

# 基于 ZYNQ 的用于间隙测量的白光干涉信号 处理系统\*

董晓璇<sup>1,2,3</sup>, 刘明刚<sup>1,2</sup>, 罗先刚<sup>1,2</sup>, 高平<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院微细加工光学技术国家重点实验室, 成都 610209; 2. 中国科学院光电技术研究所, 成都 610209;  
3. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘 要:** 为实现在表面等离子体光刻机中对掩模与基片间的间隙测量, 提出一种基于白光干涉测量技术的掩模-基片间隙测量方法, 并设计了以 ZYNQ 芯片为核心的信号处理系统。以 ZYNQ 芯片的片上 ARM 用作参数设定、驱动控制以及前端显示, 以可编程逻辑资源用于实现光谱数据的小波处理和互相关解调。系统以分布并行结构运行, 大大提高了测量速度, 并实现了对掩模-基片间隙的实时测量。最后为了确定测量精度, 搭建了激光干涉仪精度测试平台。测试实验表明, 间隙测量的重复测量精度为 4.4 nm, 位移测量精度为 6.7 nm, 满足间隙测量性能稳定和精度高等要求。

**关键词:** 间隙测量; 白光干涉; ZYNQ 芯片; 互相关算法

**中图分类号:** TN911.74 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-488X(2020)04-0277-07

## White Light Interference Signal Processing System for Gap Measurement Based on ZYNQ

DONG Xiaoxuan<sup>1,2,3</sup>, LIU Minggang<sup>1,2</sup>, LUO Xiangang<sup>1,2</sup>, GAO Ping<sup>1,2</sup>

(1. *State Key Laboratory of Optical Technologies on Nano-fabrication and Micro-engineering, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, CHN*; 2. *Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, CHN*; 3. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, CHN*)

**Abstract:** In order to realize the gap measurement between the mask and the substrate in the surface plasma lithography machine, a gap measurement method of the mask-substrate gap was proposed based on white light interferometry, and a signal processing system was designed based on ZYNQ. ZYNQ's on-chip ARM was used for parameter setting, drive control, and front-end display. The programmable logic resources were used to realize wavelet processing and cross-correlation demodulation of spectral data. This system operated in a distributed parallel structure, which could greatly improve

收稿日期: 2020-06-19

\* 基金项目: 国家自然科学基金项目(61875202), 国家重点研发计划(2019YFF0216400)

作者简介: 董晓璇(1995—), 男, 硕士研究生, 主要从事表面等离子体光刻机间隙检测方面的研究; (E-mail: dong\_zeto@sina.com)

刘明刚(1980—), 男, 助理研究员, 主要从事表面等离子体光刻机控制方面的研究;

罗先刚(1970—), 男, 研究员, 主要从事微纳光刻、亚波长电磁学、结构功能材料等方面的研究。(E-mail: lxg@ioe.ac.cn)

the detection speed, and realize the real-time measurement of the mask-substrate gap. Finally, in order to determine the measurement accuracy, a laser interferometer accuracy test platform were built. Test experiments showed that the repeat measurement accuracy was 4.4 nm, and the displacement measurement accuracy was 6.7 nm. It could satisfy the gap measurement system requirements of stabilization and higher precision.

**Key words:** gap measurement; white light interference; ZYNQ chip; cross-correlation algorithm

## 引 言

在半导体芯片制造过程中,光刻机中掩模与基片的定位精度直接影响芯片加工的线宽,因此在光刻机中需设计高精度的测量系统,以保证光刻机中掩模与基片的定位精度<sup>[1]</sup>。表面等离子体光刻(Surface plasmon lithography, SPL)是一种新型的光刻技术,其不受传统光刻技术中衍射极限的限制,因此具有很高的研究价值<sup>[2-3]</sup>。但其会受到自身超低工作距的限制,这进一步提高了对掩模与基片间间隙测量的要求。

对于光刻机中的间隙测量,可以实现纳米级精度测量的方法主要有电容电感传感器、激光干涉仪、X射线干涉仪、F-P干涉仪和光栅干涉仪等测量技术<sup>[4-7]</sup>。但以上各测量技术往往实现的是相对测量,并由于需要添加各种附加测量设备、设备价格昂贵等原因,难以投入到SP光刻场景中。与以上测量技术对应的白光干涉测量技术通过宽带光在被测结构中形成干涉,通过对干涉光谱进行分析以实现光程差测量,进而实现对被测物理量的测量<sup>[8-11]</sup>。由于其测量系统简单,无需添加各种复杂设备,可实现对间隙的绝对测量,并具有高测量精度,可以很好地用于SP光刻中对掩模与基片的间隙测量。

为此,文中提出了一种基于白光干涉测量技术对掩模与基片间间隙进行测量的方法,并根据间隙测量算法的特点,设计了基于ZYNQ芯片的实时测量系统。使用的ZYNQ芯片包含有可编程逻辑(PL端)和片内ARM(PS端),结合了可编程逻辑易于实现高速数据处理和片内ARM易于实现任务切换、驱动控制和前端显示的特点。设计的间隙测量系统无需添加复杂装置,即可对掩模与基片间间隙实现实时测量。精度测试实验表明,系统具有简单便捷、性能稳定、实时性强和精度高等特点。

## 1 实现原理

### 1.1 白光干涉模型

结合表面等离子体光刻中掩模与基片的GPG膜层结构,建立了如图1(a)所示的多层膜系结构的白光干涉腔体模型。其具体结构为 $\text{SiO}_2$ -Cr-空气-Ag-Pr-Ag-Si,可纵向划分为石英玻璃掩模板、空气间隙、表面等离子体激发层、光刻胶和硅基底。

图1(b)显示了白光光束的入射模型,入射光束从掩模层入射,光束在间隙内不断地反射,并使射出光束的相位随光程的变化而产生改变,使得反射

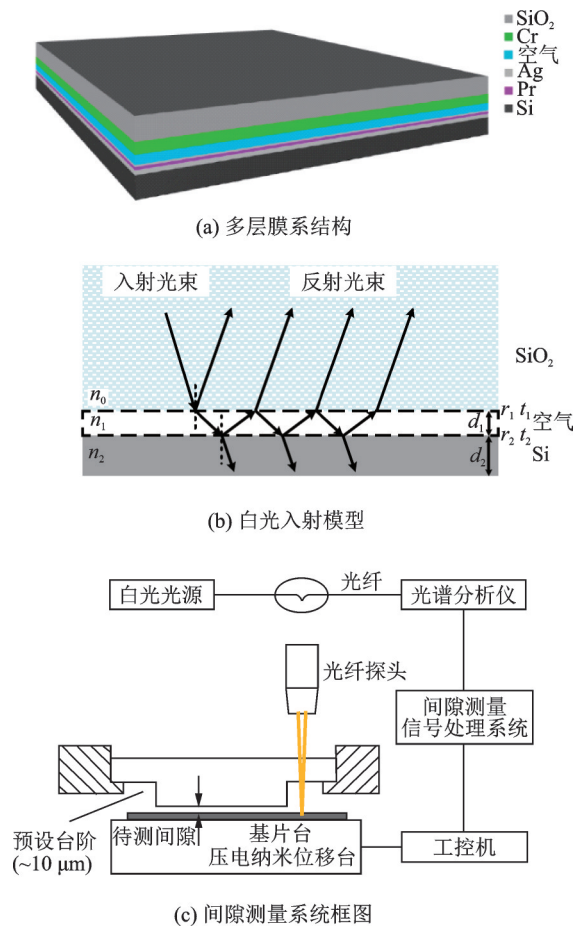


图 1 白光干涉间隙测量

Fig.1 White light interference gap measurement

光方向产生多光束并发生多光束干涉。根据相关光学原理<sup>[12]</sup>,可得反射光束在干涉场上的光谱为:

$$I(\lambda) = \frac{R_1 + R_2 + 2\sqrt{R_1 R_2} \cos\left(\frac{4\pi d}{\lambda}\right)}{1 + R_1 R_2 + 2\sqrt{R_1 R_2} \cos\left(\frac{4\pi d}{\lambda}\right)} \quad (1)$$

其中  $R_1$  和  $R_2$  为两个界面的反射系数的平方,  $d$  为掩模与基片间的间隙。

由公式(1)可知白光干涉的产生是因为光束在掩模-基片间隙反射过程中产生了时延与相位变化,即可以通过处理干涉光谱实现对被测物理量的测量。为避免扫描干涉测量伴随的  $1/2$  波长问题,文中实验通过光谱域相位测量方法实现。同时由公式(1)可知,所得光谱为一种周期随波长变化的啁啾信号,为避免变化周期增加解调复杂度,文中采用互相关算法进行间隙解调。

图1(c)显示了间隙测量系统的框图,即白光光源发出的白光通过光纤探头射入掩模-基片结构,之后采集反射光束并由光谱分析仪进行光谱分析,随后在文中信号处理系统中进行处理和间隙解调。

### 1.2 互相关算法间隙解调

通过互相关算法进行间隙解调的原理是:首先通过模拟生成一系列与所采集信号相对应的干涉光谱信号。在文中,若设定间隙值为  $d_e$ ,根据公式(1)即可得到所需要的一系列干涉光谱,这一系列干涉光谱间的差别在于预设间隙值  $d_e$  的不同。将所采集的干涉光谱信号与模拟生成的干涉光谱依次做互相关计算,可以得到其与每个模拟干涉光

谱相对应的互相关系数,通过比较互相关系数以实现间隙解调。

两信号的互相关系数即为其内积和,这里为两干涉光谱信号对应波长数据分别相乘后的和值。其可以用式(2)表示:

$$C(d_e) = \sum_{n=1}^N R(n)R'(n) \quad (2)$$

其中  $R(n)$  和  $R'(n)$  分别是文中所采集的和在互相关算法中模拟的干涉光谱信号。 $N$  为白光干涉光谱的采样点数,在文中实际测量中,其受到光谱分析仪中 CCD 阵列数目的限制。

为了测量被测间隙  $d$ ,改变  $R'(n)$  的预设间隙  $d_e$ ,依次计算对应的互相关系数。当  $R(n)$  与  $R'(n)$  的互相关系数  $C$  为所有互相关系数的最大值,即代表此时  $R(n)$  和  $R'(n)$  的相位分布最相近,拟合程度最高。因此依次计算互相关系数,当互相关系数取得最大值时,对应的预设间隙即为文中通过互相关算法测得的间隙。

## 2 系统实现设计

### 2.1 整体系统设计及数据传输

图2为整个系统的总体结构图,其中信号处理系统的配置与处理是在一块 Xilinx ZYNQ-7000 系列 XC7Z020CLG400-2 实验板上实现的。所用的 ZYNQ 芯片包含片上 ARM 处理器(PS 端)和可编程逻辑(PL 端)。其中 PL 端作为硬件处理器,用以实现对光谱数据的处理和间隙解调,PS 端用作参数设定、驱动控制以及交互显示。

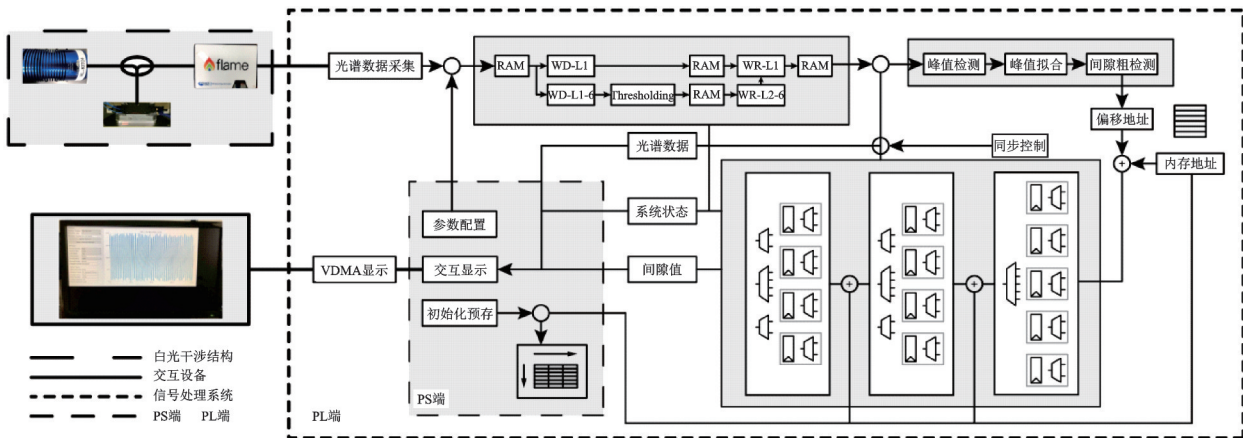


图2 系统总体结构图

Fig.2 Diagram of system structure

整个系统可以分为白光干涉结构、交互设备和信号处理系统:白光干涉结构实现对掩模-基片的白光干涉和干涉光谱采集;交互设备用于系统初始化参数配置和间隙值、光谱数据和系统状态的显示;信号处理系统接收来自光谱分析仪的光谱信号,通过对信号的处理与解调,测得掩模与基片间的间隙值。

信号处理系统的处理流程为:

- (1)系统启动,对系统中的参数进行配置,并对预先标定的数据进行初始化预存;
- (2)采集来自光谱分析仪的干涉光谱数据,并对数据存储;
- (3)通过小波处理去除原始光谱信号中的噪声;
- (4)通过峰-峰值算法进行粗检测;
- (5)根据粗检测的结果,转换为偏移地址,并通过互相关算法进行间隙解调,并得到间隙值;
- (6)将所测得的处理结果和系统状态在交互设备上交互显示。

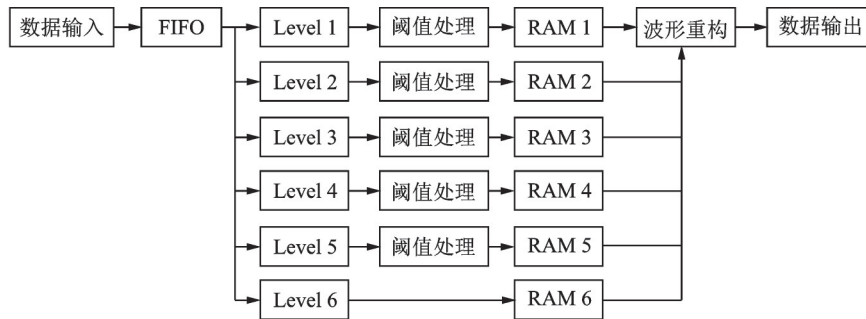
### 2.2 小波处理模块

由于文中是通过光纤探头与 CCD 光谱分析仪

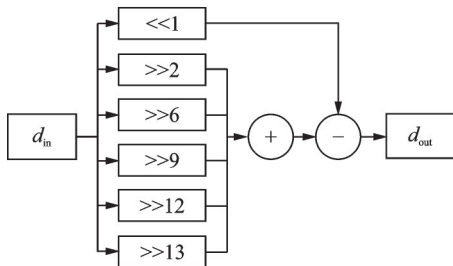
采集分析反射光束的,其过程会不可避免地产生干扰噪声。采集的白光干涉信号中存在的毛刺使得信号轮廓不光滑,未经处理直接解调信号时毛刺引发的峰值误定位会使测量结果产生误差。于是,文章在进行间隙解调前,先通过小波变换对其进行去噪处理。

小波处理模块可分为以下三部分:小波分解部分完成对信号的各阶分解,将信号分解为各阶细节分量与近似分量,这里为保证小波变换的效率,各阶的分解过程按照并行处理设计;阈值处理部分通过阈值处理去除分解得到的各阶细节分量中的高频噪声;小波重构部分完成信号重构,并得到去噪信号。

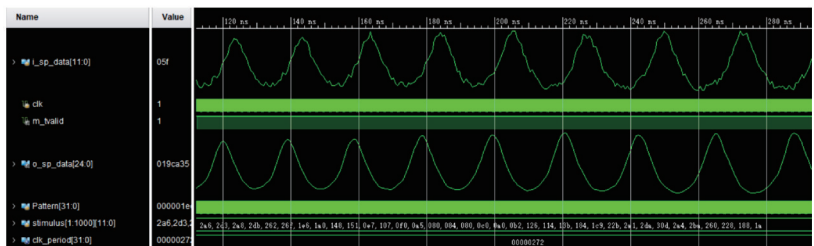
为保证去噪效果并减少计算量,文章将小波处理模块的阶数设置为 6 层,图 3(a)显示了小波处理模块的处理流程图。其流程为:(1)将光谱数据传入 FIFO,准备进行处理;(2)对光谱数据并行进行 1 至 6 阶的小波分解;(3)对含有噪声的 2 至 6 阶小波的细节分量进行阈值处理(其阈值通过对设定阈值的信噪比分析来确定),并分别存入相应的 RAM 中;(4)将 1 阶小波的近似分量和经阈值处理后的 2 至 6 阶小波的细节分量进行重构,实现对信号的去噪。



(a) 小波处理模块的流程图



(b) 浮点系数乘积的逻辑实现



(c) 仿真波形图

图 3 小波处理模块

Fig.3 Wavelet processing module

文章选用 db4 小波对信号进行处理,处理过程中的计算主要是算术运算,这里把浮点系数的乘运

算分解为多次移位相加。图 3(b)显示了浮点系数 1.732 05 的实现过程,文章将其分解为多次移位和,

即  $1.732\ 05=2-(1/4+1/64+1/512+1/4\ 096+1/8\ 192)$ 。这样可以在尽可能不降低精度的情况下,减少乘法器的使用,减少了设计所需逻辑资源,又提高了计算处理速度。

图 3(c)为小波处理模块的波形仿真图,其中  $i\_sp\_data$  为含有噪声的光谱信号,  $o\_sp\_data$  为经过去噪的光谱信号。可知原光谱信号中含有明显的噪声,经过小波处理模块很好地滤除了光谱信号中的噪声。

### 2.3 间隙解调模块

文章实现间隙解调的算法为互相关算法,但由于直接进行互相关解调会涉及大量的互相关计算,文章采用先通过峰-峰值算法进行间隙粗测量,随后再进行互相关间隙解调的思路。

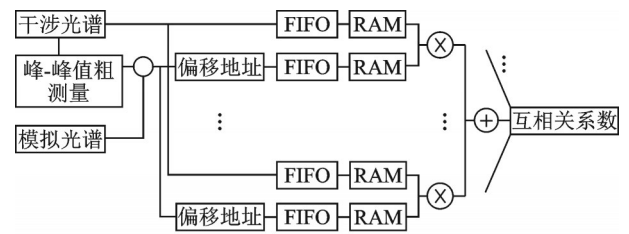
图 4(a)为进行单次互相关系数计算的流程图,其主要过程为:

- (1)由峰-峰值算法对干涉光谱进行粗测量;
- (2)将粗测量结果转换为预设定间隙的范围,即对应模拟光谱的偏移地址范围;
- (3)将用于互相关计算的干涉光谱数据和模拟光谱数据由 FIFO 传入各对应 RAM 中;
- (4)将 RAM 内各组数据进行乘计算(实际为 8 组),并将各乘计算结果相加;
- (5)循环进行多次计算,并得到互相关系数的计算结果。

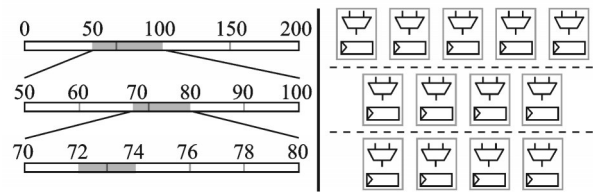
由于在 FPGA 中生成模拟干涉光谱信号会涉及大量重复性计算并消耗大量逻辑资源,而且在白光干涉结构不变的情况下(如 Cr 膜厚度等),如预设定间隙  $d_c$  不变则对应的模拟干涉光谱信号总是相同的。因此文章预先生成模拟干涉光谱信号,并在

系统启动时的 PS 端启动进程内将其存储到 DDR 中,之后计算互相关系数时,根据不同的 DDR 地址偏移量,即可从 DDR 中读取到对应干涉光谱信号,并用于计算互相关系数。

另外由于互相关系数求解的过程中涉及大量重复性计算,为进一步减少计算量,文章在互相关解调过程中采用了分层检测的思路。即通过多层的检测,逐渐缩小求解区间以确定最大互相关系数。并在各层的求解过程,采用流水线结构设计,以减少运算时间。图 4(b)为互相关解调模块的分层检测结构示意图。



(a) 单次互相关系数计算流程图



(b) 分层检测结构示意图

图 4 互相关解调模块

Fig.4 Cross-correlation demodulation module

图 5 为通过 Vivado 的 ila 工具抓取的间隙解调模块的数据处理时序图。图中  $do\_cc\_offset$  为偏移地址,  $do\_cc\_redu$  为解调间隙,  $do\_cc\_sta$  为检测层数。可知,通过间隙解调模块对干涉光谱数据进行分析处理,实现了间隙解调。

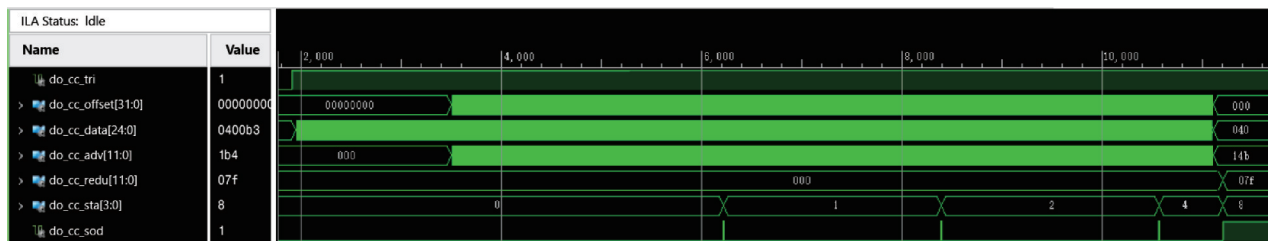


图 5 间隙解调模块数据处理时序图

Fig.5 Data processing sequence diagram of gap demodulation module

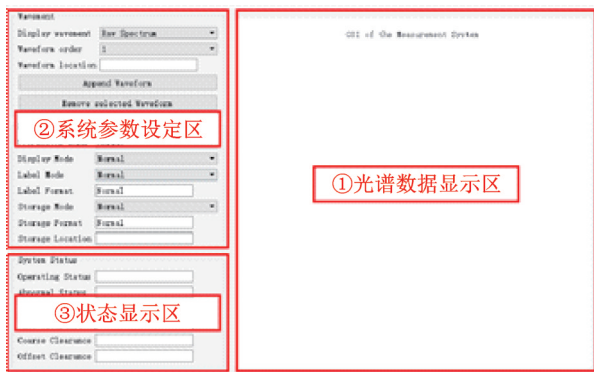
### 2.4 交互显示模块

Qt 是一个跨平台的图形用户界面开发框架,使用 C++ 编程语言可以方便地设计人机交互界面,

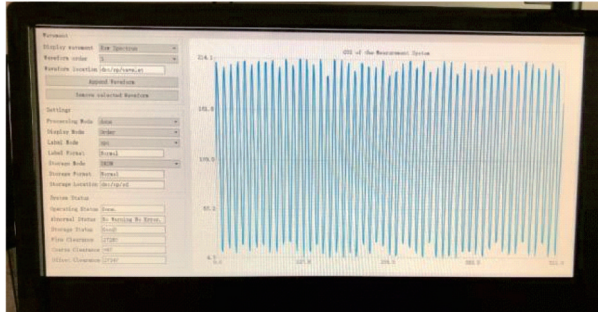
并且移植到嵌入式开发平台上。为了实现参数设定和测量数据实时显示,文章基于 Qt5.9 设计了一个友好的交互显示界面,用于参数的设定、光谱数

据和检测结果的显示和对系统状态的实时监控。此交互显示界面在 Qt 设计完成后,使用 arm-linux-gnueabi-hf-gcc 交叉编译工具链对代码进行交叉编译,通过 NFS 服务的 mount 操作移植挂载并运行于 ZYNQ 芯片上的 PS 端系统中。

图 6 为本系统设计的交互显示模块的界面布局与实际运行图。此交互显示界面的布局可分为三部分:光谱数据显示区,用来显示采集和处理后的干涉光谱数据;系统参数设定区,用来设定系统参数和数据的存储参数;状态显示区,用来显示系统的当前状态和当前间隙值。



(a) 交互显示界面布局



(b) 实际运行图

图 6 交互显示模块

Fig.6 Interactive display module

### 3 测试实验与性能测试

#### 3.1 检测环境与测试平台

为了评价测量系统的测量精度,文中设计了图 7 所示基于激光干涉仪的精度测试平台。平台中涉及的主要设备有:白光光源(OceanOptics @ HL-2000-LL)、光谱分析仪(OceanOptics @ Flame-UV-VIS)、FTP 光纤探头(QR400-7-UV-VIS)、掩模、基片、纳米位移台和激光干涉仪(Renishaw @ XL-80)。其中激光干涉仪在测试环境中的测量精度在 1 nm 以内,文中将其检测结果作为参考结果,用来确定间隙测量系统的测量精度。图中红蓝两种颜

色的线路分别显示了平台中的两组光路,蓝色为用于间隙测量的光路,红色为用于激光干涉仪校准测量的光路。

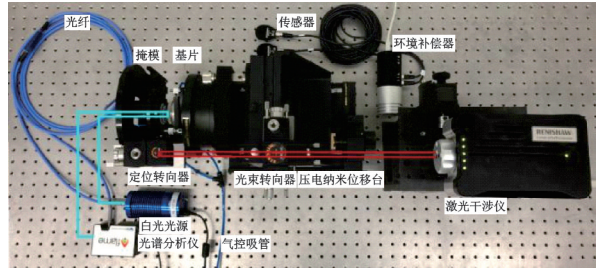


图 7 精度测试平台

Fig.7 Platform of accuracy test

图 8 为间隙测量流程图。进行测量时,首先进行位移台初始化与仪器复位校准,并在测试平台中固定掩模与基片。随后控制位移台调整间隙检测面,直到可以采集到干涉光谱,之后进行多次间隙测量,在测量过程中根据需要控制位移台对间隙检测面进行相应调整,并丢弃测量过程中采集到的无效光谱信号。最后根据测量结果计算测量精度,结束检测并复位位移台。

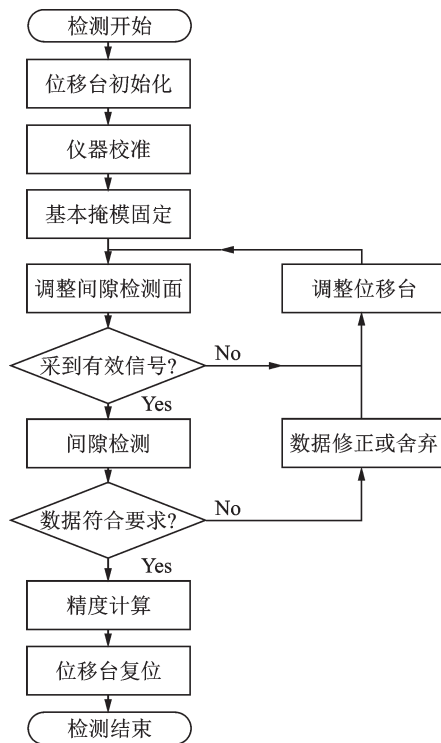


图 8 间隙测量流程图

Fig.8 Flow chart of gap measurement

#### 3.2 性能测试与结果分析

在精度测试平台中,对固定间隙的掩模-基片结

构进行多次重复测量,以分析系统对间隙的测量精度。表1为对固定间隙的掩模-基片结构的测量结果统计。

**表1 间隙测量结果统计(单位:nm)**  
**Tab.1 Results of gap measurement( Unit: nm)**

测量次数	测得间隙	间隙残差	3σ
1	5 048	1.875	
2	5 045	-1.125	
3	5 043	-2.125	
4	5 046	-0.125	
5	5 045	-1.125	4.373
6	5 044	-0.125	
7	5 047	0.875	
8	5 048	1.875	
均值	5 046.125	—	

由表1中测量结果可知,本白光干涉间隙测量系统对掩模与基片间的空气间隙进行间隙测量,间隙测量的重复测量精度为4.4 nm。

随后分别固定掩模与基片。在每次测量过程中,通过调整压电位移台使基片移动固定距离,并在基片移动前后分别进行间隙测量,以实现位移量的测量,并分析系统对位移量的测量精度。表2为位移量的测量结果统计。

**表2 位移量测量结果统计(单位:nm)**  
**Tab.2 Results of displacement measurement( Unit: nm)**

测量次数	位移量	初始间隙	最终间隙	间隙差值	位移残差
1		17 997	28 322	10 325	0.875
2		19 002	29 326	10 324	-0.125
3		19 998	30 321	10 323	-1.125
4		20 998	31 320	10 322	-2.125
5	10 325	21 010	31 334	10 324	-0.125
6		22 006	32 327	10 321	-3.125
7		22 993	33 319	10 326	1.875
8		24 006	34 333	10 328	3.875
均值	10 325	—	—	10 324.125	—
3σ	—	—	—	6.696	—

表2中,初始间隙和最终间隙分别为在基片运动前后通过文中所设计间隙测量系统对空气间隙进行测量的结果,其相减即可得到间隙差值。实验

中通过激光干涉仪确定基片位移量,与其对应的即为表中的位移量。由表中数据可知,系统的位移量测量精度为6.7 nm。

## 4 结 论

文中提出并设计了基于ZYNQ的白光干涉间隙测量系统。系统集对白光干涉光谱信号的处理与解调于一体,系统以并行的流水线结构,大大提高了检测速度,并实现了对掩模与基片间的间隙值的实时测量与输出。精度测量实验表明,系统能够快速稳定地实现对掩模与基片间的工作间隙的测量,间隙测量的重复测量精度约为4.4 nm,位移测量的精度约为6.7 nm。设计的测量系统满足了SP光刻对间隙测量的严苛要求,具有很好的实用意义。

## 参 考 文 献

- [1] 姚汉民, 胡 松, 邢廷文. 光学投影曝光微纳加工技术[M]. 北京:北京工业大学出版社, 2006.
- [2] 蒲明博, 王长涛, 王彦钦, 等. 衍射极限尺度下的亚波长电磁学[J]. 物理学报, 2017, 66(14): 27-40.
- [3] 王长涛, 赵泽宇, 高 平, 等. 表面等离子体超衍射光学光刻[J]. 科学通报, 2016, 61(06): 585-599.
- [4] 吕 强, 王 玮, 刘兆武, 等. 多维自由度衍射光栅精密测量系统[J]. 中国光学, 2020, 13(01): 189-202.
- [5] 朱均超, 许虹虹, 张海彤, 等. 基于激光自混合干涉的高精度角度测量方法[J]. 激光与红外, 2020, 50(01): 37-41.
- [6] 邢 旭, 常 笛, 胡鹏程, 等. 空间分离式外差二自由度平面光栅干涉仪[J]. 光学精密工程, 2019, 27(08): 1727-1736.
- [7] HU Pengcheng, CHANG Di, TAN Jiubin, et al. Displacement measuring grating interferometer: a review[J]. Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering, 2019, 20(05): 631-655.
- [8] Xu Z, Shilpiekandula V, Youcef-Toumi K, et al. White-light scanning interferometer for absolute nano-scale gap thickness measurement [J]. Optics Express, 2009, 17(17): 15104-15117.
- [9] Wang Z, Jiang Y, Ding W, et al. A cross-correlation based fiber optic white-light interferometry with wavelet transform denoising [C]. Fourth Asia Pacific Optical Sensors Conference, International Society for Optics and Photonics, 武汉, 2013, 8924: 89241J.
- [10] 江 毅, 高红春, 贾景善. 光谱域光纤白光干涉测量技术[J]. 计测技术, 2018(3): 31-42.
- [11] 王振兴, 江 毅, 王素梅, 等. 基于光纤白光干涉测量技术的折射率测量仪[J]. 光学技术, 2016, 42(06): 487-490.
- [12] 马科斯·珀恩, 埃米尔·沃尔夫, 杨霞菽. 光学原理[M]. 北京: 电子工业出版社, 2016.