



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 112424562 A

(43) 申请公布日 2021.02.26

(21) 申请号 201980047263.9

(22) 申请日 2019.05.17

(30) 优先权数据

62/673,181 2018.05.18 US

(85) PCT国际申请进入国家阶段日

2021.01.14

(86) PCT国际申请的申请数据

PCT/US2019/032847 2019.05.17

(87) PCT国际申请的公布数据

W02019/222614 EN 2019.11.21

(71) 申请人 密歇根大学董事会

地址 美国密歇根州

(72) 发明人 史蒂文·T·坎迪夫

克里斯·斯莫尔伍德

埃里克·马丁

(74) 专利代理机构 北京集佳知识产权代理有限公司 11227

代理人 陈炜 李德山

(51) Int.Cl.

G01B 9/02 (2006.01)

G01J 9/02 (2006.01)

G01J 3/45 (2006.01)

G01N 21/45 (2006.01)

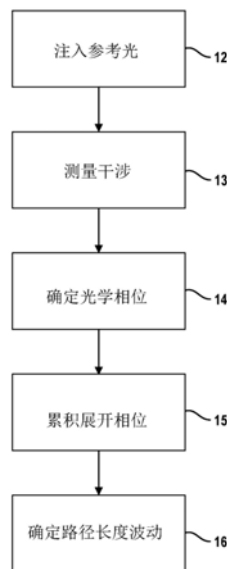
权利要求书2页 说明书5页 附图5页

(54) 发明名称

用于频率调制干涉仪的路径波动监测

(57) 摘要

提出了使用相对于测量光具有任意频率的参考激光器来确定干涉仪中的路径长度波动的方法。该方法包括：沿干涉仪的信号路径注入参考光；测量干涉仪的输出处的参考光之间的干涉；通过测量参考光之间的干涉的强度调制并且从所测量的强度调制中减去预期的频率调制来确定干涉仪的两个信号路径中的参考光之间的光学相位差；累积干涉仪的两个信号路径中的参考光之间的展开相位差，其中，展开相位差是相对于参考定义的；以及使用展开相位差确定干涉仪中的光的路径长度波动。



1. 一种用于确定干涉仪中的路径长度波动的方法,其中,所述干涉仪的一个臂相对于所述干涉仪的另一个臂被频率调制,所述方法包括:

通过参考激光器沿所述干涉仪的信号路径注入参考光;

通过检测器测量所述干涉仪的输出处的参考光之间的干涉;

由信号处理器通过测量所述参考光之间的干涉的强度调制并且从所测量的强度调制中减去预期的频率调制来确定所述干涉仪的两个信号路径中的参考光之间的光学相位差;

由所述信号处理器累积所述干涉仪的两个信号路径中的参考光之间的展开相位差,其中,所述展开相位差是相对于参考定义的;以及

通过所述信号处理器使用所述展开相位差确定所述干涉仪中的光的路径长度波动。

2. 根据权利要求1所述的方法,还包括:注入具有单一频率的参考光。

3. 根据权利要求1所述的方法,还包括:以超过声学噪声的采样率测量干涉。

4. 根据权利要求1所述的方法,还包括:以超过路径长度变化的速度除以所述参考光的波长的结果的两倍的采样率来测量干涉。

5. 根据权利要求1所述的方法,其中,累积展开相位差包括:

检测所述光学相位差的符号变化;

响应于检测到所述光学相位差的符号从正值变为负值而使计数器递增1;以及

响应于检测到所述光学相位差的符号从负值变为正值而使所述计数器递减1。

6. 根据权利要求1所述的方法,还包括:使用现场可编程门阵列来累积所述展开相位差。

7. 根据权利要求1所述的方法,还包括:通过将所述展开相位差乘以所述参考光的波长并将乘积除以 2π 来确定路径长度波动。

8. 一种光谱系统,包括:

干涉仪,所述干涉仪在两个光学路径中的一个中具有频率调制器;

参考激光源,所述参考激光源被配置成沿所述干涉仪的两个光学路径注入参考光;

检测器,所述检测器被配置成测量所述干涉仪的输出处的参考光之间的干涉;

信号处理器,所述信号处理器与所述检测器接口连接,所述信号处理器部分地基于所测量的干涉来确定所述干涉仪的两个光学路径中的参考光之间的光学相位差,并且累积所述干涉仪的两个光学路径中的参考光之间的展开相位差。

9. 根据权利要求8所述的光谱系统,其中,所述信号处理器通过测量所述参考光之间的干涉的强度调制并且从所测量的强度调制中减去预期的频率调制,来确定所述干涉仪的两个信号路径中的参考光之间的光学相位差。

10. 根据权利要求8所述的光谱系统,其中,所述信号处理器使用所述展开相位差来确定所述干涉仪中的光的路径长度波动。

11. 根据权利要求8所述的光谱系统,其中,所述检测器以超过声学噪声的采样率来测量干涉。

12. 根据权利要求8所述的光谱系统,其中,所述检测器以超过路径长度变化的速度除以所述参考光的波长的结果的两倍的采样率来测量干涉。

13. 根据权利要求8所述的光谱系统,其中,所述信号处理器通过以下操作来累积展开相位差:

检测所述光学相位差的符号变化；

响应于检测到所述光学相位差的符号从正值变为负值而使计数器递增1；以及

响应于检测到所述光学相位差的符号从负值变为正值而使所述计数器递减1。

14. 根据权利要求8所述的光谱系统,其中,所述信号处理器是现场可编程门阵列。

用于频率调制干涉仪的路径波动监测

[0001] 相关申请的交叉引用

[0002] 本申请要求于2018年5月18日提交的美国临时申请第62/673,181号的优先权。以上申请的全部公开内容通过引用并入本文中。

技术领域

[0003] 本公开内容涉及用于频率调制干涉仪的路径波动监测或者等同地用于频移干涉仪的路径波动监测。

背景技术

[0004] 多维相干光谱的共线实施方式包括两个干涉仪,两个干涉仪中的每个干涉仪将光的输入脉冲分成一对脉冲。这些脉冲中的每个脉冲都使用声光调制器(AOM)来进行频率标记,使得可以识别用于感兴趣的任何特定脉冲序列的四波混频信号。

[0005] 通过考虑仅用于生成一对几乎相同的脉冲并且在脉冲之间具有一定延迟的单个干涉仪,可以简化用于使以上装置商业化所需的新技术。该脉冲对将被传递到强度检测器。至少一个臂中的频率标记部件(如AOM)将导致干扰项,该干扰项使检测器处的强度被以两臂之间的频率差地调制。该干扰信号称为拍频(beat note)。通过用两臂之间的频率差来解调强度检测器上的信号,可以测量干扰的相位和幅度。

[0006] 干涉仪的一个臂的路径长度可以相对于另一个臂扫描。记录作为相对路径长度的函数的信号幅度和相位是两个场的互相关。为了使每个数据点的相位测量有意义,路径波动必须小或者被测量,并且路径波动被主动校正或被电子地减去。该互相关测量的傅里叶变换给出了两个脉冲谱的乘积。

[0007] 为了使这样的干涉仪正常工作,有必要知道两臂之间的确切频率调制差和路径长度差。名义上,频率差是应用于AOM的频率(或者是如果使用两臂时每个臂中的两个AOM之间的差)。然而,由于光束的多普勒频移,当反射镜移动或波动时,频率差具有额外的依赖性。路径长度差也取决于这些波动。因此,用第二激光器来测量干涉仪的路径长度差。

[0008] 历史上,针对光谱用额外的激光器测量干涉仪并不罕见。存在许多使用远失谐激光器来确定傅里叶变换红外(FTIR)光谱中的路径长度分离的示例。然而,这些应用没有在干涉仪的一个或两个臂中使用频率调制部件。对于FTIR,使用具有633nm波长的氦-氖(He-Ne)激光器作为用于对具有2000nm至20000nm之间的频率的光进行光谱解析的参考是标准的。在这种情况下,不必解调信号,只需要使用参考激光器干涉的零交点来识别由该波长(在这些情况下通常为633nm)隔开的点。对于具有与信号类似的波长或者比信号长得多的波长的参考激光器,无法利用零交点对信号进行充分地采样。

[0009] 最近,已经将AOM引入干涉仪以用于光束选择和改进的噪声消除。对于频率调制,为FTIR开发的路径长度测量的标准技术并不适用。相反,这些方法依赖于具有非常接近被测量的光的频率的参考频率。通过将参考光谱保持接近被测量的光,具有路径长度波动的相位演变非常小。这意味着解调干涉仪对路径长度波动非常不敏感。

[0010] 该部分提供了与本公开内容相关的背景技术信息,该背景技术信息不一定是现有技术。

发明内容

[0011] 该部分提供了本公开内容的总体概述,并且不是其全部范围或全部特征的全面公开。

[0012] 提出了一种用于确定干涉仪中的路径长度波动的方法,其中,干涉仪的一个臂相对于干涉仪的另一个臂被频率调制。该方法包括:通过参考激光器沿干涉仪的信号路径注入参考光;通过检测器测量干涉仪的输出处的参考光之间的干涉;由信号处理器通过测量参考光之间的干涉的强度调制并且从所测量的强度调制中减去预期的频率调制来确定干涉仪的两个信号路径中的参考光之间的光学相位差;由信号处理器累积干涉仪的两个信号路径中的参考光之间的展开相位差,其中,展开相位差是相对于参考来定义的;以及通过信号处理器使用展开相位差确定干涉仪中的光的路径长度波动。

[0013] 在一个示例中,以超过声学噪声的采样率来测量干涉。在另一示例中,以超过路径长度变化的速度除以参考光的波长的结果的两倍的采样率来测量干涉。

[0014] 在一个实施方式中,累积展开相位差包括检测光学相位差的符号变化;响应于检测到光学相位差的符号从正值变为负值使计数器递增1;以及响应于检测到光学相位差的符号从负值变为正值使计数器递减1。

[0015] 在一个实施方式中,通过将展开相位差乘以参考光的波长并将乘积除以 2π 来确定路径长度波动。

[0016] 在另一方面,光谱系统实现用于监测路径波动的技术。该系统包括:干涉仪,该干涉仪在两个光学路径中的一个中具有频率调制器;参考激光源,该参考激光源被配置成沿干涉仪的两个光学路径注入参考光;检测器,该检测器被配置成测量干涉仪的输出处的参考光之间的干涉;以及信号处理器,该信号处理器与检测器接口。信号处理器部分地基于所测量的干涉来确定干涉仪的两个光学路径中的参考光之间的光学相位差,并且累积干涉仪的两个光学路径中的参考光之间的展开相位差。

[0017] 更具体地,信号处理器通过测量参考光之间的干涉的强度调制并且从所测量的强度调制中减去预期的频率调制来确定干涉仪的两个信号路径中的参考光之间的光学相位差。检测器以超过声学噪声的采样率或者以超过路径长度变化的速度除以参考光的波长的结果的两倍的采样率来测量干涉。

[0018] 在一个实施方式中,信号处理器是现场可编程门阵列。

[0019] 根据本文提供的描述,另外的适用领域将变得明显。本发明内容中的描述和具体示例仅旨在用于说明的目的并且不旨在限制本公开内容的范围。

附图说明

[0020] 本文中描述的附图仅用于所选择的实施方式而非所有可能的实现方式的说明目的,并且不旨在限制本公开内容的范围。

[0021] 图1是描绘用于监测频率调制干涉仪中的路径长度波动的方法的流程图;

[0022] 图2A是示出对于干涉仪中的各种光的波长,作为时间的函数的相对相位波动的曲

线图；

[0023] 图2B是示出如果参考波长不等于测量信号的波长，则信号的测量相位将是错误的曲线图；

[0024] 图3A是示出信号的包裹相位 (wrapped phase) 的曲线图；

[0025] 图3B是示出信号的展开相位 (unwrapped phase) 的曲线图；

[0026] 图4是描绘示例频率调制干涉仪的图；

[0027] 图5是示出在频率调制干涉仪的示例实施方式中的测量的延迟与标称延迟的偏差的曲线图；以及

[0028] 图6是示出在频率调制干涉仪的示例实施方式中计算用于解调信号的任意参考的能力的曲线图。

[0029] 在附图的若干视图中，对应的附图标记指示对应的部分。

具体实施方式

[0030] 现在将参照附图更全面地描述示例实施方式。

[0031] 图1示出了用于监测频率调制干涉仪中的路径长度波动的方法。也就是说，干涉仪的一个臂相对于干涉仪的另一个臂被频率调制。在本公开内容的上下文中，频率调制干涉仪被理解为包括频移干涉仪的特定情况。

[0032] 为了测量具有相位灵敏度的光信号，需要利用激光器参考来采样路径长度波动。因此，在12处，参考光通过参考激光器沿干涉仪的信号路径被注入。如下文进一步描述，不是改变参考光的频率，而是对相对于测量光的频率具有任意频率的参考激光器，保持路径长度差的记录。

[0033] 下面的表1示出了如果此处公开的方法不用于确定校正的相位，而是直接使用测量的参考相位来校正信号相位波动，则失谐的参考如何影响测量信号。

	$\lambda_{ref}(\text{nm})$	$\delta\varphi_{sig} - \delta\varphi_{ref} (\text{rad})$	δA (统一归一化)
[0034]	800	0	0
	810	0.048	0.001
	1064	0.974	0.438

[0035] 为了说明的目的，测量信号具有800nm的波长，并且测量时间内的路径长度波动是 $\delta x = 500\text{nm}$ 。表的第二列 $\delta\varphi_{sig} - \delta\varphi_{ref}$ 指示参考波动消除信号波动的程度。这些相位波动使测量信号的幅度通过因子 $1 - \delta A = \cos(\delta\varphi_{sig} - \delta\varphi_{ref})$ 被降低。具有与测量信号相同波长的参考可以消除波动。波长为810nm的略微失谐的参考将几乎消除参考的所有相位波动，并且对测量幅度的影响可以忽略不计。然而，波长为1064nm的非常失谐的参考将不佳地校正相位波动并且将低估信号40%以上。

[0036] 在图2A中，针对相同的模拟路径长度随时间的波动绘制了干涉仪的两个臂之间的相位波动。这些波动是针对波长为800nm、810nm和1064nm的光绘制的。在图2B中，这些曲线之间的差异示出了在几秒钟之后相位测量可能是多么不正确。这意味着对于810nm处的参

考,消除800nm信号的波动,将总是测量接近正确的相位。对于1064nm处的参考,相位可能容易被不正确地测量超过 π (这对应于测量具有与其应当具有的符号完全相反的符号的信号)。因此,明显地,不能使用远失谐参考和标准相位消除方案进行相位解析光谱分析。相位差变化不应超过0.15rad,否则数据可能被曲解(使用该规则,可以将远失谐定义为大于30nm,或者以能量单位的60meV。相反,需要考虑波长差并且用参考波长缩放相位波动。

[0037] 返回图1,在干涉仪的输出处,例如通过检测器,在13测量参考光之间的干涉。以超过系统的声学噪声的采样率来测量干涉。在一个实施方式中,以超过路径长度变化的速度除以参考光的波长的结果的两倍的采样率来测量干涉。

[0038] 然后在14处部分地基于所测量的干涉来确定干涉仪的两个信号路径中的参考光之间的光学相位差。在示例实施方式中,通过测量参考光之间的干涉的强度调制并且从所测量的强度调制中减去预期的频率调制来确定光学相位差。

[0039] 可以自然地认为将相位差与参考波长和测量信号波长的比率相乘会产生路径长度波动。问题是只能测量在 2π 范围内的相位,在 2π 点处相位包裹。在图3A中,绘制了干涉仪的两个臂之间的测量的相对相位,其中一个臂相对于另一个臂有意地延迟。在图中,可以看到相位随扫描延迟而演变,并且对于不同的波长,相位演变不同。由于相位包裹,没有校正相位而不累积和/或记录延迟与零延迟之间的相位包裹的数量的简单方式。

[0040] 因此,在15处,通过信号处理器来累积干涉仪的两个信号路径中的参考光之间的展开相位差。在示例实施方式中,例如,使用现场可编程门阵列来维持用于相位包裹的数量的计数器。每个相位包裹由光学相位差的符号的变化来检测。响应于检测到光学相位差的符号从正值变为负值,计数器递增1。响应于检测到光学相位差的符号从负值变为正值,计数器递减1。本公开内容考虑了用于跟踪和/或累积相位包裹的数量的其他技术。

[0041] 在16处,可以使用展开相位差来确定干涉仪中的光的路径长度波动。更具体地,通过将展开相位差乘以参考光的波长并将乘积除以 2π 来计算路径长度波动,其中,在给定时间点的展开相位差是根据测量的干涉与在该给定时间点由计数器值指示的相位的总和而确定的相位差。将任何优化波长的该计算相位应用于调制频率,使得可以测量调制信号。

[0042] 替选实施方式可以使用自适应采样。这是可以由FPGA执行的以便同样消除路径长度波动的不同计算。对于这种方法,不是消除信号的相位,而是信号的采样率随着路径长度波动而改变。因此,每当参考相位递增有限量时对信号进行采样。例如,不是每1微秒采样(对应于1M采样/秒采样时钟周期),而是在相位演变0.001度时(对应于1064nm参考激光器的约为1nm的路径长度差演变)信号被采样。自适应采样将通过以下来实现(1)将FPGA时钟锁定到参考信号或(2)跟踪路径长度差并且周期性地采样。如果(1)FPGA时钟被锁定到参考信号,则重要的是延迟级比路径长度波动移动得快,使得行进方向在任何时间都不模糊。因此,该方法受到限制。如果(2)使用路径长度跟踪,则使用0036段至0038段中描述的方法来确定路径长度。通过使用自适应采样,路径长度波动不再对相位噪声有贡献,因为干涉仪信号作为路径长度延迟的函数而演变。如果使用自适应采样来代替使用任意参考的解调,则不应当使用信号的平均,因为信号将非常快速地演变,原因在0045段中描述。因此,这些类型的解决方案将需要比优选实施方式更大的数据集。

[0043] 图4描绘了示例频率调制干涉仪40。在操作期间,测量光束41穿过干涉仪40的两个光路。频率调制器44设置在其中一个光路中,并且用于对测量光束进行频率标记。在一个实

施方式中,尽管本公开内容考虑了其他类型的调制器,频率调制器44是声光调制器。容易理解的是,可以使用诸如分束器的常规光学部件来分离和/或组合穿过两个光路的光。光检测器47用于测量干涉仪输出处的测量光束。光检测器47又与信号处理器46接口。

[0044] 为了测量路径波动,通过参考激光器43沿干涉仪的信号路径注入参考光。参考光优选为连续波。在穿过两个光路之后,参考光被重新组合并且被引导到第二光检测器45。第二光检测器也与信号处理器46接口。基于由第二光检测器45测量的参考光,信号处理器46以上述方式操作以确定干涉仪中的路径长度波动。

[0045] 在示例性实施方式中,信号处理器46被实现为微控制器。在其他实施方式中,信号处理器46可以是或可以包括数字信号处理器(DSP)、微处理器、微控制器或利用实现上述方法的软件编程的其他可编程设备中的任何一个。应当理解的是,替代地,信号处理器是其他逻辑器件或者包括其他逻辑器件,例如,现场可编程门阵列(FPGA)、复杂可编程逻辑器件(CPLD)或专用集成电路(ASIC)。当陈述信号处理器46执行功能或被配置成执行功能时,应当理解的是,信号处理器46被配置成利用适当的逻辑(例如,以软件、逻辑器件或其组合)来执行功能。应当理解的是,已经关于图4讨论了最相关的部件,但是可以需要其他光学部件来实现该系统。

[0046] 作为概念证明,证明了上述示例实施方式的能力。图5示出了频移干涉仪中的测量延迟与标称延迟的偏差。以恒定速度移动光学延迟级以便以100微米/秒的速率来增加标称延迟。干涉仪是用波长等于1064nm的参考激光器来测量的。实际相位演变的测量表明了延迟偏离。如上所述,计算其他参考信号的能力取决于该相位测量的精度。

[0047] 图6示出了示例实施方式的计算用于在频移干涉仪中解调信号的任意参考的能力。该图包含三个曲线,每个曲线表示在干涉仪中分离的脉冲对之间的互相关的实部,在干涉仪中,干涉仪的一个臂穿过色散介质。脉冲具有60nm的带宽和760nm的中心波长。实际参考激光器的波长为1064nm,并且该激光器穿过干涉仪的每个臂的干涉用于生成电参考。电参考调制由干涉仪的频移和路径长度波动两者引起。如果在没有处理的情况下使用电参考信号来解调信号,则测量到顶部的曲线(标记为1064nm)。因为信号具有与参考非常不同的频率,所以当级移动时,信号非常快速地调制。用于该检测示例的解调参数使信号幅度降低。使用FPGA实时地计算使用波长为800nm的参考激光器生成的有效电参考。由于信号波长更靠近计算参考,并且频率差更小,所以测量幅度更精确。如果将计算的参考设置在与信号激光器相同的波长,则信号变化最慢,并且信号幅度最大。使用相同的实际为1064nm的参考激光器测量这些曲线中的每个曲线,但是使用路径长度测量计算不同的参考。

[0048] 出于说明和描述的目的,已经提供了实施方式的上述描述。这不旨在穷举或限制本公开内容。特定实施方式的各个元件或特征通常不限于该特定实施方式,而是在适用的情况下是可互换的并且可以用于所选择的实施方式中,即使没有具体示出或描述也是如此。特定实施方式的各个元件或特征还可以以许多方式变化。这样的变型不被视为脱离本公开内容,并且所有这样的修改旨在被包括在本公开内容的范围内。

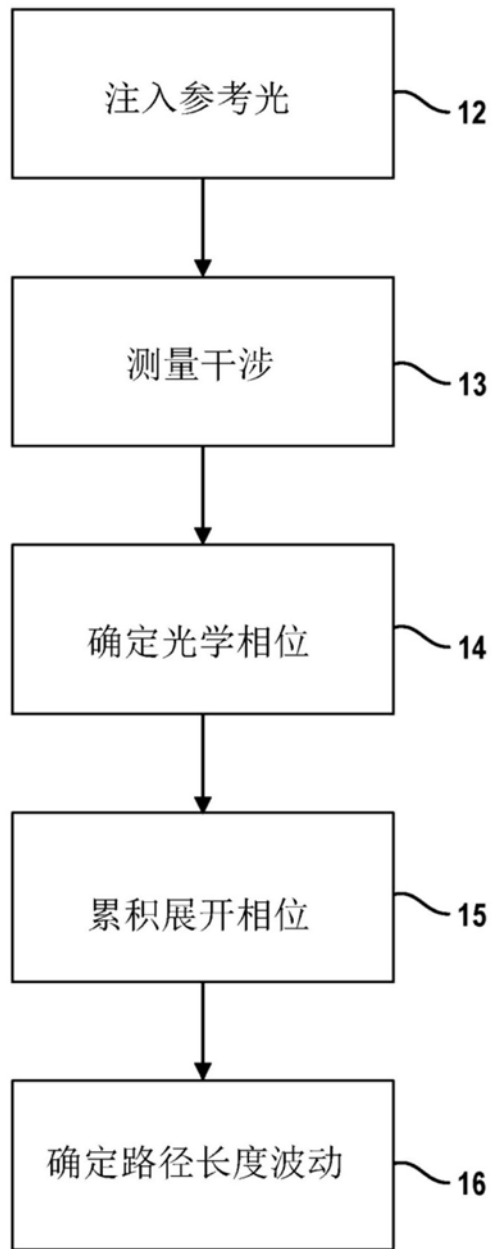


图1

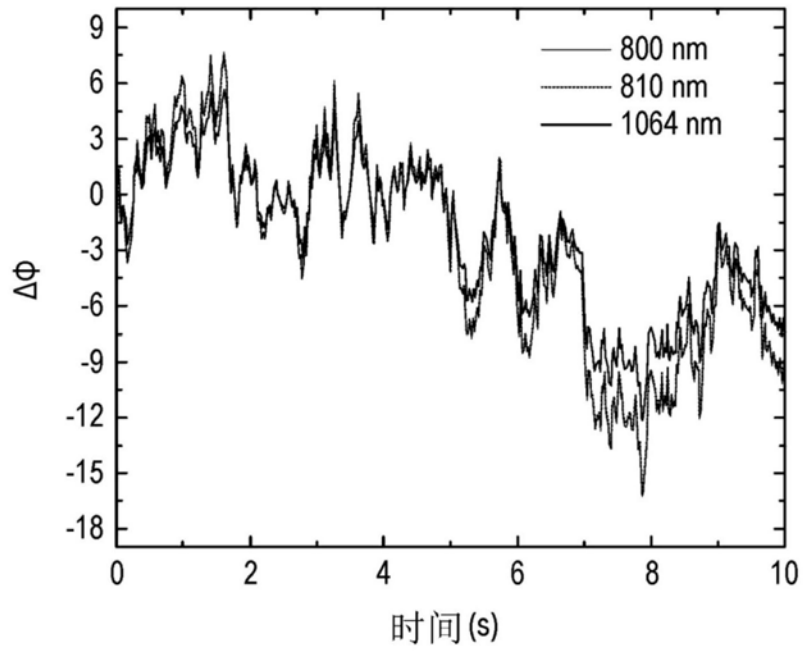


图2A

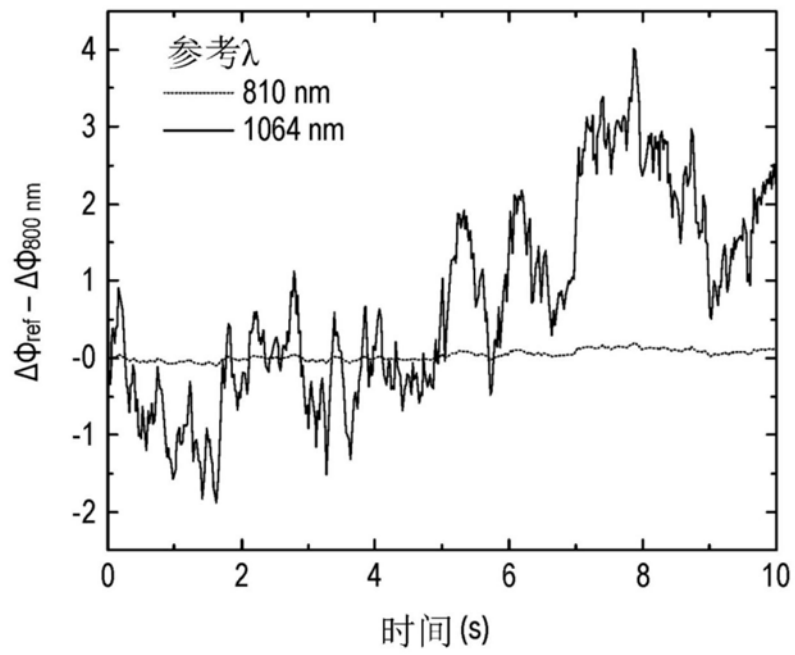


图2B

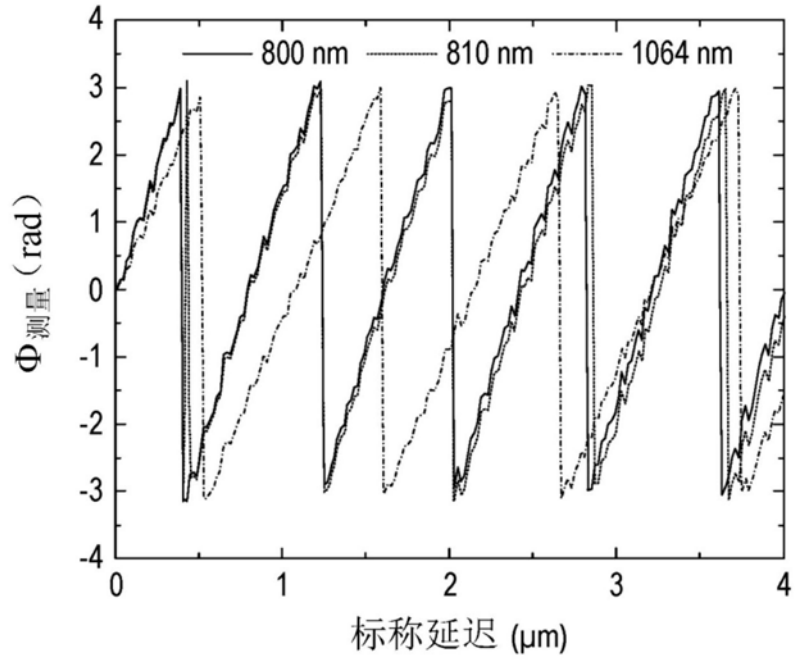


图3A

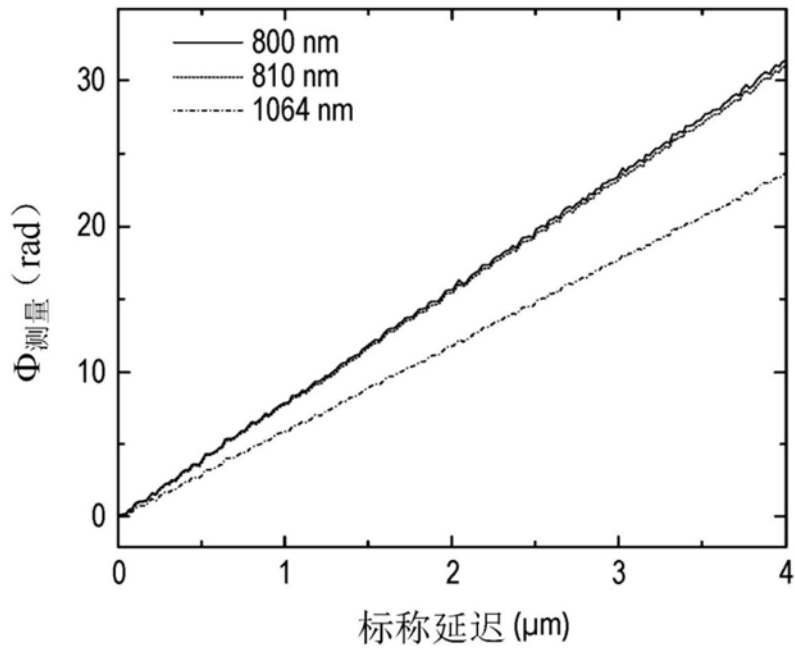


图3B

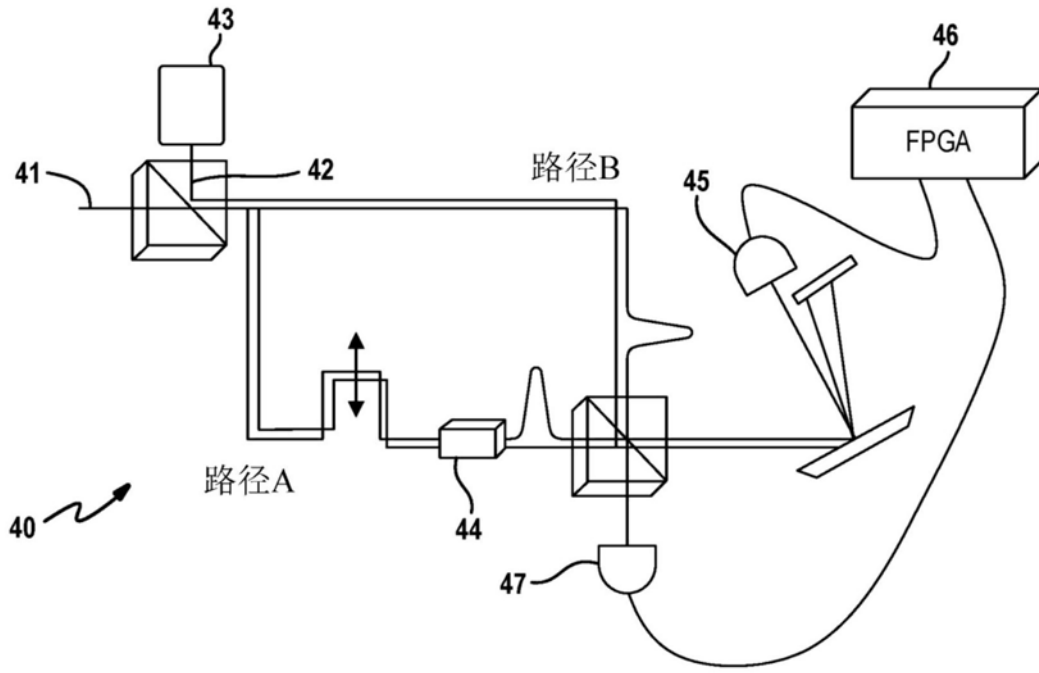


图4

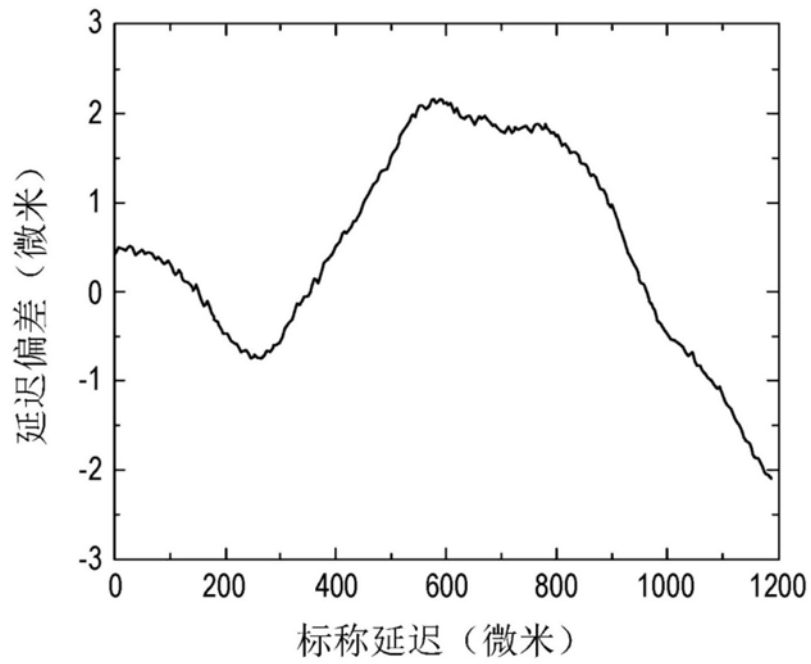


图5

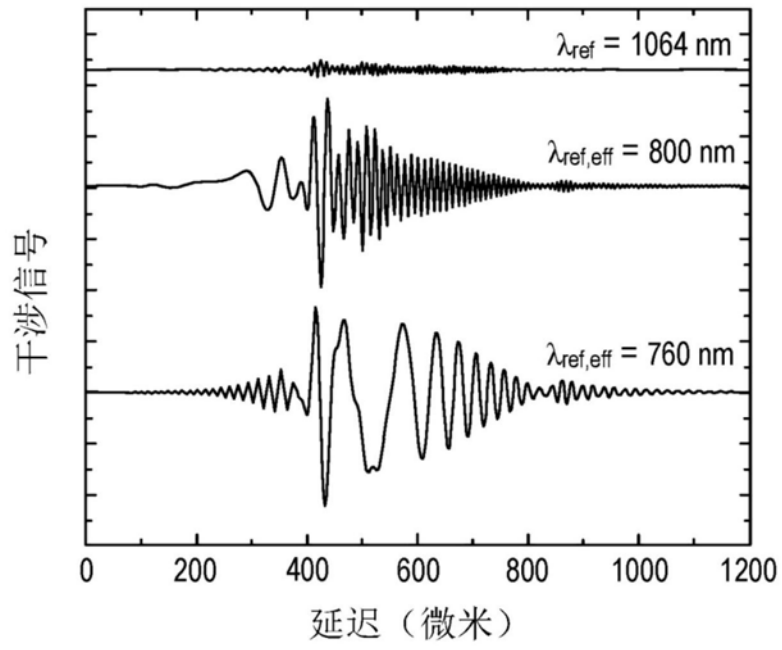


图6