



## (12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 110716397 B

(45) 授权公告日 2020.10.13

(21) 申请号 201911050178.6

(22) 申请日 2019.10.31

(65) 同一申请的已公布的文献号

申请公布号 CN 110716397 A

(43) 申请公布日 2020.01.21

(73) 专利权人 清华大学

地址 100084 北京市海淀区北京市100084

信箱82分箱清华大学专利办公室

专利权人 北京华卓精科科技股份有限公司

(72) 发明人 王磊杰 朱煜 张鸣 徐继涛

成荣 李鑫 杨开明 胡金春

(74) 专利代理机构 北京鸿元知识产权代理有限公司 11327

代理人 吴金水 张超艳

(51) Int.Cl.

G03F 7/20 (2006.01)

G02B 5/18 (2006.01)

G02B 27/28 (2006.01)

G02F 1/11 (2006.01)

(56) 对比文件

CN 103092002 A, 2013.05.08

CN 106225667 A, 2016.12.14

CN 103698983 A, 2014.04.02

CN 101413783 A, 2009.04.22

EP 1169613 A1, 2002.01.09

审查员 周勇

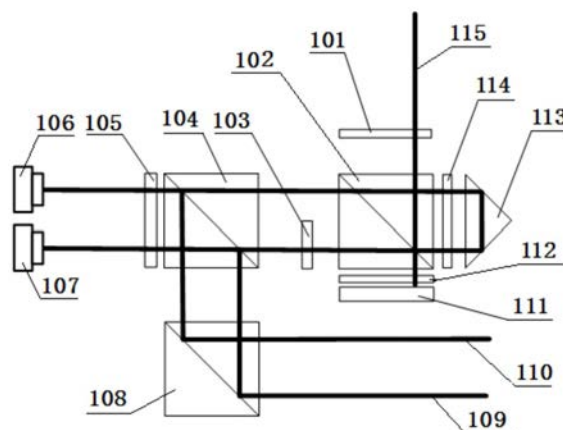
权利要求书2页 说明书7页 附图2页

### (54) 发明名称

激光干涉光刻中的曝光光束相位测量方法和光刻系统

### (57) 摘要

本发明属于光学仪器仪表设备技术领域,公开了一种激光干涉光刻中的曝光光束相位测量方法,从激光干涉光刻的曝光光束中分离出测量光输入激光相位测量干涉仪对激光干涉光刻的曝光光束进行相位测量,再引入与激光干涉光刻曝光光束同源的参考光束也输入激光相位测量干涉仪,由激光相位测量干涉仪处理形成干涉测量光信号,进行解算得到激光干涉光刻的曝光光束的相位。本发明公开了一种激光干涉光刻系统,包括激光相位测量干涉仪、控制器和相位调制器,采用前述激光干涉光刻中的曝光光束相位测量方法,用激光相位测量干涉仪测量曝光光束相位是否漂移,由控制器控制相位调制器进行相位调制,完成对曝光条纹相位漂移的锁定,实现高精度变周期光栅的制作。



1. 一种激光干涉光刻中的曝光光束相位测量方法,其特征在于:基于外差测量原理的变周期干涉条纹相位测量方法使用激光相位测量干涉仪对激光干涉光刻的曝光光束进行相位测量,所述激光相位测量干涉仪包括第一波片、第一偏振分光棱镜、第二波片、第二偏振分光棱镜、偏振片、第一光电探测器、第二光电探测器、第三偏振分光棱镜、反射镜、第三波片、后向反射镜和第四波片;该方法包括以下步骤:

从激光干涉光刻的两束曝光光束中各分离出一束测量光,两束测量光平行,两束测量光分别作为激光相位测量干涉仪的第一条输入光束和第二条输入光束;

第一条输入光束附加频率 $f_{s1}$ ,以s偏振态由第三偏振分光棱镜处输入,经第三偏振分光棱镜反射至第二偏振分光棱镜,再经第二偏振分光棱镜反射到偏振片形成第一路测量光;

第二条输入光束附加频率 $f_{s2}$ ,以s偏振态由第三偏振分光棱镜处输入,经第三偏振分光棱镜反射至第二偏振分光棱镜,再经第二偏振分光棱镜反射到偏振片形成第二路测量光;

引入与激光干涉光刻曝光光束同源的参考光束作为激光相位测量干涉仪的第三条输入光束,附加频率 $f_{s3}$ ,第三条输入光束从第一波片处输入,经第一波片变为圆偏振态入射第一偏振分光棱镜,经第一偏振分光棱镜分成反射参考光和透射参考光;

反射参考光经第四波片到后向反射镜,经后向反射镜反射转向回到第四波片,变为p偏振态,再依次经第一偏振分光棱镜、第二偏振分光棱镜透射后,经过偏振片形成第一条参考光束;

透射参考光经过第三波片到反射镜,经反射镜反射回第三波片后变为s偏振态到第一偏振分光棱镜,再经第一偏振分光棱镜反射至第二波片后变为p偏振态,再依次经第二偏振分光棱镜透射和偏振片形成第二条参考光束;

第一路测量光与第一条参考光束合光形成了一束干涉测量光信号入射至第一光电探测器,第二路测量光与第二条参考光束合光形成了另一束干涉测量光信号入射至第二光电探测器;第一光电探测器和第二光电探测器分别把接收到的干涉测量光信号转换为电信号,对电信号进行解算得到激光干涉光刻的两束曝光光束的相位。

2. 根据权利要求1所述的激光干涉光刻中的曝光光束相位测量方法,其特征在于:该方法采用的激光相位测量干涉仪的所述第一波片为四分之一波片。

3. 根据权利要求1所述的激光干涉光刻中的曝光光束相位测量方法,其特征在于:该方法采用的激光相位测量干涉仪的所述第二波片为二分之一波片。

4. 根据权利要求1所述的激光干涉光刻中的曝光光束相位测量方法,其特征在于:该方法采用的激光相位测量干涉仪的所述第三波片为四分之一波片。

5. 根据权利要求1所述的激光干涉光刻中的曝光光束相位测量方法,其特征在于:该方法采用的激光相位测量干涉仪的所述第四波片为四分之一波片。

6. 根据权利要求1所述的激光干涉光刻中的曝光光束相位测量方法,其特征在于:所述作为激光相位测量干涉仪的第一条输入光束和第二条输入光束的测量光由激光干涉光刻的两束曝光光束的光路后半程中分离出来。

7. 根据权利要求1所述的激光干涉光刻中的曝光光束相位测量方法,其特征在于:所述激光干涉光刻的两束曝光光束通过凸透镜聚焦在基底上曝光制作光栅,所述作为激光相位测量干涉仪的第一条输入光束和第二条输入光束的测量光在凸透镜前进行分离得到。

8. 根据权利要求7所述的激光干涉光刻中的曝光光束相位测量方法,其特征在于:采用

分光棱镜从所述两束曝光光束分离出测量光。

9. 一种激光干涉光刻系统,其特征在于:采用权利要求1-8中任意一项所述的激光干涉光刻中的曝光光束相位测量方法,所述系统包括激光相位测量干涉仪、控制器和相位调制器,控制器分别与激光相位测量干涉仪和相位调制器连接,以激光相位测量干涉仪实时测得两束曝光光束的相位反馈给控制器,当相位测量结果表明相位发生偏移时,由控制器控制相位调制器对曝光光束进行相位调制,完成对曝光条纹相位漂移的锁定。

10. 根据权利要求9所述的激光干涉光刻系统,其特征在于:所述相位调制器采用声光调制器。

## 激光干涉光刻中的曝光光束相位测量方法和光刻系统

### 技术领域

[0001] 本发明属于光学仪器仪表设备技术领域,特别是涉及一种激光干涉光刻中的曝光光束相位测量方法和光刻系统。

### 背景技术

[0002] 光栅器件作为大型天文望远镜、惯性约束核聚变激光点火系统、光刻系统等重大工程系统中的关键器件,近年来对尺寸、栅线密度、精度等要求不断提高,同时,光栅的应用类型也不在局限于一维光栅,还包括二维光栅、弯曲光栅、变周期光栅等,光栅制造正在向微米级尺寸、纳米级精度、亚万级栅线密度的量级迈进,多样化高精度密栅线的大尺寸光栅的制造成为了光栅制造领域的亟需解决的热点问题。

[0003] 机械刻划、激光直写、机械拼接等传统光栅制造技术均存在不同的技术缺陷,机械刻划主要缺点包括大面积制造精度低、加工周期长、制造的光栅存在鬼线等,激光直写主要缺点包括大面积制造精度低、加工周期长等,机械拼接则存在拼接精度差、拼接过程复杂、成本昂贵等缺点。因此,上述量级光栅的制造难以通过传统技术来实现。激光干涉光刻技术是一种利用两束或者多束激光干涉产生的周期性图形曝光感光基底制造微纳阵列器件的重要技术,主要应用于制造特征尺寸低于亚波长的柱阵、光栅、孔阵、点阵、微透镜阵列等器件,这些微阵列器件广泛应用于国防、民生、科研等领域。通过激光干涉光刻技术或全息光刻技术可实现密栅线高精度、且加工周期短的大面积光栅制造,激光干涉光刻技术也逐步成为了大面积高精度光栅制造技术中的主流。

[0004] 激光干涉光刻技术的主要难点是在大面积高精度光栅制造中的精度控制,高精度激光干涉光刻系统具有很大的研发难度。世界多个著名光栅制造系统公司及研究机构针对高精度干涉光刻系统的研发展开了一系列的研究,研究主要集中于高精度干涉光刻系统。高精度干涉光刻系统中的高速高精图形锁定技术可直接决定系统的图形锁定精度,其中有关激光曝光光束的相位测量方法是研发中的关键技术单元。

[0005] 有学者提出了一种较为常用的干涉图形相位锁定系统。曝光光源经分光反射光路在基底处形成干涉图形,受外界诸如振动、空气扰动的影响,基底处的干涉图形将发生漂移,从而影响曝光质量。利用从两曝光光束引出的光重合入射至CCD (Charge-coupled Device) 形成干涉条纹,CCD通过监测空间干涉条纹图像的移动来获取基底处干涉图形的漂移量,并将漂移量作为反馈输入至控制器,控制器控制压电陶瓷驱动反射镜座调节干涉图形相位,从而实现干涉图形的锁定,来获取较好的曝光质量。压电陶瓷调制范围较大,但其调制速度较慢,且由于CCD分辨率与帧率的限制,所以难以做到相位实时测量以进行高速高精度的相位调制。

[0006] 还有学者提出了一种基于零差相位测量干涉仪相位锁定系统方案。曝光光源经分光反射光路在基底处形成干涉图形。为防止干涉图形漂移,系统利用基底附近的分光镜分别提取左右曝光光束形成两路具有 $180^\circ$ 相差的干涉信号,干涉信号通过光电转换后作差放大得到电压信号。干涉图形受外界干扰影响发生相位漂移而引起电压信号变化,以电压信

号作为反馈来控制电光调制器EOM(Electro-optic Modulator)调节干涉图形相位来保持电压稳定,从而实现干涉图形的锁定。所用双通道零差相位测量干涉仪的测量信号为直流信号,其抗干扰能力较差不易实现高精度测量,相位求解、细分及判向也都较为困难。

[0007] 美国专利US6,882,477B1中公开了一种扫描激光干涉光刻系统,该光刻系统利用两束经准直后的小尺寸光束干涉形成干涉图形曝光作步进扫描运动的基底实现大面积光栅制作,经准直后的小尺寸光束干涉有效的消除了干涉图形的相位非线性误差;同时,为防止系统干涉图形相对于运动的基底平台发生相位漂移引起误差,该光刻系统列举了一种基于外差测量原理的图形锁定装置,该装置通过在干涉光路中布置三个声光调制器产生外差相位测量的频差,利用光束采样器采样干涉光束至外差相位计进行图形相位检测,检测的相位反馈至控制器控制声光调制器调制相位实现图形锁定;该装置具有高速、高精等图形相位锁定的优点特点,但进行变周期光栅制造时,曝光光束的偏移会使测量光束光斑分离,无法测量并对变周期的干涉曝光系统实现实时的条纹锁定。

[0008] 综上所述,现有技术方案中的曝光光束相位测量均存在一定的局限性,难以实现实时测量以进行变周期的干涉曝光系统的条纹控制。

## 发明内容

[0009] 为了解决上述技术问题,本发明提供了一种激光干涉光刻中的曝光光束相位测量方法,使用激光相位测量干涉仪对激光干涉光刻的曝光光束进行相位测量,所述激光相位测量干涉仪包括第一波片、第一偏振分光棱镜、第二波片、第二偏振分光棱镜、偏振片、第一光电探测器、第二光电探测器、第三偏振分光棱镜、反射镜、第三波片、后向反射镜和第四波片;该方法包括以下步骤:

[0010] 从激光干涉光刻的两束曝光光束中各分离出一束测量光,两束测量光平行,两束测量光分别作为激光相位测量干涉仪的第一条输入光束和第二条输入光束;

[0011] 第一条输入光束以s偏振态由第三偏振分光棱镜处输入,经第三偏振分光棱镜反射至第二偏振分光棱镜,再经第二偏振分光棱镜反射到偏振片形成第一路测量光;

[0012] 第二条输入光束以s偏振态由第三偏振分光棱镜处输入,经第三偏振分光棱镜反射至第二偏振分光棱镜,再经第二偏振分光棱镜反射到偏振片形成第二路测量光;

[0013] 引入与激光干涉光刻曝光光束同源的参考光束作为激光相位测量干涉仪的第三条输入光束,第三条输入光束从第一波片处输入,经第一波片变为圆偏振态入射第一偏振分光棱镜,经第一偏振分光棱镜分成反射参考光和透射参考光;

[0014] 反射参考光经第四波片到后向反射镜,经后向反射镜反射转向回到第四波片,变为p偏振态,再依次经第一偏振分光棱镜、第二偏振分光棱镜透射后,经过偏振片形成第一条参考光束;

[0015] 透射参考光经过第三波片到反射镜,经反射镜反射回第三波片后变为s偏振态到第一偏振分光棱镜,再经第一偏振分光棱镜反射至第二波片后变为p偏振态,再依次经第二偏振分光棱镜透射和偏振片形成第二条参考光束;

[0016] 第一路测量光与第一条参考光束合光形成了一束干涉测量光信号入射至第一光电探测器,第二路测量光与第二条参考光束合光形成了另一束干涉测量光信号入射至第二光电探测器;第一光电探测器和第二光电探测器分别把接收到的干涉测量光信号转换为电

信号,对电信号进行解算得到激光干涉光刻的两束曝光光束的相位。

[0017] 优选地,该方法采用的激光相位测量干涉仪的所述第一波片为四分之一波片。

[0018] 优选地,该方法采用的激光相位测量干涉仪的所述第二波片为二分之一波片。

[0019] 优选地,该方法采用的激光相位测量干涉仪的所述第三波片为四分之一波片。

[0020] 优选地,该方法采用的激光相位测量干涉仪的所述第四波片为四分之一波片。

[0021] 优选地,所述作为激光相位测量干涉仪的第一条输入光束和第二条输入光束的测量光由激光干涉光刻的两束曝光光束的光路后半程中分离出来。

[0022] 优选地,所述激光干涉光刻的两束曝光光束在光路尾部通过凸透镜聚焦在基底上曝光制作光栅,所述作为激光相位测量干涉仪的第一条输入光束和第二条输入光束的测量光在凸透镜前进行分离得到。进一步地,采用分光棱镜从所述两束曝光光束分离出测量光。

[0023] 本发明还提供了一种激光干涉光刻系统,采用上述的激光干涉光刻中的曝光光束相位测量方法,所述系统包括激光相位测量干涉仪、控制器和相位调制器,控制器分别与激光相位测量干涉仪和相位调制器连接,以激光相位测量干涉仪实时测得两束曝光光束的相位反馈给控制器,当相位测量结果表明相位发生偏移时,由控制器控制相位调制器对曝光光束进行相位调制,以完成对曝光条纹相位漂移的锁定。优选地,所述相位调制器采用声光调制器。

[0024] 本发明提供的激光干涉光刻中的曝光光束相位测量方法,利用一种外差测量的方法,具有高速高精度的优点,且光学结构简洁、激光利用率高,是制造变周期光栅的激光干涉光刻系统中不可或缺的部件,该激光相位测量干涉仪利用一种基于外差测量原理的条纹锁定原理,实现对变周期干涉曝光系统的条纹控制,具有高速高精度的测量优点,且光路结构简洁、激光利用率高,可实现曝光光束相位的实时测量。本发明同时提供的激光干涉光刻系统,应用上述激光干涉光刻中的曝光光束相位测量方法,保证输出测量信号始终保持合束,信号强度并不会改变,实时测量曝光光束相位,由此可实现对曝光干涉条纹的实时控制,且实现高速高精度控制,提升激光干涉光刻系统的整体性能。

## 附图说明

[0025] 图1为本发明采用的激光相位测量干涉仪光路结构示意图;

[0026] 图2为采用本发明方法的激光干涉光刻系统实施例示意图。

[0027] 图中:1-激光相位测量干涉仪,101-第一波片,102-第一偏振分光棱镜、103-第二波片,104-第二偏振分光棱镜,105-偏振片,106-第一光电探测器,107-第二光电探测器,108-第三偏振分光棱镜,109-第二条输入光束,110-第一条输入光束,111-反射镜,112-第三波片,113-后向反射镜,114-第四波片,115-第三条输入光束;2-控制器,201-信号接收端,202-显示屏,203-解算模块,204-执行模块;3-激光器,4-第一声光调制器,5-第一反射镜,6-第二反射镜,7-光栅,8-第二声光调制器,9-第三声光调制器,10-第三反射镜,11-第一透镜,12-第二透镜,13-第四反射镜,14-分光棱镜,15-第三透镜,16-基底,17-第五反射镜,18-第四透镜,19-第六反射镜。

## 具体实施方式

[0028] 为了更进一步阐述本发明为解决技术问题所采取的技术手段及功效,以下结合附

图和具体实施例对本发明做进一步详细描述,需要说明的是所提供的附图是示意性的,相互间并没有完全按照尺寸或者比例绘制,因此附图和具体实施例并不作为本发明要求的保护范围限定。

[0029] 如图1所示的本发明方法中采用的激光相位测量干涉仪光路结构,包括第一波片101、第一偏振分光棱镜102、第二波片103、第二偏振分光棱镜104、偏振片105、第一光电探测器106、第二光电探测器107、第三偏振分光棱镜108、反射镜111、第三波片112、后向反射镜113和第四波片114;所述第一波片101、第三波片112和第四波片114都是四分之一波片,第二波片103是二分之一波片;从激光干涉光刻的两束曝光光束中各分离出一束测量光,两束测量光平行,两束测量光分别作为激光相位测量干涉仪的第一条输入光束和第二条输入光束,激光相位测量干涉仪的光路结构如下:

[0030] 第一条输入光束110附加频率 $f_{s1}$ ,以s偏振态由第三偏振分光棱镜108处输入,经第三偏振分光棱镜108反射至第二偏振分光棱镜104,再经第二偏振分光棱镜104反射到偏振片105形成第一路测量光;

[0031] 第二条输入光束109与第一条输入光束110平行,附加频率 $f_{s2}$ ,以s偏振态由第三偏振分光棱镜108处输入,经第三偏振分光棱镜108反射至第二偏振分光棱镜104,再经第二偏振分光棱镜104反射到偏振片105形成第二路测量光;

[0032] 第三条输入光束115是与激光干涉光刻曝光光束同源的参考光束,第三条输入光束115附加频率 $f_{s3}$ ,从第一波片101处输入,以s偏振态经第一波片101变为圆偏振态入射第一偏振分光棱镜102,经第一偏振分光棱镜102分成反射参考光和透射参考光;反射参考光经第四波片114到后向反射镜113,经后向反射镜113反射转向回到第四波片114,变为p偏振态到,再依次经第一偏振分光棱镜102、第二偏振分光棱镜104透射后,经过偏振片105形成第一条参考光束;透射参考光经过第三波片112到反射镜111,经反射镜111反射回第三波片112后变为s偏振态到第一偏振分光棱镜102,再经第一偏振分光棱镜102反射至第二波片103后变为p偏振态,再依次经第二偏振分光棱镜104透射和偏振片105形成第二条参考光束;

[0033] 第一路测量光与第一条参考光束合光形成了一束干涉测量光信号入射至第一光电探测器106,第二路测量光与第一条参考光束合光形成了另一束干涉测量光信号入射至第二光电探测器107,第一光电探测器106和第二光电探测器107分别把接收到的干涉测量光信号转换为电信号,对电信号进行解算即可得到曝光光束的相位。

[0034] 如图2所示的采用本发明方法的激光干涉光刻系统可选实施例,包括激光相位测量干涉仪1、控制器2、激光器3、第一声光调制器4、第一反射镜5、第二反射镜6、光栅7、第二声光调制器8、第三声光调制器9、第三反射镜10、第一透镜11、第二透镜12、第四反射镜13、分光棱镜14、第三透镜15、第五反射镜17、第四透镜18和第六反射镜19,所述第一透镜11、第二透镜12、第三透镜15和第四透镜18都是凸透镜,其中控制器2包括信号接收端201、显示屏202、解算模块203和执行模块204,信号接收端201分别与激光相位测量干涉仪1的第一光电探测器106和第二光电探测器107连接,解算模块203分别与显示屏202、信号接收端201和执行模块204连接,执行模块204分别与第二声光调制器8和第三声光调制器9连接,显示屏202实现数据可视化;该系统的光路结构如下:

[0035] 激光器3发出光源经过第一声光调制器4分出零级衍射光与一级衍射光;

[0036] 零级衍射光依次经过第一反射镜5、光栅7后分为两束光：其中一束光经第二声光调制器8，附加频率 $f_{s2}$ ，再依次经第五反射镜17、第三反射镜10和第一透镜11至分光棱镜14，分光棱镜14透射后再经过第三透镜15聚焦至基底16曝光，分光棱镜14对该束光反射成为激光相位测量干涉仪1的第二条输入光束；另一束光经第三声光调制器9，附加频率 $f_{s1}$ ，再依次经第四反射镜13和第二透镜12至分光棱镜14，分光棱镜14反射后再经过第三透镜15聚焦至基底16曝光，分光棱镜14对该束光透射成为激光相位测量干涉仪1的第一条输入光束；

[0037] 一级衍射光作为参考光附加频率 $f_{s3}$ ，依次经过第二反射镜6、第六反射镜19和第四透镜18成为激光相位测量干涉仪1的第三条输入光束；

[0038] 第一条输入光束、第二条输入光束和第三条输入光束经激光相位测量干涉仪1处理中形成第一路测量光、第二路测量光、第一条参考光束和第二条参考光束，且第一路测量光和第一条参考光束合光为一束干涉测量光信号，第二路测量光和第二条参考光束合光为另一束干涉测量光信号；附加频率 $f_{s1}=f_{s2}$ ，两束干涉测量光信号频率相同，当激光干涉光刻曝光周期改变时，测量光的间距改变，向第三偏振分光棱镜中心或边缘偏移，外差测量光束向第三偏振分光棱镜中心或边缘偏移相同距离，可保证测量光和参考光束始终保持合束形成干涉测量光信号，干涉测量光信号强度并不会随之改变，获得的两束干涉测量光信号分别入射至第一光电探测器106和第二光电探测器107，由第一光电探测器106和第二光电探测器107将光信号转换为电信号传输至信号接收端201，信号接收端201给到解算模块203进行解算得到曝光光束的相位，当相位测量结果表明相位发生偏移时，根据曝光光束相位漂移信息生成补偿指令传输给执行模块204，由执行模块204把补偿指令下达给第二声光调制器8和第三声光调制器9对曝光光束进行相位调制，以完成对曝光条纹相位漂移的锁定，由此实现对激光干涉光刻变周期曝光的实时条纹控制。

[0039] 以下对本发明方法所采用的激光相位测量干涉仪的干涉测量光信号形成原理做进一步说明：

[0040] 第一条输入光束 $s_1$ 的光矢量矩阵可表示为：

$$[0041] \quad E_{s1} = E_1 \exp(-2\pi f_{s1}t + \varphi_{s1}) \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

[0042] 式中：

[0043]  $E_{s1}$ 表示第一条输入光束 $s_1$ 的光矢量矩阵；

[0044]  $E_1$ 表示第一条输入光束 $s_1$ 的振幅；

[0045]  $i$ 表示虚数单位；

[0046]  $f_{s1}$ 表示包含附加频率的第一条输入光束 $s_1$ 的振动频率；

[0047]  $t$ 表示激光在空间中向前传播的时间；

[0048]  $\varphi_{s1}$ 表示第一条输入光束 $s_1$ 的初始相位；

[0049] 第二条输入光束 $s_2$ 的光矢量矩阵可表示为：

$$[0050] \quad E_{s2} = E_2 \exp(-2\pi f_{s2}t + \varphi_{s2}) \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

[0051] 式中：

[0052]  $E_{s2}$ 表示第二条输入光束 $s_2$ 的光矢量矩阵；

[0053]  $E_2$ 表示第二条输入光束 $s_2$ 的振幅；



[0054]  $f_{s2}$ 表示包含附加频率的第二条输入光束s2的振动频率；

[0055]  $\Phi_{s2}$ 表示第二条输入光束s2的初始相位；

[0056] 第三条输入光束s3是外差测量参考光束，其的光矢量矩阵可表示为：

$$[0057] \quad E_{s3} = E_3 \exp i(-2\pi f_{s3}t + \varphi_{s3}) \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

[0058] 式中：

[0059]  $E_{s3}$ 表示第三条输入光束s3的光矢量矩阵；

[0060]  $E_3$ 表示第三条输入光束s3的振幅；

[0061]  $f_{s3}$ 表示包含附加频率的第三条输入光束s3的振动频率；

[0062]  $\Phi_{s3}$ 表示第三条输入光束s3的初始相位；

[0063] 第一路测量光由第一条输入光束s1经由光路： $s1 \rightarrow \text{PBSR3}$  (第三偏振分光棱镜反射)  $\rightarrow \text{PBSR2}$  (第二偏振分光棱镜反射)  $\rightarrow \text{PF}$  ( $45^\circ$ 布置的偏振片) 形成，所以第一路测量光的光矢量为：

$$[0064] \quad E_{s11} = J_{PF} J_{PBSR3} J_{PBSR2} E_{s1} = E_1 \exp i(-2\pi f_{s1}t + \varphi_{s1}) \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix}$$

[0065] 式中：

[0066]  $E_{s11}$ 表示第一路测量光的光矢量矩阵；

[0067]  $J_{PF}$ 表示偏振片透射光路的琼斯矩阵；

[0068]  $J_{PBSR2}$ 表示第二偏振分光棱镜反射光路的琼斯矩阵；

[0069]  $J_{PBSR3}$ 表示第二偏振分光棱镜反射光路的琼斯矩阵；

[0070] 第一条参考光束由第三条输入光束s3分光后形成，经历的光路为： $s3 \rightarrow \text{QW1}$  (快轴呈 $45^\circ$ 布置的第一波片)  $\rightarrow \text{PBSR1}$  (第一偏振分光棱镜反射)  $\rightarrow \text{QW4}$  (快轴呈 $45^\circ$ 布置的第四波片)  $\rightarrow \text{RR}$  (后向反射镜)  $\rightarrow \text{QW4}$  (快轴呈 $45^\circ$ 布置的第四波片)  $\rightarrow \text{PBST1}$  (第一偏振分光棱镜透射)  $\rightarrow \text{PBST2}$  (第二偏振分光棱镜透射)  $\rightarrow \text{PF}$  ( $45^\circ$ 布置的偏振片)，所以第一条参考光束的光矢量为：

$$E_{s31} = J_{PF} J_{PBST1} J_{PBST2} J_{QW1} J_{RR} J_{QW4} J_{PBSR1} J_{QW4} E_{s3}$$

$$[0071] \quad = E_3 \exp i(-2\pi f_{s3}t + \varphi_{s3}) \begin{bmatrix} 1 + i \\ 1 + i \end{bmatrix}$$

[0072] 式中：

[0073]  $E_{s31}$ 表示第一条参考光束的光矢量矩阵；

[0074]  $J_{PBST1}$ 表示第一偏振分光棱镜透射光路的琼斯矩阵；

[0075]  $J_{PBST2}$ 表示第二偏振分光棱镜透射光路的琼斯矩阵；

[0076]  $J_{QW1}$ 表示第一波片透射光路的矩阵；

[0077]  $J_{QW4}$ 表示第四波片透射光路的矩阵；

[0078] 第一路测量光与第一条参考光束合光形成一束干涉测量信号入射至第一光电探测器106，所以可得到第一光电探测器106所获得的干涉测量信号的光强值：

$$[0079] \quad I_1 = (E_{s11} + E_{s31})(E_{s11} + E_{s31})^* = E_1^2 + E_3^2 + 2E_1E_3 \cos(-2\pi\Delta f_1t + \Delta\varphi_1)$$

[0080] 式中：

[0081]  $I_1$ 表示第一路测量光与第一条参考光束合光形成的干涉测量光信号光强；

[0082]  $\Delta f_1$ 表示第一路测量光与第一条参考光束合光形成的干涉测量光信号的振动频率；

[0083]  $\Delta\varphi_1$ 表示第一路测量光与第一条参考光束合光形成的干涉测量光信号的相位；

[0084] 第二路测量光由第二条输入光束s2经由光路： $s_2 \rightarrow \text{PBSR3}$  (第三偏振分光棱镜反射)  $\rightarrow \text{PBSR2}$  (第二偏振分光棱镜反射)  $\rightarrow \text{PF}$  ( $45^\circ$ 布置的偏振片) 形成，所以第二路测量光的光矢量为：

$$[0085] \quad E_{s21} = J_{PF} J_{PBSR2} J_{PBSR3} E_{s2} = E_2 \exp i(-2\pi f_{s2} t + \varphi_{s2}) \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix}$$

[0086] 式中：

[0087]  $E_{s21}$ 表示第二路测量光的光矢量矩阵；

[0088] 第二条参考光束由第三条输入光束s3分光后形成，经历光路为： $s_3 \rightarrow \text{QW1}$  (快轴呈 $45^\circ$ 布置的第一波片)  $\rightarrow \text{PBST1}$  (第一偏振分光棱镜透射)  $\rightarrow \text{QW3}$  (快轴呈 $45^\circ$ 布置的第三波片)  $\rightarrow \text{R}$  (反射镜)  $\rightarrow \text{QW3}$  (快轴呈 $45^\circ$ 布置的第三波片)  $\rightarrow \text{PBSR1}$  (第一偏振分光棱镜反射)  $\rightarrow \text{HW}$  (呈 $45^\circ$ 布置的第二波片)  $\rightarrow \text{PBST2}$  (第二偏振分光棱镜透射)  $\rightarrow \text{PF}$  ( $45^\circ$ 布置的偏振片)，所以第二条参考光束的光矢量为：

$$E_{s32} = J_{PF} J_{PBST1} J_{HW} J_{PBSR1} J_{QW1} J_R J_{QW3} J_{PBST2} J_{QW3} E_{s3}$$

$$[0089] \quad = E_3 \exp i(-2\pi f_{s3} t + \varphi_{s3}) \begin{bmatrix} 1 + i \\ 1 + i \end{bmatrix}$$

[0090] 式中：

[0091]  $E_{s32}$ 表示第二条参考光束的光矢量矩阵；

[0092]  $J_{PBSR1}$ 表示第一偏振分光棱镜反射光路的琼斯矩阵；

[0093]  $J_{QW3}$ 表示第三波片透射光路的矩阵；

[0094]  $J_{HW}$ 表示第二波片透射光路的矩阵；

[0095] 第二路测量光与第二条参考光束合光形成另一束干涉测量信号入射至第二光电探测器107，所以可得到第二光电探测器107所获得的干涉测量信号的光强值：

$$[0096] \quad I_2 = (E_{s21} + E_{s32})(\overline{E_{s21} + E_{s32}}) = E_2^2 + E_3^2 + 2E_2 E_3 \cos(-2\pi \Delta f_2 t + \Delta\varphi_2)$$

[0097] 式中：

[0098]  $I_2$ 表示第二路测量光与第二条参考光束合光形成的干涉测量光信号光强；

[0099]  $\Delta f_2$ 表示第二路测量光与第二条参考光束合光形成的干涉测量光信号的振动频率；

[0100]  $\Delta\varphi_2$ 表示第二路测量光与第第二条参考光束合光形成的干涉测量光信号的相位；

[0101] 合光形成的两束干涉测量光信号具有相同频差，包含测量输入的光束s1、s2与输入的外差参考光s3的相位信息，转换为电信号后通过信号接收端传递到解算模块处理，即可解算出曝光光束的相位，完成对曝光光束的相位测量。

[0102] 当然，本发明还可有其它多种实施例，在不背离本发明精神及其实质的情况下，本领域技术人员可根据本发明做出各种相应的改变和变形，但这些相应的改变和变形都属于本发明的权利要求的保护范围。

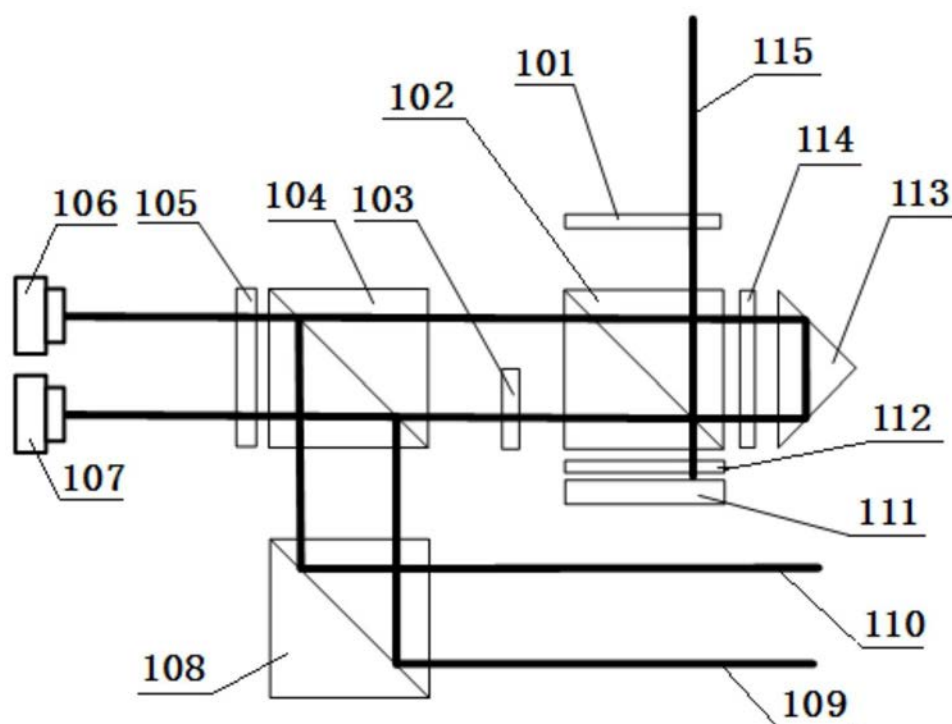


图1

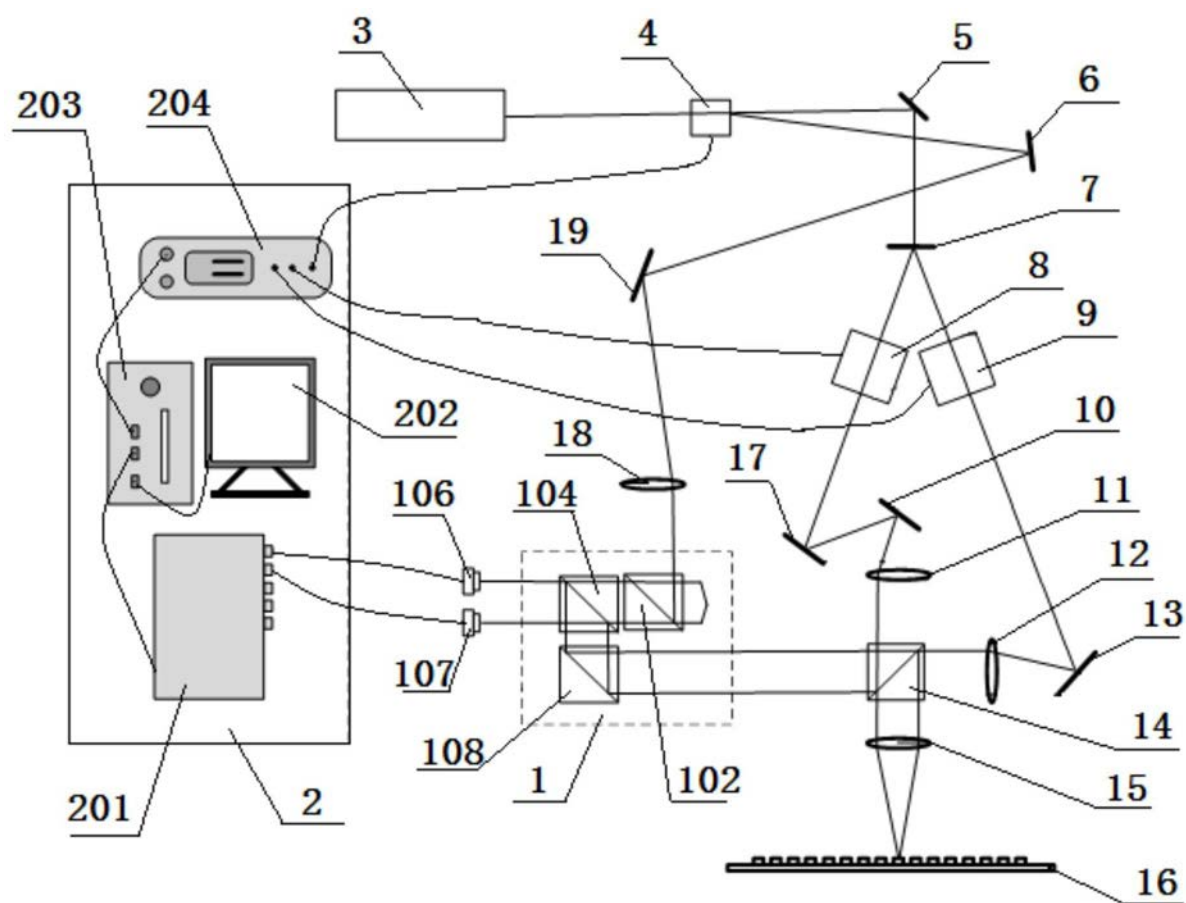


图2