tellurite glass fiber [J]. *Opt. Express*, 2006, 14(24): 11766–11772.
- [15] N Sugimoto, T Nagashima, T Hasegawa, et al. Bismuth-based optical fiber with nonlinear coefficient of $1360 \text{ W}^{-1} \text{ km}^{-1}$ [C]. *Opti. Fiber Commun. Conf. (OFC)*, 2004, 2: 3.