

303 MHz 高重复频率掺 Er 光纤飞秒激光器

刘欢 巩马理 曹士英 林百科 方占军

A 303 MHz fundamental repetition rate femtosecond Er: fiber ring laser

Liu Huan Gong Ma-Li Cao Shi-Ying Lin Bai-Ke Fang Zhan-Jun

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 64, 114210 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.114210

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.114210>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I11>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

高速线性光采样用被动锁模光纤激光器重复频率优化

Repetition rate optimization of passively mode-locked fiber laser for high-speed linear optical sampling

物理学报.2015, 64(13): 134206 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.134206>

覆盖可见光波长的掺 Er 光纤飞秒光学频率梳

Er-fiber femtosecond optical frequency comb covering visible light

物理学报.2015, 64(9): 094204 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.094204>

光子晶体光纤飞秒激光非线性放大系统的耦合动力学过程研究

Coupling dynamics for a photonic crystal fiber femtosecond laser nonlinear amplification system

物理学报.2015, 64(9): 094203 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.094203>

300 W 侧面分布式抽运掺 Yb 全光纤放大器

300 W all-fiber amplifier with distributed side-coupled pump configuration

物理学报.2015, 64(8): 084205 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.084205>

高重复频率全光纤被动锁模掺铒光纤激光器

High-repetition-rate passively mode-locked erbium-doped all fiber laser

物理学报.2015, 64(6): 064206 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.064206>

303 MHz高重复频率掺Er光纤飞秒激光器^{*}刘欢¹⁾ 巩马理¹⁾ 曹士英^{2)†} 林百科²⁾ 方占军²⁾

1)(清华大学精密仪器系, 激光与光子技术研究室, 北京 100084)

2)(中国计量科学研究院, 时间频率计量研究所, 北京 100029)

(2014年10月10日收到; 2014年11月21日收到修改稿)

高重复频率掺Er光纤飞秒激光器在光学频率梳、超高速光学采样等领域具有很重要的作用. 本文采用非线性偏振旋转锁模机理, 在掺Er光纤飞秒激光器中实现了重复频率为303 MHz的锁模脉冲输出. 通过优化腔内色散, 激光器腔内色散在零色散附近偏负值, 锁模后工作在展宽脉冲锁模状态. 在817 mW抽运功率下, 激光器在连续光状态下可以输出125 mW的平均功率, 在锁模状态下可以输出69 mW的平均功率, 脉冲宽度为90 fs. 当抽运功率处于700—817 mW时, 激光器可以实现自启动锁模. 激光器重复频率在5 h内的漂移量为30 Hz.

关键词: 掺Er光纤激光器, 光纤光学频率梳, 光学频率计量

PACS: 42.55.Wd, 42.65.Re, 06.30.Ft, 95.55.Sh

DOI: 10.7498/aps.64.114210

1 引言

随着光纤制造技术的发展和不断创新, 光纤飞秒激光器开始逐步取代固体激光器在精细加工、长度测量、光学频率梳、超高速光学采样、任意光学波形产生、太赫兹产生、生物组织成像等领域发挥越来越重要的作用.

与固体激光器中采用大量分离器件相比, 光纤激光器以光纤为增益介质, 通过光纤器件的熔接使其稳定性和可操作性得到很大的提高; 同时光纤激光器采用半导体激光器直接抽运, 有效降低了激光器的应用成本. 对于全光纤型的激光器, 还具有体积小、便于携带、适合野外操作等诸多优点.

目前飞秒光纤激光器的研究主要集中于中心波长在1 μm 附近的掺Yb光纤激光器^[1]、中心波长在1.5 μm 附近的掺Er光纤激光器^[2]和中心波长在2 μm 附近的掺Tm^[3]、掺Ho光纤激光器^[4]. 不同波长的光纤飞秒激光器均已发展成为光学频率

梳^[5-7]. 其中以掺Er光纤飞秒光学频率梳的应用最为广泛.

除了不同波长的飞秒光纤激光器外, 飞秒光纤激光器的几个典型的研究方向是追求窄脉冲宽度^[8]、高脉冲能量^[9]和高重复频率^[10,11]. 其中, 高重复频率光纤飞秒激光器在光学频率梳以及超高速光学采样领域的应用十分明显. 对于高重复频率的光学频率梳, 不仅能增大梳齿间隔以满足频率测量的需要, 还可以解决天文观测中高精度视向速度定标问题. 高重复频率、短脉冲光源用于光学频率梳中可以有效地抑制超连续光谱产生过程中带来的噪声, 有利于载波位相包络偏移频率信号 f_0 的探测以及和待测激光拍频信号 f_b 的信噪比提高.

为了实现光纤激光器的锁模运转, 通常采用非线性偏振旋转锁模或可饱和吸收体进行锁模. 可饱和吸收体一般采用半导体可饱和吸收镜(SESAM)、石墨烯、碳纳米管. 采用碳纳米管作为饱和吸收体用于掺Er光纤飞秒激光器中锁模, 目前已经将激光器的重复频率从几十MHz提高到了447 MHz,

^{*} 清华大学自主科研计划(批准号: 20131089299), 质检公益性行业科研专项(批准号: 201310007), 北京高等学校青年英才计划(批准号: YETP0087)和精密测试技术及仪器国家重点实验室开放基金(批准号: pil1201)资助的课题.

[†] 通信作者. E-mail: caoshiying@nim.ac.cn

脉冲宽度 270 fs, 但输出功率只有 2 mW^[10]. 采用可饱和吸收镜锁模时, Byun 等在线性腔结构的掺 Er 光纤激光器中实现了重复频率 491 MHz 的锁模脉冲输出, 其脉冲宽度 180 fs^[12]. 2009 年, Sun 和 Bao 等首次证实了石墨烯作为可饱和吸收体用于掺 Er 光纤激光器锁模^[13], 但石墨烯锁模的掺 Er 光纤激光器的重复频率基本都小于 100 MHz.

采用石墨烯、碳纳米管锁模时, 由于在石墨烯、碳纳米管前需要进行聚焦以保证足够的峰值功率, 因此, 激光器输出的功率不能过高, 否则容易使这些器件造成损坏. 虽然采用 SESAM 锁模可以获得较高的功率输出, 但高功率下 SESAM 的热损伤容易造成激光器的不稳定.

非线性偏振旋转锁模一般采用偏振控制器或者波片组合来实现, 偏振控制器采取挤压光纤的方式实现锁模, 光纤在机械力的作用下长时间容易变形或者复原, 因此挤压光纤的方式不利于长时间的锁模运转. 波片组合方式是目前最常用的锁模方式, 它既不存在高功率损坏的风险, 也不会对腔内光纤带来机械力的作用, 因此是光纤激光器实现高功率、长时间稳定锁模运转的理想方式.

在掺 Yb 光纤飞秒激光器中, 由于掺 Yb 光纤的增益系数比掺 Er 光纤高数倍, 因此依靠集成光学器件结合非线性偏振旋转锁模的方式, 掺 Yb 光纤飞秒激光器的重复频率可以提高到 750 MHz 以上^[11]. 在掺 Er 光纤飞秒激光器中, 由于掺 Er 光纤的增益系数较低, 需要依赖较长的增益光纤提高腔内功率, 同时为了平衡腔内色散, 还需要大量的光纤进行色散补偿, 这使得在非线性偏振旋转锁模机理下, 掺 Er 光纤飞秒激光器的重复频率较低.

采用非线性偏振旋转锁模方式, Chen 等将掺 Er 光纤飞秒激光器的重复频率提高到了 194 MHz, 脉冲宽度为 167 fs, 输出功率 30 mW^[14]. MenloSystems 公司的掺 Er 飞秒光纤光学频率梳, 采用非线性偏振旋转锁模的掺 Er 光纤飞秒激光器, 重复频率为 250 MHz^[15]. Peng 等实现了 300 MHz 的掺 Er 飞秒光纤光学频率梳, 其输出平均功率为 60 mW^[16].

在本文中, 我们采用波片组合的结构, 利用非线性偏振旋转锁模机理, 在掺 Er 光纤飞秒激光器中实现了重复频率为 303.2 MHz 的锁模脉冲输出. 锁模后激光器工作在展宽脉冲锁模状态, 输出脉冲宽度为 90 fs. 在 817 mW 的抽运功率下, 锁模后激

光器可以输出 69 mW 的平均功率. 激光器重复频率在 5 h 内的漂移量为 30 Hz.

2 实验装置

高重复频率掺 Er 光纤飞秒激光器采用非线性偏振旋转方式实现锁模, 其光路结构如图 1 所示. 其中, 980 nm 的半导体抽运光经过 980 nm/1550 nm 波分复用器件 WDM 耦合进入光纤激光腔激励掺 Er 光纤产生激光, 抽运激光输出的最大功率为 817 mW. WDM 尾纤采用 HI1060 单模光纤, 其群速度色散值约为 $+0.020 \text{ ps}^2/\text{m}$. 增益介质采用增益大但色散低的掺 Er 光纤 (Er110-4/125, LIEKKI), 在 1530 nm 处的吸收率为 110 dB/m, 群速度色散值约为 $+0.012 \text{ ps}^2/\text{m}$, 在激光器里有利于得到高重复频率锁模脉冲. 光纤准直器 Col1, Col2 成对出现, 完成从光纤光到空间光, 再从空间光又回到光纤光的完整光学回路. 实验中采用的光纤准直器的耦合效率可达 90%. 光纤准直器的尾纤为 SMF28 单模光纤, 其群速度色散值约为 $-0.022 \text{ ps}^2/\text{m}$. 光纤准直器之间的空间光路由两个四分之一波片、一个二分之一波片、一个光学隔离器 ISO 以及一个偏振分光片 PBS 构成. 光学隔离器 ISO 采用厚度为 4 mm 的微型空间光隔离器, 保证腔内激光光路的单向性. 三个波片用于来调节腔内激光的偏振方向, 以实现光纤中非线性偏振旋转锁模. 偏振分光片用于产生线偏光的分离作为激光器的输出. 该激光器

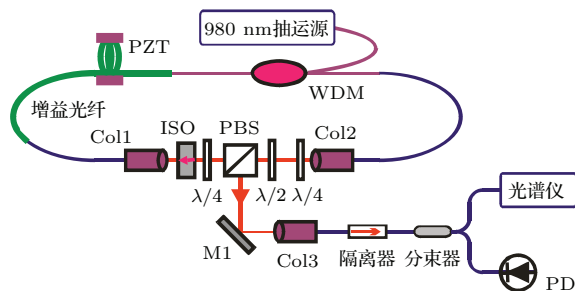


图 1 高重复频率掺 Er 光纤飞秒激光器结构图 (其中, WDM 为 980 nm/1550 nm 波分复用器件, Col1—Col3 为光纤准直器, PBS 为偏振分光片, ISO 为空间隔离器, $\lambda/4$ 为四分之一波片, $\lambda/2$ 为二分之一波片, M1 为平面反射镜, PD 为 InGaAs 光电探测器, PZT 为压电位移器)

Fig. 1. Experimental setup for high-repetition-rate Er-fiber laser. WDM, 980 nm/1550 nm wavelength division multiplexing; Col1-Col3, fiber collimators; PBS, polarization beam splitter; ISO, space isolator; $\lambda/4$, quarter wave plate; $\lambda/2$, half wave plate; M1, plane mirrors; PD, InGaAs detector; PZT, piezoelectric transducer.

装还预装了压电位移器PZT用于实现对光纤的拉伸,为将来激光器的重复频率 f_r 的锁定提供基础.

PBS输出光经平面反射镜M1反射后耦合进入光纤准直器Col3,通过光纤隔离器和一分二的等比分束器分成两路分别进入光谱仪OSA(Ando, AQ-6315B)和光电探测器PD(EOT, ET-3000AFC)监测锁模后的光谱形状和脉冲的重复频率.

3 实验结果

为了在激光器中得到尽可能高的重复频率,我们在腔内采用高掺杂的增益光纤,并尽可能减少腔内光纤长度.

激光器中首先需要考虑增益光纤要能够提供足够高增益.在此前提下,增益光纤的长度要尽量缩至最短.目前掺Er光纤最大的增益是110 dB/m,其色散约为 $+0.012 \text{ ps}^2/\text{m}$.与其他增益系数的光纤相比,该光纤的色散比较小,因此可以通过较短的负色散光纤进行色散补偿,有利于激光器整体腔长的缩短.实验中,增益光纤的初始长度选取45 cm.在817 mW抽运光的激励下,PBS直接输出的最大功率可达125 mW.通过逐渐剪短增益光纤长度,我们发现,当增益光纤长度从45 cm减至21 cm时,激光器连续光的最大输出功率没有显著变化.当继续剪短增益光纤至21 cm以下时,连续光的最大功率开始明显下降.为了保持足够高增益和最短长度,我们将增益光纤长度设定为21 cm.

表1 腔内器件的色散参数

Table 1. Dispersion of different optical elements in Er-fiber laser.

器件名称	长度/m	色散/ $\text{ps}^2 \cdot \text{m}^{-1}$	总色散/ ps^2
增益光纤	0.210	+0.012	+0.00252
WDM	0.140	+0.020	+0.00280
准直器	0.277	-0.022	-0.00609
Col1 和 Col2 之间空间距离	0.055	0	0
物理长度	0.682	—	-0.00077

由于增益光纤是正色散、WDM尾纤也是正色散,而光纤准直器的尾纤是负色散,考虑到腔内色散平衡,同时略偏向负色散更容易实现锁模运转,我们将WDM的尾纤减至最短.WDM自身长度为4 cm,腔内WDM两端尾纤的长度均为5 cm.这也

是熔接机熔接光纤的最短长度.短于这个长度将无法直接熔接导致器件报废.较短的增益光纤和较短的WDM尾纤使光纤准直器的尾纤可以通过较短的长度实现腔内的色散补偿.这也是激光器实现重复频率锁模运转的关键.实验中,两个光纤准直器Col1和Col2自身长度均为1.1 cm,尾纤长度分别为4.5 cm和21 cm.Col1和Col2之间的空间长度为5.5 cm.腔内总色散为 -0.00077 ps^2 ,保持在零色散附近偏负值.腔内总的物理长度为68.2 cm,光学长度约为99.55 cm,整个腔的重复频率预计在301.36 MHz附近.表1给出了该激光器中器件长度以及对应的色散值.

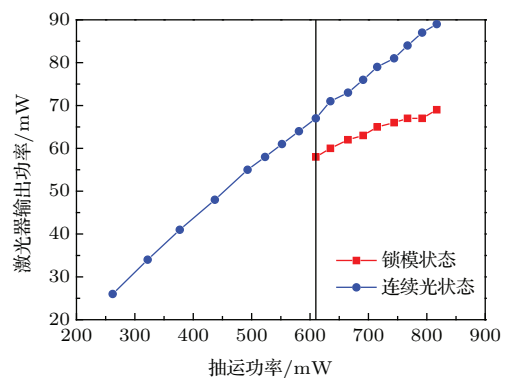


图2 激光器在连续光状态和锁模运转时的输出功率随抽运功率的变化

Fig. 2. Output power of Er-fiber laser versus pumping power in the state of continue wave and mode locking.

当抽运电流为1.5 A时,抽运源最大输出功率为817 mW,掺Er光纤激光器在连续光运转的条件下,可输出的最大功率为125 mW.通过精细地调节腔内三个波片位置,激光器可以实现稳定的锁模运转.此时,固定三个波片的位置,当抽运功率处于700—817 mW之间时,激光器每次开机均可以实现锁模的自启动运转.当抽运功率处于610—700 mW之间时,激光器每次开机需微调腔内二分之一波片启动锁模,锁模启动后可将二分之一波片恢复到原位置保持锁模运转.图2给出了在锁模位置时,激光器在连续光状态和锁模状态时的输出功率随抽运功率的变化.从图中可以看出,随着抽运功率的增加,激光器连续光运转时输出功率呈线性增长,斜率为0.112.当抽运功率增加到610 mW时,输出功率存在一个向下的跳变,此时激光器由连续光过渡到锁模脉冲运转状态.该功率为激光器的锁模阈值.此后随着抽运功率的增加,锁模的输出功率又开始呈现线性增长,斜率为0.0502.

在相同状态下, 激光器锁模后的输出功率比连续光功率低 13%—22%. 由于激光器重复频率较高, 当抽运功率低于 610 mW 时, 腔内激光强度不足支持非线性偏振旋转锁模机理的发生. 在 817 mW 抽运功率下, 锁模后的激光经 PBS 直接输出的功率为 69 mW.

采用 InGaAs 光电探测器 PD 监测锁模后脉冲的频谱. 图 3 分别给出了脉冲在 3 GHz 带宽范围内的各阶次的频谱分量以及其中的一阶频谱分量. 锁

模后激光器的重复频率为 303.2 MHz, 一阶频谱分量的信噪比为 70 dB.

激光器锁模后的光谱如图 4(a) 所示, 中心波长为 1550 nm, 光谱半高宽约为 95 nm. 从光谱形状可以看出, 该激光器工作在展宽脉冲锁模状态. 从 PBS 输出的激光未经色散补偿直接进入干涉自相关仪测量脉冲的自相关曲线, 如图 4(b) 所示, 脉冲宽度为 90 fs.

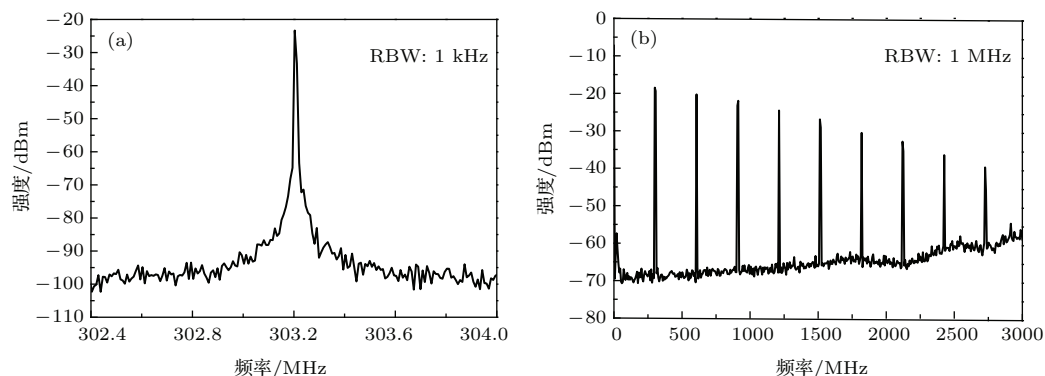


图 3 锁模后激光输出的频谱图 (a) 一阶频谱分量, 锁模后激光器的重复频率为 303.2 MHz; (b) 3 GHz 带宽范围内激光输出的频谱图

Fig. 3. Radio frequency spectrum of the mode-locked Er-fiber laser: (a) RF spectrum of fundamental beat note at 303.2 MHz with the RBW of 1 kHz; (b) RF spectrum of 3 GHz wide-span range with the RBW of 100 kHz.

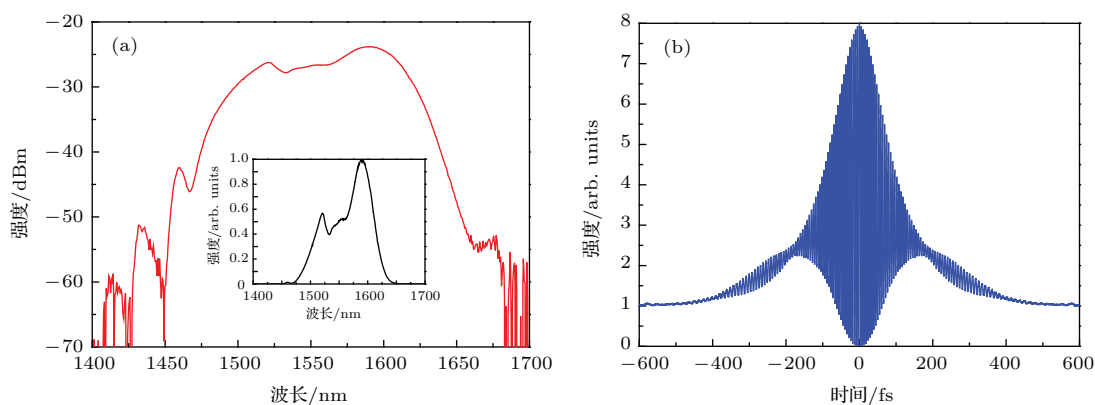


图 4 激光器输出参数 (a) 激光器输出光谱, 其中插图为线性坐标光谱; (b) 激光器直接输出的自相关曲线

Fig. 4. Output of mode-locked Er-fiber laser: (a) spectrum, linear scale (insert); (b) interferometric auto-correlation trace.

激光器中采用 PZT 拉伸光纤的方式实现对锁模后激光重复频率的调节. 由于腔内各种光纤中只有增益光纤的完整长度最长为 21 cm, 因此为方便黏接, 我们采用将增益光纤黏接在 PZT 两端的方式来控制激光器的重复频率. PZT 外部驱动电压在 0—100 V 之间调节时, 激光器重复频率变化量为 2.5 kHz.

激光器自由运转时, 温度变化对激光器重复频率影响很大. 一方面, 外界环境的温度变化会引起激光器腔内光纤的变化, 从而对激光器重复频率带来影响. 另外一方面, 激光器抽运光功率的波动也会通过热量的积累影响光纤的光学长度, 抽运光功率的波动可以溯源到激光器抽运源的电流的波动. 实验中我们采用的抽运源的电流控制精度为

0.001 A.

整个激光器置于 $21\text{ cm} \times 15\text{ cm}$, 厚度为 12 cm 的合金铝材料的光学平板上, 采用聚四氟乙烯材料进行四周及顶盖密封. 在激光器底板未加温度控制时, 激光器重复频率在 5 h 内的漂移量约为 30 Hz, 如图 5 所示. 图中重复频率的细节振荡主要是由于实验室温度的波动所引起.

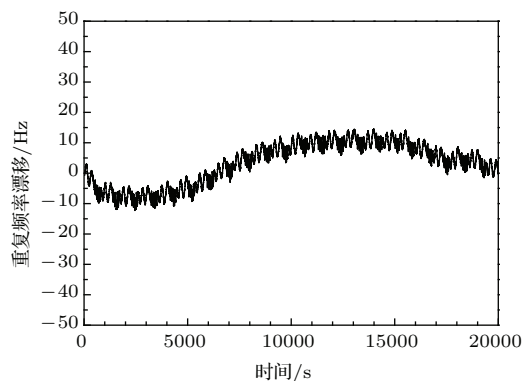


图5 激光器重复频率漂移

Fig. 5. Repetition rate drift of the mode-locked Er-fiber laser.

为了将该激光器应用于掺 Er 光纤光学频率梳系统中^[17], 首先需要对激光器 PBS 输出的脉冲进行色散补偿, 以适应后续放大系统的需要, 此外, 还需要通过对激光器的密闭设计和合理温控抑制重复频率的微小振荡, 以适应重复频率锁定的需要.

4 结 论

在本文中, 我们采用波片组合的结构, 利用非线性偏振旋转锁模机理, 通过剪短光纤的方式, 在掺 Er 光纤飞秒激光器中实现了高重复频率的锁模脉冲. 激光器中采用 21 cm 长的高掺杂增益光纤, 在 813 mW 激光抽运的条件下获取了 125 mW 的连续光输出. 锁模后激光功率降低至 69 mW . 锁模后激光的重复频率为 303.2 MHz , 一阶频谱分量信噪比 70 dB . 激光器锁模后的光谱半高全宽为 95 nm , 表明激光器工作在展宽脉冲锁模状态. 采用干涉自相关仪测量激光的脉冲宽度为 90 fs . 激光器重复频率在 5 h 内的漂移量约为 30 Hz .

由于目前光纤器件的尾纤短于 5 cm 时将很难进行焊接, 并且熔接的风险很大, 因此重复频率的进一步提高受到限制. 今后通过采用 1550 nm 的集

成光学器件, 或更高增益系数的光纤使增益光纤的长度得到缩短, 有望在非线性偏振旋转锁模中获得更高重复频率的激光脉冲. 高重复频率掺 Er 光纤飞秒激光器的实现有望为光学频率梳以及超高速光学采样领域提供有力的应用工具, 同时通过腔外滤波实现 GHz 以上重复频率的光学频率梳, 解决天文光谱仪高精度视向速度的定标问题.

参考文献

- [1] Renninger W H, Chong A, Wise F W 2011 *Opt. Express* **19** 22496
- [2] Tamura K, Ippen E P, Haus H A, Nelson L E 1993 *Opt. Lett.* **18** 1080
- [3] Chernysheva M A, Krylov A A, Kryukov P G, Arutyunyan N R, Pozharov A S, Obraztsova E D, Dianov E M 2012 *Opt. Express* **20** B124
- [4] Jung M, Koo J, Park J, Song Y, Jhon Y M, Lee K, Lee S, Lee J H 2013 *Opt. Express* **21** 20062
- [5] Ruehl A, Marcinkevicius A, Fermann M E, Hartl I 2010 *Opt. Lett.* **35** 3015
- [6] Washburn B R, Diddams S A, Newbury N R, Nicholson J W, Yan M F, Jorgensen C G 2004 *Opt. Lett.* **29** 250
- [7] Mills A A, Gatti D, Jiang J, Mohr C, Mefford W, Gianfrani L, Fermann M, Hartl I, Marangoni M 2012 *Opt. Lett.* **37** 4083
- [8] Ma D, Cai Y, Zhou C, Zong W J, Chen L L, Zhang Z G 2010 *Opt. Lett.* **35** 2858
- [9] Renninger W H, Wise F W 2014 *IEEE J. Sel. Top. Quant. Elect.* **21** 101
- [10] Nicholson J W, DiGiovanni D J 2005 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **17** 750
- [11] Li C, Wang G Z, Jiang T X, Wang A M, Zhang Z G 2013 *Opt. Lett.* **38** 314
- [12] Byun H, Pudo D, Chen J, Ippen E P, Kärtner F X 2008 *Opt. Lett.* **33** 2221
- [13] Bao Q L, Zhang H, Wang Y, Ni Z H, Yan Y L, Shen Z X, Loh K P, Tang D Y 2009 *Adv. Funct. Mater.* **19** 3077
- [14] Chen J, Sickler J W, Ippen E P, Kärtner F X 2007 *Opt. Lett.* **32** 1566
- [15] <http://www.menlosystems.com/products/optical-frequency-combs/fc1500-250-wg/>
- [16] Peng J L, Liu T A, and Shu R H 2009 Proceedings of the 2009 IEEE International Frequency Control Symposium jointly with the 22nd European Frequency and Time Forum (IFCS/EFTF) **344**
- [17] Cao S Y, Meng F, Lin B K, Fang Z J and Li T C 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 134205 (in Chinese) [曹士英, 孟飞, 林百科, 方占军, 李天初 2012 物理学报 **61** 134205]

A 303 MHz fundamental repetition rate femtosecond Er: fiber ring laser^{*}

Liu Huan¹⁾ Gong Ma-Li¹⁾ Cao Shi-Ying^{2)†} Lin Bai-Ke²⁾ Fang Zhan-Jun²⁾

1) (Center for Photonics and Electronics, Department of Precision Instrument, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

2) (Division of Time and Frequency Metrology, National Institute of Metrology, Beijing 100029, China)

(Received 10 October 2014; revised manuscript received 21 November 2014)

Abstract

High-repetition-rate fiber laser has widely applications in the field of femtosecond frequency comb, ultra-fast optical sampling, and so on. In this paper, an Er-doped femtosecond fiber laser with a repetition rate of 303 MHz is demonstrated based on the mechanism of nonlinear polarization rotation. By means of optimization of cavity dispersion, the net dispersion in fiber cavity is a little negative nearby zero point. After mode locking, the laser is operating in the stretched-pulse regime. At a pump power of 817 mW, the output power of the laser is 125 mW in continue-wave state, and 69 mW in mode-locking state. The laser directly generates 90 fs before dispersion compensation. Mode locking can self-start at the pump power of 700—817 mW. Repetition rate drift of the mode-locked laser is 30 Hz in five hours.

Keywords: Er: fiber femtosecond laser, fiber optical frequency comb, optical frequency metrology

PACS: 42.55.Wd, 42.65.Re, 06.30.Ft, 95.55.Sh

DOI: 10.7498/aps.64.114210

^{*} Project supported by the Tsinghua University Initiative Scientific Research Program, China (Grant No. 20131089299), the Special Scientific Research Foundation of General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of China (Grant No. 20130007), the Beijing Higher Education Young Elite Teacher Project of China (Grant No. YETP0087), and the State Key Laboratory of Precision Measuring Technology and Instruments, China (Grant No. pil1201).

[†] Corresponding author. E-mail: caoshiying@nim.ac.cn