



75 fs 全光纤超短脉冲激光器

邓定桓, 詹黎*, 夏宇兴

上海交通大学物理系光学与光子学研究所, 上海 200240

* 联系人, E-mail: lizhan@sjtu.edu.cn

2007-09-04 收稿, 2007-12-18 接受

国家自然科学基金(批准号: 60577048)和上海市重大基础研究(批准号: 04DZ14001)资助项目

摘要 报道了利用光纤非线性偏振旋转锁模方法, 使用正常色散的高掺铒光纤提供高增益的同时, 补偿谐振腔中普通单模光纤的反常色散, 在展宽脉冲光纤环形激光器中直接产生了 75 fs 的超短脉冲输出. 在 125 mW 的抽运光功率下, 其平均输出功率大于 15 mW, 重复频率为 25.9 MHz, 光谱宽度达到 53 nm, 同时输出脉冲的能量也获得了极大的提高, 单脉冲能量达到 0.6 nJ. 该激光器操作简单, 在锁模情况下运行稳定, 其全光纤结构更有利于小型化和便携化.

关键词

掺铒光纤激光器

飞秒脉冲

非线性偏振旋转

超短脉冲掺铒光纤激光器由于其在时域上的脉冲分布极短, 在频域上光谱分布又极宽, 在光孤子通信、精密光谱和传感器等方面具有广泛的应用前景. 光纤激光器中利用被动锁模产生超短脉冲主要有三种方法: 饱和吸收体(saturable absorber mirror, SAM)、8 字型的非线性放大环形镜(nonlinear amplifying loop mirror, NALM)和非线性偏振旋转(nonlinear polarization rotation, NPR), 其中前面两种方法一般只能产生低于 500 fs 的光脉冲, 而 NPR 锁模方法如果引进色散管理, 使得脉冲在谐振腔中展宽放大后压缩, 形成展宽脉冲光纤环形激光器(stretched-pulse fiber ring laser), 可以实现低于 100 fs 的超短脉冲输出^[1]. 1993 年, Tamura 等人^[2]最先利用 NPR 锁模方法, 在环形腔中实现了 77 fs 的超短脉冲输出, 该方法已成为光纤激光器产生超短脉冲的主要方法, 不同的研究小组对此进行了一系列的研究. 2007 年, Tang 和 Zhao^[3]利用 1480 nm 的高功率激光器进行抽运, 使用相同的方法实现了 47 fs 的超短脉冲输出, 这是目前世界上光纤激光器直接产生的最短脉冲, 但该激光器本质上不是一个全光纤结构, 在腔中使用了波片和偏振光束分光器等体器件, 从而使得激光器的调整对准和维护较为困难, 不利于集成化, 而全光纤的结构会使操作简单, 更有利于集成化、便

携化. 国内在超短脉冲光纤激光器方面的研究起步于 20 世纪 90 年代末, 也取得了不少进展, 1999 年陈国夫等人^[4]利用相同结构实现了 276 fs 的脉冲输出, 输出平均功率为几百微瓦, 光谱宽度为 10.1 nm, 随后, 他们又实现了 260 fs 的超短脉冲输出^[5], 但是其所用的光纤全部工作在反常色散区, 属于孤子光纤环形激光器(soliton fiber ring laser)^[1], 非线性饱和限制了其脉冲宽度和脉冲峰值功率. 另外, 他们还在 1.06 μm 波段利用 8 字型腔结构实现了 177 fs 的脉冲输出^[6], 这是到目前为止国内在光纤激光器中实现的最短脉冲结果. 2005 年, 赵德双等人^[7]同样利用 NPR 技术实现了约 200 fs 的脉冲输出, 其光谱宽度为 18 nm, 重复频率为 14.0 MHz.

本文报道了在 1550 nm 波段利用非线性偏振旋转锁模方法, 同时引入正常色散的高掺铒光纤补偿普通单模光纤的反常色散, 优化色散管理, 在展宽脉冲光纤环形激光器中直接产生 75 fs 的超短脉冲输出. 其抽运光功率阈值在 80 mW 左右, 在 125 mW 的抽运光功率下输出平均功率大于 15 mW, 重复频率为 25.9 MHz, 光谱的带宽达到 53 nm.

1 实验原理及装置

展宽脉冲光纤环形激光器的主要结构如图 1 所

示, 波长为 980 nm 的抽运光经过 980/1550 波分复用器(wavelength division multiplexer)耦合进谐振腔, 随后进入一段高掺杂的掺铒光纤(erbium-doped fiber, EDF), 10%输出耦合器选择在掺铒光纤后面直接输出光脉冲, 这样可以降低进入普通单模光纤中的脉冲能量, 减少脉冲在光纤中的非线性效应, 两个偏振控制器 PC1($\lambda/4 + \lambda/4$)和 PC2($\lambda/4 + \lambda/4$), 以及偏振相关隔离器(polarization dependent isolator)作为锁模器件连接在谐振腔中, 构成一个光纤环形激光器。

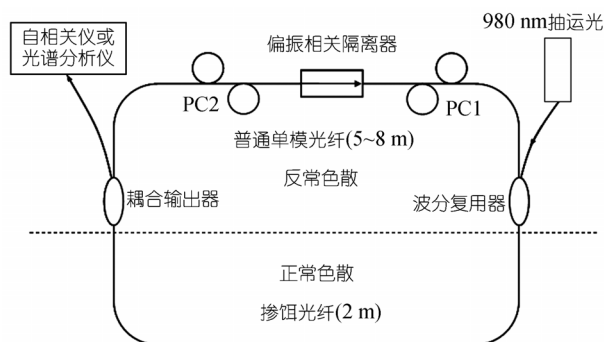


图1 展宽脉冲光纤环形激光器的结构图

该激光器的锁模原理为: 在连续工作情况下, 极小的抖动脉冲从偏振相关隔离器出来后, 由于起偏器的作用变成线偏振光, 经过偏振控制器 PC1($\lambda/4$)后变成两个在互相垂直方向上有一定延时的椭圆偏振光进入掺铒光纤进行独立放大, 偏振光在单模光纤中由于存在着自相位调制、交叉相位调制、光克尔效应等非线性效应而发生偏振旋转, 使得脉冲的峰值位置和两边翼经历了不同的相位延迟, 到达 PC2 时只有部分脉冲被还原成线偏振光, 如果调节 PC2 的位置使得脉冲峰值位置刚好被还原成线偏振光而顺利通过偏振相关隔离器, 脉冲的两边翼被阻挡而湮灭, 使得脉冲变窄(这里的偏振相关隔离器的作用类似于饱和吸收体), 经过几个周期的变窄和放大之后就能实现稳定的超短脉冲输出。

由于普通单模光纤在 1550 nm 波长附近工作在反常色散区, 群速度延迟量约为 $18 \text{ ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})$, 为了优化色散管理, 我们选用了工作在正常色散上的掺铒光纤, 其掺杂浓度达到 2280×10^{-6} , 在 1550 nm 波长附近的群速度延迟量约为 $-51 \text{ ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})$, 用于补偿普通单模光纤的反常色散, 使得形成的脉冲在谐振腔经历了极大的正常色散和反常色散, 经历了

两次展宽和压缩, 减少了非线性饱和, 使得输出的脉冲宽度更窄, 同时极大地提高了单脉冲所能容纳的能量。实验中, 我们先固定掺铒光纤的长度为 2 m, 随后通过优化普通单模光纤的长度来实现最短的脉冲输出, 这样能够找到最佳的色散补偿点, 便于色散管理。实验用到的 980 nm 抽运光的最大输出功率为 125 mW, 输出端可以接到自相关仪(autocorrelator)、光谱分析仪(OSA)以及探测器对脉冲的形状和特性进行研究。

2 结果与讨论

实验中, 980 nm 抽运光通过 WDM 进入激光环形腔内, 激光器在偏振相关隔离器的作用下实现单向运转, 当抽运光功率达到锁模阈值后, 调节偏振控制器可以很容易从连续振荡状态实现锁模脉冲输出^[8], 经过锁模优化后, 我们发现在普通单模光纤长度为 5~8 m 时都可以实现锁模状态输出, 其脉冲宽度都小于 100 fs。直接从输出端出来的脉冲宽度一般为 1 ps 左右, 但脉冲是高度啁啾的^[1], 通过一定长度的单模光纤进行色散补偿可以将脉冲压缩到 100 fs 以下。图 2 是谐振腔长度为 7.9 m 时通过高速探测器(1 ns 上升时间)后, 在示波器上所显示的输出脉冲形状, 可以看出其脉冲间隔稳定, 形状相同, 表示其锁模情况良好, 同时从图上可以读出其脉冲的重复频率为 25.9 MHz。当谐振腔长度较长时, 通过微调偏振控制器可以看到高阶谐波锁模或者分裂孤子现象(multiple gain-guided solitons)^[9], 但是脉冲一旦形成, 如果没有扰动和背向反射, 激光器可以在光学平台上稳定工作几个小时, 其在示波器屏幕上的脉冲形状保持不变。

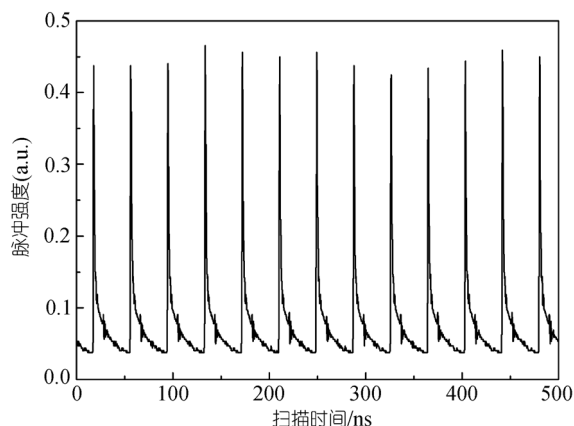


图2 从展宽脉冲光纤环形激光器输出的飞秒脉冲序列

经过一定长度的单模光纤压缩后, 图 3 是利用自相关仪观测到的自相关轨迹, 在色散补偿不理想的情况下可以看到其自相关信号有一个很小的基座(如插图所示), 这主要是由三阶色散引起的^[10], 通过光纤长度优化和调节偏振控制器, 可以把这个基座最小化, 从而找到平滑的自相关信号. 实验中我们所观测到的最短的自相关信号的 FWHM 为 115.2 fs, 对应其最短的脉冲宽度为 75 fs(双曲正割脉冲形状下).

图 4 为 75 fs 脉冲输出情况下的对应光谱图, 其光谱平滑分布, 没有明显的边带存在, 中心波长约为 1575 nm, 由图读得光谱的 3 dB 带宽为 53 nm, 计算得出其时间带宽积为 0.48, 已经接近了傅里叶转换极限. 通过缩短谐振腔的长度或者提高耦合输出比可以把中心波长移动到 1550 nm 附近^[11], 这样可以有效地利用掺铒光纤的增益带宽, 获得更宽的光谱输出, 从而实现更短的脉冲输出. 由于我们的谐振腔长度主要由掺铒光纤长度和色散参数决定, 通过改变这些参数就可以实现谐振腔的优化.

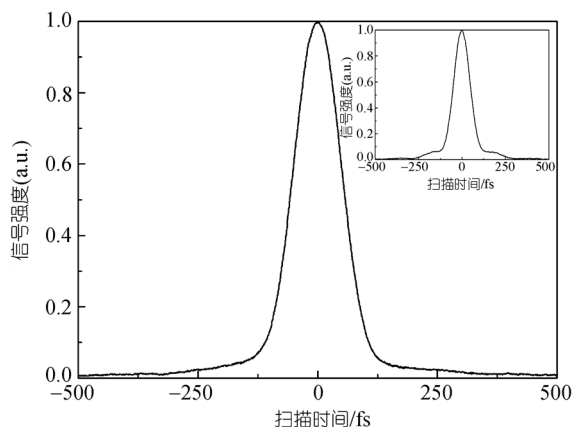


图 3 实验所观测到的最短自相关信号

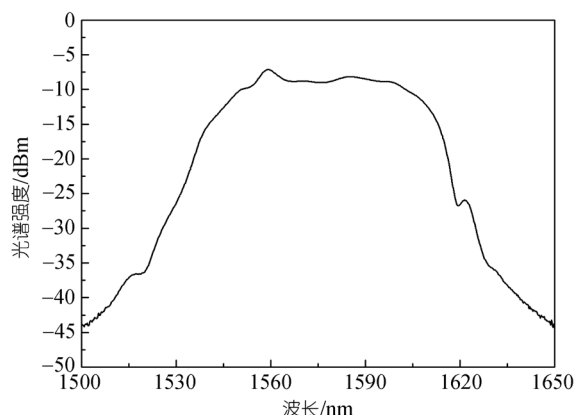


图 4 75 fs 脉冲输出情况下的对应光谱

最后我们测量了在锁模状态下平均输出功率与抽运功率的关系. 在最大抽运光功率下实现最佳锁模, 随后降低抽运光功率, 测出其相应的输出平均功率, 结果如图 5 所示. 可以看出, 当最大抽运光功率为 125 mW 时, 其锁模脉冲输出的平均功率达到了 15.4 mW, 具有极高的转换效率, 斜率效率为 16.9%, 在 25.9 MHz 的重复频率和 75 fs 的脉冲宽度下, 其输出的单脉冲的能量达到 0.6 nJ, 峰值功率达到 8 kW. 激光器的锁模阈值在 80 mW 左右, 一旦实现锁模, 抽运光功率降低到 70 mW, 仍然能保持锁模状态. 从图 5 可以看出, 在低于 70 mW 的抽运光功率下, 激光器的输出功率明显下降, 此时激光器只能工作在连续模式. 由于我们使用的掺铒光纤在没有抽运光的情况下在 1530 nm 附近具有 80 dB/m 的吸收峰值, 对连续光具有强吸收, 引起输出功率也随着下降. 在实验中我们观察到, 随着抽运光功率的上升, 脉冲的宽度有一定的变窄, 进一步提高抽运光功率应该可以输出更短脉宽、更高功率的脉冲.

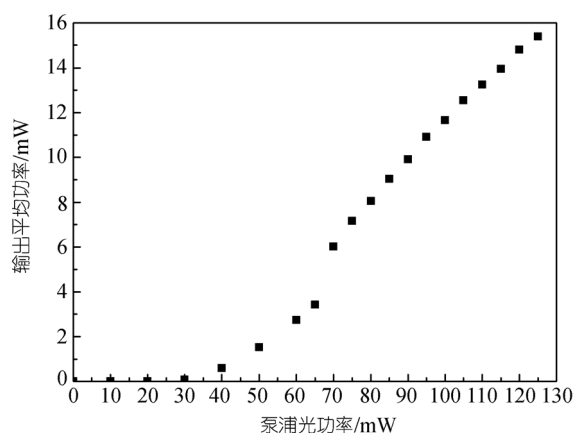


图 5 输出脉冲的平均功率与抽运光功率的关系

3 结论

我们利用非线性偏振旋转锁模在掺铒光纤环形激光器中实现了 75 fs 的超短脉冲输出, 在 25.9 MHz 的重复频率下, 其光谱的中心波长为 1575 nm, 光谱宽度为 53 nm. 由于我们在激光谐振腔中引入正常色散的高掺铒光纤与反常色散的普通单模光纤进行色散管理, 脉冲在谐振腔中两次被展宽后再压缩, 减少了光纤中的非线性效应, 并进一步提高了输出的脉冲能量, 其全光纤结构有利于小型化, 便携化, 操作更加简单, 是在眼安全及通信波段上理想的超短脉冲激光光源. 通过改变谐振腔长结构、增加抽运光功率及改变输出耦合比, 应该可以实现更短的脉冲输出.

参考文献

- 1 Nelson L E, Jones D J, Tamura K, et al. Ultrashort-pulse fiber ring lasers. *Appl Phys B*, 1997, 65: 277—294[DOI]
- 2 Tamura K, Ippen E P, Haus H A, et al. 77-fs pulse generation from a stretched-pulse mode-locked all-fiber ring laser. *Opt Lett*, 1993, 18(13): 1080—1082
- 3 Tang D Y, Zhao L M. Generation of 47-fs pulses directly from an erbium-doped fiber laser. *Opt Lett*, 2007, 32(1): 41—43[DOI]
- 4 刘东峰, 陈国夫, 王贤华. 自起振被动锁模掺 Er^{3+} 光纤环形腔孤子激光器的实验研究. *中国科学 A 辑: 数学, 物理, 天文学*, 1999, 29(7): 656—661
- 5 陈国夫, 王贤华, 刘东峰, 等. 稳定的全光纤飞秒激光光源. *光子学报*, 2001, 30(2): 148—150
- 6 Zhao W, Ma H Q, Zhang W, et al. Environmentally stable ytterbium figure-of-eight fiber laser producing 177-fs pulses. *Opt Commun*, 2007, 273: 242—245[DOI]
- 7 赵德双, 刘永智, 王秉中, 等. 高能量飞秒脉冲掺 Er^{3+} 光纤激光器. *光电子·激光*, 2005, 16(8): 922—925
- 8 Tamura K, Jacobson J, Ippen E P, et al. Unidirectional ring resonators for self-starting passively mode-locked lasers. *Opt Lett*, 1993, 18(3): 220—222
- 9 Zhao L M, Tang D Y, Cheng T H, et al. Generation of multiple gain-guided solitons in a fiber laser. *Opt Lett*, 2007, 32(11): 1581—1583[DOI]
- 10 Prochnow O, Ruehl A, Schultz M, et al. All-fiber similariton laser at 1 μm without dispersion compensation. *Opt Express*, 2007, 15(11): 6889—6893 [DOI]
- 11 Lin G R, Chang J Y. Femtosecond mode-locking erbium-doped fiber ring laser with intra-cavity loss controlled full L-band wavelength tenability. *Opt Express*, 2007, 15(1): 97—103[DOI]