

利用调 Q 的谐振腔直接输出超连续谱

李思源 葛廷武* 孙畅 高静 安娜 王智勇

北京工业大学激光工程研究院, 北京 100124

摘要 采用在谐振腔内加入非线性介质的方法, 制作了由谐振腔直接产生超连续谱输出的全光纤结构激光器。解决了传统超连续谱激光器光源需要高功率和多级放大结构的问题。利用声光调制器作为调 Q 介质, 在调制不稳定性效应的影响下使脉冲分裂, 利用谐振腔直接输出的结构获得了平均功率为 102 mW 的超连续谱输出, 光谱范围为 440~1700 nm, 10 dB 带宽为 500 nm, 光-光转换效率为 5%。

关键词 激光器; 超连续谱; 谐振腔; 调制不稳定性

中图分类号 TN248.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201643.0202005

Supercontinuum Generation using Resonator Cavity of Q -Switched Fiber Laser

Li Siyuan Ge Tingwu Sun Chang Gao Jing An Na Wang Zhiyong

Institute of Laser Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China

Abstract By adding the nonlinear medium in the cavity, the supercontinuum laser is produced by the resonant cavity directly. The problem of the traditional super continuous spectrum laser source demanding the high power and multi stage amplification structure is avoided. In the cavity, using the acoustic optical modulator (AOM) as the Q medium, the pulse is divided under the influence of the modulation instability, and the supercontinuum laser with average output power of 102 mW is obtained directly, with the corresponding optical-optical efficiency of 5%. In addition, the spectral range is from 440 nm to 1700 nm, with 10 dB flatness of 500 nm.

Key words lasers; supercontinuum; resonator cavity; modulation instability

OCIS codes 060.2310; 140.3538; 320.6629

1 引言

超连续谱激光光源由于具有光谱范围宽且平坦、高强度和高亮度等优点。如激光雷达、密集波分复用、医学成像和光谱分析等诸多领域有着重要的应用^[1]。1970年, Alfano等^[2]首次利用倍频后的锁模皮秒脉冲激光抽运BK47玻璃获得了400~700 nm的超连续谱输出; 1994年, Morioka等^[3]首次在光纤中获得了谱宽为200 nm的超连续谱输出。1996年第一根光子晶体光纤(PCF)诞生, 2000年Ranka等^[4]利用一段长75 cm的光子晶体光纤, 首次观察到了400~1600 nm的超连续谱, 其宽度远远超过了以往所有的超连续谱宽度。

近年来, 由于PCF具有无单模截止、色散可控以及高非线性等特性, 可以用于超连续谱产生, 引起了人们的广泛关注^[5]。PCF结构设计参数可调, 通过减小光子晶体光纤的模式面积或者增大光纤长度, 就可以极大地增强光纤中的非线性效应^[6], 在实验中可以依据需求选择光子晶体光纤的结构参数及光纤长度, 满足实验中对非线性效应的需求。

目前报道过的超连续谱主要技术方案是利用高功率大模场面积光纤激光器在腔外抽运高非线性光纤^[7], 如PCF, 或者利用拉锥技术在放大器中直接产生^[8]。这两类产生机制主要存在的缺陷为结构复杂且产生超连

收稿日期: 2015-08-13; 收到修改稿日期: 2015-10-13

作者简介: 李思源(1990—), 男, 硕士研究生, 主要从事脉冲光纤激光器方面的研究。E-mail: lisiyuan@emails.bjut.edu.cn

导师简介: 王智勇(1970—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事大功率半导体激光器及光纤激光器方面的研究。

E-mail: zywang@bjut.edu.cn

*通信联系人。E-mail: getingwu@bjut.edu.cn

续谱所需要的抽运功率较高。因此,如何利用简单结构在较低抽运功率的情况下产生光谱较宽且平坦度良好的超连续谱光源是目前扩大超连续谱应用的一个重要的问题。2009年西班牙瓦伦西亚大学^[9]首次使用谐振腔直接输出超连续谱的方式获得了功率为17 mW的激光输出。2014年厦门大学^[10]利用相似的方式获得了400 mW的超连续谱输出,光谱范围拓展到了550~1950 nm。

传统非线性机制如自相位调制、交叉相位调制、受激拉曼散射和四波混频对超连续谱的影响已经有很多的报道^[11],但依靠这类机制通常需要很高的峰值功率,在峰值功率相对较低的情况下很难产生上述机制。而通常在连续激光器抽运产生超连续谱时,起源于噪声的,其中典型的机制为调制不稳定性^[11]。2007年Demircan等^[12]研究发现,在光子晶体光纤中有长脉冲入射时,调制不稳定性依然可以成为产生超连续谱的主要原因之一,由调制不稳定性导致的脉冲分裂和脉冲内拉曼散射可以使得产生超连续谱的峰值功率降低到千瓦级,甚至亚千瓦级。在皮秒和纳秒激光产生超连续谱的过程中,调制不稳定性 and 四波混频都可以成为展宽超连续谱的重要非线性效应^[13]。在这一机制的影响下可以将产生超连续谱所需的峰值功率降低。

本实验采用谐振腔直接输出超连续谱的方案,将PCF置于谐振腔内,利用中心波长为1064 nm,脉冲重复频率可调的调Q纳秒脉冲激光入射到腔内的PCF,最终成功产生了102 mW的超连续谱输出,光谱宽度超过1300 nm。

2 实验和实验结果分析

2.1 实验结构

实验采用谐振腔直接输出超连续谱,图1为实验结构图。如图1所示,利用合束器将抽运半导体激光(LD)耦合入谐振腔内来激励增益介质(Yb),并由声光调制器(AOM)进行调Q,产生高峰值的纳秒脉冲激光,PCF为非线性介质用以产生超连续谱,超连续谱激光从右侧光纤 Bragg 光栅(FBG)输出。图中的耦合器耦合比为1:99,用于实时监测通过AOM的平均功率。

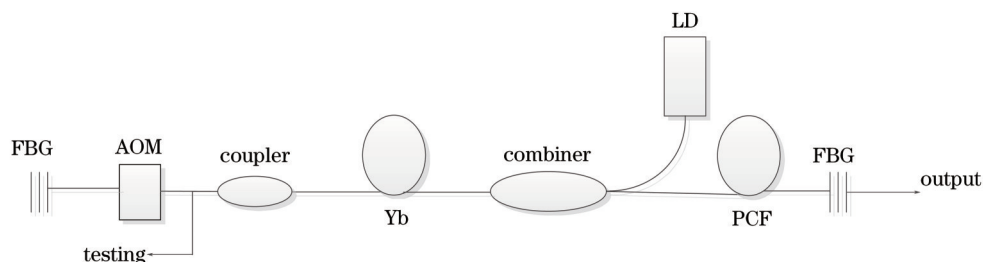


图1 谐振腔结构

Fig.1 Cavity structure

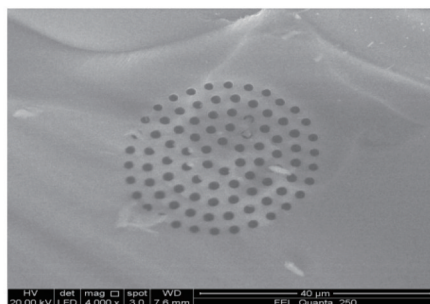


图2 PCF截面图

Fig.2 Cross section of PCF

实验所用的PCF为长飞公司生产,纤芯为4.8 μm,零色散点在1040 nm,长度为20 m,图2为其在电子显微镜扫描下的端面结构图。实验中的调Q介质为古奇公司生产的声光调制器,尾纤为Hi1060,外接信号发生器可以对输出脉冲信号的重复频率进行调节。上升/下降沿时间为10 ns;增益介质为5/130 μm,数值孔径(NA)为0.12的掺镱光纤,吸收系数(975 nm)为1.7 dB/m,长度为10 m;抽运源为975 nm波长的半导体激光器,最高输出功率为9 W,谐振腔两端的光栅均是中心波长为1064 nm,反射率为99%的高反光栅,双高反光栅可

以增加谐振腔内的能量强度,更容易在能量低的情况下产生超连续谱,同时还可以减少输出超连续谱激光中 $1\ \mu\text{m}$ 处的激光剩余,获得较平坦的超连续谱输出。

实验中光谱测量采用的是 Yokogawa 公司的 AQ6370C 光谱仪(测量范围 600~1700 nm)和 Avantes Avaspce-2048 短波光谱仪(测量范围 200~1100 nm);脉冲的波形图测量采用 Tektronix 公司的 DPO4054B 示波器和 Thorlabs 公司的 DETO1CFC 光电转换探头;输出功率测量使用 OPHIR 公司的 3 W 功率计。

2.2 实验结果

首先,测试了调 Q 脉冲信号的重复频率分别为 100 kHz 和 50 kHz 时谐振腔的输出,此时 AOM 可以进行稳定的调 Q ,随着功率的增高,光谱有一定的展宽,但是光谱可见光部分几乎没有能量分布,且整体功率很低,几乎无法测量,输出光谱如图 3 所示,可见此情况下无法获得良好的超连续谱输出。

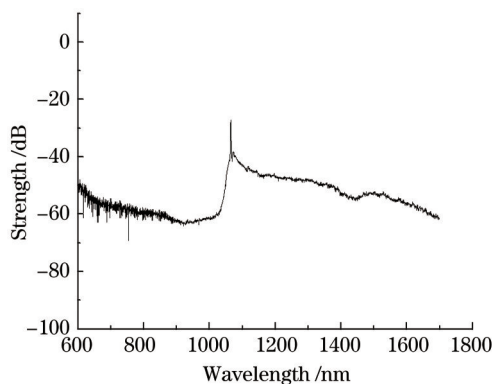


图 3 脉冲在重复频率为 100 kHz 下输出光谱图

Fig.3 Spectral graph pulse at repetition rates of 100 kHz

之后将重复频率改为 5 kHz,由放置于谐振腔内的检测装置观测到,在低功率时谐振腔可以稳定调 Q ,随着功率增高,脉冲逐渐分裂,调 Q 呈现不稳定状态,如图 4 所示。

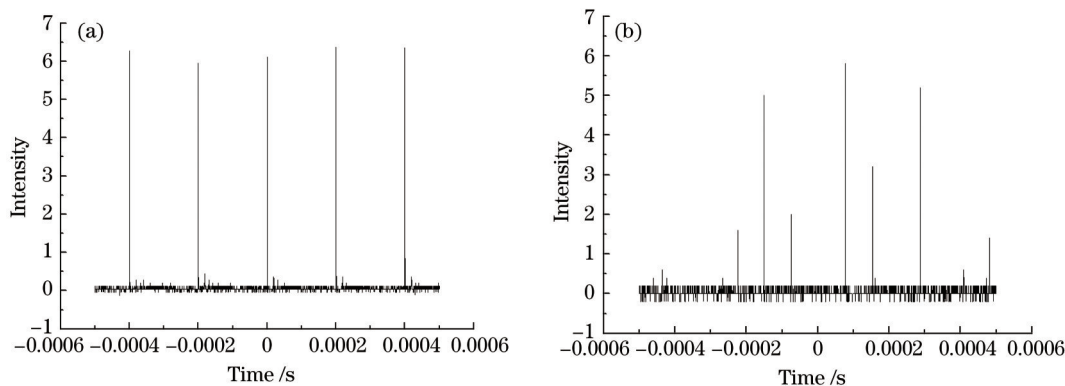


图 4 重复频率为 5 kHz 调 Q 脉冲序列。(a) 分裂前;(b) 分裂后

Fig.4 5 kHz Q pulse sequence. (a) Before splitting; (b) after splitting

随着脉冲序列的分裂,在腔外也观测到了超连续谱的输出,输出光谱随着功率的提高而不断展宽,最终在抽运功率为 2.59 W 时获得了 102 mW 的超连续谱输出。图 5 为激光输出效率曲线。

由图 5 可以观测到,当抽运功率在 1 W 以下时,激光器几乎没有功率输出,这是因为在这种状态下,功率较低,非线性效应相对较弱,光谱没有展开,能量大部分都聚集在 1064 nm 处,而实验采用的光栅对 1064 nm 附近的激光有 99% 反射,因此没有激光输出,激光器能量几乎全部留在了激光器内部,随着抽运功率增高到 1 W 以上,谐振腔内的能量逐渐升高,非线性效应增强,同时脉冲开始分裂,光谱逐渐展开至其他波长,因为光栅反射带宽较窄(约为 0.5 nm),展宽后的光谱能量可以输出,且随抽运功率的增加而增大,抽运功率达到 1.5 W 之后,光谱趋于稳定,此时输出功率与输入功率开始呈线性变化,由于所使用声光调制器额定平均功率为 1 W,因此实验输出超连续谱最高为 102.3 mW。若采用额定功率更高的声光调制器,可获得更高功率的超连续谱输出。

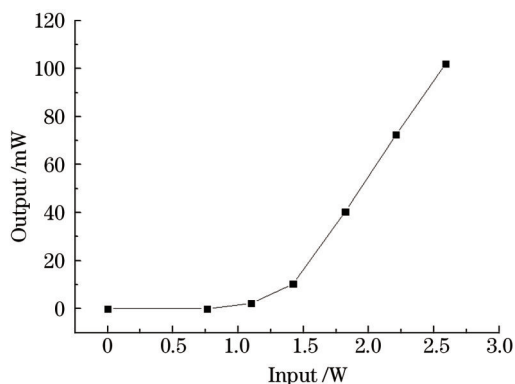


图5 激光输出效率曲线

Fig.5 Efficiency curve of laser output

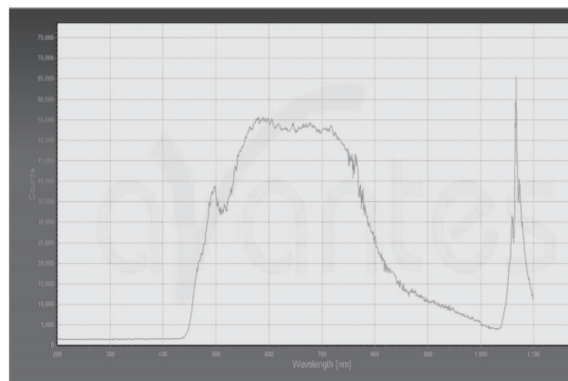


图6 脉冲在重复频率5 kHz下输出的短波光谱图

Fig.6 Short wave spectral of pulse at repetition rates of 5 kHz

利用短波光谱仪对输出光进行测量,其输出光谱短波边界至440 nm,几乎覆盖整个可见光波段,如图6所示。

光谱整体平坦度较好,长波可以延伸至1700 nm以上,光谱如图7所示。

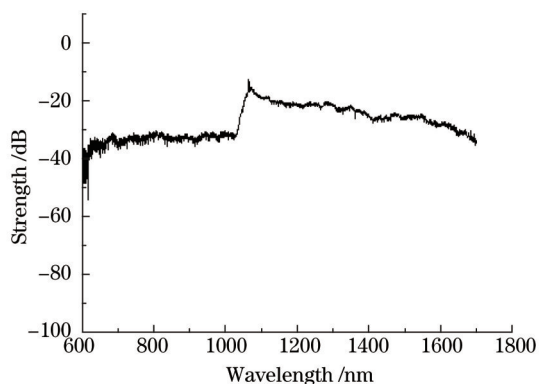


图7 脉冲重复频率为5 kHz下输出光谱图

Fig.7 Spectral graph of pulse at repetition rates of 5 kHz

其中图3和图7均为谐振腔内部峰值功率在1000~1200 W时测得,产生图3光谱的脉冲序列稳定,没有脉冲分裂现象,而产生图7的脉冲序列产生脉冲分裂,通过对光谱图3和7的对比可以得出,在脉冲分裂的情况下所获得的光谱远远优于脉冲不分裂的状态。

对于脉冲分裂的现象,可以理解为调制不稳定性在时域上的影响,使得脉冲顶部出现振幅振荡所导致的。实验表明调制不稳定性可以成为低峰值功率情况下产生超连续谱的主要原因之一,而其他的非线性效应则产生斯托克斯和反斯托克斯波,调制不稳定性和边带的调制不稳定性产生新的频率分量,同时斯托克斯和反斯托克斯波也起到了拓展频谱的作用。因此在调制不稳定性的影响下,随着脉冲的传输,光谱将被极大地展宽,从而产生了超连续谱^[14]。

3 结 论

本实验采用谐振腔直接输出超连续谱的实验方案,利用AOM获得调Q的脉冲信号,通过改变调Q的重复频率,最终获得了102.3 mW的超连续谱输出,输出光谱宽度超过1300 nm,几乎可以覆盖整个可见光波段,且整体平坦度良好,验证了谐振腔内部直接产生超连续谱实验的可行性,并对超连续谱的产生机制进行了分析。但是所获得的光谱并没有如预想完全消除1000 nm附近的峰值,可见光部分能量所占比例还不够高,且整体光-光转换效率偏低。对于进一步优化光谱及整个谐振腔结构的研究还在继续。所得结论可以为进一步发展超连续谱光源提供一定的参考。

参 考 文 献

- 1 高 静,葛廷武,李五一,等.吉赫兹高功率全光纤超连续谱激光光源[J].中国激光,2014,41(11):1102004.

- 2 Alfano R R, Shapiro S L. Emission in the region 4000 to 7000 via four-photon coupling in glass[J]. *Phys Rev Lett*, 1970, 24(11): 584-587.
- 3 Morioka T, Mori K, Saruwatari M, *et al.*. Ultrawide spectral range group-velocity dispersion measurement utilizing supercontinuum in an optical fiber pumped by a 1.5 μm compact laser source[J]. *IEEE, Transactions on Instrumentation and Measurement*, 1995, 44(3): 712-715.
- 4 Ranka J K, Robert S W, Stentz A J. Optical properties of high-delta air-silica microstructure optical fibers[J]. *Opt Lett*, 2000, 25(11): 796-798.
- 5 Deng Chunnian. Nonlinear Amplification of Noise in Optical Communication System and Its Influence on Pulse Breakup[D]. ChangSha: Hunan University, 2007: 11-13.
邓春年. 光纤通信系统中噪声的非线性增长及其对脉冲分裂的影响[D]. 长沙: 湖南大学, 2007: 11-13.
- 6 湛鸿伟, 韦会峰, 刘 通, 等. 七芯光子晶体光纤实现高功率白光超连续谱输出[J]. *中国激光*, 2014, 41(1): 0102007.
- 7 Corwin K L, Newbury N R, Windeler R S, *et al.*. Fundamental noise limitations to supercontinuum generation in microstructure fiber[J]. *Phys Rev Lett*, 2003, 90(11): 113904.
- 8 杨未强, 张 斌, 薛光辉, 等. 13 W 全光纤中红外超连续谱光源[J]. *中国激光*, 2014, 41(3): 0305001.
- 9 J CascanteVindas, A Díez, J L Cruz *et al.*. Supercontinuum Q-switched Yb fiber laser using an intracavity microstructured fiber[J]. *Opt Lett*, 2009, 34(23): 3628-3630.
- 10 Huihui Cheng, Zhengqian Luo, Yizhong Huang, *et al.*. Low-threshold supercontinuum generation and optimization of PCF-intracavity-excited Q-switched fiber lasers[J]. *Opt Commun*, 2014(321): 145-149.
- 11 Liu Jiang, Liu Kun, Shi Hongxing, *et al.*. High-power all-fiber mid-infrared supercontinuum laser source[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(9): 0902004.
刘 江, 刘 昆, 师红星, 等. 高功率全光纤中红外超连续谱激光光源[J]. *中国激光*, 2014, 41(9): 0902004.
- 12 A Demircan, U Bandelow. Supercontinuum generation by the modulation instability[J]. *Opt Commun*, 2005(244): 181-185.
- 13 G Agrawal. Nonlinear Fiber Optics Applications of Nonlinear Fiber Optics, Second Edition[M]. Jia Dongfang, Yu Zhenhong, *et al.* Transl. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2010: 91-93.
阿戈沃. 非线性光纤光学原理及应用(第四版)[M]. 贾东方, 余震虹, 等. 译. 北京: 电子工业出版社, 2010: 91-93.
- 14 Liu Chu. Optical Fiber Based Long-Pulse Pumped Supercontinuum Laser Source and Its Stability Research[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2012: 35-38.
刘 楚. 长脉冲抽运光纤超连续谱光源及其稳定性研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2012: 35-38.

栏目编辑: 宋梅梅