



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 116718123 B

(45) 授权公告日 2023. 10. 20

(21) 申请号 202310997124.0

(22) 申请日 2023.08.09

(65) 同一申请的已公布的文献号
申请公布号 CN 116718123 A

(43) 申请公布日 2023.09.08

(73) 专利权人 中国科学院精密测量科学与技术
创新研究院

地址 430071 湖北省武汉市武昌区小洪山
西30号

(72) 发明人 李振千 李刘锋 彭建康 茹媛
陈李生

(74) 专利代理机构 武汉宇晨专利事务所(普通
合伙) 42001

专利代理师 孙劲

(51) Int. Cl.

G01B 11/02 (2006.01)

G01N 25/16 (2006.01)

(56) 对比文件

CN 106848827 A, 2017.06.13

CN 114865445 A, 2022.08.05

CN 102916335 A, 2013.02.06

US 2017146337 A1, 2017.05.25

US 7800763 B1, 2010.09.21

US 2014044142 A1, 2014.02.13

US 2007217456 A1, 2007.09.20

Liufeng Li et al..Loss Measurement of High-Finesse Fabry-Perot Cavities.中国激光.2010,全文.

M. J. Lawrence et al..Dynamic response of a Fabry-Perot interferometer.Journal of the Optical Society of America B.1999,全文.

胡方迅.窄线宽激光器稳频控制技术研究.数字技术与应用.2012,(12),全文.

韩顺利;仵欣;林强.半导体激光器稳频技术.红外与激光工程.2013,(05),全文.

沈辉;李刘锋;陈李生.超窄线宽激光——激光稳频原理及其应用.物理.2016,(07),全文.

审查员 於锦航

权利要求书3页 说明书8页 附图2页

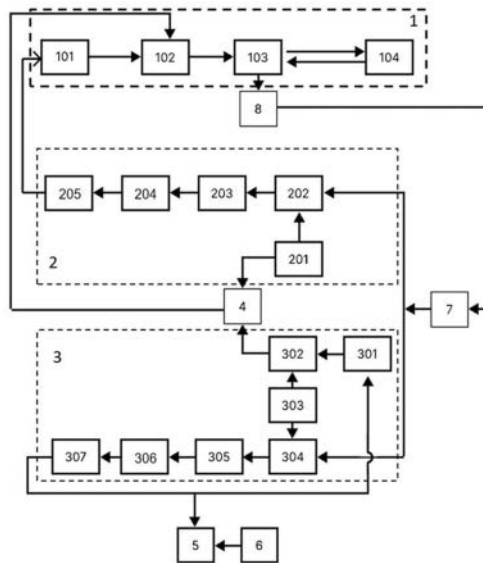
(54) 发明名称

一种基于PDH稳频的绝对长度测量装置及方法

(57) 摘要

本发明公开了一种基于PDH稳频的绝对长度测量装置,包括PDH锁频光学模块、锁频电路控制模块、参考腔长度测量电路控制模块、加法器、频率计数器、铷钟参考源、模数转换器以及光电探测器。本发明还公开了一种基于PDH稳频的绝对长度测量方法,利用PDH锁频系统加入新的调制源,对光谱进行相位调制,最终可以直接得到光学参考腔的绝对长度以及热膨胀系数等参数。本发明只需要一套稳频激光即可完成对光学参考腔热膨胀系数的测量,且结构简单,成本较低,测量范围大,测量周期较短,受到漂移等其他因素的影响也较小。

CN 116718123 B



1. 一种基于PDH稳频的绝对长度测量装置,包括激光器(101),其特征在于,激光器(101)出射的激光经过电光调制器(102)调制后经光学F-P腔(104)再入射至光电探测器(8)得到模拟电信号,模拟电信号经过模数转换器(7)转化为数字信号且数字信号分为两路;

锁频调制信号源(201)输出的锁频调制信号分为两路,第一路锁频调制信号与模数转换器(7)输出的第一路数字信号均输入到锁频解调器(202),经锁频解调器(202)解调后得到的锁频鉴频信号依次通过第一低通滤波器(203)和环路滤波器(204)后输入到激光频率微调执行器(205),激光频率微调执行器(205)输出的电学控制信号输入至激光器(101);

边带调制信号源(303)输出的相位调制信号分为两路,边带调制信号源(303)输出的第一路相位调制信号与上述模数转换器(7)输出的第二路数字信号均输入到锁腔解调器(304),由锁腔解调器(304)解调得到的锁腔鉴频信号依次通过第二低通滤波器(305)和积分器(306)后输入到压控晶振(307),压控晶振(307)输出的第一路信号输入到射频信号源(301),压控晶振(307)输出的第二路信号和铷钟参考源(6)的输出信号均输入至频率计数器(5);

边带调制信号源(303)输出的第二路相位调制信号以及射频信号源(301)输出的射频信号同时输入到相位调制器(302),相位调制器(302)输出的锁腔调制信号以及第二路锁频调制信号均输入到加法器(4)中,加法器(4)得到的合成信号输入至电光调制器(102)的电输入端。

2. 根据权利要求1所述一种基于PDH稳频的绝对长度测量装置,其特征在于,所述射频信号源(301)输出的射频信号的频率与光学F-P腔(104)自由光谱范围相等。

3. 根据权利要求2所述一种基于PDH稳频的绝对长度测量装置,其特征在于,所述相位调制器(302)输出的锁腔调制信号包括射频信号源(301)输出的频率信号为载波加上边带调制信号源(303)输出的相位调制信号对应的频率信号为两个边带信号。

4. 根据权利要求3所述一种基于PDH稳频的绝对长度测量装置,其特征在于,所述边带调制信号源(303)输出的相位调制信号的频率不和锁频调制信号源(201)输出频率相等,且不为锁频调制信号源(201)输出频率的整数倍。

5. 根据权利要求4所述一种基于PDH稳频的绝对长度测量装置,其特征在于,所述射频信号源(301)输出的初始射频信号频率接近光学F-P腔(104)的预估自由光谱范围 $f'_{FSR} = \frac{c}{2nL'}$,其中n为光学F-P腔(104)所处环境内的空气折射率,c为光速, f'_{FSR} 为光学F-P腔(104)的预估自由光谱范围, L' 为光学F-P腔(104)初始的预估长度。

6. 根据权利要求1所述一种基于PDH稳频的绝对长度测量装置,其特征在于,所述电光调制器(102)调制后的激光先经过偏振分光棱镜(103)透射至光学F-P腔(104),之后光学F-P腔(104)的反射光再通过偏振分光棱镜(103)反射耦合至光电探测器(8)。

7. 一种基于PDH稳频的绝对长度测量方法,根据权利要求4所述一种基于PDH稳频的绝对长度测量装置,其特征在于,包括对光学F-P腔(104)腔长的绝对长度测量步骤:

步骤1.1、射频信号源(301)输出信号与边带调制信号源(303)输出的相位调制信号输入到相位调制器(302)进行相位调制,将调制得到的锁腔调制信号与锁频调制信号源(201)输出的第二路锁频调制信号输入到加法器(4),经加法器(4)合成后的信号输入到电光调制器(102)中对激光进行相位调制;

步骤1.2、光电探测器(8)获取激光反射的模拟信号,然后经模数转换器(7)转换得到的数字信号分别与锁频调制信号源(201)输出的第一路锁频调制信号和相位调制器(302)输出的锁腔调制信号进行解调操作,再分别经过低通滤波得到滤除高频成分的锁频误差信号以及锁腔误差信号;

步骤1.3、滤除高频成分的锁频误差信号通过环路滤波器(204)进行环路滤波后输出电学控制信号至激光频率微调执行器(205)对激光器(101)输出激光频率进行微调,使激光器(101)锁定在光学F-P腔(104)上;

步骤1.4、滤除高频成分的锁腔误差信号通过积分器(306)进行积分后输出晶振电学控制信号至压控晶振(307),压控晶振(307)输出两路频率参考信号中的一路频率参考信号输入射频信号源(301)作为频率参考,压控晶振(307)输出的另一路频率参考信号输入至频率

计数器(5)进行测量,光学F-P腔(104)腔长的绝对长度为:
$$L = \frac{c}{2 * n * f_{ref} * M},$$

其中, L 为光学F-P腔(104)腔长的绝对长度, c 为真空中的光速; n 为光学F-P腔(104)所处环境内的空气折射率; f_{ref} 为频率参考信号的频率,是压控晶振(307)的输出频率,由频率计数器(5)直接测量得到; M 为压控晶振(307)输出频率分频系数。

8. 根据权利要求7所述一种基于PDH稳频的绝对长度测量方法,其特征在于,还包括光学F-P腔(104)热膨胀系数测算步骤:

步骤2.1、改变光学F-P腔(104)内温度,得到光学F-P腔(104)腔长的绝对长度对温度的数据组,进而得到光学F-P腔(104)腔长绝对长度变化对温度变化的数据组,

步骤2.2、将步骤2.1中光学F-P腔(104)腔长绝对长度以及腔长绝对长度变化对温度变化的数据组带入如下公式进行计算,得到光学F-P腔(104)热膨胀系数对温度的数据组,进而得到光学F-P腔(104)热膨胀系数随温度变化的曲线,
$$\alpha(T) = \frac{dL}{LdT},$$

其中 L 为光学F-P腔(104)腔长的绝对长度, dL 为当温度变化是 dT 时引起光学F-P腔(104)腔长的绝对长度变化, $\alpha(T)$ 为F-P光学腔(104)腔体材料在温度为 T 时的热膨胀系数。

9. 根据权利要求8所述一种基于PDH稳频的绝对长度测量方法,其特征在于,光学F-P腔(104)热膨胀系数测算步骤还包括:

步骤2.3、利用所述步骤2.2得到的光学F-P腔(104)腔体材料的热膨胀系数 $\alpha(T)$ 与温度 T 的数据组以及如下公式进行拟合,获得零膨胀温度点附近的热膨胀系数与温度的关系式:
$$\alpha(T) = a_1(T - T_0) + a_2(T - T_0)^2,$$

其中, T_0 表示光学F-P腔(104)腔体材料零膨胀温度, a_1 为热膨胀系数的有效线性温度系数, a_2 为二阶温度系数。

10. 根据权利要求9所述一种基于PDH稳频的绝对长度测量方法,其特征在于,光学F-P腔(104)热膨胀系数测算步骤还包括获取零膨胀温度点:

根据所述步骤2.3拟合得到的零膨胀温度点附近的热膨胀系数与温度的关系式或者步

骤2.2中光学F-P腔(104)热膨胀系数随温度变化的曲线,取热膨胀系数为0时对应的温度点即为零膨胀温度点。

一种基于PDH稳频的绝对长度测量装置及方法

技术领域

[0001] 本发明涉及高精度信号测量和控制技术领域,具体涉及一种基于PDH稳频的绝对长度测量装置,还涉及一种基于PDH稳频的绝对长度测量方法。

背景技术

[0002] 光学法布里-珀罗(Fabry-Perot,F-P)腔是现代原子分子与光物理学的基本器件之一,在激光稳频、量子精密测量和光频率标准等领域都具有重要应用。例如,在激光PDH稳频技术中,光学参考腔的谐振频率作为频率参考,其稳定性直接影响激光的频率。光学参考腔的频率稳定性主要受到其机械稳定性和环境温度引起的腔长变化的影响。因此,光学参考腔的腔长以及其热膨胀系数的精密测量十分重要。

[0003] 利用低膨胀材料(如微晶玻璃、超低膨胀(ULE)玻璃等)制作的高热稳定性F-P腔的腔体,极大减小了温度波动的影响。同时,超低膨胀(ULE)玻璃的热膨胀系数具有过零点的性质,该过零点称为零膨胀温度点。参考腔工作在其零膨胀温度附近能降低其温度敏感性,从而提高频率稳定性。在现有技术中,对ULE腔体的零膨胀温度点测量有多种方法,如膨胀测量法、光弹性分析法、超声法、干涉法等,其中超声法和干涉法已获得广泛应用。其中干涉法是将激光锁定在用ULE材料制成的F-P腔上,通过改变ULE腔体的温度来改变腔体的长度,从而改变共振频率。在温度改变的过程中,将腔体的共振频率与一个稳定的参考源相比较,从而判断腔体的温度是否在零膨胀温度点附近。根据参考源的不同也衍生出了多种测量方法,如:参考腔拍频法、光梳测量法、光钟测量法等。

[0004] 传统参考腔拍频法利用一个已有的稳定工作的超稳腔作为参考源,待测光学参考腔在不同的稳态温度下与参考源进行拍频,得到不同温度下待测光学参考腔的共振频率变化量。这种方法需要两套稳频激光系统,并要保证其在测量过程中不失锁,这在测量过程中很难实现。而且参考腔拍频法的测量精度受限于拍频测量时待测腔的温度是否达到平衡以及参考源频率的稳定性,也无法给出精确的光学参考腔体共振频率。故此类方法测量范围一般也较小。

[0005] 光梳测量法和光钟测量法优点在于能够提供一个高精度的参考标准,能够快速找到光学参考腔体处于零膨胀温度点时的共振频率,测量所需时间周期较短,且测量准确性较高,但是这两种方法的系统更加复杂且装置成本较高。

[0006] 因此,本发明提出了一种基于PDH稳频的绝对长度以及热膨胀系数测量的装置和方法,利用PDH锁频系统加入新的调制源,对光谱进行相位调制,最终得到光学参考腔的绝对长度以及热膨胀系数等重要参数。

发明内容

[0007] 为解决上述技术问题,本发明提供了一种基于PDH稳频的绝对长度测量装置,还提供了一种基于PDH稳频的绝对长度测量方法。

[0008] 本发明解决技术问题所采用的技术方案如下:

[0009] 一种基于PDH稳频的绝对长度测量装置,包括激光器,激光器出射的激光经过电光调制器调制后经光学F-P腔再入射至光电探测器得到模拟电信号,模拟电信号经过模数转换器转化为数字信号且数字信号分为两路;

[0010] 锁频调制信号源输出的锁频调制信号分为两路,第一路锁频调制信号与模数转换器输出的第一路数字信号均输入到锁频解调器,经锁频解调器解调后得到的锁频鉴频信号依次通过第一低通滤波器和环路滤波器后输入到激光频率微调执行器,激光频率微调执行器输出的电学控制信号输入至激光器;

[0011] 边带调制信号源输出的相位调制信号分为两路,边带调制信号源输出的第一路相位调制信号与上述模数转换器输出的第二路数字信号均输入到锁腔解调器,由锁腔解调器解调得到的锁腔鉴频信号依次通过第二低通滤波器和积分器(306)后输入到压控晶振,压控晶振输出的第一路信号输入到射频信号源,压控晶振输出的第二路信号和铷钟参考源的输出信号均输入至频率计数器;

[0012] 边带调制信号源输出的第二路相位调制信号以及射频信号源输出的射频信号同时输入到相位调制器,相位调制器输出的锁腔调制信号以及第二路锁频调制信号均输入到加法器中,加法器得到的合成信号输入至电光调制器的电输入端。

[0013] 如上所述射频信号源输出的射频信号的频率与光学F-P腔自由光谱范围相等。

[0014] 如上所述相位调制器输出的锁腔调制信号包括射频信号源输出的频率信号为载波加上边带调制信号源输出的相位调制信号对应的频率信号为两个边带信号。

[0015] 如上所述边带调制信号源输出的相位调制信号的频率不和锁频调制信号源输出频率相等,且不为锁频调制信号源输出频率的整数倍。

[0016] 如上所述射频信号源输出的初始射频信号频率接近光学F-P腔的预估自由光谱范围 $f'_{FSR} = \frac{c}{2nL'}$, 其中n为光学F-P腔所处环境内的空气折射率,c为光速, f'_{FSR} 为光学F-P腔的预估自由光谱范围, L' 为光学F-P腔初始的预估长度。

[0017] 如上所述电光调制器调制后的激光先经过偏振分光棱镜透射至光学F-P腔,之后光学F-P腔的反射光再通过偏振分光棱镜反射耦合至光电探测器。

[0018] 一种基于PDH稳频的绝对长度测量方法,根据如上所述一种基于PDH稳频的绝对长度测量装置,其特征在于,包括对光学F-P腔腔长的绝对长度测量步骤:

[0019] 步骤1.1、射频信号源输出信号与边带调制信号源输出的相位调制信号输入到相位调制器进行相位调制,将调制得到的锁腔调制信号与锁频调制信号源输出的第二路锁频调制信号输入到加法器,经加法器合成后的信号输入到电光调制器中对激光进行相位调制;

[0020] 步骤1.2、光电探测器获取激光反射的模拟信号,然后经模数转换器转换得到的数字信号分别与锁频调制信号源输出的第一路锁频调制信号和相位调制器输出的锁腔调制信号进行解调操作,再分别经过低通滤波得到滤除高频成分的锁频误差信号以及锁腔误差信号;

[0021] 步骤1.3、滤除高频成分的锁频误差信号通过环路滤波器进行环路滤波后输出电学控制信号至激光频率微调执行器对激光器输出激光频率进行微调,使激光器锁定在光学F-P腔上;

[0022] 步骤1.4、滤除高频成分的锁腔误差信号通过积分器进行积分后输出晶振电学控制信号至压控晶振,压控晶振输出两路频率参考信号中的一路频率参考信号输入射频信号源作为频率参考,压控晶振输出的另一路频率参考信号输入至频率计数器进行测量,光学

F-P腔腔长的绝对长度为:
$$L = \frac{c}{2 * n * f_{ref} * M}$$
,其中, L 为光学F-P腔腔长的绝对长

度, c 为真空中的光速; n 为光学F-P腔所处环境内的空气折射率; f_{ref} 为频率参考信号的频率,是压控晶振的输出频率,由频率计数器直接测量得到; M 为压控晶振输出频率分频系数。

[0023] 如上所述一种基于PDH稳频的绝对长度测量方法,还包括光学F-P腔热膨胀系数测算步骤:

[0024] 步骤2.1、改变光学F-P腔内温度,得到光学F-P腔腔长的绝对长度对温度的数据组,进而得到光学F-P腔腔长绝对长度变化对温度变化的数据组,

[0025] 步骤2.2、将步骤2.1中光学F-P腔腔长绝对长度以及腔长绝对长度变化对温度变化的数据组带入如下公式进行计算,得到光学F-P腔热膨胀系数对温度的数据组,进而得到

光学F-P腔热膨胀系数随温度变化的曲线,
$$\alpha(T) = \frac{dL}{LdT}$$
,其中 L 为光学F-P腔腔长的绝

对长度, dL 为当温度变化是 dT 时引起光学F-P腔腔长的绝对长度变化, $\alpha(T)$ 为F-P光学腔腔体材料在温度为 T 时的热膨胀系数。

[0026] 如上所述光学F-P腔热膨胀系数测算步骤还包括:

[0027] 步骤2.3、利用所述步骤2.2得到的光学F-P腔腔体材料的热膨胀系数 $\alpha(T)$ 与温度 T 的数据组以及如下公式进行拟合,获得零膨胀温度点附近的热膨胀系数与温度的关系式:
$$\alpha(T) = a_1(T - T_0) + a_2(T - T_0)^2,$$

[0028] 其中, T_0 表示光学F-P腔腔体材料零膨胀温度, a_1 为热膨胀系数的有效线性温度系数, a_2 为二阶温度系数。

[0029] 如上所述光学F-P腔热膨胀系数测算步骤还包括获取零膨胀温度点:

[0030] 根据所述步骤2.3拟合得到的零膨胀温度点附近的热膨胀系数与温度的关系式或者步骤2.2中光学F-P腔热膨胀系数随温度变化的曲线,取热膨胀系数为0时对应的温度点即为零膨胀温度点。

[0031] 本发明的技术方案与现有技术相比,本发明的有益效果是:

[0032] 1.本发明提出了一种基于PDH稳频的绝对长度以及热膨胀系数测量的装置和方法,利用PDH锁频系统(包括PDH锁频光学模块和锁频电路控制模块)加入新的调制源(参考腔长度测量电路控制模块),对激光进行相位调制,最终可以直接得到光学参考腔的绝对长度以及热膨胀系数等参数。本发明装置只需要一套稳频激光即可完成对光学参考腔热膨胀系数的测量,结构简单,成本较低。

[0033] 2.本发明装置结构测量范围大,可在 $-40^{\circ}\text{C} \sim 70^{\circ}\text{C}$ 的范围内连续进行测量,同时测量周期较短,受到漂移等其他因素的影响也较小,并且参考腔绝对长度的测量对时频测量有着重要的意义。

附图说明

[0034] 图1为本发明的原理结构图；

[0035] 图2为实施例中所使用的光学参考腔的腔长绝对长度变化量随温度的变化曲线；其中，实施例所用参考腔的零膨胀温度点22℃时的腔长为0.098133698m；

[0036] 图3为实施例中所使用的光学参考腔的热膨胀系数随温度变化曲线；

[0037] 1-PDH锁频光学模块；101-激光器；102-电光调制器；103-偏振分光棱镜；104-光学F-P腔；

[0038] 2-锁频电路控制模块；201-锁频调制信号源；202-锁频解调器；203-第一低通滤波器；204-环路滤波器；205-激光频率微调执行器；

[0039] 3-参考腔长度测量电路控制模块；301-射频信号源；302-相位调制器；303-边带调制信号源；304-锁腔解调器；305-第二低通滤波器；306-积分器；307-压控晶振；

[0040] 4-加法器；5-频率计数器；6-铷钟参考源；7-模数转换器；8-光电探测器。

具体实施方式

[0041] 为了便于本领域普通技术人员理解和实施本发明，下面结合实施例并参照附图，对本发明作进一步的详细描述，此处所描述的实施例仅用于说明和解释本发明，并非是对本发明的限制。

[0042] 为了实现光学参考腔高精度的长度测量，本发明提出了一种基于PDH稳频的绝对长度测量装置和方法，利用PDH锁频系统再加入新的调制源，对光谱进行相位调制，最终得到光学参考腔的绝对长度以及热膨胀系数等参数。

实施例1

[0043] 一种基于PDH稳频的绝对长度测量装置，如图1所示，该装置包括PDH锁频光学模块1、锁频电路控制模块2、参考腔长度测量电路控制模块3、加法器4、频率计数器5、铷钟参考源6、模数转换器7以及光电探测器8。

[0044] 所述PDH锁频光学模块1包括激光器101、电光调制器102、偏振分光棱镜103和光学F-P腔104，其中光学F-P腔104为待测的光学参考腔。

[0045] 所述锁频电路控制模块2包括锁频调制信号源201、锁频解调器202、第一低通滤波器203、环路滤波器204以及激光频率微调执行器205。

[0046] 所述参考腔长度测量电路控制模块3包括射频信号源301、相位调制器302、边带调制信号源303、锁腔解调器304、第二低通滤波器305、积分器306和压控晶振307。

[0047] 上述各器件连接关系如下：

[0048] 对于PDH锁频光学模块1：激光器101出射的激光入射到电光调制器102进行相位调制，经电光调制器102调制后的光通过偏振分光棱镜103入射到光学F-P腔104，经光学F-P腔104反射的光再次通过偏振分光棱镜103反射耦合到光电探测器8中并转化为模拟电信号。随后由光电探测器8得到的模拟电信号通过模数转换器7转换为数字信号；由模数转换器7得到数字信号分为两路，其中模数转换器7输出的第一路数字信号输入到锁频电路控制模块2的锁频解调器202，模数转换器7输出的第二路数字信号输入到参考腔长度测量电路控制模块3中的锁腔解调器304。

[0049] 对于锁频电路控制模块2:锁频调制信号源201输出的锁频调制信号分为两路,锁频调制信号源201输出的第一路锁频调制信号与上述模数转换器7输出的第一路数字信号均输入到锁频解调器202中并进行频率解调,锁频解调器202解调后得到的锁频鉴频信号(即锁频误差信号,为激光器101的激光频率与光学参考腔谐振频率之间的误差信号)通过第一低通滤波器203进行滤波,滤除高频成分。将第一低通滤波器203输出的信号输入到环路滤波器204中进行锁频处理,锁频后的信号输入到激光频率微调执行器205,激光频率微调执行器205输出的电学控制信号输入至激光器101,通过激光频率微调执行器205对激光器101进行伺服控制,用于激光器101输出激光频率的锁定。

[0050] 对于参考腔长度测量电路控制模块3:边带调制信号源303输出的相位调制信号分为两路,边带调制信号源303输出的第一路相位调制信号与上述模数转换器7转换得到的第二路数字信号均输入到锁腔解调器304中并进行频率解调,锁腔解调器304解调后得到的锁腔鉴频信号(即锁腔误差信号,为射频信号源301的频率与光学F-P腔104的自由光谱范围的误差信号)通过第二低通滤波器305进行滤波操作,滤除高频成分。将第二低通滤波器305输出的信号输入到积分器306中,进行积分处理后输入到压控晶振307进行电压控制。压控晶振307输出信号分为两路,压控晶振307输出的第一路信号输入到射频信号源301,压控晶振307输出的第一路信号频率作为射频信号源301的参考频率输入信号;同时压控晶振307输出的第二路信号和铷钟参考源6的输出信号均输入至频率计数器5,压控晶振307输出的第二路信号作为光学F-P腔104的长度变化的表征值,铷钟参考源6的输出信号作为频率计数器5的频率参考。

[0051] 边带调制信号源303输出的第二路相位调制信号以及射频信号源301输出的频率与光学F-P腔104自由光谱范围相等的射频信号同时输入到相位调制器302,相位调制器302输出的锁腔调制信号包括射频信号源301输出的频率信号为载波加上边带调制信号源303输出的相位调制信号对应的频率信号为两个边带信号。相位调制器302输出的锁腔调制信号以及锁频调制信号源201输出的第二路锁频调制信号均输入到加法器4中,加法器4输出的合成信号输入至电光调制器102的电输入端。其中,锁频调制信号源201输出的信号频率对激光频率进行相位调制。相位调制器302输出的信号对参考腔自由光谱范围进行调制。

[0052] 在本实施例中,光学F-P腔104使用超低膨胀(ULE)玻璃制作而成的。腔长约为10cm。

[0053] 在本实施例中,光学F-P腔104处于真空环境内。

[0054] 在本实施例中,射频信号源301输出初始频率为1.5GHz(频率波动范围为50kHz)的初始射频信号。该初始射频信号频率设定原则为接近光学F-P腔104的预估自由光谱范围。

预估自由光谱范围由公式 $f'_{FSR} = \frac{c}{2nL}$ 得到。(n为光学F-P腔104所处环境内的空气折射率,c为光速, f'_{FSR} 为光学F-P腔104的预估自由光谱范围, f'_{FSR} 值与射频信号源301输出的初始射频信号频率相等, L' 为光学F-P腔104的初始预估长度。)

[0055] 在本实施例中,锁频调制信号源201输出频率为2.5MHz的正弦信号。

[0056] 在本实施例中,边带调制信号源303输出频率为1MHz的正弦信号。边带调制信号源303输出频率有限定,边带调制信号源303输出频率不能和锁频调制信号源201输出频率相等,且不为锁频调制信号源201输出频率的整数倍。

[0057] 在本实施例中,电光调制器102的电输入信号为锁频调制信号源201输出频率为2.5MHz正弦信号与相位调制器302输出的带相位调制的1.5GHz初始射频信号之和。其中,带相位调制的1.5GHz初始射频信号的相位调制频率为1MHz,该1MHz相位调制信号由边带调制信号源303输出。

[0058] 本实施例中,第一低通滤波器203的通带截止频率为100kHz;第二低通滤波器305的通带截止频率为50kHz。

实施例2

[0059] 一种基于PDH稳频的绝对长度测量方法,利用实施例1所述一种基于PDH稳频的绝对长度测量装置,在本实施例中对光学F-P腔104腔长的绝对长度进行测量,具体步骤如下:

[0060] 使用本装置的操作步骤:

[0061] 步骤1:射频信号源301输出1.5GHz信号与边带调制信号源303输出的1MHz相位调制信号输入到相位调制器302进行相位调制。将调制后得到的锁腔调制信号与锁频调制信号源201输出的第二路2.5MHz锁频调制信号输入到加法器4后进行加法操作。最后将加法器4合成后的信号输入到电光调制器102中对激光进行相位调制。

[0062] 步骤2:通过光电探测器8获取激光反射的模拟信号。(该信号包含光频误差信息以及参考腔锁定的电学信号)通过模数转换器7将激光反射的模拟信号转化为数字信号,并分别与锁频调制信号源201输出的第一路2.5MHz锁频调制信号和相位调制器302输出的1MHz锁腔调制信号进行解调操作。解调操作由锁频解调器202和锁腔解调器304实现。解调操作后的信号分别通过第一低通滤波器203和第二低通滤波器305进行滤波,进行滤波操作后可以得到滤除高频成分的锁频误差信号以及锁腔误差信号。

[0063] 步骤3:锁频电路控制模块2中,滤除高频成分的锁频误差信号通过环路滤波器204进行环路滤波后输出电学控制信号至激光频率微调执行器205对激光器101输出激光频率进行微调,使激光器101的频率锁定在光学F-P腔104上。

[0064] 步骤4:参考腔长度测量电路控制模块3中,滤除高频成分的锁腔误差信号通过积分器306进行积分后输出电学控制信号至压控晶振307。压控晶振307输出两路10MHz左右频率参考信号(频率参考信号的频率为 f_{ref}),其中一路频率参考信号输入至射频信号源301作为频率参考,一路频率参考信号至频率计数器5进行测量,频率计数器5测量的频率变化量作为光学F-P腔104的长度变化的表征值。铷钟参考源6输出10MHz超稳频率至频率计数器5作为计数频率参考。

[0065] 在本实施例中,实际光学F-P腔104的自由光谱范围等于射频信号源301输出频率,射频信号源301输出频率由压控晶振307的频率参考信号的频率 f_{ref} 与压控晶振307输出频率分频系数M决定。在本实施例中,射频信号源301输出示数为1.5GHz,故其分频系数为150。通过公式1获得光学F-P腔104的自由光谱范围 f_{FSR} :

$$[0066] \quad f_{FSR} = \frac{c}{2nL} \quad \text{公式1}$$

[0067] 可以得到光学F-P腔104的绝对长度:

$$L = \frac{c}{2 * n * f_{FSR}} \quad \text{公式2}$$

$$= \frac{c}{2 * n * f_{ref} * M}$$

[0068] 其中, L 为光学F-P腔104腔长的绝对长度, c 为真空中的光速; n 为光学F-P腔104所处环境内的空气折射率。在本实施例中 $n=1$ 。

[0069] 在本实施例中,频率参考信号的频率 f_{ref} 为压控晶振307的输出频率,由频率值频率计数器5直接测量得到。

实施例3

[0070] 一种基于PDH稳频的热膨胀系数测算步骤,在实施例2的基础上,利用实施例1所述一种基于PDH稳频的绝对长度测量装置,本实施例对光学F-P腔104热膨胀系数进行测算,具体步骤如下:

[0071] 步骤1:本实施例在实施例2的基础上通过改变光学参考腔(即光学F-P腔104)内温度,得到光学F-P腔104腔长的绝对长度对温度的数据组,进而得到光学F-P腔104腔长变化对温度变化的数据组,光学F-P腔104腔长变化对温度的关系曲线如图2所示。光学F-P腔104腔长的绝对长度为 L ,温度变化为 dT 时引起光学F-P腔104的绝对腔长变化 dL 可以表示为

$$dL = L\alpha(T) * dT \quad \text{公式3}$$

[0072] 即 $\alpha(T) = \frac{dL}{LdT}$ 公式4

[0073] 式中 $\alpha(T)$ 为光学F-P腔104腔体材料的在温度为 T 时的热膨胀系数。

[0074] 步骤2:将步骤1得到光学F-P腔104腔长的绝对长度以及腔长变化对温度变化的数据组带入公式4进行计算,得到光学F-P腔104热膨胀系数(CTE)对温度的数据组,进而可以得到光学F-P腔104热膨胀系数(CTE)随温度变化的曲线,如图3所示。

[0075] 步骤3:在本实施例中,光学F-P腔104腔体材料采用的是ULE玻璃,其在零膨胀温度点附近的热膨胀系数可以近似表示为

$$\alpha(T) = a_1(T - T_0) + a_2(T - T_0)^2 \quad \text{公式5}$$

[0076] T_0 表示光学F-P腔104的腔体材料零膨胀温度, a_1 为热膨胀系数的有效线性温度系数。 a_2 为二阶温度系数。利用步骤2得到的光学F-P腔104腔体材料的热膨胀系数 $\alpha(T)$ 与温度 T 的数据组以及公式5进行拟合,可获得零膨胀温度点附近的热膨胀系数随温度变化关系,其中热膨胀系数的有效线性温度系数 a_1 和二阶温度系数 a_2 通过拟合得到。

[0077] 根据拟合后的公式5(即零膨胀温度点附近的热膨胀系数与温度的关系式),或拟合曲线,取热膨胀系数为0时对应的温度点即为零膨胀温度点。当步骤1中,温度变化的步长较小,如温度变化步长小于或等于 0.1°C 时,也可直接通过步骤2中光学F-P腔104热膨胀系数(CTE)随温度变化的曲线取热膨胀系数为0时对应的温度点从而获得零膨胀温度点。

[0078] 整体的,为了测量光学F-P腔104的腔长绝对长度和零膨胀温度点,本发明首先提

出了一种基于PDH稳频的绝对长度测量装置。利用锁频电路控制模块2以及参考腔长度测量电路控制模块3,同时在电光调制器102中再加入一路射频信号对光波进行相位调制,产生上下边带以及载波。将射频信号源301输出的微波信号锁定在光学F-P腔104上,最后压控晶振307的输出控制频率作为射频信号源301的频率参考,得到待测光学F-P腔104的自由光谱范围。通过压控晶振307输出的频率参考信号的频率 f_{ref} 与频率分频系数M得到光学F-P腔104腔长的绝对长度;进一步通过改变光学F-P腔104温度,从而得到不同温度时光学F-P腔104腔长绝对长度以及光学F-P腔104腔长绝对长度随温度变化。通过计算,得到光学F-P腔104的热膨胀系数以及零膨胀温度点。

[0079] 本发明并不限于上述实施方式,上述实施例仅是对本发明的优选实施例进行描述,并非对本发明的构思进行限定,上述实施例中的实施方案可以进一步组合或者替换,本领域技术人员对本发明的技术方案作出的各种变化和改进,均属于本发明的保护范围。

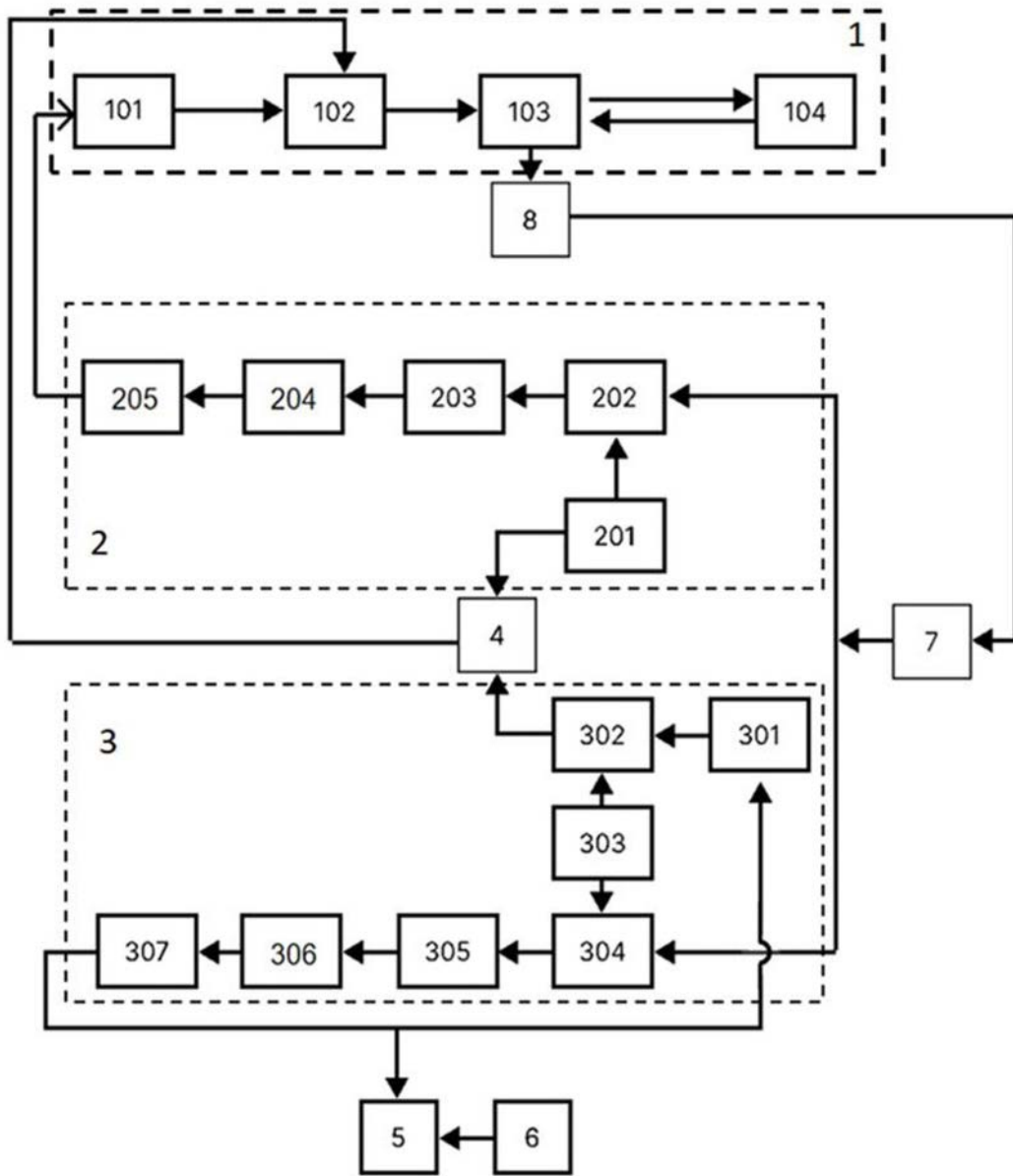


图 1

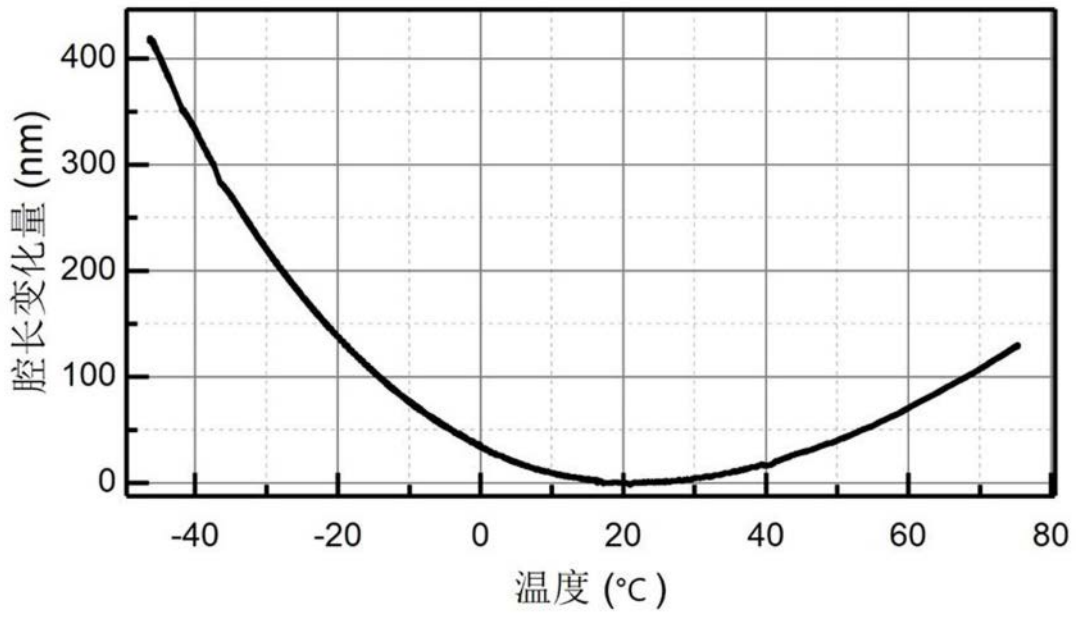


图 2

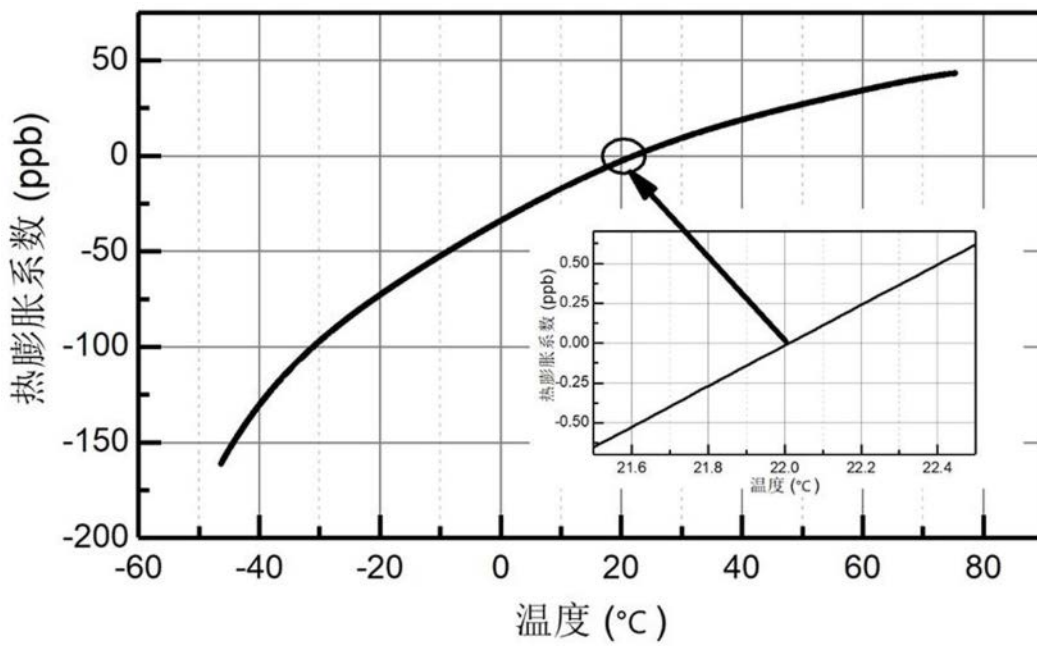


图 3