



掺Er光纤飞秒激光器中电光晶体对激光器参数的影响

曹士英 林百科 袁小迪 丁永今 孟飞 方占军

Influence of electro-optic modulator on Er-doped fiber femtosecond laser

Cao Shi-Ying Lin Bai-Ke Yuan Xiao-Di Ding Yong-Jin Meng Fei Fang Zhan-Jun

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 70, 074203 (2021) DOI: 10.7498/aps.70.20201564

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201564>

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

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

滤波对8字腔掺铒光纤激光器锁模运转的影响

Influence of spectral filtering on mode-locking operation of figure-eight Er-doped fiber laser

物理学报. 2019, 68(6): 064206 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20182144>

基于增益光纤长度优化的双波长运转掺铒光纤锁模激光器

Dual-wavelength mode-locked Er-doped fiber laser based on optimizing gain fiber length

物理学报. 2017, 66(13): 134203 <https://doi.org/10.7498/aps.66.134203>

MnPS₃可饱和吸收体被动锁模掺铒光纤激光器双波长激光

Dual-wavelength self-starting mode-locking Er-doped fiber laser with MnPS₃ saturable absorber

物理学报. 2020, 69(18): 184208 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200342>

530 W全光纤结构连续掺铒光纤激光器

530 W all-fiber continuous-wave Tm-doped fiber laser

物理学报. 2020, 69(18): 184209 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200466>

基于石墨烯可饱和吸收体的纳秒锁模掺铒光纤激光器

Nanosecond mode-locked Tm-doped fiber laser based on graphene saturable absorber

物理学报. 2017, 66(11): 114209 <https://doi.org/10.7498/aps.66.114209>

级联掺Yb增益光纤提高拍频信号信噪比的实验研究

Experimental study on increasing signal-to-noise ratio of a beat note by cascading an Yb-doped fiber in an Er-fiber comb

物理学报. 2017, 66(2): 024206 <https://doi.org/10.7498/aps.66.024206>

掺 Er 光纤飞秒激光器中电光晶体 对激光器参数的影响*

曹士英[†] 林百科 袁小迪 丁永今 孟飞 方占军

(中国计量科学研究院, 时间频率计量科学研究所, 北京 100029)

(2020 年 9 月 21 日收到; 2020 年 11 月 9 日收到修改稿)

由于受增益介质上能级寿命的影响, 掺 Er 光纤光梳的梳齿线宽一般在百 kHz 量级. 为了实现光梳梳齿线宽的压窄, 一种有效的方法是在激光器中增加快速响应的电光晶体, 使光纤光梳的伺服锁定带宽提高到百 kHz 以上, 为光纤光梳的快速伺服锁定提供反馈机构. 这其中, 高品质的飞秒激光器是核心. 基于此, 本文主要研究了掺 Er 光纤飞秒激光器中电光晶体对激光器参数的影响. 通过计算电光晶体的折射率、色散、相位延迟等参数, 分析了电光晶体对激光器参数的影响, 并在实验上获得了电光晶体电压对激光器重复频率和载波包络偏移频率的影响, 进而通过电光晶体实现了对光纤光梳重复频率和载波包络偏移频率的锁定. 通过锁定光纤飞秒激光器与窄线宽激光器的拍频信号, 验证了电光晶体的引入使激光器的伺服锁定带宽提高到了 236 kHz, 为窄线宽飞秒光学频率梳的建立提供了技术基础.

关键词: 掺 Er 光纤激光器, 掺 Er 光纤光学频率梳, 电光晶体, 伺服锁定**PACS:** 42.55.Wd, 42.65.Re, 06.30.Ft**DOI:** 10.7498/aps.70.20201564

1 引言

近年来, 得益于超快激光和光纤制造技术的发展, 光纤光学频率梳 (简称“光纤光梳”) 已成为新一代频率梳的发展方向^[1]. 以掺 Er 光纤光梳为代表的频率梳技术的飞速发展, 使光梳技术逐步突破激光频率测量领域^[2], 在时间频率传递^[3]、超稳微波源^[4]、绝对距离测量^[5]、高精密度光谱学^[6]和天文观测^[7]等领域中发挥越来越重要的作用. 光纤光梳具有成本低、稳定性高、易于集成和环境适应能力强等显著特点, 在需要高可靠性的应用场合具有巨大潜力. 野外用光纤光梳^[8]、太空用光纤光梳^[9] 都已报道.

但从实际应用角度考虑, 光学频率梳目前还面

临着一些挑战. 1) 国际单位制量子化变革带来计量方法和量值传递技术的扁平化、嵌入式, 使得对光学频率梳的微型化需求迫切, 从而催生和带动了芯片光梳技术的发展. 但芯片光梳在技术指标上与传统飞秒光学频率梳还存在一定差距. 2) 光学频率梳应用于激光频率测量时, 光学频率梳输出激光与待测激光高信噪比的拍频信号获取一直是个瓶颈. 这需从物理机制和光纤设计上抑制激光频率转换过程中引入的额外噪声, 使光学频率梳的光谱保持良好的相干性. 3) 可见光到近红外波段光学频率梳的研究趋于成熟, 但位于分子特征谱线、大气透明窗口的中红外波段自参考飞秒光学频率梳还面临一系列挑战, 包括中红外波段扩谱光纤的制备与器件集成、光谱调控和相干性控制等. 4) 在光钟研究中, 为了实现光钟的比对测量, 如何使覆盖

* 国家重点研发计划 (批准号: 2016YFF0200204) 资助的课题.

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

多种光钟激光波长的宽光谱光学频率梳的梳齿都具有超窄线宽特性也是当前光学频率梳研究中的重要方向之一. 通常的掺 Er 光纤光梳, 由于受增益介质上能级寿命的影响, 其梳齿线宽一般在百 kHz 量级. 在光钟信号转换过程中, 不可避免地对高精确度和高稳定度的信号造成损失, 而通过对光梳梳齿线宽的压窄则可以很好地解决这一问题^[10–13].

窄线宽光纤光梳的关键在于高品质的飞秒激光器. 在光纤光梳中飞秒激光器重复频率 (f_r) 通常由腔内压电陶瓷 (piezoelectric transducer, PZT) 控制, 载波包络偏移频率 (f_0) 通常由飞秒激光器的驱动电流源控制. 受伺服机构自身特性影响, PZT 和电流源的伺服带宽都在几十 kHz 或者更低. 这导致在光纤光梳的锁定过程中, 激光器中的高频噪声无法得到抑制.

一种有效方法是在激光器中增加快速响应的电光调制器 (electro-optic modulator, EOM). 电光调制器在激光器系统中主要作为宽带伺服的反馈器件具有伺服带宽宽的优点, 但伺服范围较小, 因此通常要与伺服范围大的器件配合使用. 2005 年, 美国 Hudson 等^[14] 采用在掺 Er 光纤飞秒激光器中加入空间 EOM 的方法, 实现了大于 230 kHz 的伺服带宽. 2010 年, 日本 Nakajima 等^[10] 采用在激光器腔内加入空间 EOM 的方法也获得了大于 200 kHz 的伺服带宽, 后来该研究组改用波导型带尾纤的 EOM, 伺服带宽可以达到 1.3 MHz^[15]. 波导型 EOM 需要的驱动电压较低并且可以灵活插入腔内, 但波导型 EOM 输入和输出尾纤需要与激光器腔内光纤连接, 因此插入损耗较大, 不利于在高重复频率激光器中使用. 2017 年 Torcheboeuf 等^[16] 在 Er/Yb 玻璃作为增益介质的固体激光器中采用 EOM 实现了激光器向参考激光的锁定, 锁定带宽为 700 kHz, 其中 EOM 的引入对激光器中心波长、功率和脉冲宽度都带来很大的影响. 2018 年德国 Schweyer 等^[17] 采用在半导体可饱和吸收镜锁模的光纤激光器中加入了 EOM, 通过 EOM 结合激光器温度控制, 实现了光梳向 633 nm 氦氖激光器超过 46 小时的连续锁定, 锁定带宽 610 kHz.

我国光学频率梳技术已经取得了快速发展, 国内许多单位都已开展了光学频率梳的研究, 如钛宝石光梳、掺 Er 光纤光梳、掺 Yb 光纤光梳和掺 Tm

光纤光梳等等. 在光谱范围、重复频率、输出功率、稳定性和可靠性等指标上都有了显著的提升. 在基于 EOM 的光纤光梳方面, Ning 等^[18] 在全保偏多路输出的光纤光梳中增加了 EOM, 并可以采用 EOM 结合 PZT 的方式进行重复频率锁定. Ma 等^[19] 在掺 Yb 光纤光梳中增加了 EOM, 实现了 0.95 GHz 的高重复频率输出以及和 6 束不同波长激光的拍频信号探测, 但 EOM 在该光梳中快速锁定效果没有验证. Wang 等^[20] 在掺 Yb 光纤光梳中增加了 EOM, 利用 EOM 将光纤光梳锁定在 972 nm 窄线宽激光上, 验证了 EOM 锁定带宽 320 kHz. 但在窄线宽光学频率梳, 特别是基于目前常用的掺 Er 光纤光梳的窄线宽光学频率梳的研究还有进一步提升的空间.

基于此, 本文主要研究了掺 Er 光纤飞秒激光器中铌酸锂 (LiNbO_3 , LN) 电光晶体对激光器参数的影响. 通过计算 LN 晶体的折射率、色散和相位延迟等参数, 分析了 LN 晶体对激光器参数的影响, 并在实验上获得了 LN 晶体电压对激光器重复频率和载波包络偏移频率的影响, 进而通过 LN 晶体实现了对光纤光梳重复频率和载波包络偏移频率的锁定. 通过锁定光纤飞秒激光器与窄线宽激光器的拍频信号, 验证了 LN 晶体的引入使激光器的伺服锁定带宽提高到了 236 kHz, 为窄线宽飞秒光学频率梳的建立提供了技术基础.

2 理论计算

2.1 LN 晶体的线性电光效应

系统中选择 LN 晶体作为 EOM 中的电光晶体. LN 晶体属于单轴晶体, 晶体的光轴为 z 轴, 垂直光轴的两个轴分别为 x 轴和 y 轴. n_o 和 n_e 是寻常光和非寻常光的主折射率. 在不加电场时 LN 晶体的折射率椭球可以表示为

$$B_1^0(x^2 + y^2) + B_3^0z^2 = 1, \quad (1)$$

其中 $B_1^0 = 1/n_o^2$, $B_3^0 = 1/n_e^2$.

在外加电场作用下, LN 晶体的折射率椭球表示为

$$\frac{x^2}{n_{11}^2} + \frac{y^2}{n_{22}^2} + \frac{z^2}{n_{33}^2} + \frac{2}{n_{23}^2}yz + \frac{2}{n_{13}^2}xz + \frac{2}{n_{12}^2}xy = 1, \quad (2)$$

其中

$$\begin{pmatrix} 1/n_{11}^2 - 1/n_1^2 \\ 1/n_{22}^2 - 1/n_2^2 \\ 1/n_{22}^2 - 1/n_2^2 \\ 1/n_{23}^2 \\ 1/n_{13}^2 \\ 1/n_{12}^2 \end{pmatrix} = \gamma_{ij} \begin{pmatrix} E_x \\ E_y \\ E_z \end{pmatrix}.$$

考虑 LN 晶体的一次电光系数 $\gamma_{13} = \gamma_{23} = 11 \text{ pm/V}$, $\gamma_{33} = 32 \text{ pm/V}$, $\gamma_{22} = -\gamma_{12} = -\gamma_{61} = 6.8 \text{ pm/V}$ 中, γ_{33} 分量明显大于 γ_{13} 分量, 因此晶体施加电场时, 对沿主轴 z 轴方向偏振光的折射率影响最大. 实验中选取沿 $x(y)$ 轴切割、沿 z 轴加电场的 LN 晶体, 同时利用晶体的横向电光效应. 当外加电场平行于光轴 z 轴时, LN 晶体 x, y, z 三个轴方向的电场 E_x, E_y, E_z 分别为: $E_x = E_y = 0, E_z = E$. 在电场作用下折射率椭球方程演变为

$$\begin{aligned} & \left(\frac{1}{n_o^2} + \gamma_{13} E_z \right) x^2 + \left(\frac{1}{n_o^2} + \gamma_{13} E_z \right) y^2 \\ & + \left(\frac{1}{n_e^2} + \gamma_{33} E_z \right) z^2 = 1. \end{aligned} \quad (3)$$

从 (3) 式可知, 沿 z 方向施加电场后, LN 晶体三个折射率主轴方向不变, 仍然是 z 轴方向的单轴晶体, 只是各主折射率发生变化, 施加电场后三个新主折射率分别表示为

$$n'_x = n_o - \frac{1}{2} n_o^3 \gamma_{13} E, \quad (4)$$

$$n'_y = n_o - \frac{1}{2} n_o^3 \gamma_{13} E, \quad (5)$$

$$n'_z = n_e - \frac{1}{2} n_e^3 \gamma_{33} E. \quad (6)$$

2.2 LN 晶体对掺 Er 光纤飞秒激光器的影响

2.2.1 LN 晶体对重复频率的影响

在掺 Er 光纤飞秒激光器中 LN 晶体对重复频率的调节, 主要通过晶体加电压后对折射率产生影响来实现. 其对重复频率的调节范围直接受晶体的折射率变化率的影响, 即 LN 晶体加电压后的折射率 n' 与未加电压时的折射率 n 之间的相对变化量.

首先需要知道 LN 晶体中 o 光和 e 光的折射率曲线. LN 晶体的折射率曲线可通过 Sellmeier 色散方程进行计算, 其中 o 光和 e 光在波长 λ 处折

率表示为

$$n_o^2 - 1 = \frac{2.6734\lambda^2}{\lambda^2 - 0.01764} + \frac{1.2290\lambda^2}{\lambda^2 - 0.05914} + \frac{12.614\lambda^2}{\lambda^2 - 474.60}, \quad (7)$$

$$n_e^2 - 1 = \frac{2.9804\lambda^2}{\lambda^2 - 0.02047} + \frac{0.5918\lambda^2}{\lambda^2 - 0.0666} + \frac{8.9543\lambda^2}{\lambda^2 - 416.08}. \quad (8)$$

图 1 给出了 LN 晶体的折射率曲线. LN 晶体在 1550 nm 处 o 光和 e 光的折射率分别为 2.2111 和 2.1376.

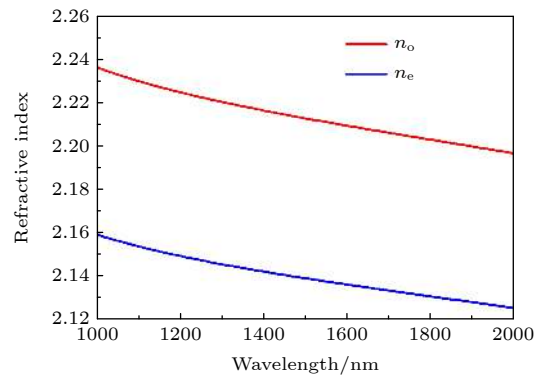


图 1 LN 晶体的折射率曲线

Fig. 1. Refractive index curves of LiNbO₃ crystal.

加电压后, LN 晶体折射率的相对变化量为

$$\left| \frac{n - n'}{n} \right| = \frac{1}{2} n^2 \gamma E = \frac{1}{2} n^2 \gamma \frac{V}{d}, \quad (9)$$

其中 V 为 LN 晶体所加电压值; d 为电极之间距离.

2.2.2 LN 晶体对腔内色散的影响

LN 晶体作为色散介质放于激光器腔内, 由于晶体入射面和出射面镀增透膜, 因此插入损耗可以忽略不计, 但晶体色散对激光器影响很大. 根据晶体折射率公式, 可以得出 LN 晶体的群速度色散曲线, 如图 2 所示.

实验中采用的 LN 晶体在 1550 nm 处的群速度色散 (group velocity dispersion, GVD) 为 $112 \text{ fs}^2/\text{mm}$. 为了平衡 LN 晶体在腔内引入的正色散, 需要利用五倍晶体长的 SMF-28 单模光纤进行色散补偿 (SMF-28 单模光纤在 1550 nm 处的群速度色散为 $-22 \text{ fs}^2/\text{mm}$). 在线性电光效应下, 晶体加电场后产生的折射率是随电场强度的线性变化, 因此加电场前后, 可以忽略电场对 LN 晶体色散带来的影响.

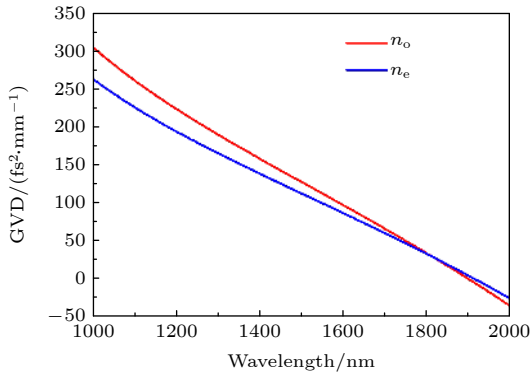


图 2 LN 晶体的群速度色散曲线

 Fig. 2. Group velocity dispersion curves of LiNbO₃ crystal.

2.2.3 LN 晶体引入的相位延迟

LN 晶体在外加电场作用下, 入射到晶体的光的偏振方向会沿着晶体感应折射率主轴分解成两个相互垂直的偏振分量传输. 两个偏振方向的光所经历的折射率分别发生不同的改变, 从而产生不同的相位延迟, 从晶体出射后合成新的偏振态. 而非线性偏振旋转锁模的原理是通过控制腔内激光不同分量的偏振状态实现锁模, 所以 LN 晶体在外加电场作用下引入的相位延迟会对激光器锁模带来影响.

由于 LN 晶体 z 轴加电压时具有高于其他轴加电压的一次电光效应, 因此实验中采用激光沿 x 轴通过晶体. 此时, 沿 y 轴和 z 轴两个偏振方向上的折射率变化由之前的公式给出. 激光通过长度为 L 的晶体后, 产生的相位差 δ 为

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda}(n'_z - n'_y)L = \frac{2\pi}{\lambda}(n_e - n_o)L - \frac{\pi}{\lambda}(n_e^3\gamma_{33} - n_o^3\gamma_{13})L\frac{V}{d}. \quad (10)$$

在 1550 nm 处, $n_e = 2.1375$, $n_o = 2.2111$, 晶体长度为 3 mm. 当在晶体两端加 200 V 电压时, 如果光在沿 y 轴和 z 轴上都有分量, 那么得到相位差为 0.08π . 较短长度 LN 晶体加电压后带来的相位差不大, 但是需要重新调整腔内波片的角度实现锁模. 在系统中, 为了保证晶体出射激光的偏振态不受电压的影响, 调节晶体入射光的偏振方向使其与晶体的一个感应主轴重合. 对于沿着 z 轴加电场的情况下, LN 晶体的折射率椭球不发生旋转, 因此只需保证晶体入射光的偏振沿水平或者垂直方向即可.

3 实验系统

腔内加入 EOM 的掺 Er 光纤光梳结构如图 3 所示, 总体结构与文献 [21] 基本相似. 主要区别在于:

1) 飞秒激光器中增加了 LN 晶体构成的 EOM. 在激光器的四分之一波片和 PBS 之间增加一个 LN 晶体. LN 晶体的通光截面 (yz) 为 3 mm × 5 mm, 通光长度 (x) 为 3 mm, xz 表面镀金用于施加电压. 采用最大 200 V 的 EOM 驱动器 (Thorlabs, HVA200) 对 LN 晶体施加电压;

2) f_0 探测模块进行了改进. f_2f 干涉仪中晶体前后两端的透镜进行了集成设计和封装, 形成了一体化模块. 其中输入端为 FC/PAC 接口, 输出端为平行光输出. 采用该模块, HNLF 后单模光纤的 FC/PAC 接口可以直接与 f_0 探测模块连接, 避免了优化 HNLF 后单模光纤长度时, 每次都需要对 f_0 探测模块进行调节的弊端;

3) 四个伺服锁定环路. 伺服锁定环路 PPL1 由伺服模块 (Vescent, D2-135) 控制飞秒激光器的抽运电流源 (Thorlabs, LDC8020) 构成, 伺服锁定环路 PPL2 由伺服模块 (Vescent, D2-135) 控制 EOM 的驱动器构成. 伺服锁定环路 PPL1 和伺服锁定环路 PPL2 可分别控制激光器的载波包络偏移频率 f_0 . 伺服锁定环路 PPL3 由伺服模块 (Vescent, D2-125) 控制 EOM 的驱动器构成, 伺服锁定环路 PPL4 由伺服系统 (Vescent, D2-125) 控制 PZT 驱动器 (Thorlabs, MDT694B) 构成. 伺服锁定环路 PPL3 和伺服锁定环路 PPL4 可分别控制激光器的重复频率 f_r .

4 实验结果

4.1 激光器状态

激光器腔内不加 EOM 时, 激光器的整体结构与文献 [21] 类似. 激光器中增益光纤长度为 35 cm, WDM 两端尾纤长度分别为 15 和 12 cm, 两个准直器的尾纤长度分别为 20 和 37 cm. 两个准直器之间的空间距离为 5.5 cm. 在 650 mW 抽运功率下, 激光器在连续光状态下可以输出 150 mW, 锁模后平均功率为 85 mW. 此时加入 EOM, 调节 LN 晶体放置角度, 使腔内激光垂直入射到 LN 晶

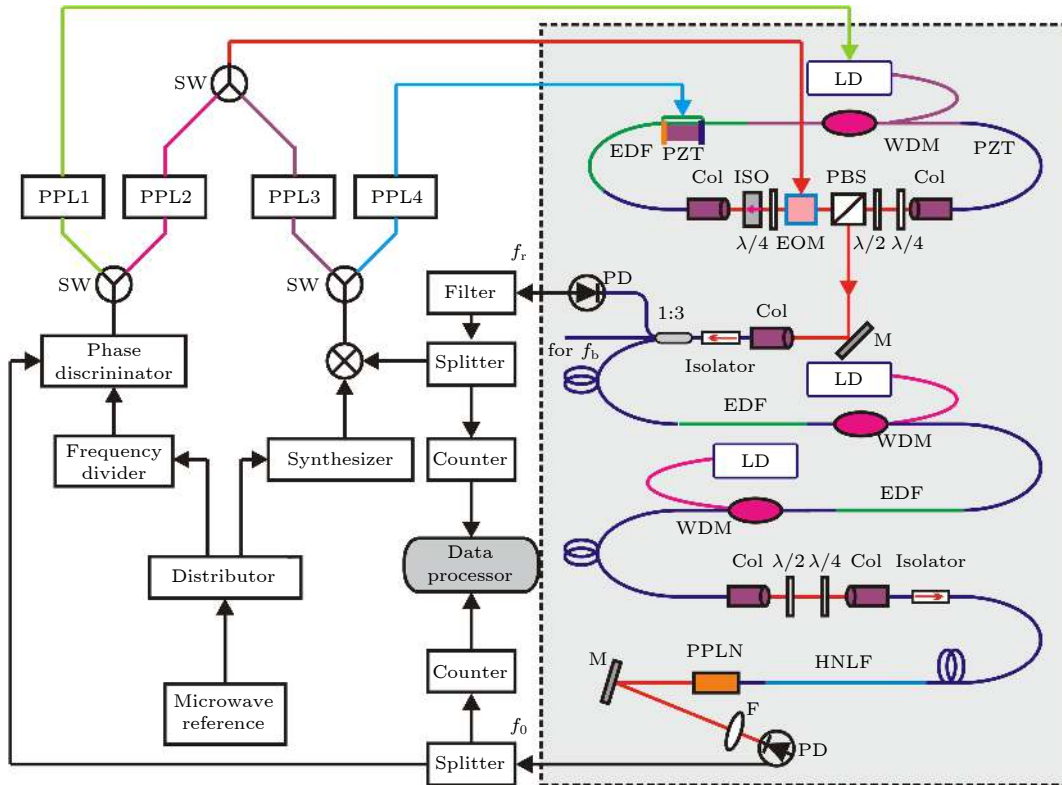


图 3 腔内加入 EOM 的掺 Er 光纤光梳结构图. 其中, LD 为激光二极管, WDM 为 980 nm/1550 nm 波分复用器件, EDF 为增益光纤, Col 为光纤准直器, PBS 为偏振分光片, ISO 为隔离器, $\lambda/4$ 为四分之一波片, $\lambda/2$ 为二分之一波片, M 为平面反射镜, PZT 为压电陶瓷, EOM 为电光晶体调制器, HNLF 为高非线性光纤, F 为透镜, PD 为光电探测器, PPL 为伺服锁定环路, PPLN 为周期极化 LN 晶体, SW 为微波线切换模块

Fig. 3. Schematic diagram of the Er-fiber comb with an intra-cavity EOM. LD, laser diode; WDM, 980 nm/1550 nm wavelength division multiplexing; EDF, Er-doped gain fiber; Col, fiber collimator; PBS, polarization beam splitter; ISO, isolator; $\lambda/4$, quarter wave plate; $\lambda/2$, half wave plate; M, plane mirror; PZT, piezoelectric transducer; EOM, electro-optic modulator; HNLF, highly nonlinear fiber; F, optical lens; PD, photoelectric diode; PPL, phase lock loop; PPLN, Periodically Poled Lithium Niobate; SW, signal switch module.

体表面, 激光器输出功率保持不变. 在最佳锁模状态下, EOM 的放入或者取出对激光器的自动启动锁模没有影响. 图 4 给出了激光器腔内有无 EOM 时的锁模光谱. 从图中可以看出, EOM 的引入对

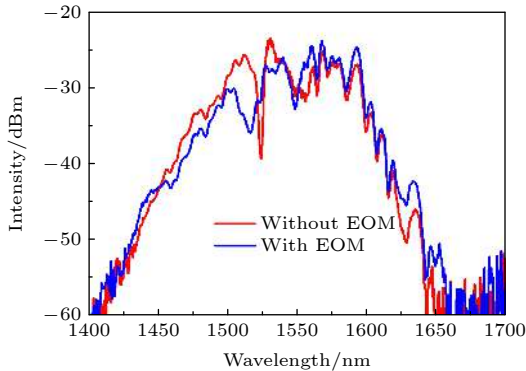


图 4 激光器腔内有无 EOM 时的锁模光谱

Fig. 4. Spectra of the Er-fiber femtosecond laser with and without an intra-cavity EOM.

激光器锁模影响不大. 这主要源于 EOM 中 LN 晶体通光长度较短, 对激光器的色散影响可以忽略不计.

激光器输出激光经过 1:3 的光纤分束器分成三路, 第一路直接进入探测器 PD (EOT, 3000 A) 用于探测激光器重复频率 f_r . 图 5 为激光器中加入 EOM 锁模后的射频曲线. 从图 5 中可以看出激光器重复频率为 163 MHz. 第二路通过后续放大、扩谱、 $f-2f$ 干涉仪, 实现 40 dB 信噪比的 f_0 信号输出, 如图 6 所示. 图 6 插图 of HNLF 扩谱后的倍频程光谱, 光谱覆盖 1100 到 2200 nm. 第三路在本系统中用于与 1542 nm 窄线宽激光器拍频获取拍频信号 f_b .

EOM 中 LN 晶体施加电压后, 对激光器重复频率和 f_0 信号会产生影响, 因此 EOM 可以作为伺服器件用于对激光器重复频率和 f_0 的锁定. 当 EOM 晶体上的电压在 -200 到 200 V 之间变化时, 激光

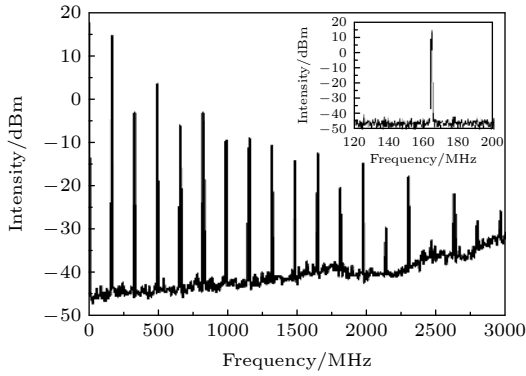


图 5 激光器中加入 EOM 锁模后的射频曲线, 其中插图为 163 MHz 处的频谱

Fig. 5. Radio frequency of the Er-fiber femtosecond laser with an intra-cavity EOM. The insert is the radio frequency at 163 MHz.

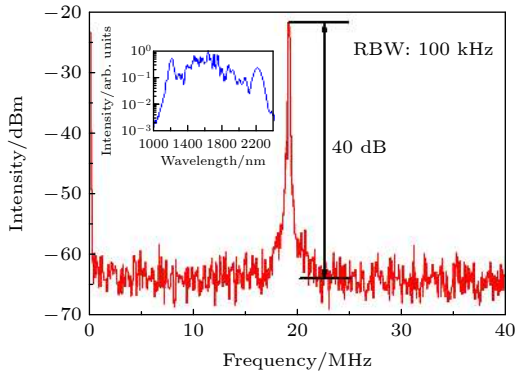


图 6 激光器载波包络偏移频率, 插图为扩谱后的倍频程光谱图

Fig. 6. Signal-to-noise ratio of carrier-envelope offset frequency in 100 kHz resolution bandwidth (RBW). The insert is octave spanning spectrum after HNLF.

器重复频率的变化量约为 30 Hz, 如图 7(a) 所示. 激光器重复频率变化主要是由于 EOM 中晶体施加电压后引起折射率变化所致. 在激光器重复频率漂移量较小的条件下, 可以利用 EOM 对激光器重复频率进行锁定. 当 EOM 晶体上的电压从 -200 到 200 V 逐渐增大时, 激光器 f_0 信号的变化量约为 25 MHz, 如图 7(b) 所示. 在电压调节过程中 f_0 信噪比保持不变.

EOM 中晶体施加电压后, 在对激光器重复频率和 f_0 信号产生影响的同时, 要避免对激光的锁模状态产生影响. 在系统优化过程中通过微调 LN 晶体, 使晶体电压在 -200 到 200 V 之间变化时, 激光器保持相同的锁模状态. 图 8 给出了激光器腔内 EOM 晶体电压改变时, 激光器输出光谱的变化. 从图 8 中可以看出, 本系统中 EOM 在不同驱动电压下, 激光器锁模光谱未发生明显变化.

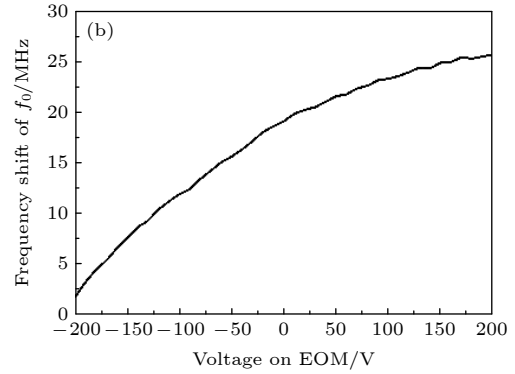
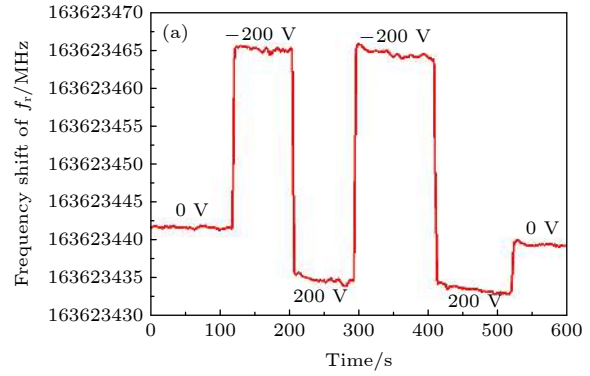


图 7 EOM 晶体电压对激光器参数的影响 (a) EOM 晶体电压对激光器重复频率的影响; (b) EOM 晶体电压对激光器载波包络偏移频率的影响

Fig. 7. Diagram showing the change in laser parameters at different voltage on EOM: (a) The change in repetition rate; (b) the change in carrier envelope offset frequency.

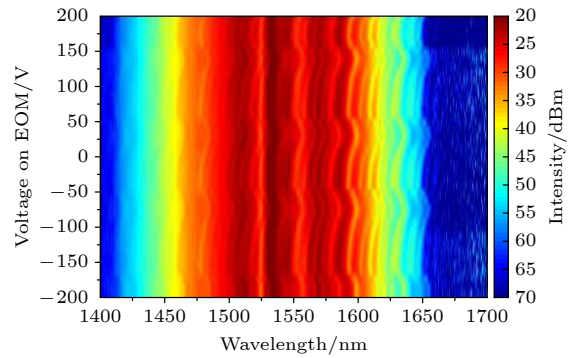


图 8 EOM 晶体电压改变时, 激光器输出光谱变化
Fig. 8. Evolution of the spectra of the Er-fiber femtosecond laser with the changing of the voltage on EOM.

4.2 激光器向微波频率的锁定

在锁定系统中增加 EOM 驱动器 (Thorlabs, HVA200), 其输出电压直接作用于 EOM 中的 LN 晶体. 伺服锁定环路 PPL2 由伺服模块 (Vescent, D2-135) 控制 EOM 驱动器构成. f_0 信号与参考信号鉴相输出信号通过微波线切换模块, 可选取进入 PPL1 或者 PPL2 环路, 控制激光器的载波包络

偏移频率 f_0 信号.

伺服锁定环路 PPL3 由伺服模块 (Vescent, D2-125) 控制 EOM 驱动器 (Thorlabs, HVA200) 构成. f_r 信号与参考信号混频输出信号通过微波线切换模块, 可选项进入 PPL3 环路或者 PPL4 环路, 控制激光器的重复频率 f_r 信号. 由于激光器腔内只有一个 EOM 并且 EOM 驱动器的输入端为单通道输入, 所以工作时伺服锁定环路 PPL2 和伺服锁定环路 PPL3 只有一路接入 EOM 的输入端.

本系统可以分别通过以下方式实现对激光器 f_0 和 f_r 信号的锁定:

1) 伺服锁定环路 PPL1 和伺服锁定环路 PPL4 同时使用, 即伺服锁定环路 PPL1 通过控制抽运激光器电流源实现对 f_0 的锁定, 伺服锁定环路 PPL4 通过控制 PZT 驱动器实现对 f_r 的锁定;

2) 伺服锁定环路 PPL1 和伺服锁定环路 PPL3 同时使用, 即伺服锁定环路 PPL1 通过控制抽运激光器电流源实现对 f_0 的锁定, 伺服锁定环路 PPL3 通过控制 EOM 驱动器实现对 f_r 的锁定;

3) 伺服锁定环路 PPL2 和伺服锁定环路 PPL4 同时使用, 即伺服锁定环路 PPL2 通过控制 EOM 驱动器实现对 f_0 的锁定, 伺服锁定环路 PPL4 通过控制 PZT 驱动器实现对 f_r 的锁定.

伺服锁定环路 PPL1 和伺服锁定环路 PPL4 的锁定方法在许多文献中都有介绍 [22–24]. 本文主要关注通过伺服锁定环路 PPL2 和伺服锁定环路 PPL3 实现向微波频率的锁定.

重复频率 f_r 的锁定主要通过控制激光器的腔长实现. 在本系统中, 一种方式是可以通过 PZT 实现重复频率的锁定. 该方法的特点是控制范围较大 (kHz 量级), 可以实现长时间连续锁定. 另一种方式是通过 EOM 实现对重复频率的锁定. 该方法的特点是控制范围较小 (Hz 量级), 但可以实现光梳高频噪声的抑制. 特别是以光学频率作为参考时, 采用 EOM 可以实现飞秒激光器梳齿线宽的压窄.

以微波频率作为参考进行光梳重复频率锁定时, 重复频率与参考频率混频输出的误差信号进入伺服锁定环路 PPL3. PPL3 环路中的伺服模块控制 EOM 驱动器输出的电压直接作用到 EOM, 通过改变 EOM 中 LN 晶体的折射率实现激光器重复频率的锁定. 系统中采用光电探测器 PD 获得激光重复频率的一次谐波. 调节频率综合器使其输出频

率位于重复频率一次谐波附近, 即 163623966.432 Hz. 在自由运转的条件下, 激光器在 50 h 内重复频率漂移量在 600 Hz 左右, 如图 9 所示. 而 EOM 中 LN 晶体在 ± 200 V 的条件下, 对重复频率的调节量只有 60 Hz. 因此采用 EOM 实现对重复频率的锁定时间较短. 图 10(a) 给出了 3 h 的锁定时间内激光器重复频率的平均值和标准差. 重复频率锁定后的平均值为 163623966.43216 Hz, 标准差为 0.474 mHz.

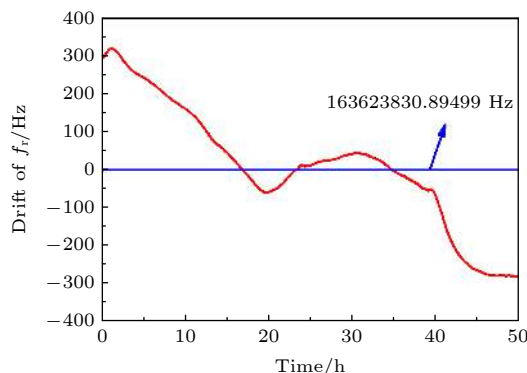


图 9 激光器自由运转时, 重复频率漂移
Fig. 9. Frequency drift of the repetition rate.

为了对比, 重复频率与参考频率混频输出的误差信号通过微波线切换模块切换进入伺服锁定环路 PPL4. 由于激光器重复频率漂移, 因此调节频率综合器使其输出频率位于 163623411.431 Hz 附近, 以匹配此时的重复频率. 其中 PPL4 中伺服模块控制 PZT 驱动器输出电压直接作用到 PZT 上, 通过改变 PZT 伸缩量实现激光器重复频率的锁定. 图 10(b) 给出了 7.5 h 的锁定时间内激光器重复频率的平均值和标准差. 重复频率锁定后的平均值为 163623411.43121 Hz, 标准差为 0.473 mHz.

图 11 给出了为分别采用 EOM 和 PZT 锁定重复频率时所获得的相对 Allan 偏差曲线. 在平均时间 0—1000 s 内, 两种锁定方法得到的相对 Allan 偏差基本一致. 因此, 当重复频率不需要长时间锁定时, 可以在飞秒激光器中直接加入 EOM 以简化重复频率锁定时飞秒激光的复杂性. 而先前无论是 PZT 控制端镜还是 PZT 拉伸光纤 [14,21,25], 都需要在激光器建立过程中把伺服器件加入激光腔内. 后续采用 EOM 结合与对激光器底板温度控制相结合的方式有望实现激光器重复频率的长时间连续锁定.

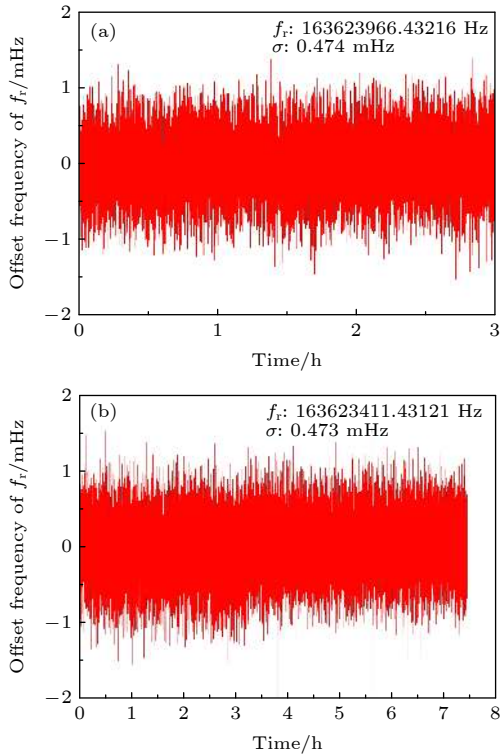


图 10 重复频率锁定后的频率变化 (a) 采用 EOM 锁定重复频率; (b) 采用 PZT 锁定重复频率

Fig. 10. Residual fluctuations of the repetition rate when it is phase-locked: (a) Phase-locked by EOM; (b) phase-locked by PZT.

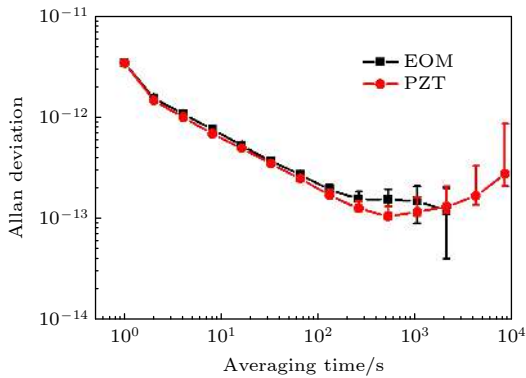


图 11 采用 EOM 和 PZT 锁定重复频率后, 所获得的重复频率的相对 Allan 偏差曲线

Fig. 11. Calculated Allan deviations when the repetition rate was phase-locked by EOM and PZT respectively.

以微波频率作参考进行光梳的 f_0 信号锁定时, f_0 信号与参考频率鉴相输出的误差信号进入伺服锁定环路 PPL2. 其中伺服模块的输出控制 EOM 驱动器输出的电压直接作用到 EOM, 通过改变 EOM 中 LN 晶体的折射率实现 f_0 信号的锁定. 激光器在自由运转的条件下, 载波包络偏移频率 f_0 信号在 16 h 内的漂移量在 20 MHz 左右, 如图 12

所示. 而 EOM 在 ± 200 V 的条件下, 对载波包络偏移频率的调节量可以达到 25 MHz, 足以满足对载波包络偏移频率的控制. 图 13 给出了 18 h 的锁定时间内激光器 f_0 信号的平均值和标准差. f_0 信号锁定后平均值为 20 MHz, 标准差为 1.03 mHz.

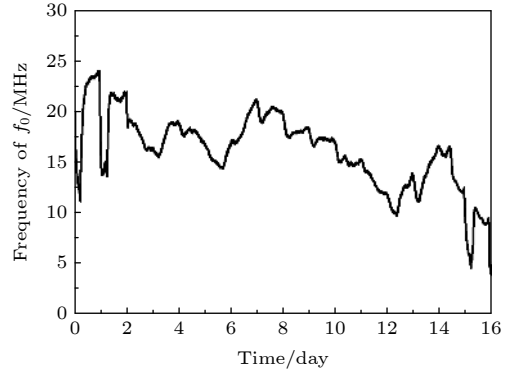


图 12 自由运转时 f_0 信号漂移曲线

Fig. 12. Frequency drift of the carrier envelope offset frequency.

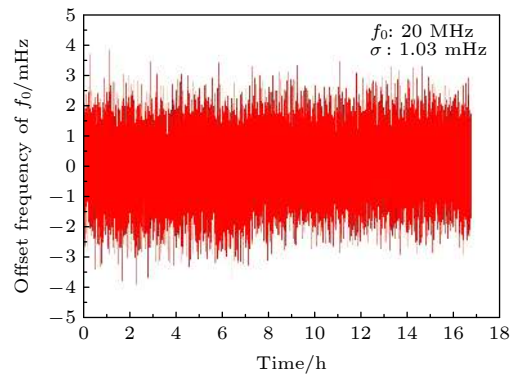


图 13 采用 EOM 锁定 f_0 信号后的频率变化

Fig. 13. Residual fluctuations of the carrier envelope offset frequency when it is phase-locked by EOM.

4.3 EOM 中 LN 晶体伺服带宽的测量

激光器中增加快速响应的 LN 晶体, 主要为了提高光梳的伺服带宽、抑制光纤光梳中高频噪声, 为光纤光梳向窄线宽激光器的锁定提供伺服器件. 在光梳 f_r 和 f_0 两个参数向微波锁定的过程中, LN 晶体的快环特性不是必须的. 但当光梳梳齿线宽压窄时, 光梳的锁定带宽必须得到提高才能抑制高频噪声. 为了验证 EOM 引入对激光器的伺服锁定带宽的改善, 采用将飞秒激光器锁定于一台超窄线宽激光器, 通过测量锁相环内拍频信号边带宽度来判断伺服锁定带宽.

采用锁定到高 Q 腔的波长为 1542 nm 的窄线

宽激光器作为参考光源, 激光器秒稳定度 1.5×10^{-15} , 线宽小于 2 Hz, 输出功率大于 10 mW. 采用 20 m 单模保偏光纤将激光传输至飞秒激光器所在的光学台面进行拍频. 飞秒激光器输出激光经过 1:3 的光纤分束器分成三路后的第三路光约 5 mW 进入拍频模块. 经仔细调节两路光空间耦合、偏振、聚焦、光斑等参数, 在 100 kHz 分辨率带宽和 40 MHz 频带范围内, 可以获得大于 40 dB 信噪比的拍频信号 f_b .

拍频信号 f_b 与 20 MHz 微波参考信号混频, 误差信号进入锁定模块 (Vescent, D2-125), 其输出信号通过 PZT 驱动器反馈控制 PZT. D2-125 附加输出信号进入锁定模块 (New Focus, LB1005), 通过 EOM 驱动器反馈控制 LN 晶体实现 f_b 的快环锁定. 当只有 PZT 锁定时, 环内拍频信号如图 14(a) 所示. 从图 14(a) 中可以看出, 由于 f_b 信号线宽太宽, 锁定边带淹没在 f_b 信号之中. 当快环锁定起作用时, f_b 信号在锁定频率中心处出现相干

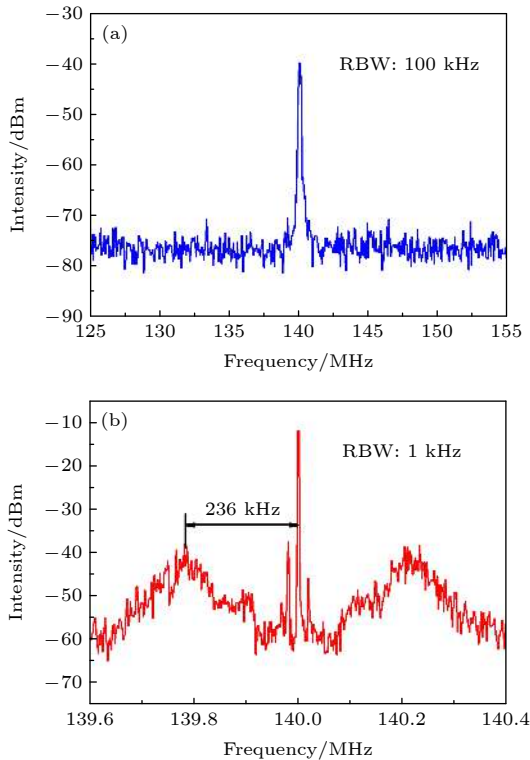


图 14 飞秒激光器与 1542 nm 的单频激光的拍频信号 (a) 采用 PZT 锁定后的拍频信号, 其中分辨率带宽为 100 kHz; (b) 采用 EOM 锁定后的拍频信号, 其中分辨率带宽为 1 kHz

Fig. 14. Beat note between the Er-fiber comb and a 1542 nm laser: (a) Spectrum of the in-loop f_b after phase-locking with PZT in 100 kHz RBW; (b) spectrum of the in-loop f_b after phase-locking with EOM in 1 kHz RBW.

峰, 相干峰信噪比为 45 dB, 在距离中心频率一定位置出现锁定边带如图 14(b) 所示. 从图 14(b) 中可以看出 EOM 的锁定带宽约为 236 kHz. 该信号在 10 h 连续锁定时间内的标准差为 0.09 mHz, 如图 15 所示.

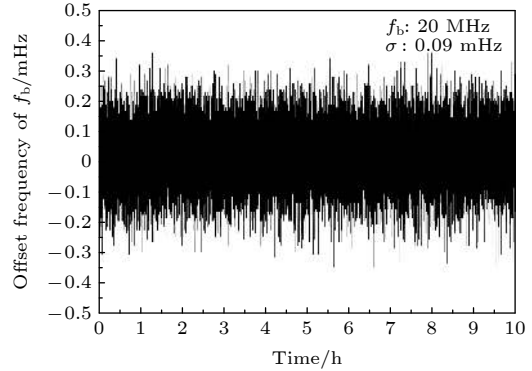


图 15 光梳与 1542 nm 激光拍频信号 f_b 锁定后的频率变化

Fig. 15. Residual fluctuations of the beat note when the Er-fiber comb was phase-locked to a 1542 nm laser.

5 结 论

窄线宽光学频率梳在光钟频率比对、双光梳和超稳微波等领域都具有十分重要的作用. 本文以光梳梳齿线宽压窄的关键技术为研究内容, 重点研究了掺 Er 光纤飞秒激光器中 LN 晶体对激光器参数的影响. 通过计算 LN 晶体的折射率、色散、相位延迟等参数, 分析了 LN 晶体对激光器参数的影响, 并在实验上获得了 LN 晶体电压对激光器重复频率和载波包络偏移频率的影响, 进而通过 LN 晶体实现对光纤光梳重复频率和载波包络偏移频率的锁定.

本系统选取了 3 mm 长度的 x 切割的 LN 晶体作为快速伺服器件加入掺 Er 光纤飞秒激光器腔内. 较短的通光长度对激光器的色散和锁模性能影响可以忽略, 在 ± 200 V 电压的驱动下, LN 晶体对重复频率的调节量为 60 Hz, 对载波包络偏移频率的调节量为 25 MHz. 对于数小时的频率锁定, 完全可以采用 EOM 作为控制器件. 在 EOM 有效工作的基础上, 进一步通过锁定光纤飞秒激光器与窄线宽激光器的拍频信号, 验证了电光晶体的引入使激光器的伺服锁定带宽提高到了 236 kHz, 为窄线宽飞秒光学频率梳的建立提供了技术基础.

后续工作将在光纤飞秒激光器向窄线宽激光

器锁定的基础上, 验证光梳梳齿线宽的传递性能, 即当光梳锁定到一个频率的窄线宽激光器 (如 1542 nm) 时, 距离较远的波长处 (如 698, 729 nm 等) 梳齿线宽性能, 以进一步验证 EOM 中 LN 晶体的锁定效果.

参考文献

- [1] Fortier T, Baumann E 2019 *Commun. Phys.* **2** 153
- [2] Liu T A, Shu R H, Peng J L 2008 *Opt. Express* **16** 10728
- [3] Giorgetta F R, Swann W C, Sinclair L C, Baumann E, Coddington I, Newbury N R 2013 *Nat. Photonics* **7** 434
- [4] Millo J, Boudot R, Lours M, Bourgeois P Y, Luiten A N, Coq Y. L, Kersalé Y, Santarelli G 2009 *Opt. Lett.* **34** 3707
- [5] Minoshima K, Matsumoto H 2000 *Appl. Opt.* **39** 5512
- [6] Picqué N, Hänsch T W 2019 *Nat. Photonics* **13** 146
- [7] McCracken R A, Charsley J M, Reid D T 2017 *Opt. Express* **25** 15058
- [8] Sinclair L C, Coddington I, Swann W C, Rieker G B, Hati A, Iwakuni K, Newbury N R 2014 *Opt. Express* **22** 6996
- [9] Lezius M, Wilken T, Deutsch C, Giunta M, Mandel O, Thaller A, Schkolnik V, Schiemangk M, Dinkelaker A, Kohfeldt A, Wicht A, Krutzik M, Peters A, Hellmig O, Duncker H, Sengstock K, Windpassinger O, Lampmann K, Hülasing T, Hänsch T W, and Holzwarth R 2016 *Optica* **3** 1381
- [10] Nakajima Y, Inaba H, Hosaka K, Minoshima K, Onae A, Yasuda M, Kohno T, Kawato S, Kobayashi T, Katsuyama T, Hong F L 2010 *Opt. Express* **18** 1667
- [11] Schibli T R, Hartl I, Yost D C, Martin M J, Marcinkevicius A, Fermann M E, Ye J 2008 *Nat. Photonics* **2** 355
- [12] Inaba H, Hosaka K, Yasuda M, Nakajima Y, Iwakuni K, Akamatsu D, Okubo S, Kohno T, Onae A, Hong F L 2013 *Opt. Express* **21** 7891
- [13] Nicolodi D, Argence B, Zhang W, Targat R L, Santarelli G, Coq Y L 2014 *Nat. Photonics* **8** 219
- [14] Hudson D D, Holman K W, Jones R J, Cundiff S T, Ye J 2005 *Opt. Lett.* **30** 2948
- [15] Iwakuni K, Inaba H, Nakajima Y, Kobayashi T, Hosaka K, Onae A, Hong F L 2012 *Opt. Express* **20** 13769
- [16] Torcheboeuf N, Buchs G, Kundermann S, Portuondo-Campa E, Bennès J, Lecomte S 2017 *Opt. Express* **25** 2215
- [17] Schweyer S M, Eder B, Putzer P, Mayerbacher M, Lemke N, Schreiber K U, Hugentobler U, Kienberger R 2018 *Opt. Express* **26** 23798
- [18] Ning K, Hou L, Fan S T, Yan L L, Zhang Y Y, Rao B J, Zhang X F, Zhang S G, Jiang H F 2020 *Chin. Phys. Lett.* **37** 064202
- [19] Ma Y X, Meng F, Wang Y, Wang A M, Zhang Z G 2019 *Chin. Opt. Lett.* **17** 041402
- [20] Wang H B, Han H N, Zhang Z Y, Shao X D, Zhu J F, Wei Z Y 2020 *Chin. Phys. B* **29** 030601
- [21] Cao S Y, Meng F, Lin B K, Fang Z J, 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]
- [22] Hisai Y, Akamatsu D, Kobayashi T, Okubo S, Inaba H, Hosaka K, Yasuda M, Hong F L 2019 *Opt. Express* **27** 6404
- [23] Kim Y, Kim S, Kim Y J, Hussein H, Kim S W 2009 *Opt. Express* **17** 11972
- [24] Hundertmark H, Wandt D, Fallnich C, Haverkamp N, Telle H R 2004 *Opt. Express* **12** 770
- [25] Washburn B R, Fox R W, Newbury N R, Nicholson J W, Feder K, Westbrook P S, Jørgensen C G 2004 *Opt. Express* **12** 4999

Influence of electro-optic modulator on Er-doped fiber femtosecond laser^{*}

Cao Shi-Ying[†] Lin Bai-Ke Yuan Xiao-Di Ding Yong-Jin
Meng Fei Fang Zhan-Jun

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

(Received 21 September 2020; revised manuscript received 9 November 2020)

Abstract

Narrow-linewidth femtosecond optical frequency comb plays an important role in the fields, such as optical clock comparison, time frequency transfer, ultrastable microwave generation, absolute distance measurement, high precision spectroscopy, etc. Due to the influence of the lifetime of the upper energy level in the gain medium, the linewidth of Er-fiber combs is generally on the order of several hundred kilohertz. In order to narrow the linewidth of comb teeth, an effective method is to insert a fast response electro-optic modulator (EOM) into the laser cavity, so that the servo bandwidth of fiber comb is extended to several hundred kilohertz, which provides a feedback mechanism for fast servo locking. Among them, a high quality femtosecond laser is the core. Based on this, the influence of the EOM on the parameters of Er-fiber femtosecond laser is studied in this paper. By calculating the refractive index, group velocity dispersion, and phase delay of the electro-optic crystal, the influence of the introduction of the EOM on the laser performance is analyzed. A LiNbO₃ (LN) crystal with a length of 3 mm and *x*-cut is selected as the EOM and inserted into the laser cavity. The influence of the applied voltage of the EOM on the repetition rate and carrier envelope offset frequency of the laser are obtained experimentally. When the voltage on the LN crystal changes from -200 to 200 V, the adjustment of repetition rate is 60 Hz and the carrier envelope offset frequency is 25 MHz. Then the two parameters are phase locked through the EOM. Furthermore, by phase locking the beat note between the fiber comb and a narrow-linewidth continue wavelength laser at 1542 nm, it is verified that the introduction of the EOM can expand the servo bandwidth of the laser to more than 236 kHz, which provides a technical basis for establishing narrow linewidth femtosecond optical frequency combs. The following work will verify the performance of comb line, that is, when the comb is locked to a narrow-linewidth laser (such as 1542 nm), the performance of comb line at wavelength (such as 698, 729 nm, and so on) of distant place will be analyzed in detail.

Keywords: Er-doped fiber femtosecond laser, Er-doped fiber optical frequency comb, electro-optic modulator, servo lock

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

DOI: [10.7498/aps.70.20201564](https://doi.org/10.7498/aps.70.20201564)

^{*} Project supported by the National Key R&D Program of China (Grant No. 2016YFF0200204).

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