



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 113607084 A

(43) 申请公布日 2021. 11. 05

(21) 申请号 202110916532.X

(22) 申请日 2021.08.11

(71) 申请人 浙江大学

地址 310058 浙江省杭州市西湖区余杭塘路866号

(72) 发明人 张可欣 梁宜勇 李国忠

(74) 专利代理机构 杭州求是专利事务有限公司 33200

代理人 林超

(51) Int. Cl.

G01B 11/24 (2006.01)

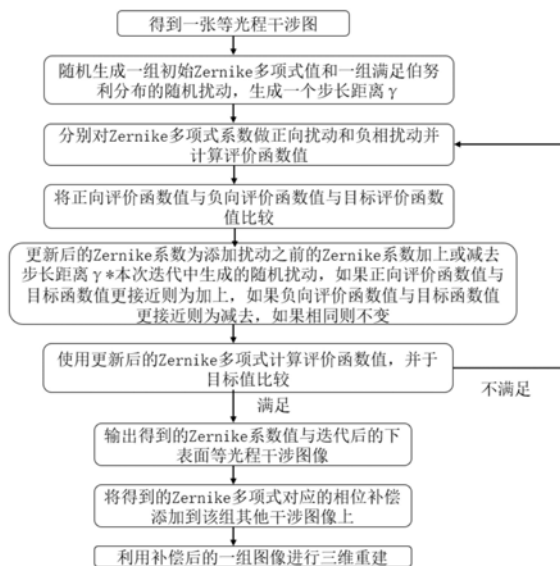
权利要求书2页 说明书5页 附图4页

(54) 发明名称

基于白光干涉及SPGD的亚毫米沟槽结构的测量方法

(57) 摘要

本发明公开了一种基于白光干涉及SPGD的亚毫米沟槽结构的测量方法。包括：搭建白光干涉系统，利用白光干涉系统测量待测沟槽样品的结构，相机探测采集待测沟槽样品的等光程干涉图；进行灰度处理后获得沟槽灰度干涉图，计算沟槽灰度干涉图的对比度和高频信息量；随机生成多项式系数，利用SPGD算法对多项式系数进行迭代优化后，获得优化后的多项式系数；控制变形镜对光路光程进行补偿，移动变形镜或待测沟槽样品，相机采集获得一组光程补偿后的沟槽干涉图及每张沟槽干涉图对应的编号；使用重心法进行图像重建，获得待测沟槽样品的三维结构重建图。本发明实现对亚毫米级别高深宽比结构沟槽进行形貌检测，探测结构的深度可达到毫米级别。



1. 一种基于白光干涉及SPGD的亚毫米沟槽结构的测量方法,其特征在于,包括以下步骤:

1) 搭建白光干涉系统,包括光源、分光镜、CCD相机和变形镜;光源产生白光入射到分光镜中发生透射和反射,分光镜的透射光通过变形镜的反射后入射回分光镜中,入射回分光镜的光在分光镜中产生反射,反射后的光束作为第一光束并入射至CCD相机中;分光镜的反射光通过待测沟槽样品的反射后入射回分光镜中产生透射,透射后的光束作为第二光束并入射至CCD相机中;第一束光与第二束光产生干涉被CCD相机所探测,CCD相机探测采集获得沟槽干涉图;

2) 沿光轴方向平行的方向移动白光干涉系统的变形镜或待测沟槽样品,使得白光干涉系统中的变形镜与分光镜之间沿光轴方向的距离等于待测沟槽样品的任意一个待测表面与分光镜之间沿光轴方向的距离,利用白光干涉系统测量待测沟槽样品的结构,按照步骤1)的处理方式进行CCD相机探测采集获得沟槽干涉图作为待测沟槽样品的等光程干涉图;

3) 对等光程干涉图进行灰度处理后获得对应的沟槽灰度干涉图,计算沟槽灰度干涉图的对比度和高频信息量并作为所需优化参数;随机生成Zernike多项式系数,根据所需优化参数,利用SPGD算法对Zernike多项式系数进行迭代优化后,获得优化后的Zernike多项式系数;

4) 利用优化后的Zernike多项式系数控制白光干涉系统的变形镜,使变形镜发生形变,从而对光路光程进行补偿,沿光轴方向移动变形镜或待测沟槽样品,CCD相机采集获得一组光程补偿后的沟槽干涉图及每张沟槽干涉图对应的编号;

5) 使用重心法对获得的一组光程补偿后的沟槽干涉图及每张沟槽干涉图对应的编号进行图像重建,获得待测沟槽样品的三维结构重建图。

2. 根据权利要求1所述的一种基于白光干涉及SPGD的亚毫米沟槽结构的测量方法,其特征在于,所述步骤2)具体为:

将待测沟槽样品倾斜放置或水平放置;如果是倾斜放置,则调整待测沟槽样品的倾斜角度,以及沿光轴方向移动白光干涉系统中的变形镜或待测沟槽样品,调整变形镜与分光镜之间或者待测沟槽样品与分光镜之间的距离,使得变形镜与分光镜之间的距离等于待测沟槽样品的任意一个待测表面与分光镜之间的距离,CCD相机所采集的图像上产生清晰的条纹,进而固定沟槽样品的倾斜角度、沟槽样品和平面镜,CCD相机探测采集待测沟槽样品的当前待测表面的等光程干涉图;

如果是水平放置,则沿光轴方向移动变形镜或待测沟槽样品,调整沟槽样品与分光镜之间的距离或变形镜与分光镜之间的距离,使变形镜与分光镜之间的距离等于待测沟槽样品的任意一个待测表面与分光镜之间的距离,CCD相机所采集的图像上产生清晰的条纹,进而固定沟槽样品和平面镜,CCD相机探测采集待测沟槽样品的当前待测表面的等光程干涉图。

3. 根据权利要求1所述的一种基于白光干涉及SPGD的亚毫米沟槽结构的测量方法,其特征在于,所述步骤3)具体为:

3.1) 对等光程干涉图进行灰度处理后获得对应的沟槽灰度干涉图,计算沟槽灰度干涉图的对比度和对沟槽灰度干涉图傅里叶变换后的高频信息量,将沟槽灰度干涉图的对比度和高频信息量作为所需优化函数值;

3.2) 随机生成一组初始的Zernike多项式系数;

3.3) 随机生成一组满足伯努利分布的小幅扰动, 小幅扰动的数目与Zernike多项式系数的数目一致; 将一组Zernike多项式系数依次全加上和全减去一组小幅扰动后, 分别生成一组加上小幅扰动后的Zernike多项式系数和一组减去小幅扰动后的Zernike多项式系数;

3.4) 分别计算一组加上小幅扰动后的Zernike多项式系数的对比度和高频信息量并作为第一优化函数值以及一组减去小幅扰动后的Zernike多项式系数的对比度和高频信息量并作为第二优化函数值, 将得到的第一、第二优化函数值与所需优化函数值进行比较;

3.5) 预设步长距离  $\gamma$ , 如果第一优化函数值与所需优化函数值的差值小于第二优化函数值与所需优化函数值的差值, 将小幅扰动乘上步长距离  $\gamma$  后再加到Zernike多项式系数, 获得更新后的Zernike多项式系数;

如果第一优化函数值与所需优化函数值的差值等于第二优化函数值与所需优化函数值的差值, 则Zernike多项式系数不变; 如果第一优化函数值与所需优化函数值的差值大于第二优化函数值与所需优化函数值的差值, 将小幅扰动乘上步长距离  $\gamma$  后的相反数再加到Zernike多项式系数, 获得更新后的Zernike多项式系数;

3.6) 重复步骤3.3) -3.5), 不断迭代优化Zernike多项式系数, 直至Zernike多项式系数的对比度和高频信息量等于沟槽灰度干涉图的对比度和高频信息量时迭代结束, 最终的Zernike多项式系数作为优化后的Zernike多项式系数。

4. 根据权利要求3所述的一种基于白光干涉及SPGD的亚毫米沟槽结构的测量方法, 其特征在于, 所述初始的Zernike多项式系数的数目与沟槽灰度干涉图对应的Zernike多项式系数的数目一致。

5. 根据权利要求3所述的一种基于白光干涉及SPGD的亚毫米沟槽结构的测量方法, 其特征在于, 所述小幅扰动的数量级在0.001-0.1之间。

## 基于白光干涉及SPGD的亚毫米沟槽结构的测量方法

### 技术领域

[0001] 本发明涉及了微机电系统 (MEMS) 器件测量领域的一种沟槽结构测量方法,具体涉及了一种基于白光干涉及SPGD(stochastic parallel gradient descent algorithm随机并行梯度下降算法)的亚毫米沟槽结构的测量方法。

### 背景技术

[0002] 现有对沟槽结构进行探测的技术中,主要有以下几种方式:分为接触式和非接触式方法。接触式是触针式轮廓仪,光学测量属于非接触式的测量技术。在光学测量技术中,包含探针法、扫描隧道显微镜法、激光聚焦法和干涉显微法。其中,探针法容易对出现断针现象,且容易对敏感元件造成破坏,接触式测量虽然在逐步缩小探针尺寸,但是随着待测样品表面结构越来越复杂,仍会有一部分区域无法探测到。扫描隧道显微镜主要原理是依据量子力学的隧道效应,粒子运动到高于粒子能量的壁垒也是有一定概率穿过壁垒的。扫描隧道显微镜的测量对象主要是微米或纳米级的样品,且是点式测量,逐点、逐线、逐面扫描,通常耗费时间长,效率较低,在被测样品上找到测量区域也需要耗费较长时间。激光聚焦法基本原理为,将由激光单元发生的计光经过反射将焦点信息反馈到差分光电器,然后通过计算机处理,控制聚焦式测头垂直方向的上下移动,以获得被测样品的表面形貌,工作区间约为微米量级。

[0003] 对于白光干涉测量技术,使用显微干涉结构进行测量,由于显微干涉光路中光是汇聚光,所以在实际过程中会收到显微镜头景深的限制,且由于光束的汇聚,如果焦面在探测沟槽样品底面之上,会产生干扰光。使用平行光干涉会增加样品的深度范围,理论上无论样品深度为多少都可以垂直入射到样品底部并垂直出射。现有技术中,多针对微米级别的沟槽结构,本发明主要针对亚毫米级别的沟槽结构进行仿真重建。

### 发明内容

[0004] 为了解决背景技术中存在的问题,本发明利用平行光白光干涉探测深度高,所得误差小的特点,提供了一种基于白光干涉及SPGD的亚毫米沟槽结构的测量方法,本发明将白光干涉与算法相结合,对亚毫米级别高深宽比结构的沟槽形貌进行检测。

[0005] 本发明的技术方案如下:

[0006] 本发明包括以下步骤:

[0007] 1) 搭建白光干涉系统,包括光源、分光镜、CCD相机和变形镜;光源产生白光入射到分光镜中发生透射和反射,分光镜的透射光通过变形镜的反射后入射回分光镜中,入射回分光镜的光在分光镜中产生反射,反射后的光束作为第一光束并入射至CCD相机中;分光镜的反射光通过待测沟槽样品的反射后入射回分光镜中产生透射,透射后的光束作为第二光束并入射至CCD相机中;第一束光与第二束光产生干涉被CCD相机所探测,CCD相机探测采集获得沟槽干涉图;

[0008] 2) 沿光轴方向平行的方向移动白光干涉系统的变形镜或待测沟槽样品,使得白光

干涉系统中的变形镜与分光镜之间沿光轴方向的距离等于待测沟槽样品的任意一个待测表面与分光镜之间沿光轴方向的距离,利用白光干涉系统测量待测沟槽样品的结构,按照步骤1)的处理方式进行CCD相机探测采集获得沟槽干涉图作为待测沟槽样品的等光程干涉图;

[0009] 3) 对等光程干涉图进行灰度处理后获得对应的沟槽灰度干涉图,计算沟槽灰度干涉图的对比度和高频信息量并作为所需优化参数;随机生成Zernike多项式系数,根据所需优化参数,利用SPGD算法对Zernike多项式系数进行迭代优化后,获得优化后的Zernike多项式系数;

[0010] 4) 利用优化后的Zernike多项式系数控制白光干涉系统的变形镜,使变形镜发生形变,从而对光路光程进行补偿,沿光轴方向移动变形镜或待测沟槽样品,CCD相机采集获得一组光程补偿后的沟槽干涉图及每张沟槽干涉图对应的编号;

[0011] 5) 使用重心法对获得的一组光程补偿后的沟槽干涉图及每张沟槽干涉图对应的编号进行图像重建,获得待测沟槽样品的三维结构重建图。

[0012] 所述步骤2) 具体为:

[0013] 将待测沟槽样品倾斜放置或水平放置;如果是倾斜放置,则调整待测沟槽样品的倾斜角度,以及沿光轴方向移动白光干涉系统中的变形镜或待测沟槽样品,调整变形镜与分光镜之间或者待测沟槽样品与分光镜之间的距离,使得变形镜与分光镜之间的距离等于待测沟槽样品的任意一个待测表面与分光镜之间的距离,CCD相机所采集的图像上产生清晰的条纹,进而固定沟槽样品的倾斜角度、沟槽样品和平面镜,CCD相机探测采集待测沟槽样品的当前待测表面的等光程干涉图;

[0014] 如果是水平放置,则沿光轴方向移动变形镜或待测沟槽样品,调整沟槽样品与分光镜之间的距离或变形镜与分光镜之间的距离,使变形镜与分光镜之间的距离等于待测沟槽样品的任意一个待测表面与分光镜之间的距离,CCD相机所采集的图像上产生清晰的条纹,进而固定沟槽样品和平面镜,CCD相机探测采集待测沟槽样品的当前待测表面的等光程干涉图。

[0015] 所述步骤3) 具体为:

[0016] 3.1) 对等光程干涉图进行灰度处理后获得对应的沟槽灰度干涉图,计算沟槽灰度干涉图的对比度和对沟槽灰度干涉图傅里叶变换后的高频信息量,将沟槽灰度干涉图的对比度和高频信息量作为所需优化函数值;

[0017] 3.2) 随机生成一组初始的Zernike多项式系数;

[0018] 3.3) 随机生成一组满足伯努利分布的小幅扰动,小幅扰动的数目与Zernike多项式系数的数目一致;将一组Zernike多项式系数依次全加上和全减去一组小幅扰动后,分别生成一组加上小幅扰动后的Zernike多项式系数和一组减去小幅扰动后的Zernike多项式系数;

[0019] 3.4) 分别计算一组加上小幅扰动后的Zernike多项式系数的对比度和高频信息量并作为第一优化函数值以及一组减去小幅扰动后的Zernike多项式系数的对比度和高频信息量并作为第二优化函数值,将得到的第一、第二优化函数值与所需优化函数值进行比较;

[0020] 3.5) 预设步长距离 $\gamma$ ,如果第一优化函数值与所需优化函数值的差值小于第二优化函数值与所需优化函数值的差值,将小幅扰动乘上步长距离 $\gamma$ 后再加到Zernike多项式

系数,获得更新后的Zernike多项式系数;

[0021] 如果第一优化函数值与所需优化函数值的差值等于第二优化函数值与所需优化函数值的差值,则Zernike多项式系数不变;如果第一优化函数值与所需优化函数值的差值大于第二优化函数值与所需优化函数值的差值,将小幅扰动乘上步长距离 $\gamma$ 后的相反数再添加到Zernike多项式系数,获得更新后的Zernike多项式系数;

[0022] 3.6) 重复步骤3.3) -3.5),不断迭代优化Zernike多项式系数,直至Zernike多项式系数的对比度和高频信息量等于沟槽灰度干涉图的对比度和高频信息量时迭代结束,最终的Zernike多项式系数作为优化后的Zernike多项式系数。

[0023] 所述初始的Zernike多项式系数的数目与沟槽灰度干涉图对应的Zernike多项式系数的数目一致。

[0024] 所述小幅扰动的数量级在0.001-0.1之间。

[0025] 本发明的有益效果是:

[0026] 本发明的光路相比于现为干涉结构的光路更为简洁,且使用与算法相结合的方法对亚毫米级别的沟槽结构进行探测,宽度可以达到几百微米,深度可以得到几毫米。

[0027] 本发明将平行光白光干涉检测方法与SPGD算法相结合,利用特定的优化函数对干涉图像进行优化,实现对亚毫米级别高深宽比结构沟槽进行形貌检测,探测结构的深度可达到毫米级别。

[0028] 本发明在沟槽三维形貌重建过程中,提出了一种先对包含干涉信息更多的待测表面等光程干涉图像进行优化,再根据优化结果对一组干涉图像中的其他干涉图像进行优化,再根据优化后的一组干涉图像进行三维重建从而得到整体样品的三维重建结果的方法。这一方法对干涉图像中干扰信息的去除和图像重建的效果都有重要作用。

## 附图说明

[0029] 图1是为本发明的整体流程图。

[0030] 图2是白光干涉系统的光路图。

[0031] 图3是侧壁垂直的沟槽结构示意图。

[0032] 图4是侧壁倾斜的沟槽样品结构示意图。

[0033] 图5是使用的Zernike多项式前20项示意图。

[0034] 图6是实验结果对比图。

## 具体实施方式

[0035] 下面结合附图及具体实施例对本发明作进一步详细说明。

[0036] 本发明采用的技术方案包含仿真和实验两个部分,实验和仿真相互验证,其中本发明所述的待测沟槽样品通常例如为微电子和功率半导体器件,但不限于此。

[0037] 如图1所示,本发明包括以下步骤:

[0038] 1) 搭建白光干涉系统,如图2所示,包括光源、分光镜、CCD相机和变形镜;光源产生白光入射到分光镜中发生透射和反射,分光镜的透射光通过变形镜的反射后入射回分光镜中,入射回分光镜的光在分光镜中产生反射,反射后的光束作为第一光束并入射至CCD相机中;分光镜的反射光通过待测沟槽样品的反射后入射回分光镜中产生透射,透射后的光束

作为第二光束并入射至CCD相机中；第一束光与第二束光产生干涉被CCD相机所探测，CCD相机探测采集获得沟槽干涉图；其中，光源为宽光谱光源，波长范围为380nm-780nm，即可见光谱范围，在其内选取任意光谱宽度的宽光谱光源即可，分光镜与平面镜光路为参考臂，分光镜与沟槽样品光路为测量臂。

[0039] 2) 沿光轴方向平行的方向移动白光干涉系统的变形镜或待测沟槽样品，使得白光干涉系统中的变形镜与分光镜之间沿光轴方向的距离等于待测沟槽样品的任意一个待测表面与分光镜之间沿光轴方向的距离，利用白光干涉系统测量待测沟槽样品的结构，按照步骤1) 的处理方式进行CCD相机探测采集获得沟槽干涉图作为待测沟槽样品的等光程干涉图；待测沟槽样品的待测表面具体为待测沟槽样品的上表面和待测沟槽样品中的沟槽底面。

[0040] 步骤2) 具体为：

[0041] 将待测沟槽样品倾斜放置或水平放置；如果是倾斜放置，则调整待测沟槽样品的倾斜角度，以及沿光轴方向移动白光干涉系统中的变形镜或待测沟槽样品，调整变形镜与分光镜之间或者待测沟槽样品与分光镜之间的距离，使得变形镜与分光镜之间的距离等于待测沟槽样品的任意一个待测表面与分光镜之间的距离，即使得参考臂的长度与测量臂的长度相等，CCD相机所采集的图像上产生清晰的条纹，进而固定沟槽样品的倾斜角度、沟槽样品和平面镜，CCD相机探测采集待测沟槽样品的当前待测表面的等光程干涉图；

[0042] 如果是水平放置，则沿光轴方向移动变形镜或待测沟槽样品，调整沟槽样品与分光镜之间的距离或变形镜与分光镜之间的距离，使变形镜与分光镜之间的距离等于待测沟槽样品的任意一个待测表面与分光镜之间的距离，即使得参考臂的长度与测量臂的长度相等，CCD相机所采集的图像上产生清晰的条纹，进而固定沟槽样品和平面镜，CCD相机探测采集待测沟槽样品的当前待测表面的等光程干涉图；

[0043] 侧壁垂直的沟槽结构示意图如图3所示，沟槽样品的尺寸为5mm\*5mm，沟槽宽度为0.2mm，深度为2mm，该沟槽样品对应的测量光路的参考臂和测量臂的长度为15mm。侧壁倾斜的沟槽样品结构示意图如图4所示，沟槽样品的尺寸为5mm\*5mm，侧壁倾斜沟槽上部分尺寸为1mm\*5mm，下部分尺寸为0.8mm\*5mm，深度为0.1mm，该沟槽样品对应的测量光路的参考臂和测量臂的长度均为60mm；

[0044] 3) 对等光程干涉图进行灰度处理后获得对应的沟槽灰度干涉图，计算沟槽灰度干涉图的对比度和高频信息量并作为所需优化参数；随机生成Zernike多项式系数，根据所需优化参数，利用SPGD算法对Zernike多项式系数进行迭代优化后，获得优化后的Zernike多项式系数；

[0045] SPGD算法中的参数：Zernike多项式系数，所对应的Zernike多项式的前20项示意图如图5所示。

[0046] 步骤3) 具体为：

[0047] 3.1) 对等光程干涉图进行灰度处理后获得对应的沟槽灰度干涉图，计算沟槽灰度干涉图的对比度和对沟槽灰度干涉图傅里叶变换后的高频信息量，高频信息量具体为：一般情况下，对沟槽灰度干涉图傅里叶变换后的频域谱中除零级谱的其他级谱作为高频信息量，也可以根据实际情况设定，比如根据不同的沟槽灰度干涉图调整选取的高频信息的范围，将沟槽灰度干涉图的对比度和高频信息量作为所需优化函数值；

[0048] 3.2) 随机生成一组初始的Zernike多项式系数,初始的Zernike多项式系数的数目与沟槽灰度干涉图对应的Zernike多项式系数的数目一致;

[0049] 3.3) 随机生成一组满足伯努利分布的小幅扰动,小幅扰动的数量级在0.001-0.1之间,小幅扰动的数目与Zernike多项式系数的数目一致;将一组Zernike多项式系数依次全加上和全减去一组小幅扰动后,分别生成一组加上小幅扰动后的Zernike多项式系数和一组减去小幅扰动后的Zernike多项式系数;

[0050] 3.4) 分别计算一组加上小幅扰动后的Zernike多项式系数的对比度和高频信息量并作为第一优化函数值以及一组减去小幅扰动后的Zernike多项式系数的对比度和高频信息量并作为第二优化函数值,将得到的第一、第二优化函数值与所需优化函数值进行比较;

[0051] 3.5) 预设步长距离 $\gamma$ ,具体实施中,步长距离 $\gamma$ 根据具体情况不断调节,如果第一优化函数值与所需优化函数值的差值小于第二优化函数值与所需优化函数值的差值,将小幅扰动乘上步长距离 $\gamma$ 后再加到Zernike多项式系数,获得更新后的Zernike多项式系数;

[0052] 如果第一优化函数值与所需优化函数值的差值等于第二优化函数值与所需优化函数值的差值,则Zernike多项式系数不变;如果第一优化函数值与所需优化函数值的差值大于第二优化函数值与所需优化函数值的差值,将小幅扰动乘上步长距离 $\gamma$ 后的相反数再加到Zernike多项式系数,获得更新后的Zernike多项式系数;

[0053] 3.6) 重复步骤3.3)-3.5),不断迭代优化Zernike多项式系数,直至Zernike多项式系数的对比度和高频信息量等于沟槽灰度干涉图的对比度和高频信息量时迭代结束,最终的Zernike多项式系数作为优化后的Zernike多项式系数。

[0054] 4) 利用优化后的Zernike多项式系数控制白光干涉系统的变形镜,使变形镜发生形变,从而对光路光程进行补偿,沿光轴方向移动变形镜或待测沟槽样品,移动范围包括从待测沟槽样品最上表面与分光镜之间的距离到待测沟槽样品最下表面与分光镜之间的距离;CCD相机采集获得一组光程补偿后的沟槽干涉图及每张沟槽干涉图对应的编号;

[0055] 5) 使用重心法对获得的一组光程补偿后的沟槽干涉图及每张沟槽干涉图对应的编号进行图像重建,获得待测沟槽样品的三维结构重建图。

[0056] 对完全相同的沟槽结构,使用SPGD方法,评价函数为图片的对比,对单张图进行优化,得到的优化后与优化之前的对比图如图6所示,其中,图6的(a)为优化之前的重建结果图,图6的(b)为优化之后的重建结果图。由图可知,优化后的重建结果相比于优化前的重建结果干扰信息更小,更能反映真实形貌。

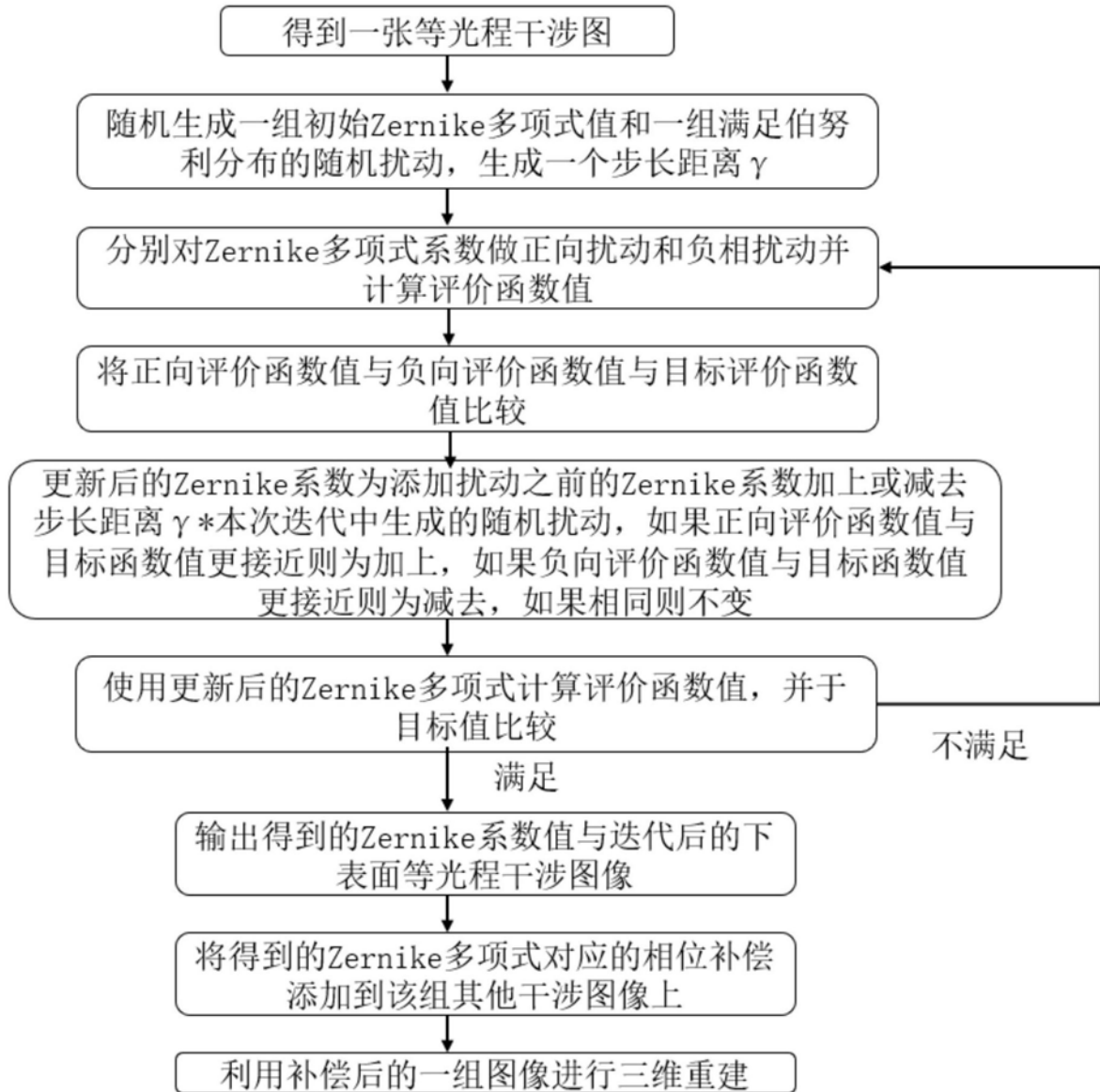


图1

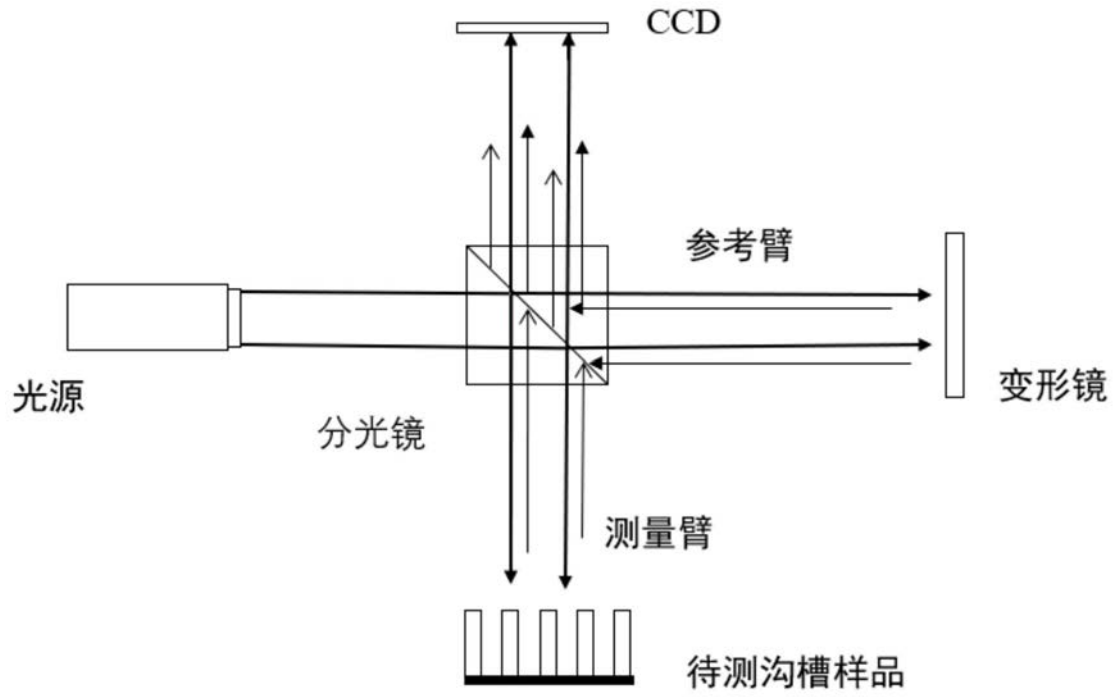


图2

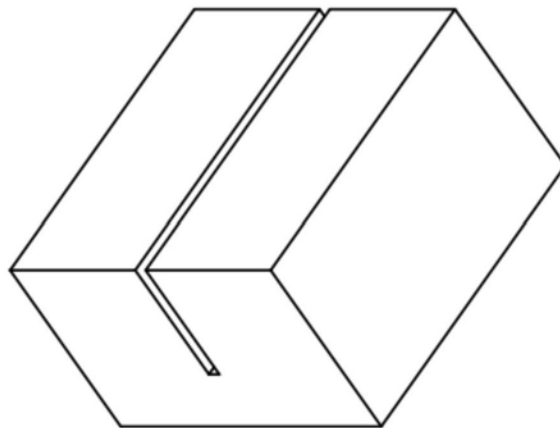


图3

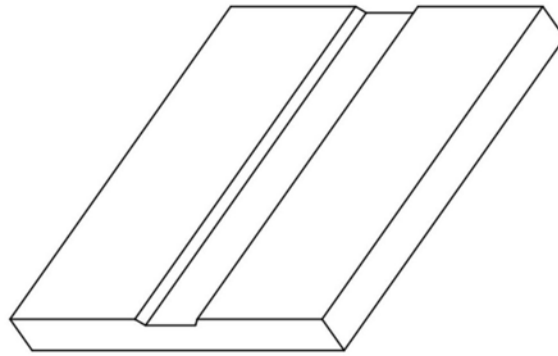


图4

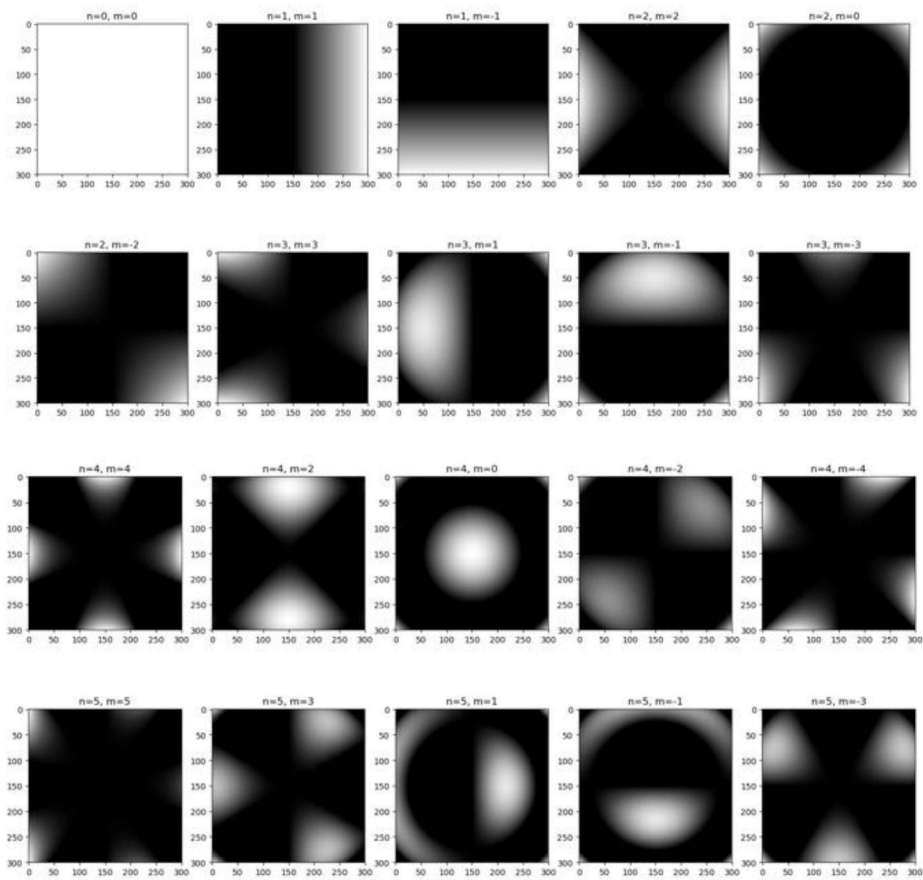
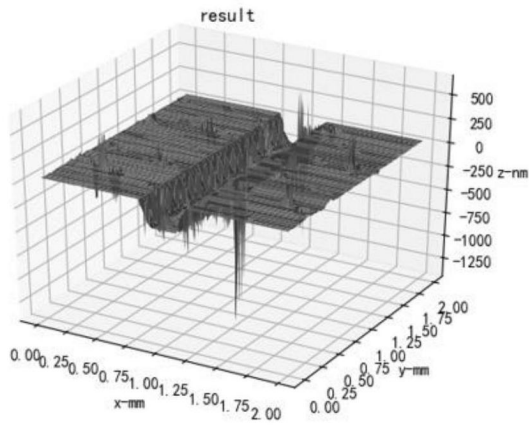
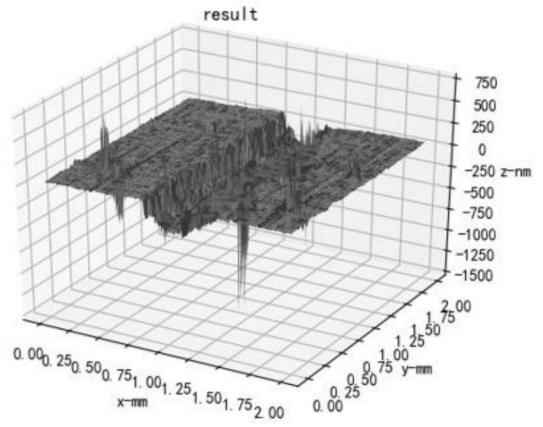


图5



(a)



(b)

图6