

孤子光脉冲的产生及其应用研究*

张书敏¹⁾ 范虹²⁾ 吕福云³⁾ 左晓雪¹⁾

1) 河北师范大学物理科学与信息工程学院, 石家庄 050016)

2) 河北建筑工程学院数理系, 张家口 075024)

3) 南开大学物理科学学院, 天津 300071)

(2006 年 7 月 22 日收到, 2006 年 12 月 31 日收到修改稿)

利用非线性偏振旋转技术实现自起振被动锁模, 在掺铒光纤环形腔激光器中产生了中心波长为 1563.3 nm、重复频率为 12.5 MHz、脉冲宽度为 352.0 fs、3 dB 光谱宽度为 7.8 nm 的孤子光脉冲. 采用该孤子光脉冲作为抽运光源, 经掺铒光纤放大器放大后, 输入到 101 m 长的高非线性光子晶体光纤中, 获得了 20 dB 带宽约为 240 nm 的超连续激光光谱. 实验详细观测了光脉冲随抽运功率的变化及超连续激光光谱的形成过程, 分析了其形成机理. 研究表明: 当抽运功率较低时, 光谱加宽主要由高阶孤子的分裂引起, 随着抽运功率的增加, 高阶孤子分裂成基本孤子的数目逐渐增大, 光谱进一步加宽; 当抽运功率增加到受激拉曼散射的阈值时, 受激拉曼散射成为光谱展宽的主要原因; 抽运功率进一步增加时, 受激拉曼散射、参量四波混频等非线性的共同作用将使光谱进一步加宽且变得光滑.

关键词: 孤子光纤激光器, 超连续, 光子晶体光纤

PACC: 4255, 4265, 4280M, 4265S

1. 引言

高重复频率的超短光脉冲是光时分复用系统和高速全光信号处理中的关键技术. 被动锁模是产生飞秒光脉冲的一种行之有效的方法. 与主动锁模光纤激光器相比, 被动锁模光纤激光器不受调制器响应速度的限制且结构简单, 是一种真正的全光器件, 它可充分利用掺杂光纤的增益带宽, 理论上可直接产生飞秒光脉冲.

超连续激光光源能够在很宽的光谱范围内同时产生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^[1]、全光再生^[2]、光相干层析^[3]及光频率测量^[4]等领域. 光子晶体光纤由于具有较高的非线性和可控的色散特性, 与其他非线性光纤相比, 更易产生超连续激光光谱. 近来, 研究人员对超短光脉冲的产生及利用锁模光纤激光器和光子晶体光纤相结合获得较宽的超连续激光光谱进行了广泛研究^[5-12]. 飞秒光脉冲在光纤中传输时, 除了受到二阶色散和自相位调制的作用, 光纤中的高阶色散、高阶非线性效应(包括自陡峭效

应、拉曼自频移效应及四波混频等)也会对光谱的形成产生影响, 因而有必要对利用飞秒光脉冲在光子晶体光纤中传输产生超连续激光光谱的物理机制进行研究.

本文利用非线性偏振旋转技术, 在被动锁模掺铒光纤激光器中得到了中心波长为 1563.3 nm、重复频率为 12.5 MHz、脉冲宽度为 352.0 fs、3 dB 光谱宽度约为 7.8 nm 的孤子光脉冲. 输出的光脉冲经过掺铒光纤放大器(EDFA)进行放大后输入到一段 101 m 长的高非线性光子晶体光纤(HNL-PCF)中, 得到了 20 dB 带宽约为 240 nm 的超连续激光光谱. 实验详细观测了抽运功率不同时超连续激光光谱的形成过程, 分析了其形成机理. 研究发现, 当入射到 HNL-PCF 的飞秒光脉冲的能量较低时, 光谱加宽主要是因为高阶孤子的分裂而形成了红移的基本孤子光脉冲和蓝移的非孤子光脉冲; 随着抽运功率的增加, 高阶孤子分裂成基本孤子的数目逐渐增大, 光谱进一步加宽; 当抽运功率增加到受激拉曼散射(SRS)的阈值时, 能量则通过 SRS 效应分别向长波或短波方向传播, 若进一步增加抽运功率, 在 SRS、四波混频等非线性效应的共同作用下, 光谱会变得更宽、更光滑.

* 河北省自然科学基金(批准号: F2006000183)、河北省教育厅科研计划(批准号: 2001241)和河北师范大学博士科研启动基金(批准号: L2005B05)资助的课题.

2. 实验装置

实验装置如图 1 所示. 被动锁模光纤激光器的增益介质为一段 8 m 长的掺铒光纤 (EDF), 工作波长为 1480 nm、最大输出功率为 205.0 mW 的半导体激光器 (LD) 通过一 1480 nm/1550 nm 的波分复用器 (WDM) 对 EDF 进行抽运. 偏振相关隔离器 (P-I) 的作用是抑制后向反馈、保证环形腔激光器单向工作. 两个偏振控制器 PC1 和 PC2 (PC1 由两个 1/4 波片组成, PC2 由两个 1/4 波片和一个 1/2 波片组成) 的作用是调节激光器的偏振态. 该锁模激光器形成的激光首先经过一 EDFA 进行放大, 后传输到一段长度为 101 m 的 HNL-PCF 中. HNL-PCF 在 1550 nm 处的非线性系数为 $11 \text{ W}^{-1} \text{ km}^{-1}$ 、零色散波长为 1557 nm、在 1520—1610 nm 波长范围内色散值为 -0.8 到 $0.5 \text{ ps/nm} \cdot \text{km}$. 实验中我们同时采用日本 Ando 公司生产的 6315B 型光谱分析仪监测输出激光的光谱, 采

用自相关仪和带有光接口的 5 GHz 的数字示波器监测输出光脉冲的时域特性.

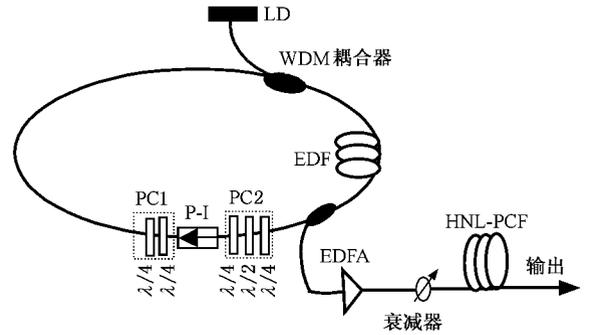


图 1 利用被动锁模光纤激光器产生超连续激光的实验装置示意图

3. 实验结果

激光器的工作阈值为 12.0 mW, 当抽运功率增加到 15.07 mW 时, 通过调整偏振控制器的状态, 稳定的单孤子光脉冲即可形成. 图 2 (a) (b) 分别给出

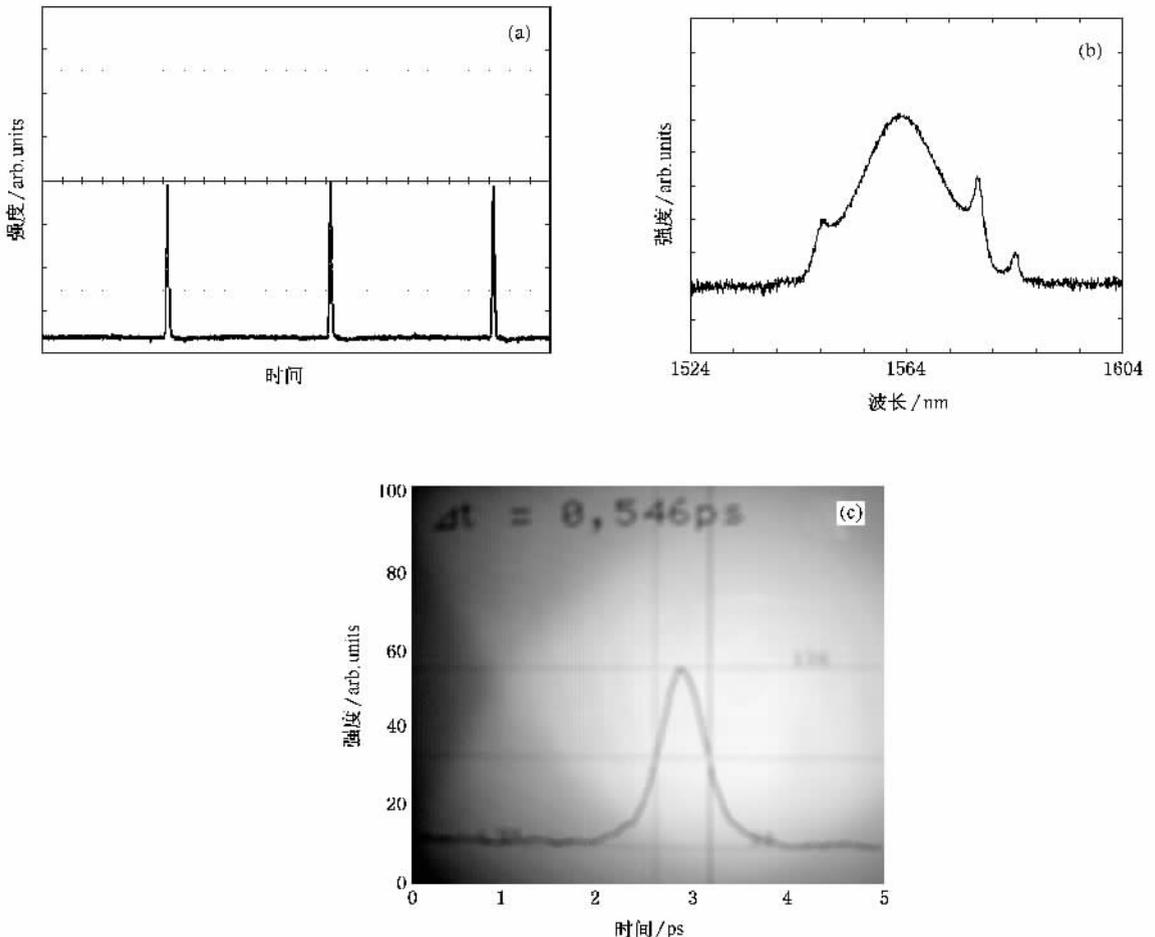


图 2 当抽运功率为 71.2 mW 时得到稳定的被动锁模脉冲序列 (a)、光谱图 (b) 及自相关曲线 (c)

了当抽运功率为 71.2 mW 时得到稳定的被动锁模脉冲序列及光谱图,其重复频率为 12.5 MHz,中心波长为 1563.3 nm,3dB 光谱宽度大约为 7.8 nm.自相关曲线如图 2(c) 所示,所得光脉冲的宽度为 546.0 fs,考虑到输出脉冲为 sech^2 型,故得到的光脉冲的实际脉冲宽度为 352.0 fs.时间带宽积为 0.34,与孤子光脉冲的时谱积(0.315)很接近,说明实验中所得光脉冲为变换极限光脉冲.

EDFA 的最大输出功率为 24 mW,图 3 给出了不同抽运功率下超连续激光光谱的形成过程.

1) 超连续激光光谱形成的初始阶段,高阶孤子分裂引起光谱加宽.当入射到 HNL-PCF 的抽运功率较低时,光谱加宽主要是因为高阶孤子的分裂而形成了红移的基孤子光脉冲和蓝移的非孤子光脉冲.在超连续激光光谱形成的初始阶段,随着 EDFA 平均功率的增加,孤子光脉冲的振幅会逐渐增大,当振幅增大到一定程度时,高阶孤子形成.因为该锁模激光器的工作波长位于 HNL-PCF 的零色散波长附近,此时三色散、拉曼自频移以及自陡峭效应的作用较强,在这些效应的共同作用下,高阶孤子将分裂成

基本孤子.图 3(a)给出了当抽运功率为 1.3 mW 时所形成的超连续激光光谱.

2) 随着 EDFA 功率的增加,基孤子的数目逐渐增加引起光谱进一步加宽.当 EDFA 的功率增加时,入射到 HNL-PCF 的光孤子的能量进一步增大,高阶光孤子分裂成基孤子的数目逐渐增加.由于每个光孤子及它们相应的色散波均具有独立的中心频率,随着光孤子数目的增加,光谱会进一步加宽.图 3(b)给出了当抽运功率为 3.34 mW 时由孤子数目增加而引起的光谱加宽.

3) 由受激拉曼散射引起长波或短波方向上的光谱加宽.当 EDFA 的功率超过 14 mW 时,发现光谱将向长波或短波方向加宽.这是因为随着抽运功率的增加,达到 SRS 的阈值,能量则通过 SRS 效应向长波或短波方向传播.图 3(c)给出了当抽运功率增加到 15.88 mW 时所产生的拉曼斯托克斯线和反斯托克斯线.

4) SRS、参量四波混频等非线性效应共同作用引起光滑的超连续激光光谱.随着抽运功率的进一步增加,四波混频效应使得新的频谱分量产生.事实

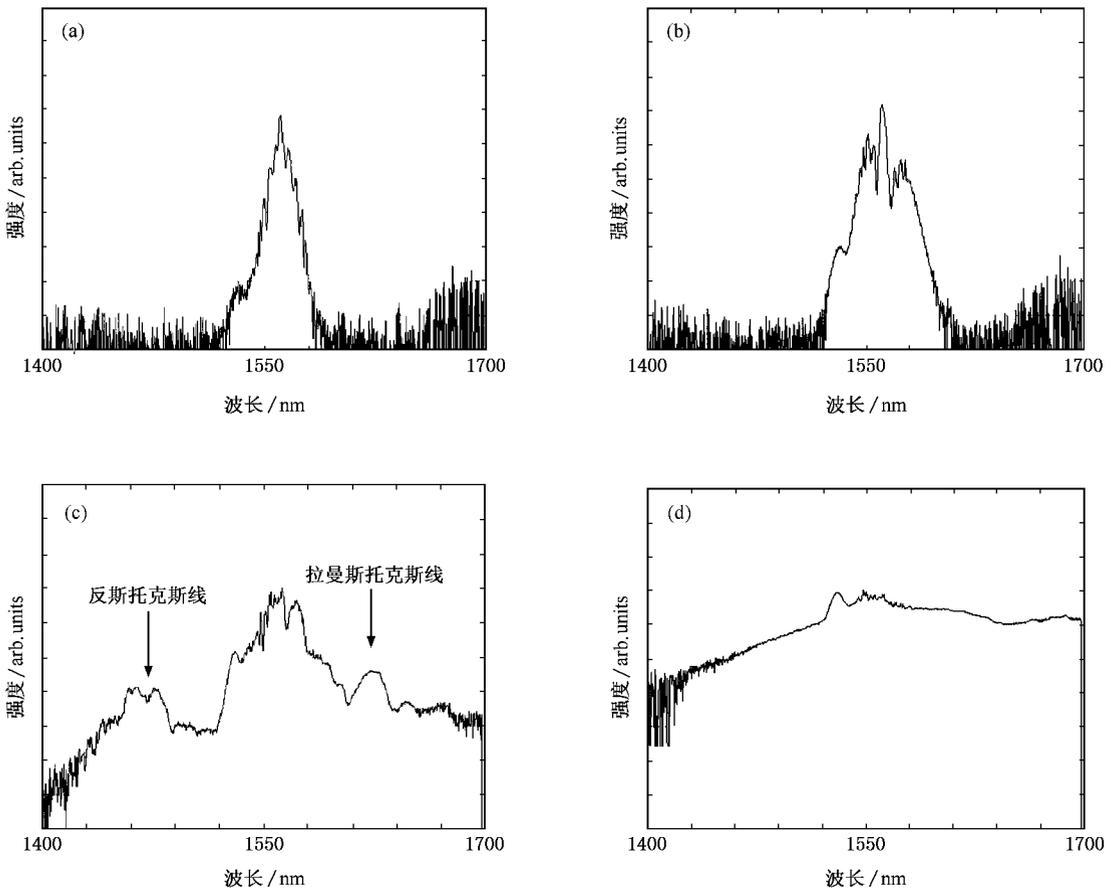


图 3 不同的抽运功率下所形成的超连续激光光谱 抽运功率为(a) 1.3 mW (b) 3.34 mW (c) 15.88 mW (d) 24 mW

上,随着抽运功率的进一步增加,将激发出更高阶光孤子,此时超连续激光光谱的产生机理可理解为:高阶孤子分裂产生超连续激光光谱,而 SRS 加宽了超连续谱的产生范围,四波混频又使新的频谱分量增加,进而使光谱变得更宽、更光滑.图 3(d)给出了当抽运功率为 24 mW 时所得到的 20 dB 带宽约为 240 nm(1460—1702 nm,光谱仪所能测到的最大光谱值为 1702 nm)的超连续激光光谱.

4. 结 论

利用非线性偏振旋转锁模技术,在掺铒光纤环

形腔激光器中得到了脉冲宽度为 352.0 fs 的孤子光脉冲.将光脉冲在 EDFA 中进行放大后传输到 HNL-PCF 中,得到了 20 dB 带宽约为 240 nm 的超连续激光光谱.实验观测了随抽运功率的变化超连续激光光谱的形成过程.研究发现,当抽运功率较低时,光谱加宽主要由高阶孤子分裂成基本光孤子引起;随着抽运功率的增加,高阶孤子分裂成基本孤子的数目逐渐增大,光谱进一步加宽;当抽运功率增加到 SRS 的阈值时,SRS 引起的斯托克斯波和反斯托克斯波将会对光谱的加宽起主导作用;若进一步增加抽运功率,在 SRS、四波混频等非线性效应的共同作用下,光滑而平坦的超连续激光光谱将形成.

-
- [1] Nisoli M, Silvestri S D, Svelto O *et al* 1997 *Opt. Lett.* **22** 522
- [2] Takara H, Ohara T, Mori K *et al* 2000 *Electron. Lett.* **36** 2089
- [3] Hartl I, Li X D, Chudoba C *et al* 2001 *Opt. Lett.* **26** 608
- [4] Udem T, Holzwarth R, Hansch T W 2002 *Nature* **416** 233
- [5] Husakou A V, Herrmann J 2002 *J. Opt. Soc. Am. B* **19** 2171
- [6] Zhang S M, Lu F Y, Dong X Y *et al* 2005 *Opt. Lett.* **30** 2852
- [7] Hilligsoe K M, Paulsen H N, Thogersen J *et al* 2003 *J. Opt. Soc. Am. B* **20** 1887
- [8] Schreiber T, Limpert J, Zellmer H *et al* 2003 *Opt. Commun.* **228** 71
- [9] Cheng C F, Wang X F, Lu B 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 1826 (in Chinese) [成纯富、王晓方、鲁波 2004 物理学报 **53** 1826]
- [10] Jia Y Q, Yan P G, Lü K C *et al* 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 1809 (in Chinese) [贾亚青、闫培光、吕可诚等 2006 物理学报 **55** 1809]
- [11] Liu W H, Wang Y S, Liu H J *et al* 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 1815 (in Chinese) [刘卫华、王屹山、刘红军等 2006 物理学报 **55** 1815]
- [12] Xu W C, Gao J L, Liang Z Q *et al* 2006 *Chin. Phys.* **15** 715

Soliton pulses in an erbium-doped fiber ring laser and its use in supercontinuum generation *

Zhang Shu-Min¹⁾ Fan Hong²⁾ Lü Fu-Yun³⁾ Zuo Xiao-Xue¹⁾

1) *College of Physics Science and Information Engineering, Hebei Normal University, Shijiazhuang 050016, China*

2) *Department of Mathematics and Physics, Hebei Institute of Architecture Civil Engineering, Zhangjiakou 075024, China*

3) *College of Physics Science, Nankai University, Tianjin 300071, China*

(Received 22 July 2006 ; revised manuscript received 31 December 2006)

Abstract

We present a source of soliton pulses in an erbium-doped fiber ring laser. The passive mode-locking is achieved by using the nonlinear polarization rotation technique. The system generates 352 fs pulses with repetition rate of 12.5 MHz and the 3dB spectrum width of about 7.8 nm at the central wavelength of 1563.3 nm. A low-cost erbium-doped fiber amplifier is employed to boost the peak power of the pulses. Single-mode supercontinuum is obtained by passing the amplified pulses through a photonic crystal fiber with the length of 101 nm. Further more, we show the evolution process of the supercontinuum with different optical pump power. It is shown that, with the low-intensity femtosecond pulses, the spectrum broadening is caused by the fission of the higher-order solitons. With the increase of the pump power, the threshold of stimulated Raman scattering (SRS) is achieved, and the energy transfer through SRS spreads toward the long wavelength and the short wavelength sides. On further increasing the pump power, the coupling between SRS and parametric four-wave mixing will result in the appearance of waves with new wavelengths, and the spectrum will become broader and more smooth.

Keywords : soliton fiber laser, supercontinuum, photonic crystal fiber

PACC : 4255, 4265, 4280M, 4265S

* Project supported by the Natural Science Foundation of Hebei Province, China (Grant No. F2006000183), the Scientific Research Program of the Education Bureau of Hebei Province, China (Grant No. 2001241), the Scientific Research Foundation for Doctor of Hebei Normal University, China (Grant No. L2005B05).