

# 基于白光干涉彩色图像的微结构表面形貌测量

郭 彤 李 峰 倪连峰 陈津平 傅 星 胡小唐

(天津大学精密测试技术及仪器国家重点实验室, 天津 300072)

**摘要** 微结构的表面形貌会显著地影响微纳器件的使用性能及产品质量,是微纳测试领域的一个重要研究方面,利用白光干涉技术是测量物体表面形貌的一种常见方法。区别于常用的 CCD 黑白相机,使用 CCD 彩色相机采集白光干涉条纹的彩色图像,使获取的图像包含了 R、G、B 三个通道的信息。利用小波变换法分别求解出在不同扫描位置处 R、G、B 通道的相位信息,通过建立的评价函数,并结合最小二乘法可精确确定零光程差的位置,利用相对高度和零光程差位置的线性关系,进而得到物体的表面形貌。通过仿真以及实际测量由 VLSI 标准公司制造的标准台阶结构,验证了所提出方法的有效性。

**关键词** 测量;白光干涉;表面形貌;彩色图像;小波变换;微结构

**中图分类号** O436.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201434.0212003

## Microstructure Surface Topography Measurement Based on Color Images of White Light Interferometry

Guo Tong Li Feng Ni Lianfeng Chen Jinping Fu Xing Hu Xiaotang

(State Key Laboratory of Precision Measuring Technology and Instruments, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

**Abstract** Microstructure surface topography is a key aspect of micro-nano measuring research for it has an obvious influence on the performance and quality of micro-nano devices. White light interferometry is a common method of testing surface profiling. A color CCD camera, rather than a black-and-white CCD camera, is utilized to acquire white light interference images, which contain information of RGB channels. Based on acquired color interference images, wavelet transform method is employed to calculate phase value of corresponding channel in each scanning position. Then zero-optical-path-difference positions are accurately determined via a constructed evaluation function and least square method. Surface topography is eventually obtained via linear relationship between the relative height and the zero-optical-path-difference position. The proposed method is verified by simulation and experiment of measuring standard step provided by VLSI Standards Incorporated.

**Key words** measurement; white light interferometry; surface topography; color image; wavelet transform; microstructure

**OCIS codes** 120.3180; 080.4035; 150.1835

## 1 引 言

在微纳制造领域,微纳器件的表面形貌对系统的可靠性和质量影响显著<sup>[1]</sup>。例如,微机电系统(MEMS)电容器两平行极板的表面形貌会显著影响电容器的电容值、电压值、电场分布等机电特性,进而影响到 MEMS 电容器件的性能和成品率<sup>[2-3]</sup>。此外,微纳器件的表面形貌可以反映出加工过程中的工艺参数,是对加工过程进行监控、诊断的重要依

据<sup>[4]</sup>。因而,微结构表面形貌的精密测量具有重要意义。

在微纳测试领域,白光干涉测量技术是一种重要的非接触式测量方法。在测试过程中,该技术不构成对被测物体表面的损伤,还具有测量范围大、测试精度高的优点<sup>[5-6]</sup>。针对白光干涉信号处理的算法主要分为两种:1)通过分析白光干涉信号的光强分布,获得被测物体的形貌,主要算法有重心法<sup>[7]</sup>、

收稿日期: 2013-08-08; 收到修改稿日期: 2013-10-14

基金项目: 国家自然科学基金(91023022)、科技部国际合作与交流项目(2008DFA71610)

作者简介: 郭 彤(1977—),男,博士,副教授,主要从事微纳测试与加工技术方面的研究。E-mail: guotong@tju.edu.cn

多项式拟合法<sup>[8]</sup>等;2)通过白光干涉信号的相位信息获取物体的形貌,主要算法有傅里叶变换法<sup>[9-11]</sup>、小波变换法<sup>[12-14]</sup>等。

在采集白光干涉条纹的过程中,通常使用的是 CCD 黑白相机<sup>[10,14-16]</sup>,而利用 CCD 彩色相机可使获取的图像信息由二维扩展为三维,即红(R)、绿(G)、蓝(B)三个通道的信息<sup>[17-18]</sup>。Pawłowski 等<sup>[19]</sup>利用 3-CCD 彩色相机获取白光干涉图像,但由于采集的干涉信号蓝色波段光谱能量较弱,所以只使用了 R、G 两个通道的信息分析得到被测物体的形貌;Ma 等<sup>[20]</sup>基于加窗傅里叶变换的方法,通过对 3-CCD 彩色相机采集的 R、G、B 三个通道的图像进行分析,获得了被测物体的形貌;相较于通过棱镜分光实现彩色图像获取的 3-CCD 彩色相机,单 CCD 彩色相机通过 Bayer 滤波获取彩色图像的方法成本更为低廉,Buchta 等<sup>[21-22]</sup>基于实验验证了使用单 CCD 彩色相机采集白光干涉图像,进而分析获得物体三维形貌的可行性。本文利用单 CCD 彩色相机采集白光干涉彩色条纹的图像,选用了连续小波变换法对 R、G、B 三个通道的图像信息进行分析,从而获得被测物体的几何尺寸及表面形貌。

## 2 测试系统

测试系统主要由光学系统、扫描系统、采集系统三部分组成。光学系统是基于 Zeiss 光学显微镜搭建的,物镜选用了由 Nikon 公司生产的 Mirau 型干涉物镜(放大倍率为  $10\times$ ,数值孔径为 0.30),照明光源选用具有宽光谱特性的卤素灯。需要说明的是,实验中需要在光源处加入一个白平衡滤光片,这是由于卤素灯的光谱能量在蓝色波段很弱,通道 B 中的光强信息更易受到噪声的干扰,白平衡滤光片的应用可以起到降低其他波段(除蓝色波段外)光的透射率,进而通过增大光源的输出光强, R、G、B 通道的光强相对强度会彼此接近,这样可以提高 CCD 采集信号的利用率和蓝色通道光强的信噪比。扫描系统采用了 PI 公司的压电控制器(E-509. C1A)和物镜纳米定位器(PI P-721. CL),实现对被测样品的垂直扫描。其中,物镜纳米定位器与 Mirau 型干涉物镜联接在一起。采集系统通过 Basler 公司的 CCD 彩色相机(型号 avA1600-65kc)和 NI 公司的 PCI-1428 图像采集卡,实现图像的采集。测试系统示意图如图 1 所示。

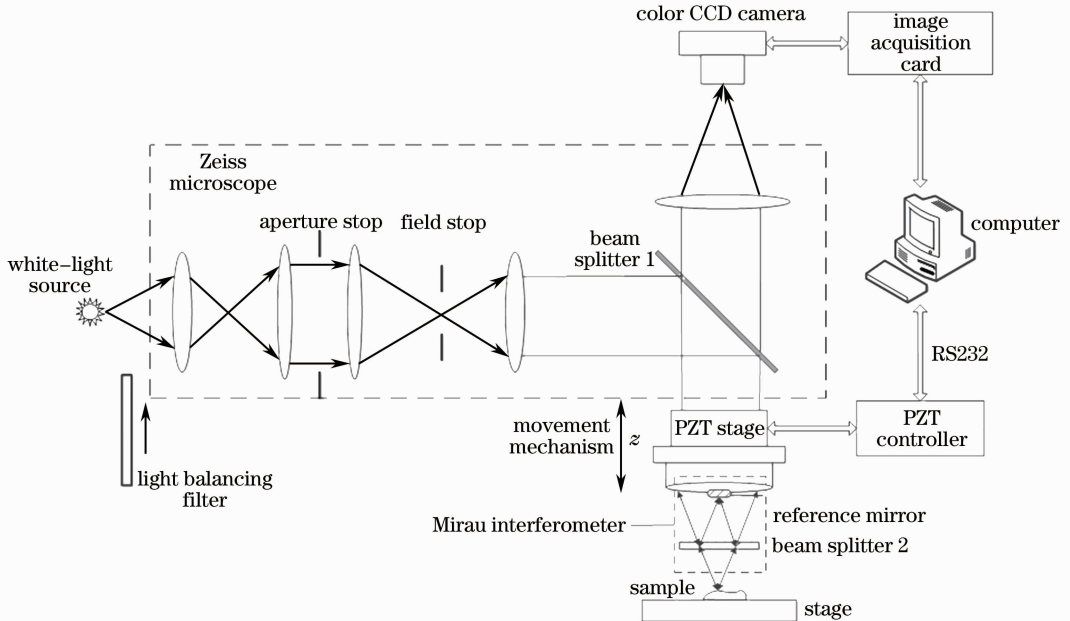


图 1 白光干涉测试系统示意图

Fig. 1 Schematic of white light interferometry system

## 3 测量原理

彩色图像(RGB 图像)是利用 R、G、B 这三个分量来表示图像中一个像素的颜色<sup>[23]</sup>。在对被测样品垂直扫描的过程中,用 CCD 彩色相机采集相应扫

描位置处的白光干涉图像。对于采集的这组彩色图像的某一像素点( $p, q$ ),分别提取 R、G、B 通道的光强信息,可以得到不同扫描位置处 R、G、B 的光强值。

测试系统使用的照明光源卤素灯是一种低相干光源,它的光谱呈现高斯分布的特点。如果光源的入射光束在被测物体表面的散射、衍射现象可以忽略不计,那么,通道 R、G、B 的光强分布可表示为<sup>[12,24]</sup>

$$I_m(z) = I_{0m} + \gamma_m I_{0m} g(z - z_0) \cos \left[ \frac{4\pi(z - z_0)}{\lambda_{c,m}} \right], \quad (1)$$

式中  $m$  分别表示为 R、G、B,代表 CCD 彩色相机的 R、G、B 通道。 $I_{0m}$  表示背景光强,反映光强的直流分量, $\gamma_m$  表示条纹可见度, $\lambda_{c,m}$  表示光源在对应通道的中心波长, $z$  表示物镜纳米定位器垂直扫描的位置,发生干涉的两光束光程差为零时,物镜纳米定位器所在的位置表示为  $z_0$ (下文将这个位置简述为“零光程差位置”)。 $g(z_m - z_0)$  是相干包络项,由光源在相应通道的光谱特征决定。实验中使用的光源卤素灯在 R、G、B 通道的光谱均呈现高斯分布的特点,因而,相干包络项可表示为<sup>[12]</sup>

$$g(z - z_0) = \exp \left[ - \left( \frac{z - z_0}{l_{c,m}} \right)^2 \right], \quad (2)$$

式中  $l_{c,m}$  表示光源在对应通道的相干长度。由(1)、(2)式可知,R、G、B 通道中,只有在零光程差位置  $z_0$  附近才会有干涉条纹的分布。

物镜纳米定位器的扫描步长是离散的,致使  $I_m(z)$  最大值的位置并不一定能与零光程差(OPD)位置重合,如图 2 所示。为了精确确定零光程差的位置,可考虑利用通道 R、G、B 的相位信息加以分析<sup>[14]</sup>。

R、G、B 通道的相位信息  $\varphi_m(z) = 4\pi(z - z_0)/\lambda_{c,m}$  可通过对  $I_m(z)$  进行一维连续小波变换<sup>[25]</sup>

$$W_m(a, b) = \int_{-\infty}^{+\infty} I_m(z) \psi_{ab}^*(z) dz \quad (3)$$

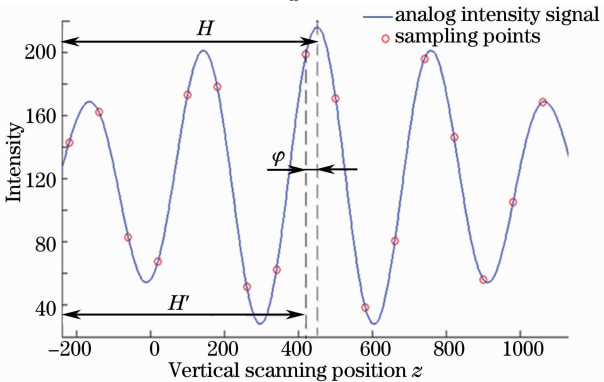


图 2 采样光强最大值位置与零光程差位置不重合的示意图

Fig. 2 Schematic of the deviation between sampling maximum intensity position and actual zero optical-path-difference position

得到。 $\psi(z)$  为小波变换的母小波, $a, b$  分别表示小波变换的尺度因子和平移因子, $\psi_{ab}(z) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi \left( \frac{z - b}{a} \right)$ ,  $*$  为共轭运算符。通过对  $I_m(z)$  进行一维连续小波变换得到的  $W_m(a, b)$  反映了  $\psi_{ab}$  与  $I_m$  的相关程度。尺度因子  $a$  的变化反映了信号  $I_m$  频率的变化,平移因子  $b$  的变化反映了信号  $I_m$  位移的变化,通过尺度因子  $a$  和平移因子  $b$  的连续变化,可求得在不同频率和位移处  $\psi_{ab}$  与  $I_m$  相关程度的大小。由于信号  $I_m$  呈现出高斯分布的特征,而 Morlet 小波事实上是由高斯函数调制而成的<sup>[25]</sup>,所以可选择 Morlet 小波作为小波变换的母小波,即  $\psi(z) = \exp \left( i\omega_0 z - \frac{z^2}{2} \right)$ 。

基于 Sandoz<sup>[12]</sup> 的研究可知,如图 3 所示,在某一扫描位置处,当  $\psi_{ab}(z)$  与  $I_m(z)$  相关程度最高,即  $W_m(a, b)$  的模值最大时, $W_m(a, b)$  的辐角即为该扫描位置处  $I_m(z)$  相对于零光程差位置的相位值,对应的尺度因子和平移因子分别记为  $a_0$  和  $b_0$ ,则有

$$\varphi_m(z) = \arctan \left\{ \frac{\text{Im}[W_m(a_0, b_0)]}{\text{Re}[W_m(a_0, b_0)]} \right\}. \quad (4)$$

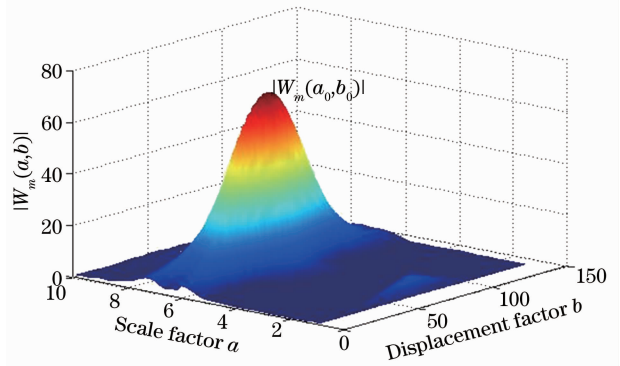


图 3 连续小波变换  $|W_m(a, b)|$  示意图

Fig. 3 Schematic of continuous wavelet transform  $|W_m(a, b)|$  由于在零光程差位置处,  $\varphi_R = \varphi_G = \varphi_B$ , 即  $\varphi_R, \varphi_G, \varphi_B$  相交于一点,则构造的评价函数

$$F = |\varphi_R - \varphi_G| + |\varphi_G - \varphi_B| + |\varphi_B - \varphi_R|, \quad (5)$$

$F$  在零光程差位置处应有最小值。需要说明的是,通过(4)式求得的相位值  $\varphi_m$  不可以进行解包裹运算,因为 R、G、B 通道的初始相位并不确定,解包裹运算会使  $\varphi_R, \varphi_G, \varphi_B$  的交点偏离零光程差位置<sup>[19]</sup>。

在垂直扫描被测样品的过程中,R、G、B 通道的零光程差位置理论上是重合的,但在实际测量过程中,测量误差使得 R、G、B 的零光程差位置并不在同一位置处,这里可运用最小二乘法确定零光程差位置的最优估计值。

R、G、B 通道的相位信息可表示为  $\varphi_m(z) = A_m z + B_m$ , 其中,  $A_m = 4\pi/\lambda_{c,m}$ ,  $B_m = -4\pi z_0/\lambda_{c,m}$ 。根据最小二乘法原理, 零光程差位置  $z_0$  的最优估计值可在  $\varphi_R^2 + \varphi_G^2 + \varphi_B^2$  有最小值时求得, 此时需满足条件

$$\frac{d(\varphi_R^2 + \varphi_G^2 + \varphi_B^2)}{dz} = 2(A_R^2 + A_G^2 + A_B^2)z + 2(A_R B_R + A_G B_G + A_B B_B) = 0, \quad (6)$$

由(6)式可得零光程差位置  $z_0$  的最优估计值为

$$z_0 = -\frac{A_R B_R + A_G B_G + A_B B_B}{A_R^2 + A_G^2 + A_B^2}. \quad (7)$$

确定  $A_m$  和  $B_m$  的方法如下: 首先通过评价函数  $F$  初步确定零光程差的位置, 进而对零级条纹内的采样点  $(z_i, \varphi_{mi})$  ( $i = 1, 2, 3, \dots, n$ ) 做分析。采样点  $(z_i, \varphi_{mi})$  满足函数关系

$$\varphi_{mi} = A_m z_i + B_m. \quad (8)$$

根据最小二乘法原理, (8)式中的  $A_m, B_m$  满足以下条件关系式:

$$\frac{\partial}{\partial A_m} \sum_{i=1}^n (\varphi_{mi} - A_m z_i - B_m)^2 = 0, \quad (9)$$

$$\frac{\partial}{\partial B_m} \sum_{i=1}^n (\varphi_{mi} - A_m z_i - B_m)^2 = 0. \quad (10)$$

由(9)、(10)式可得

$$A_m \sum_{i=1}^n z_i^2 + B_m \sum_{i=1}^n z_i = \sum_{i=1}^n \varphi_{mi} z_i, \quad (11)$$

$$A_m \sum_{i=1}^n z_i + B_m n = \sum_{i=1}^n \varphi_{mi}. \quad (12)$$

根据克莱姆法则, 由(11)、(12)式可求得  $A_m, B_m$  的数值, 将其代入(7)式, 即可求得零光程差位置  $z_0$  的

最优估计值。

由于采样点  $(z_i, \varphi_{mi})$  位于零级条纹内, 所以最优估计值  $z_0$  也局限于零级条纹内, 其实质是采样光强最大值位置与零光程差位置的偏差值, 如图 2 所示。因而, 被测物体的高度值  $H$  应表示为

$$H = H' + z_0, \quad (13)$$

式中  $H' = N\Delta$ , 其中  $\Delta$  表示扫描间距,  $N$  为采样光强最大值位置对应的扫描步数。

## 4 仿真分析

由于使用的 CCD 彩色相机是通过 Bayer 滤波的方法获取彩色图像的, 且受到 CCD 制作工艺本身的影响, 使得采集的图像 R、G、B 通道间不可避免地存在频谱混叠的问题, 即通道之间的串扰。仿真光源的光谱呈高斯分布的特征。

1) 对于理想情况, R、G、B 通道彼此独立, 即不考虑 CCD 彩色相机 R、G、B 通道间存在的频谱混叠问题。根据(1)、(2)式, 三个通道光强分布对应的参数设置如表 1 所示。

表 1 通道 R、G、B 的仿真参数

Table 1 Simulation parameters of channels RGB

Channel	$I_0$	$\gamma_m$	$\lambda_c/\text{nm}$	$l_c/\text{nm}$
R	120	0.8	620	750
G	120	0.8	540	750
B	120	0.8	470	750

对于高度为 100、300、500、700、900 nm 的台阶, 基于上述方法的仿真结果分别如图 4 所示。

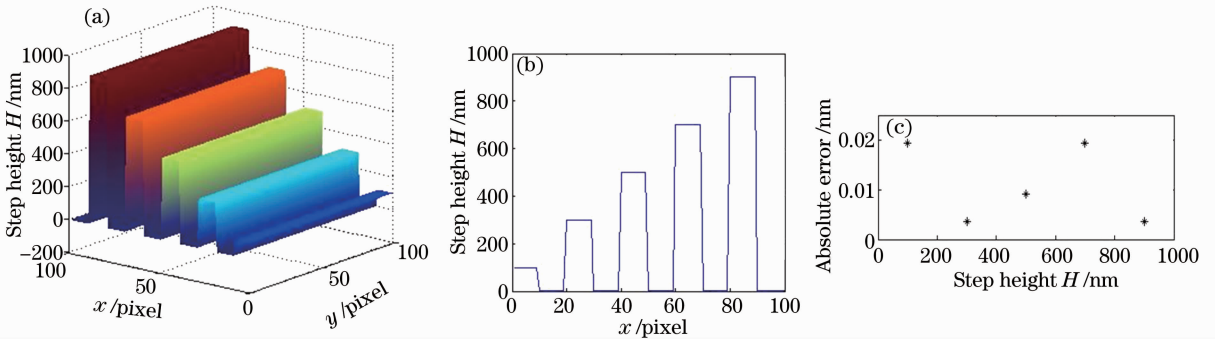


图 4 理想情况不同高度台阶的仿真结果。(a)台阶的形貌图;(b)台阶的截面图;(c)仿真结果的绝对误差值

Fig. 4 Simulation results of steps with different height values in ideal condition. (a) Topography of steps; (b) cross-section view of steps; (c) absolute error values of simulation

对于上述不同高度的台阶, 仿真分析得到的表面形貌如图 4(a)所示; 通过形貌图中心处的截面如图 4(b)所示; 图 4(c)表示仿真计算的绝对误差, 可以看出, 仿真结果的绝对误差小于 0.02nm。

以上对于不同高度台阶的仿真, 验证了在理想

条件下, 所提出方法对于白光干涉彩色图像的处理是有效的。

2) 实际测量中, R、G、B 通道的信号存在频谱混叠。通过仿真分析, 验证所提出方法的有效性:

构造串扰耦合矩阵  $\mathbf{M}$ :



$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} 0.7 & 0.2 & 0.1 \\ 0.1 & 0.8 & 0.1 \\ 0.1 & 0.25 & 0.65 \end{bmatrix}. \quad (14)$$

串扰耦合矩阵  $\mathbf{M}$  的行向量分别表示 R、G、B 通道中的光强信息,行向量中的列元素依次表示 R 波

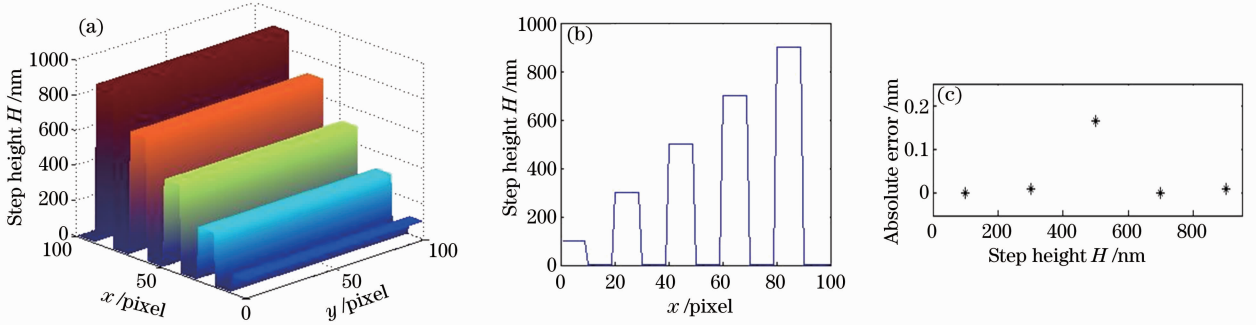


图 5 存在通道间串扰时,不同高度台阶的仿真结果。(a)台阶的形貌图;(b)台阶的截面图;(c)仿真结果的绝对误差值

Fig. 5 Simulation results of steps with different height values in crosstalk condition. (a) Topography of steps; (b) cross-section view of steps; (c) absolute error values of simulation

对于上述高度的台阶,仿真得到的表面形貌如图 5(a)所示;通过形貌图中心处的截面如图 5(b)所示;图 5(c)表示仿真计算的绝对误差,可以看出,仿真结果的绝对误差小于 0.20 nm。

当考虑 R、G、B 通道的串扰问题时,对不同高度台阶的仿真结果可以看出,计算结果的绝对误差值有所增大,但在可接受的范围内,且绝对误差并没有呈现随台阶高度的增大而增大的趋势。通道之间的串扰现象对测量精度的影响并不显著,可以说在这种情况下,上述方法仍然是可行、有效的。

当 R、G、B 通道间存在频率混叠时,通道中的光谱分布会发生相应的改变。连续小波变换对信号频率的变化具有自适应的功能,信号  $I_m$  频率和位移的变化可通过尺度因子  $a$  和平移因子  $b$  的变化反映出来<sup>[12,25]</sup>。基于变化后的  $a$  和  $b$ ,利用(4)式可以准确

段、G 波段和 B 波段光强的相对强度。构造的矩阵  $\mathbf{M}$  保证了 R、G、B 通道的原始信号占主要成份。基于串扰耦合矩阵  $\mathbf{M}$ ,三个通道的光强分布会有相应的变化,利用上述方法,对以上不同高度台阶的仿真结果如图 5 所示。

求解出相位信息,进而得到被测物体的表面形貌。这是所提出方法在 RGB 通道间存在频率混叠时,仍能保证测量精度的原因。

## 5 实验结果及分析

实验的测试对象选择经过美国国家标准与技术研究院(NIST)认证的 VLSI 标准公司制造的标准台阶,台阶标定值为  $(454.8 \pm 2.7)$  nm。

利用物镜纳米定位器垂直扫描被测物体,扫描步长为 50 nm,并用 CCD 彩色相机获取相应扫描位置处的干涉图像。对于采集的这组彩色图像的某一像素点  $(p, q)$ ,分别提取 R、G、B 通道的光强信息,得到通道 R、G、B 的光强分布如图 6 所示(扫描位置可由图中横坐标扫描步数与扫描步长相乘得到)。

在零光程差位置附近,像素点  $(p, q)$  在 R、G、B

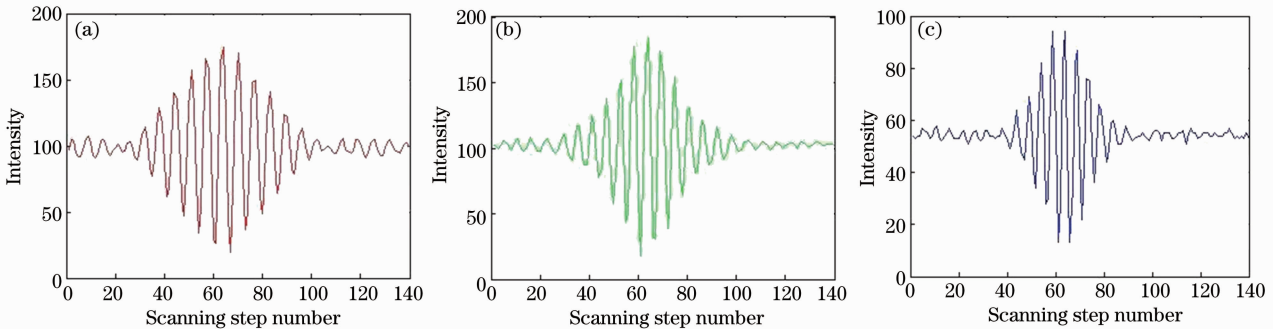


图 6 某像素点  $(p, q)$  的 R、G、B 通道光强分布图。(a) R 通道的光强分布图;(b) G 通道的光强分布图;(c) B 通道的光强分布图

Fig. 6 Intensity distributions of a certain pixel  $(p, q)$  in channels R, G, B. (a) Intensity distribution in channel R; (b) intensity distribution in channel G; (c) intensity distribution in channel B

通道的相位信息以及相应的评价函数  $F$ , 如图 7 所示。当评价函数  $F$  取得最小值时, 对应的扫描位置为零光程差位置的初步估计。

再分别对零光程差附近处, R、G、B 通道的相位作最小二乘拟合准确确定零光程差的位置, 进而求得标准台阶的几何尺寸。

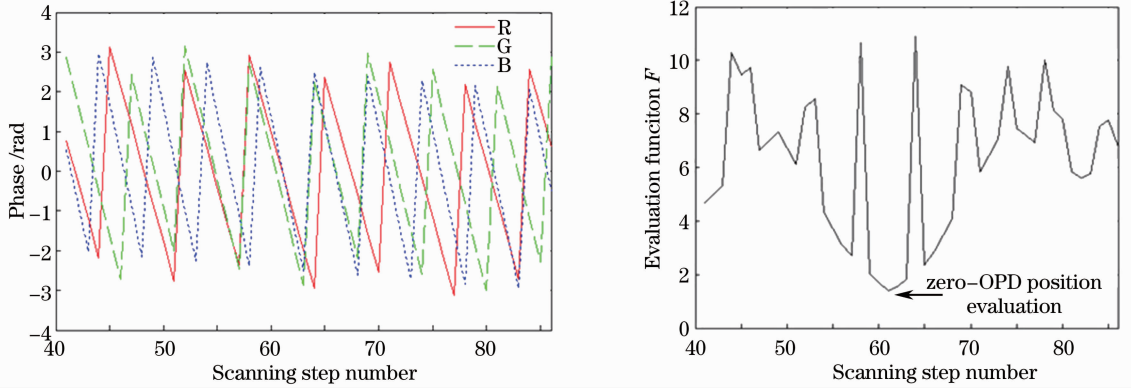


图 7 零光程位置附近, 像素点  $(p, q)$  在 R、G、B 通道的相位及对应的评价函数  $F$ 。(a) 像素点  $(p, q)$  在 R、G、B 通道的相位信息; (b) 评价函数  $F$  的值

Fig. 7 Phase of a certain pixel  $(p, q)$  in channels R, G, B and corresponding evaluation function  $F$  in the vicinity of zero-OPD position. (a) Phase value of channels R, G, B in a certain pixel; (b) evaluation function  $F$

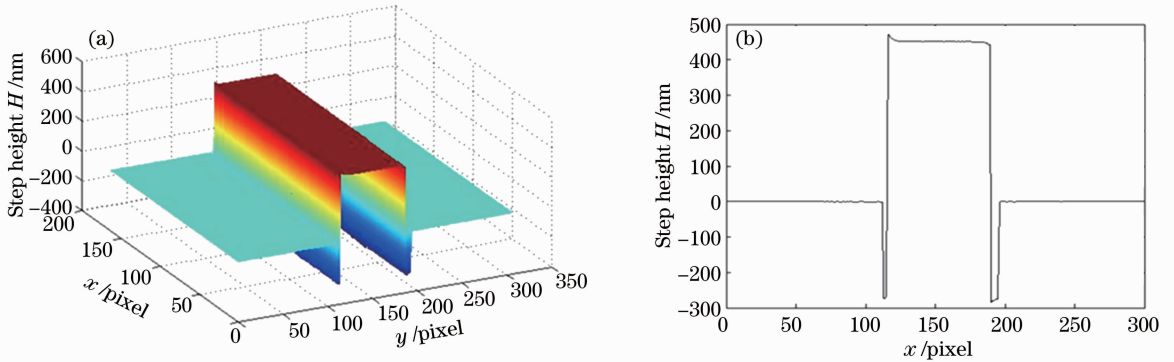


图 8 (a) 台阶的表面形貌; (b) 台阶截面图

Fig. 8 (a) Topography of measured step; (b) cross-section view of measured step

依据 ISO 5436-1:2000 的定义和 VLSI 标准公司在说明文件中阐述的评价方法, 对标准台阶 10 次测量的结果如表 2 所示。

表 2 标准台阶高度值测量结果

Table 2 Measuring results of standard step height value

Measuring times	Step height value /nm	Measuring times	Step height value /nm
1	453.46	6	453.44
2	452.54	7	453.18
3	453.35	8	456.10
4	453.73	9	453.20
5	452.06	10	453.58
Mean value /nm		453.46	
RMS /nm		1.06	

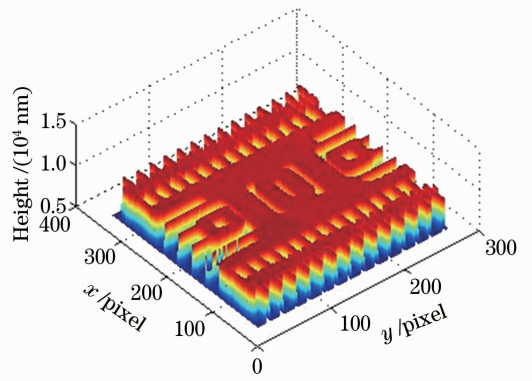


图 9 微谐振器形貌图

Fig. 9 Topography of micro resonator

对 VLSI 标准公司制造的标准台阶的测试结果:高度值为 453.46 nm,标准差为 1.06 nm,测试结果在标定值范围内,验证了所提出方法的有效性。

最后,运用上述方法分析、测量了由美国北卡罗来纳微电子中心(MCNC)提供的微加工多晶硅水平微谐振器,获得的器件表面形貌如图 9 所示。

## 6 结 论

CCD 彩色相机采集的白光干涉彩色图像可分解为 R、G、B 三个通道的信息,运用连续小波变换法分别求解出在不同扫描位置处三个通道的相位值,通过构造的评价函数,并结合最小二乘原理,可准确确定零光程差的位置,进而得到被测物体的几何尺寸和表面形貌。

### 参 考 文 献

- Fangyu Peng, Jing Wu, Zhonglong Fang, *et al.*. Modeling and controlling of surface micro-topography feature in micro-ball-end milling [J]. *Int J Advanced Manufacturing Technology*, 2013, 67(9-12): 2657-2670.
- Lior Kogut. The influence of surface topography on the electromechanical characteristics of parallel-plate MEMS capacitors [J]. *J Micromechanics and Microengineering*, 2005, 15(5): 1068-1075.
- A B Yu, A Q Liu, Q X Zhang, *et al.*. Effects of surface roughness on electromagnetic characteristics of capacitive switches [J]. *J Micromechanics and Microengineering*, 2006, 16(10): 2157-2166.
- Roya Maboudian. Surface processes in MEMS technology [J]. *Surface Science Reports*, 1998, 30(6-8): 207-269.
- Conor O' Mahony, Martin Hill, Magali Brunet, *et al.*. Characterization of micromechanical structures using white-light interferometry [J]. *Meas Sci & Technol*, 2003, 14(10): 1807-1814.
- David Grigg, Eric Felkel, John Roth, *et al.*. Static and dynamic characterization of MEMS and MOEMS devices using optical interference microscopy [C]. *SPIE*, 2004, 5455: 429-435.
- R Dändliker, E Zimmermann, G Frosio. Electronically scanned white-light interferometry: a novel noise-resistant signal processing [J]. *Opt Lett*, 1992, 17(9): 679-681.
- Min-Cheol Park, Seung-Woo Kim. Direct quadratic polynomial fitting for fringe peak detection of white light scanning interferograms [J]. *Opt Eng*, 2000, 39(4): 952-959.
- Qian Kema. Two-dimensional windowed Fourier transform for fringe pattern analysis: Principles, applications and implementations [J]. *Opt & Lasers in Eng*, 2007, 45(2): 304-317.
- S Ma, C Quan, R Zhu, *et al.*. Micro-profile measurement based on windowed Fourier transform in white-light scanning interferometry [J]. *Opt Commun*, 2011, 284(10-11): 2488-2493.
- Matthew Hart, David G Vass, Mark L Begbie. Fast surface profiling by spectral analysis of white-light interferograms with Fourier transform spectroscopy [J]. *Appl Opt*, 1998, 37(10): 1764-1769.
- Patrick Sandoz. Wavelet transform as a processing tool in white-light interferometry [J]. *Opt Lett*, 1997, 22(14): 1065-1067.
- Rolf-Jürgen Recknagel, Gunther Notni. Analysis of white light interferograms using wavelet methods [J]. *Opt Commun*, 1998, 148(1-3): 122-128.
- Zehra Saraç, Ali Dursun, Sündüs Yerdelen. Wavelet phase evaluation of white light interferograms [J]. *Meas Sci & Technol*, 2005, 16(9): 1878-1882.
- Tong Guo, Hong Chang, Jinping Chen, *et al.*. Micro-motion analyzer used for dynamic MEMS characterization [J]. *Opt & Lasers in Eng*, 2009, 47(3-4): 512-517.
- Guo Tong, Hu Chunguang, Chen Jinping, *et al.*. Temporal phase-shifting microscopic interferometry for geometrical characterization of MEMS devices [J]. *Nanotechnology and Precision Engineering*, 2008, 6(1): 44-49.
- 郭 彤, 胡春光, 陈津平, 等. 时间相移显微干涉术用于微机电系统的尺寸表征 [J]. *纳米技术与精密工程*, 2008, 6(1): 44-49.
- Dai Meiling, Yang Fujun, Geng Min, *et al.*. Single color fringe projection for measuring three-dimensional shapes with discontinuities [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(4): 0412005.
- 戴美玲, 杨福俊, 耿 敏, 等. 单幅彩色条纹投影的不连续物体表面三维形貌测量 [J]. *光学学报*, 2012, 32(4): 0412005.
- Liu Di, Yao Zhenning, Li Haifeng, *et al.*. Structured light acquisition system based on waveband separation [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(6): 0612003.
- 柳 迪, 姚振宁, 李海峰, 等. 基于波长分离的结构光采集系统 [J]. *光学学报*, 2012, 32(6): 0612003.
- Michał E Pawłowski, Youhei Sakano, Yoko Miyamoto, *et al.*. Phase-crossing algorithm for white-light fringes analysis [J]. *Opt Commun*, 2006, 260(1): 68-72.
- Suodong Ma, Chenggen Quan, Rihong Zhu, *et al.*. Surface profile measurement in white-light scanning interferometry using a three-chip color CCD [J]. *Appl Opt*, 2011, 50(15): 2246-2254.
- Zdeněk Buchta, Petr Jedlička, Milan Matějka, *et al.*. White-light fringe analysis with low-cost CCD camera [C]. 6th International Workshop on Advanced Optical Metrology, 2009. 149-152.
- Z Buchta, B Mikel, J Lazar, *et al.*. White-light fringe detection based on a novel light source and colour CCD camera [J]. *Meas Sci & Technol*, 2011, 22(9): 094031.
- Andreas Koschan, Mongi Abidi. Digital Color Image Processing [M]. Zhang Yujin Transl. Beijing: Tsinghua University Press, 2010.
- Andreas Koschan, Mongi Abidi. 彩色数字图像处理 [M]. 章毓晋译. 北京: 清华大学出版社, 2010.
- Peter de Groot, Xavier Colonna de Lega. Signal modeling for low-coherence height-scanning interference microscopy [J]. *Appl Opt*, 2004, 43(25): 4821-4830.
- Cheng Zhengxin, Yang Shouzhi, Feng Xiaoxia. Wavelet Analysis of Theory, Algorithm, Progress and Application [M]. Beijing: Press of National Defense Industry, 2007.
- 程正兴, 杨守志, 冯晓霞. 小波分析的理论、算法、进展和应用 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2007.
- Akiko Harasaki, James C Wyant. Fringe modulation skewing effect in white-light vertical scanning interferometry [J]. *Appl Opt*, 2000, 39(13): 2101-2106.