

基于电光晶体马赫-曾德干涉仪的载波包络偏移频率调节方法

丁永今 曹士英 林百科 王强 韩羿 方占军

Method of adjusting carrier-envelope offset frequency based on electro-optic-crystal Mach-Zehnder interferometer

Ding Yong-Jin Cao Shi-Ying Lin Bai-Ke Wang Qiang Han Yi Fang Zhan-Jun

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 71, 144203 (2022) DOI: 10.7498/aps.71.20220147

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220147>

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

基于银纳米链的马赫-曾德干涉仪结构的生物传感器

Biosensor based on plasmonic Mach-Zehnder interferometer with metallic gratings

物理学报. 2022, 71(1): 017301 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20211420>

基于量子增强型光纤马赫-曾德尔干涉仪的低频信号测量

Measurement of low-frequency signal based on quantum-enhanced fiber Mach-Zehnder interferometer

物理学报. 2018, 67(24): 244202 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20181335>

探测器对量子增强马赫-曾德尔干涉仪相位测量灵敏度的影响

Effect of detection efficiency on phase sensitivity in quantum-enhanced Mach-Zehnder interferometer

物理学报. 2018, 67(23): 234202 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20181193>

基于光学频率梳的超低噪声微波频率产生

Ultra-low noise microwave frequency generation based on optical frequency comb

物理学报. 2021, 70(13): 134204 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201925>

光子增加双模压缩真空态在马赫-曾德尔干涉仪相位测量中的应用

Application of photon-added two-mode squeezed vacuum states to phase estimation based on Mach-Zehnder interferometer

物理学报. 2020, 69(12): 124202 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200179>

重复频率倍增光频梳时域互相关绝对测距

Absolute distance measurement using cross correlation interferometer with a repetition rate multiplication frequency comb

物理学报. 2022, 71(9): 090602 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20212073>

基于电光晶体马赫-曾德干涉仪的 载波包络偏移频率调节方法*

丁永今 曹士英[†] 林百科 王强 韩羿 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)

(2022年1月21日收到; 2022年3月22日收到修改稿)

基于电光晶体马赫-曾德(M-Z)干涉仪的载波包络相位偏移频率(carrier-envelope offset frequency, f_0)调节方法是一种新颖的 f_0 调节方法. 该方法通过改变脉冲包络而不改变载波频率实现对 f_0 信号的调节. 本文对该方法所涉及的偏振控制装置进行了仿真, 分析了其中波片光轴偏差对输出激光偏振方向和偏振度的影响. 在实验上提出了一种光轴校准方法以减小波片光轴偏差带来的影响, 并对比了抽运电流调节方法和基于电光晶体M-Z干涉仪的 f_0 调节方法对 f_0 信号和光梳与激光拍频信号(beat note, f_b)的影响. 实验结果表明改变抽运电流, 在 f_0 调节量为9 MHz的情况下, 对 f_b 影响为7 MHz. 而在相同 f_0 调节量下, 电光晶体M-Z干涉仪 f_0 调节方法对 f_b 的影响为0.2 MHz, 仅为抽运电流对 f_b 影响的1/35, 从而验证了基于电光晶体M-Z干涉仪的 f_0 调节方法可以有效降低对 f_b 的干扰, 为利用 f_b 锁定重复频率(repetition rate, f_r), 进而实现光梳梳齿线宽的压窄提供了一种技术手段.

关键词: 马赫-曾德干涉仪, 相位偏移频率, 窄线宽, 光学频率梳

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

DOI: 10.7498/aps.71.20220147

1 引言

光学频率梳, 简称“光梳”, 自1999年被实现^[1,2]以来得到了巨大的发展, 其梳齿覆盖的波长范围广, 并且梳齿之间保持着良好的相干性^[3,4], 以一种相对简单的方式实现了前所未有的光学频率测量, 并带动了许多领域的进步. 如今, 光梳已经被广泛用于光学频率标准^[5]、精密光谱学^[6]、超稳微波产生^[7]、绝对距离测量^[8]等领域. 光梳锁定后梳齿的稳定度和准确度反映了光梳的性能. 梳齿的稳定度与梳齿线宽、相位噪声在表征光梳性能上是统一的. 随着光钟技术的不断发展, 其稳定度已经达到了秒稳 10^{-17} 水平^[9], B类不确定度甚至进入了小数 10^{-19} 水平^[10]. 在光钟研究的相关领域, 如光钟比对^[11]以及光钟

的跃迁频率转换到其他波段等应用中^[12], 为了保证测量结果不受限于光梳, 低相噪、窄线宽光梳的建立和应用至关重要. 此外, 在双光梳技术中^[13], 两套光梳之间的相对相干时间与相对线宽成反比, 更长的相干时间可以使信号相干叠加从而提高探测信号的信噪比.

无论是诞生时间较早的钛宝石光梳还是目前广泛应用的光纤光梳, 都采取了伺服反馈方式对光梳进行锁定与噪声抑制, 但由于光纤光梳腔内色散和损耗等原因, 其噪声普遍大于钛宝石光梳^[14], 因此需要更好的噪声抑制手段. 光梳有两个关键参数重复频率 f_r 和载波包络相位偏移频率 f_0 . 光梳中任一梳齿的频率 f_N 可以表示为 $f_N = N \cdot f_r + f_0$, 其中, N 为梳齿序数, 通常在 10^6 量级. 无论锁定 f_N , f_r 和 f_0 三个参数中的两个, 还是锁定两根不同梳齿,

* 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

都是直接或者间接反馈控制 f_r 和 f_0 , 因此 f_r 和 f_0 控制器件的带宽至关重要. 除此之外, 通过对光梳系统中引入噪声的环节进行优化, 例如如降低抽运源噪声^[15], 减小探测 f_0 过程中超连续谱引入的噪声^[16] 等方式也可以从源头上减小光梳噪声, 从而降低对伺服锁定带宽的要求.

光梳的重复频率与振荡器腔长有关, 控制原理相对简单. 早期的光梳通过压电陶瓷 (piezoelectric transducer, PZT) 控制腔长. 由于 PZT 为机械性的伸缩, 调节速度较慢, 带宽通常在几十 kHz 甚至更低, 但其调节范围能达到 kHz 甚至 MHz 量级. 2005 年 Hudson 等^[17] 通过腔内电光调制器 (electro-optical modulator, EOM) 实现了快速的 f_r 控制, f_r 控制带宽达到了 230 kHz, 锁定后的 f_r 在 1 Hz 到 100 kHz 的频率范围内积分相位抖动为 10 fs. 2012 年 Iwakuni 等^[18] 利用波导型 EOM 作为 f_r 的反馈器件, 其半波电压小于 5 V, f_r 伺服带宽达到了 1.3 MHz. 2017 年 Nakamura 等^[19] 提出在腔内采用磁光调制器 (magneto-optical modulator, MOM) 控制 f_r , 通过 PZT 和抽运电流将一根梳齿锁定到超稳连续光, 再加入 MOM 伺服环路, 将拍频信号 100 Hz—3 MHz 范围内的相位噪声从 128 mrad 降低到 92 mrad. 目前光梳 f_r 锁定的反馈器件普遍采用 PZT 和 EOM 相结合的方式以达到快速大范围的伺服控制. 此外, 再加上对振荡器的有效温控, 能够实现 f_r 的长期锁定.

光梳的载波包络相位偏移频率 f_0 源自于激光器腔内的色散导致腔内脉冲的载波速度与包络速度存在差异, 即脉冲载波的相速度和包络的群速度不一样, 难以直接调节. 高速可靠的 f_0 调节方法对光梳噪声抑制具有重要意义. 2004 年 Hundertmark 等^[20] 借助提取到的掺 Er 光纤振荡器的 f_0 信号, 通过控制光纤振荡器的抽运电流将 f_0 信号锁定到射频参考上. 2010 年 Koke 等^[21] 采用了一种前馈的方法, 即通过腔外的声光移频器 (acousto-optic frequency shifter, AOFS) 对梳齿进行一个整体的移动, 得到的 f_0 时间抖动只有 12 as. 这种方法的调节速度受限于声波在移频器晶体里的传播延迟, 并且可能限制输出功率, 同时引入空间色散. 2012 年 Iwakuni 等^[18] 采取将反馈电流信号直接加到抽运二极管管脚方式, 并调节腔内偏振状态减小 f_0 对注入电流的敏感程度性, 实现了 900 kHz 的 f_0 反馈带宽. 目前普遍使用的 f_0 调节方法为前面所提到的通过调节抽运电流或者调节抽运功率的方式. 这种

方式实现起来相对简单, 但是调节速度受限于增益介质, 调节机制比较复杂^[22]. 对 f_0 的调节是大量的非线性效应共同作用的结果, 对振荡器运行状态影响较大, 同时 f_0 的调节往往会对 f_r 信号产生串扰, 从而影响 f_r 环路的锁定.

2017 年, Hänsel 等^[23] 提出了一种基于电光晶体 M-Z 干涉仪的 f_0 调节方法. 这种方法通过控制施加在 EOM 上电压来控制 f_0 , 在调节速度上具有一定潜力. 并且此方法对载波频率没有影响, 对光梳与位于载波频率处激光的拍频信号没有串扰, 对光梳与载波波长附近激光的拍频信号的影响也相对较小. 在利用 f_0 锁定 f_r 方面, 基于电光晶体 M-Z 干涉仪的 f_0 调节方法具有优势. 而通过 f_0 锁定 f_r 正是将光学频率稳定度传递到微波频率所普遍采用的方法.

国内在基于 EOM 的光学频率梳的研究方面, Ning 等^[24] 在全保偏多路输出的掺 Er 光纤光梳中增加了 EOM, 并采用 EOM 结合 PZT 的方式进行重复频率锁定. Wang 等^[25] 在掺 Yb 光纤飞秒激光器中加入单个 EOM 晶体, 实现了向 972 nm 激光的锁定. Ma 等^[26] 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. 本课题组^[27] 在掺 Er 光纤飞秒激光器中加入单个 EOM 晶体, 验证了电光晶体对重复频率和载波包络偏移频率的调节能力, 实现了利用 EOM 晶体对重复频率和载波包络偏移频率的锁定.

基于此, 本文主要研究了基于电光晶体 M-Z 干涉仪的 f_0 调节方法并对该方法所涉及的偏振控制装置进行了仿真, 分析了其中波片光轴偏差对输出激光偏振方向和偏振度的影响. 在实验上提出了一种光轴校准方法以此减小波片光轴偏差带来的影响, 对比分析了抽运电流调节方法和基于电光晶体 M-Z 干涉仪的 f_0 调节方法对 f_0 信号和 f_r 信号的影响, 验证了基于电光晶体 M-Z 干涉仪的 f_0 调节方法可以有效降低对拍频信号的干扰, 为利用 f_0 信号锁定重复频率, 进而实现光梳梳齿线宽的压窄提供了一种技术手段.

2 基本原理和仿真计算

2.1 基本原理

锁模激光器输出的脉冲的电场 $E(z, t)$ 用标量

复平面波可以表示为

$$E(z, t) = A(z, t) \cdot e^{\varphi_0(z, t)} \cdot e^{i(\omega_0 - kz)},$$

其中, $A(z, t)$ 为振幅, $e^{\varphi_0(z, t)}$ 为相位因子, $e^{i(\omega_0 - kz)}$ 为载波, ω_0 为载波频率. 数学形式上包络函数与载波函数的乘积可以看作包络对载波幅度调制的结果, 如图 1 所示.

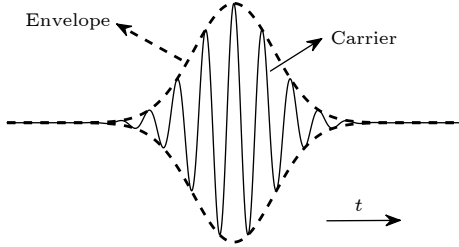


图 1 脉冲包络与载波示意图
Fig. 1. Diagram of the envelope and carrier of a pulse.

基于电光晶体 M-Z 干涉仪的 f_0 调节方法基本原理如图 2(a) 所示^[23], 脉冲在激光器腔内分成蓝色和红色两个部分. 两部分脉冲的振幅大小可控, 其中蓝色部分脉冲经历的路径相对于红色部分脉冲多出一个整数倍载波波长, 之后再重新合成为一个脉冲. 由于两个脉冲路径差对应于载波波长的整数倍, 因此合成之后脉冲的载波频率保持不变, 但脉冲的包络位置发生了移动. 脉冲的合成过程如图 2(b) 所示, 这里设两部分脉冲的路径之差为 1 个载波波长. 黑色为原始脉冲, 被分成了蓝色与红色两部分. 蓝色部分由于走过的路径多出了一个载波波长, 时间上相对于红色脉冲有一个载波周期的延迟, 然后蓝色和红色部分重新合成为一个脉冲, 用浅绿色表示. 浅绿色脉冲的包络位置相对于原始黑色脉冲发生了移动. 这样在载波频率不变的情况下通过改变包络的位置从而改变载波和包络之间的相位偏移. 当脉冲在腔内不断循环的时候, 受控载波的包络相移频率便产生了, 而载波对应的光频没有发生变化, 因此在利用光梳向位于载波波

长处的窄线宽激光锁定上具有优势, 对于光梳与载波波长附近处的窄线宽激光的拍频信号影响也较小. 而脉冲在腔内不断循环的时候, 包络位置的变化导致了包络之间的间隔也发生了变化, 这意味重复频率的变化, 因此可以认为此方法是在载波频率不变的情况下, 通过改变重复频率来改变 f_0 .

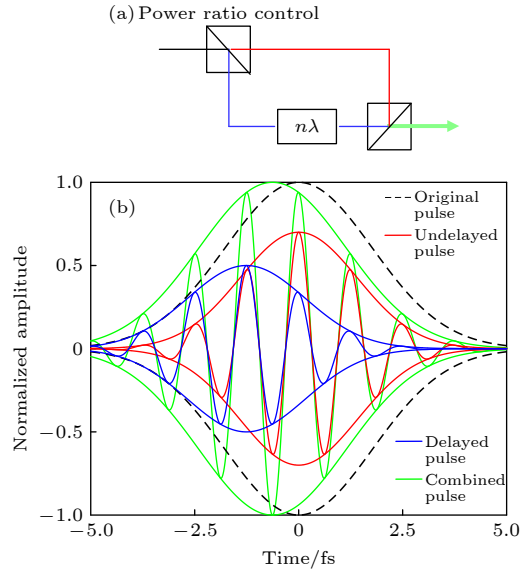


图 2 基于电光晶体 M-Z 干涉仪的 f_0 调节方法示意图 (a) 基本原理图; (b) 脉冲包络位置的演化图
Fig. 2. Principal of the EOM based M-Z interferometer for controlling f_0 : (a) Principle of f_0 control device; (b) evolution of the pulse envelope.

基于电光晶体 M-Z 干涉仪的 f_0 调节装置由偏振控制装置 PCD1, $n\lambda$ 波片、偏振控制装置 PCD2 组成. 光在电光晶体 M-Z 干涉仪中的偏振如图 3 所示. $n\lambda$ 波片快慢轴对应于 M-Z 干涉仪两臂, 通过 PCD1 改变入射线偏光的角度来改变其在 $n\lambda$ 波片两个光轴上的投影强度, 从而控制 f_0 . PCD2 与 PCD1 对偏振的控制效果相反. 这样整套装置对入射光的偏振没有影响, 对偏振的控制过程中入射光的功率也保持不变. 在图 3 所示的装置中, 偏振控制装置为 f_0 调节的关键部分, 由 1/4 波片-EOM-1/4 波片

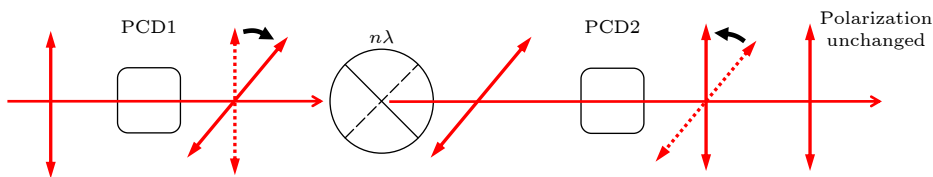


图 3 基于电光晶体的 M-Z 干涉仪示意图及光在其中的偏振方向
Fig. 3. Diagram of experimental device of the EOM based M-Z interferometer for controlling f_0 and the polarization of the light that travels along it.

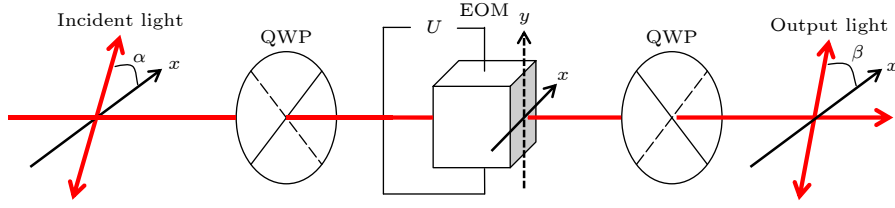


图4 偏振控制装置结构图, 其中QWP为1/4波片, 实线为QWP和EOM快轴, 虚线为QWP和EOM慢轴, α 为入射光偏振方向与 x 轴夹角, β 为出射光偏振方向与 x 轴夹角

Fig. 4. Structure of PCD, where, QWP is quarter-wave plate, the solid lines are the fast axes of QWP and EOM, the dotted lines are the slow axes of QWP and EOM, α is the angle between the polarization of the incident light and the x -axis, β is the angle between the polarization of the output light and the x -axis.

的组合构成, 如图4所示. 其中, 实线表示1/4波片和EOM的快轴, 虚线表示1/4波片和EOM的慢轴. 偏振控制装置要求EOM前后两个1/4波片光轴相互垂直, 并且与EOM加电压后的两条感应特征轴成 45° 夹角.

借助琼斯矩阵对图4所示偏振控制装置的原理进行分析. 建立二维笛卡尔坐标系, 设坐标系 x , y 轴与EOM两个感应特征轴平行, 如图4所示. x 轴沿水平方向, y 轴沿竖直方向. 第一个1/4波片光轴与 x 轴夹角为 45° , 第二个1/4波片与 x 轴夹角为 -45° , EOM感应快轴与 x 轴平行. 考虑到其他偏振态的光可以由不同线偏光叠加而来, 采用线偏光分析不影响结果的准确性. 为了方便分析, 设入射光为线偏光, 偏振方向与 x 轴夹角为 α , EOM快慢轴相位差为 $\Delta\varphi$, 则出射光为入射光所经过器件的琼斯矩阵依次左乘以入射光琼斯矩阵, 即

$$E_{\text{out}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & i \\ i & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \cos \frac{\Delta\varphi}{2} - i \cdot \sin \frac{\Delta\varphi}{2} & 0 \\ 0 & \cos \frac{\Delta\varphi}{2} - i \cdot \sin \frac{\Delta\varphi}{2} \end{bmatrix} \times \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & -i \\ -i & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos \alpha \\ \sin \alpha \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \left(\alpha + \frac{\Delta\varphi}{2} \right) \\ \sin \left(\alpha + \frac{\Delta\varphi}{2} \right) \end{bmatrix}. \quad (1)$$

从(1)式中可以看到, 出射光仍然为线偏光但角度旋转了 $\frac{\Delta\varphi}{2}$. 在具体实现过程中此角度由EOM上所施加的电压所控制.

2.2 偏振控制仿真

考虑到实际情况中1/4波片和EOM的感应光轴方向容易出现偏离, 因此对偏振控制装置的偏

振控制能力进行了仿真, 计算了器件夹角发生偏离时, 出射光的偏振方向及偏振度的变化. 仿真同样借助于琼斯矩阵, 由于EOM可以看作一个相位差可调的波片, 因此EOM和波片均采用了波片的通用琼斯矩阵公式:

$$G = \cos \frac{\delta}{2} \cdot \begin{bmatrix} 1 - i \cdot \tan \frac{\delta}{2} \cos(2\theta) & -i \cdot \tan \frac{\delta}{2} \sin(2\theta) \\ -i \cdot \tan \frac{\delta}{2} \sin(2\theta) & 1 + i \cdot \tan \frac{\delta}{2} \cos(2\theta) \end{bmatrix}, \quad (2)$$

其中, δ 为器件快慢轴相位差, θ 为器件快轴与 x 轴夹角. 考虑到实际情况 f_0 调节装置在腔内的位置为两个偏振分光镜 (polarization beam splitter, PBS) 之间, 入射光设定为水平线偏光. 综合考虑了铌酸锂晶体的折射率和电光系数, 实验采用的铌酸锂晶体加电压时感应主轴会绕通光方向旋转 45° , 即 θ_{EOM} 为 45° , 因此实验器件的光轴方向与图4并不相同, 相当于偏振控制装置整体旋转了 45° . 对于第一个1/4波片, θ_{plate1} 为 90° , 即光轴在竖直方向. 对于第二个1/4波片, θ_{plate2} 为 0° , 即光轴在水平方向. 铌酸锂晶体的相位差 $\delta_{\text{EOM}} = \frac{2\pi}{\lambda} n_0^3 \gamma \frac{l}{d} U$ 计算得到, 其中 n_0 为晶体寻常光的折射率, γ 为晶体的电光系数, d 为给晶体两电极之间的距离, l 为晶体通光方向上的长度, U 为施加的电压. 实验采用的铌酸锂晶体半波电压为10500 V, 在150 V电压下快慢轴相位差为 2.57° . 但为了让仿真结果看起来更加明显, EOM的快慢轴相位 δ_{EOM} 差设置为固定的 10° . 在实际情况器件光轴的偏离不会太大, 因此1/4波片和EOM光轴夹角偏离情况设为 $-10^\circ \sim 10^\circ$. 出射光的偏振状态借助偏振椭圆表征. 偏振椭圆为电场振幅在与光传播方向的垂直面上的分布, 偏振椭圆的 x 与 y 轴方向与图4相同. 线偏振程度用偏振椭圆的短轴 b 与长轴 a 的比值, 即 b/a 表征, 偏振方向用偏振椭圆的长轴方向表征.

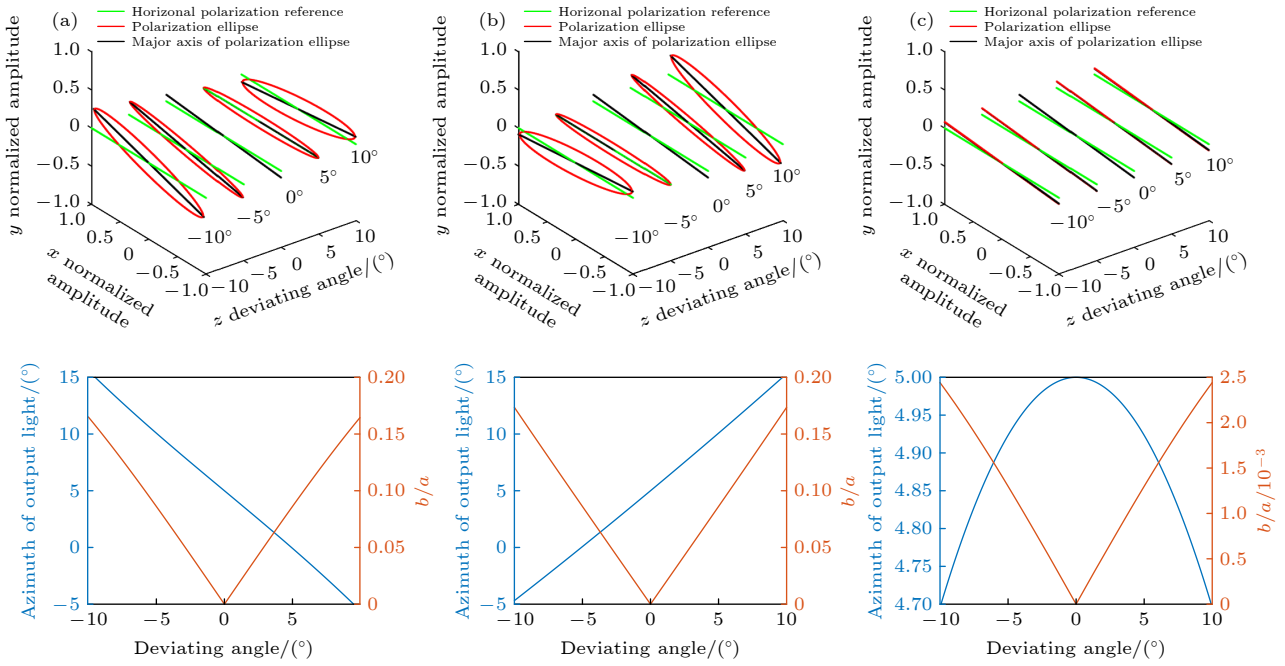


图 5 器件光轴存在偏离的情况 (a) 第一个 1/4 波片光轴发生偏离; (b) 第二个 1/4 波片光轴发生偏离; (c) EOM 光轴发生偏离
 Fig. 5. Influence of the deviation of the optical axis on the polarization: (a) Deviation of the first QWP optical axis; (b) deviation of the second QWP optical axis; (c) deviation of the EOM optical axis.

本文仿真计算了第一个 1/4 波片光轴夹角存在偏离、第二个 1/4 波片光轴夹角存在偏离和仅 EOM 光轴夹角存在偏离的情况, 结果如图 5 所示. 图 5 上面一栏图中绿色线为水平线偏振参考, 红色为出射光的偏振椭圆, 黑色为偏振椭圆的长轴. 图 5 下面一栏图中蓝色线为出射光的角度, 褐色线为偏振椭圆短轴与长轴的比值.

由于晶体 δ_{EOM} 设定为 10° , 理想情况下出射光应该为 5° , 与图 5 中器件偏离 0° 的情况保持一致. 从仿真计算结果可以看到, 对于图 5(a) 中的情况, 即当第一个 1/4 波片偏离的时候, 出射光偏离的方向与 1/4 波片偏离方向相反, 偏离的大小几乎等于第一个 1/4 波片偏离的角度, 并且出射光偏振度发生了下降. 当 1/4 波片偏离 -10° 时, 出射角为 15.59° , 偏离大小为 10.59° , b/a 为 0.17.

对于图 5(b) 中的情况, 即当第二个 1/4 波片偏离的时候, 出射光偏离的方向与 1/4 波片偏离方向相同, 偏离的大小几乎等于第二个 1/4 波片偏离的角度, 并且出射光偏振度发生了下降. 当第二个 1/4 波片偏离 -10° 时, 出射角为 -4.69° , 偏离大小为 9.69° , b/a 为 0.17.

对于图 5(c) 中的情况, 即当 EOM 光轴偏离的时候, 无论 EOM 偏离角度是正是负, 出射光都向负方向发生偏离, 出射光偏振度发生了下降. 当 EOM

偏离 -10° 时, 出射角为 4.70° , 偏离大小仅为 0.3° , b/a 为 0.0024. 与前面两种情况相比, 图 5(c) 出射光偏离的角度和偏振度的下降都大大减小.

在实际情况中, 偏振控制器中的 3 个器件光轴都有可能偏离, 而整个 f_0 调节实验装置用到了两套偏振控制器, 这让情况变得更加复杂. 为了使整个 f_0 调节实验装置对偏振的影响小, 即出射光与入射光的偏振方向尽量相同, 偏振度下降也尽量低, 因此保证前后两个 1/4 波片光轴相互垂直具有重要意义, 也就是仅 EOM 夹角发生偏离的情况, 即图 5(c) 中的情况. 在这种情况下偏振控制装置对偏振方向的控制比较准确, 偏振度的下降相对较小, 因此后续针对此情况特对 1/4 波片光轴进行校准.

3 f_0 调节装置的建立与腔外测试

3.1 1/4 波片光轴方向的校准

在实验上, 采用图 6 所示的方法将 1/4 波片光轴校准在水平或者竖直方向. 当 1/4 波片光轴在水平或者竖直方向时, 无论波片哪个面作为入射面, 经过波片的出射光的状态应保持不变. 设当 1/4 波片 A 面作为入射面时, 偏振测量仪的读数为 ξ_A , 当 1/4 波片 B 面作为入射面时, 偏振测量仪的读数为 ξ_B . 当 f_0 调节装置还没有安装到锁模激光器腔内

的时候,此时激光器应能够锁模,激光器输出激光通过 PBS 产生一个线偏光. 由于 PBS 无法保证严格水平,此时经过 PBS 的透射光偏振方向应接近水平,通过偏振测量仪 (Thorlabs PAX1000IR2/M) 测得此时偏振角为 ξ . 安装好 1/4 波片,记此时波片的入射面为 A 面,转动波片,使偏振测量仪读数 ξ_A 仍然为 ξ . 现在改变波片架的安装方向,这样入射面变成了 1/4 波片的另一个面了,记为 B 面,此时偏振测量仪读数为 ξ_B ,将波片转动一个小的角度,使偏振测量仪读数靠近 ξ_A ,记此时偏振测量仪读数为 ξ'_B . 然后让入射面变回 A 面,可以看到此时偏振测量仪读数 ξ'_A 也向 ξ'_B 靠近,继续将波片旋转一个小的角度,使偏振测量仪读数靠近 ξ'_B . 这样不断改变入射面,不断调整 1/4 波片光轴方向,直到无论哪个面作为入射面,偏振测量仪读数几乎不变,那么可以认为光轴校准已经完毕. 此校准方法的优点为: 由于平面的加工精度较高,改变波片架安装方向这一过程引入的误差较小,并且这种校准方法对 PBS 与偏振测量仪是否保持水平没有要求,对波片相位差没有严格要求,对其他相位差的波片也适用.

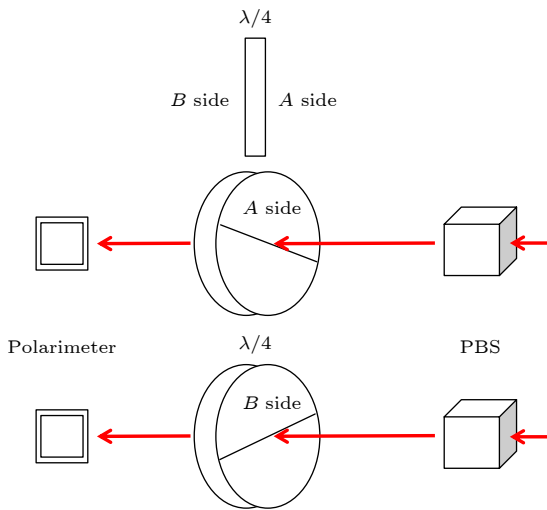


图 6 1/4 波片光轴校准示意图
Fig. 6. Schematic of QWP optical axis alignment.

采用上述方法对波片光轴方向进行校准,表 1 为单个波片校准数据,后续对 4 个波片联合测试,当线偏光经过 4 个波片后,偏振方向仅旋转了 0.1° .

3.2 偏振控制能力测试

对波片的光轴方向校准完毕之后建立 f_0 调节装置. 将 f_0 调节装置放入激光器腔内进行实验之

表 1 1/4 波片光轴校准数据
Table 1. Alignment data of the QWPs.

	1st QWP	2nd QWP	3th QWP	4th QWP
A side	2.23°	3.81°	3.75°	2.35°
B side	2.23°	3.79°	3.69°	2.42°

前,在腔外对装置偏振的控制能力进行测试,测试装置与图 6 相同,通过偏振测量仪读数的变化来测量 f_0 调节装置对偏振的影响. 为了保证两个 EOM 所加的电压大小一致,采用同一个高压驱动源分成两路,分别对两个 EOM 施加电压,这样两个 EOM 上的电压大小保持一致. 首先对单套偏振控制装置施加电压,测量出射光偏振的变化,如图 7 所示. 第二套偏振控制装置与第一套偏振控制装置相比, EOM 前后两个 1/4 波片发生了对调,因此在同样的电压下,第二套偏振控制装置对入射光偏振的旋转方向与第一套偏振控制装置相反. 然后对两套偏振控制装置同时施加一致的电压,由于两个套偏振控制装置对偏振的旋转方向相反,因此总体效果偏振方向在理论上保持不变. 但由于 EOM 光轴方向可能存在偏差,并且 EOM 存在个体差异导致实际在 150 V 电压下偏离了一个 0.06° . 在 150 V 电压下出射光偏离的角度为只对单套偏振控制装置施加同样电压时旋转角度的 1/20.

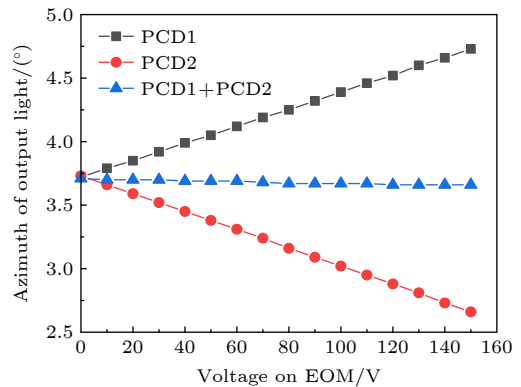


图 7 光经过偏振控制装置后的偏振方向偏离角
Fig. 7. Deviation angle of the light after passing through polarization control device.

4 电光晶体 M-Z 干涉仪 f_0 调节装置、抽运电流和 PZT 之间的比较

实验采用的振荡器为特殊设计的非线性偏振旋转 (nonlinear polarization rotation, NPR) 锁模方式的掺铒光纤飞秒激光器上,腔型为 σ 腔,如图 8 所示. 激光器重复频率为 131 MHz,输出功率为 35 mW.

f_0 调节装置被放置在两个 PBS 之间, 以进一步减小调节过程中偏振的变化带来的扰动.

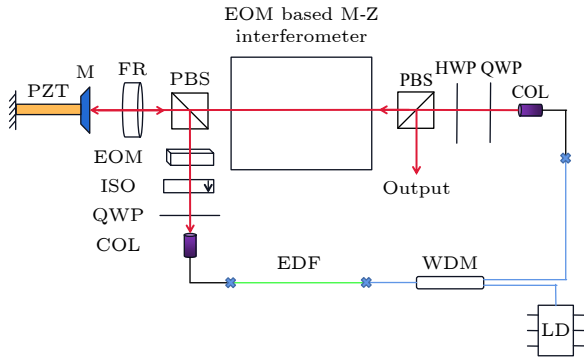


图 8 实验采用的锁模激光器结构图. LD, 抽运源; EDF, 掺铒增益光纤; WDM, 波分复用器; COL, 准直器; HWP, 1/2 波片; FR, 法拉第旋光器; ISO, 隔离器; M, 反射镜
Fig. 8. Diagram of the mode-locked laser: LD, pump laser; EDF, Er-doped fiber; WDM, 980 nm/1550 nm wavelength division multiplexing; COL, collimator; HWP, half wave plate; FR, Faraday rotator; ISO, optical isolator; M, reflective mirror.

首先对加入 f_0 调节装置前后的光谱对比, 如图 9 所示. 可以看出, 加入 f_0 调节装置前后激光器锁模光谱几乎不变, 光谱峰值在 1562 nm. 这说明 f_0 调节装置对激光器运行状态影响较小, 可以忽略 f_0 调节装置引入的色散和损耗.

通过抽运电流控制 f_0 是目前使用比较常用的方法, 而基于电光晶体 M-Z 干涉仪的 f_0 调节方法在理论上对拍频信号 f_b 的影响较小, 为了比较两者对拍频信号影响的大小, 首先将激光器输出通过放大、扩谱和 $f/2f$ 干涉仪提取到了 35 dB 的 f_0 信号. 通过优化放大器抽运功率, 扩谱光纤长度, 输入激光脉冲宽度、偏振方向等参数, f_0 信噪比可以进一步提升到 40 dB [28]. 根据现有条件, 采用线宽为 1 Hz 的 1542 nm 窄线宽激光 (SLS-INT-1542-300-1, SLS) 与激光器输出激光进行拍频, 得到了 40 dB 的拍频

信号 f_b . 该窄线宽激光的频率漂移量为 0.05 Hz/s. 为了评估电光晶体 M-Z 干涉仪的 f_0 调节方法对 f_0 调节效果, 在晶体上施加了一个频率为 20 Hz, 峰峰值为 ± 200 V 的正弦调制信号. 选择 20 Hz 调制频率是因为窄线宽激光器和飞秒激光器的频率漂移量引起拍频信号漂移较快, 而电光晶体 M-Z 干涉仪的 f_0 调节装置对拍频影响较小, 调制频率太低会导致装置对 f_b 的影响淹没在拍频信号的漂移中. 利用计数器记录 f_0 , f_b 信号及 f_r 的变化, 如图 10 所示. 从图中可以看出 f_0 变化量为 9 MHz 时, f_b 变化量为 0.2 MHz、 f_r 变化量为 6 Hz. 为了与抽运电流对比, 在抽运电流上同样施加一个正弦调制信号, 在保持 f_0 变化量也为 9 MHz 的情况下, 测量 f_b 信号和 f_r 信号的变化. 由于实验采用的抽运电流调制端口反馈带宽较低, 对抽运电流采用的调制频率为 0.2 Hz, 结果如图 11 所示. 抽运电流在同样的 f_0 调节量下对 f_b 的影响约为 7 MHz, 对 f_r 的影响为 12 Hz. 由此看出电光晶体 M-Z 干涉仪 f_0 调节装置对 f_b 的影响仅为抽运电流对 f_b 影响的 1/35.

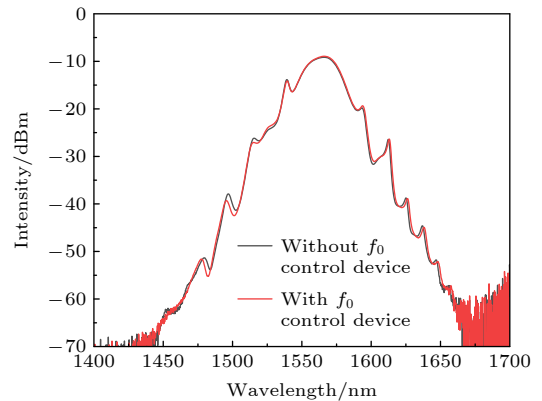


图 9 有无 f_0 调节装置光谱对比

Fig. 9. Comparison of the spectrum with and without f_0 control device.

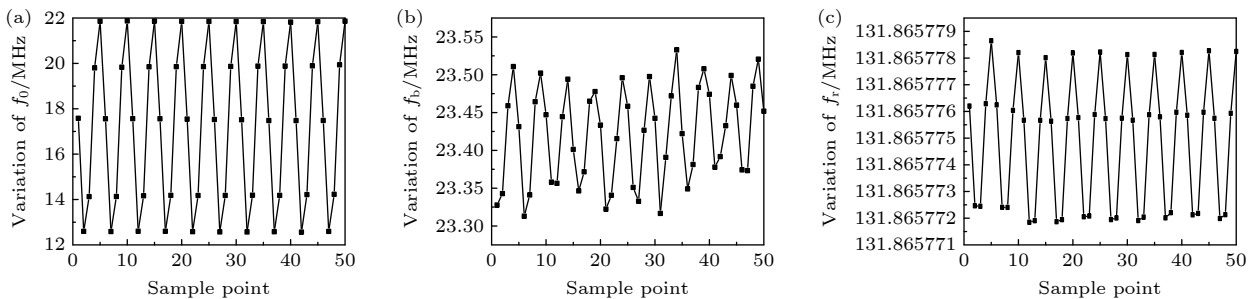


图 10 电光晶体 M-Z 干涉仪 f_0 调节装置对 f_0 、 f_b 和 f_r 频率影响 (a) f_0 ; (b) f_b ; (c) f_r

Fig. 10. Influence of the EOM based M-Z interferometer on f_0 , f_b and f_r : (a) f_0 ; (b) f_b ; (c) f_r .

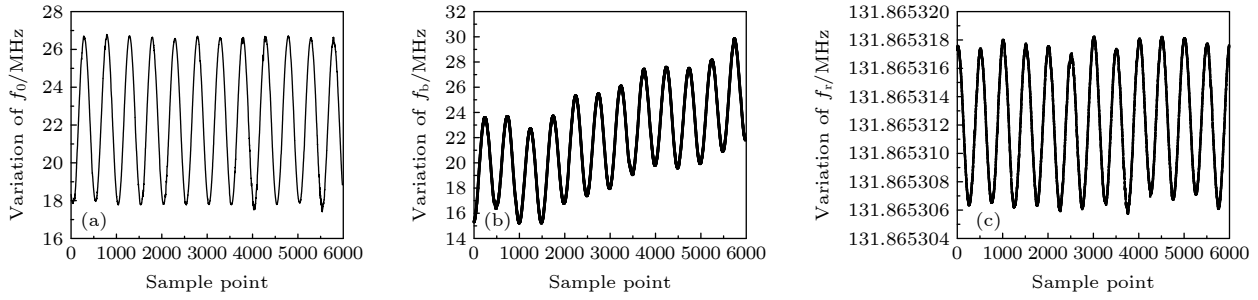


图 11 抽运电流对 f_0 、 f_b 和 f_r 频率影响 (a) f_0 ; (b) f_b ; (c) f_r

Fig. 11. Influence of the pump current on f_0 , f_b and f_r : (a) f_0 ; (b) f_b ; (c) f_r .

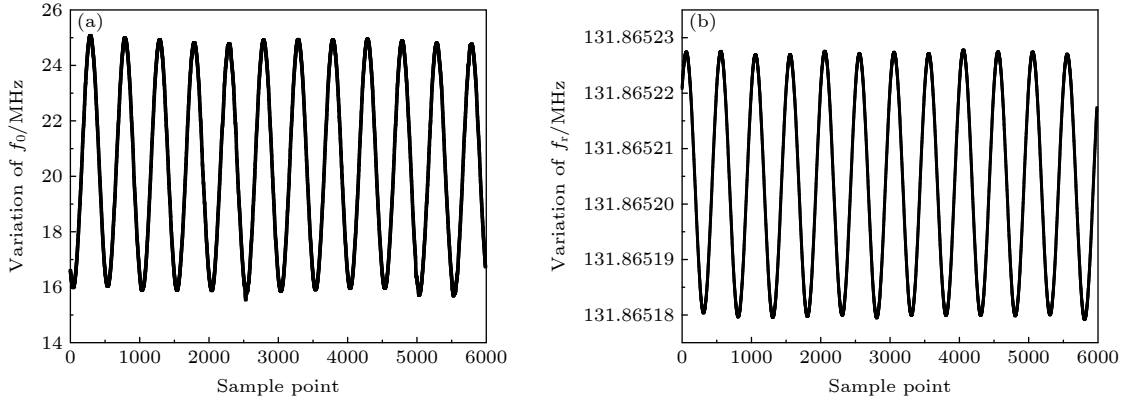


图 12 PZT 对 f_0 和 f_r 频率影响 (a) f_0 ; (b) f_r

Fig. 12. Influence of PZT on f_0 and f_r : (a) f_0 ; (b) f_r .

实验同样测试了通过 PZT 反馈控制 f_r 时, 对 f_0 和 f_b 的影响, 如图 12 所示. 从图 12 可以看出, 当对 f_0 的影响样变化 9 MHz 时, f_r 的变化需要达到 45 Hz. PZT 在控制腔长的过程中, 也会对 f_0 信号产生影响, 即 f_r 锁定环路很难在真正意义上与 f_0 锁定环路没有干扰. 在 f_0 同样变化 9 MHz 的情况下, f_b 变化量已经非常靠近 $f_r/2$, 相邻的两根梳齿的拍频信号会靠的非常近, 导致无法有效滤出 f_b 信号, 此时对 PZT 控制采用 200 mHz 的调制信号, 通过频谱仪直接观察得到 f_b 变化量为 60 MHz. 与电光晶体 M-Z 干涉仪 f_0 调节装置和抽运电流相比, PZT 对 f_r 锁定的影响量更大, 更适合用于 f_r 的锁定.

综上所述, 电光晶体 M-Z 干涉仪的 f_0 调节方法对拍频信号 f_b 影响较小, 在利用拍频信号锁定 f_r 方面具有优势, 而利用拍频信号锁定光梳正是窄线宽光梳实现的重要途径.

5 结 论

基于电光晶体 M-Z 干涉仪的 f_0 调节方法是一种新颖的 f_0 调节方法, 与传统通过抽运电流来控

制 f_0 相比有着本质的区别, 有望实现更高的伺服带宽并且调节过程中脉冲的载波频率保持不变. 本文对此方法进行了介绍, 利用琼斯矩阵进行了仿真分析, 并借助仿真结果对偏振控制装置进行了搭建和测试. 后续搭建完整的基于电光晶体的 M-Z 干涉仪的 f_0 调节装置, 在 ± 200 V 调制信号下测试得到装置对 f_0 的调节量为 9 MHz, 对振荡器输出与 1542 nm 拍频的影响为 0.2 MHz. 通过改变抽运电流让 f_0 改变量同样为 9 MHz 时, 拍频信号的变化为 7 MHz. 在对拍频信号的影响方面, 抽运电流为电光晶体 M-Z 干涉仪的 f_0 调节方法的实验装置的 35 倍. 当借助拍频锁定 f_r 时, 基于电光晶体 M-Z 干涉仪的 f_0 调节方法对 f_r 锁定环路的串扰大大减小.

后续的工作包括对实验装置进行优化, 比如选择更加合适的 EOM, 让两套偏振控制装置的偏振控制效果尽量相同, 同时让装置的需要控制电压更低, 对 f_0 调节量更大. 同时对激光器运行状态进行优化, 减小激光器自由运转时本身的噪声, 以实现同时对振荡器 f_0 与 f_r 信号同时进行快速的伺服锁定, 最终达到对光梳线宽压窄的效果.

参考文献

- [1] Udem T, Reichert J, Holzwarth R, Hänsch T W 1999 *Phys. Rev. Lett.* **82** 3568
- [2] Jones D J, Diddams S A, Ranka J K, Stentz A, Windeler R S, Hall J L, Cundiff S T 2000 *Science* **288** 635
- [3] Diddams S A, Jones D J, Ye J, Cundiff S T, Hall J L, Ranka J K, Windeler R S, Holzwarth R, Udem T, Hänsch T W 2000 *Phys. Rev. Lett.* **84** 5102
- [4] Udem T, Reichert J, Holzwarth R, Hänsch T W 1999 *Opt. Lett.* **24** 881
- [5] Hachisu H, Petit G, Nakagawa F, Hanado Y, Ido T 2017 *Opt. Express* **25** 8511
- [6] Schliesser A, Brehm M, Keilmann F, van der Weide D 2005 *Opt. Express* **13** 9029
- [7] Millo J, Boudot R, Lours M, Bourgeois P Y, Luiten A N, Coq Y Le, Kersalé Y, Santarelli G 2009 *Opt. Lett.* **34** 3707
- [8] Coddington I, Swann W C, Nenadovic L, Newbury N R 2009 *Nat. Photonics* **3** 351
- [9] Bothwell T, Kedar D, Oelker E, Robinson J M, Bromley S L, Tew W L, Ye J, Kennedy C J 2019 *Metrologia* **56** 065004
- [10] Brewer S M, Chen J S, Hankin A M, Clements E R, Chou C W, Wineland D J, Hume D B, Leibbrandt D R 2019 *Phys. Rev. Lett.* **123** 033201
- [11] Yamanaka K, Ohmae N, Ushijima I, Takamoto M, Katori H 2015 *Phys. Rev. Lett.* **114** 230801
- [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] Coddington I, Swann W C, Newbury N R 2008 *Phys. Rev. Lett.* **100** 013902
- [14] Lee C C, Mohr C, Bethge J, Suzuki S, Fermann M E, Hartl I, Schibli T R 2012 *Opt. Lett.* **37** 3084
- [15] McFerran J J, Swann W C, Washburn B R, Newbury N R 2006 *Opt. Lett.* **31** 1997
- [16] Corwin K L, Newbury N R, Dudley J M, Coen S, Diddams S A, Weber K, Windeler R S 2003 *Phys. Rev. Lett.* **90** 113904
- [17] Hudson D D, Holman K W, Jones R J, Cundiff S T, Ye J, Jones D J 2005 *Opt. Lett.* **30** 2948
- [18] Iwakuni K, Inaba H, Nakajima Y, Kobayashi T, Hosaka K, Onae A, Hong F L 2012 *Opt. Express* **20** 13769
- [19] Nakamura T, Tani S, Ito I, Kobayashi Y 2017 *Opt. Express* **25** 4994
- [20] Hundertmark H, Wandt D, Fallnich C, Haverkamp N, Telle H 2004 *Opt. Express* **12** 770
- [21] Koke S, Grebing C, Frei H, Anderson A, Assion A, Steinmeyer G 2010 *Nat. Photonics* **4** 462
- [22] Newbury N R, Washburn B R 2005 *IEEE J. Quantum Electron.* **41** 1388
- [23] Hänsel W, Giunta M, Lezius M, Fischer M, Holzwarth R 2017 Conference on Lasers and Electro-Optics San Jose, United States, May 14-19, 2017 pSF1C.5
- [24] 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
- [25] Wang H B, Han H N, Zhang Z Y, Shao X D, Zhu J F, Wei Z Y 2020 *Chin. Phys. B* **29** 030601
- [26] Ma Y X, Meng F, Wang Y, Wang A M, Zhang Z G 2019 *Chin. Opt. Lett.* **17** 041402
- [27] Cao S Y, Lin B K, Yuan X D, Ding Y J, Meng F, Fang Z J 2021 *Acta Phys. Sin.* **70** 074203 (in Chinese) [曹士英, 林百科, 袁小迪, 丁永今, 孟飞, 方占军 2021 物理学报 **70** 074203]
- [28] Cao S Y, Meng F, Fang Z J, Li T C 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 064208 (in Chinese) [曹士英, 孟飞, 方占军, 李天初 2012 物理学报 **61** 064208]

Method of adjusting carrier-envelope offset frequency based on electro-optic-crystal Mach-Zehnder interferometer*

Ding Yong-Jin Cao Shi-Ying[†] Lin Bai-Ke
Wang Qiang Han Yi Fang Zhan-Jun

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

(Received 21 January 2022; revised manuscript received 22 March 2022)

Abstract

Electro-optic-modulator (EOM) based Mach-Zehnder (M-Z) interferometer is a novel method of controlling the carrier envelope offset frequency (f_0). It is achieved by adjusting the envelop of the pulse, while keeping the carrier frequency unchanged. In this paper, the polarization control device involved in this method is simulated, and the influences caused by the deviation of the optical axis of the wave plate on the polarization direction and the degree of output laser are analyzed. An optical axis calibration method is proposed to reduce the influence caused by the deviation of optical axis of wave plate. The effects of pump current and EOM based M-Z interferometer on f_0 and the beat note (f_b) between the comb and the laser are compared with each other. The experimental results show that the effect of changing the pump current on f_b is 7 MHz, when the f_0 adjustment quantity is 9 MHz. Under the same f_0 adjustment quantity, the influence of EOM based M-Z interferometer on f_b is 0.2 MHz, which is only 1/35 of the influence of pump current. Therefore, it is verified that EOM based M-Z interferometer can effectively reduce the interference to f_b . It provides a technical means to narrow the line width of optical comb by using f_b to lock repetition rate (f_r).

Keywords: Mach-Zehnder interferometer, offset frequency, narrow linewidth, optical frequency comb

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

DOI: [10.7498/aps.71.20220147](https://doi.org/10.7498/aps.71.20220147)

* Project supported by the National Key Research and Development Program of China (Grant No. 2016YFF0200204).

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