# 奈米級振動檢測系統

王永成<sup>1</sup>,張元震<sup>1</sup>,徐力弘<sup>2</sup>,鄭英毅<sup>1</sup>,張中平<sup>3</sup>
1.雲林科技大學機械工程系,臺灣雲林,鬥六,640
2. 虎尾科技大學機械設計工程系,臺灣雲林,虎尾,632
3. 中央大學機械工程系,臺灣桃園,中壢,32

摘 要:由於高科技產業的蓬勃發展,對於零元件的品質或性能要求相當嚴格。微繼電器中,其共振頻率性質相對重要,此 性質可反推出成品的楊氏模數與殘留應力。目前積體電路成品尺寸若微小化達線寬 600 nm,即難以量測,且只能人工方式進 行掃描式檢測。本研究主要目的為建構一套新型干涉儀測振系統,對於奈米級待測件也能精准的量測,且達到自動輸入電壓 於待測件與自動量測計算、分析及儲存訊號處理結果。實驗結果顯示,本研究可進行連續自動量測,目前的量測能力為頻寬 在 450 kHz 以下及振幅 5 nm 以上。

關鍵字: Michelson 干涉儀; 奈米級振動

## Measurement System for Nano-order Vibrations

Yung-Cheng Wang\*<sup>1</sup>, Yuan-Jen Chang<sup>1</sup>, Li-Hon Shyu<sup>2</sup>, Ying-Yi Cheng<sup>1</sup>,

Chung-Ping Chang<sup>3</sup>

1. Department of Mechanical Engineering, National Yunlin University of Science and Technology, Taiwan, China, 640

2. Department of Mechanical Engineering, National Formosa University, Taiwan, China, 632

3. Department of Mechanical Engineering, National Central University, Taiwan, China, 320

**Abstract:** Due to the rapid growth of the high technology industries, the quality requirements of the components become more stringently. The most important property of the micro-relay is the resonant frequency. The Young's modulus and residual stress can be calculated by the resonance frequency of the relay. In the fast development of the technological of the integrated circuits, the product dimensions have been miniaturized. It is difficult to measure objects with the line width of 600 nm. And the scanning detection can be artificially controlled and verified only. The main purpose of this study is to construct a novel Michelson interferometer which offers the automatic measurement and calculation, analysis and accumulating signal data, and the experimental results show that the measuring range of frequencies less than 450 kHz and amplitude over 5 nm can be achieved by the proposed automatic measurement system.

Keywords: Michelson Interferometer; Nano-Order Vibration

## 引言

振動在工業界是一個非常重要的參數,因振動本身關係著機具的品質,且可反應出其機械性質,量測儀器 中加速規<sup>[1]</sup>屬最為通用,但隨著科技的進展,性能已不敷使用,因需緊貼待測物,且量測的頻寬過小,對於微 小或高溫、表面不可接觸等物品即無法量測,故鬚髮展其他量測儀器。因接觸式量測儀的諸多限制下,開發非 接觸量測儀在非接觸的儀器中,又以超音波,雷射等技術最為適合,非接觸式量測不需接觸對象表面,有別於 接觸式的量測探頭,需將探頭貼於待測物表面,除了不會造成物件的損傷及工具的磨耗外,且不會使待測物的 物理性質改變,可遠距離量測。此外測量頻寬也較接觸式探頭寬,現今高頻量測大都採用這種量測方式。非接 觸測量技術中以干涉式測振儀具有高準確度、且解析度可到微奈米等級的優點,因此受到廣泛的應用。

楊氏膜數(Young's Modulus)對於微機電元件的設計與應用上是很重要的參數,而共振頻率的量測是可反推 出成品的楊氏膜數的眾多量測法之一。目前積體電路科技的迅速發展,微影尺寸已達線寬 28 nm。根據參考文 獻顯示[3]線上寬 600 nm 的待測件中,就很難找到適合量測共振頻率的儀器,如果要進行掃描式檢測只能人為 控制訊號連續輸出並檢測器結果,檢測結果的可靠信較低。

根據前述分析後測振儀器所遇到的問題為 1.測量頻寬太小 2.對於體積微小及無法接觸的待測件無法量測 3. 因每個待測件結構不同,所以共振點也不同必須進行掃描檢出。經參考相關的儀器開發文獻[4、5、6、7、8], 本文將發展一套新型干涉儀的系統,本系統可提高量測解析度,對於奈米級待測件也能精准的量測,且達到自 動輸入電壓於待測件與自動量測計算、分析及儲存訊號處理結果,已進行掃描式連續測量。

## 1 量測工作原理

## 1.1 Michelson 干涉儀架構

#### 1.1.1 Michelson 干涉儀干涉原理

本節中介紹傳克森干涉儀的干涉原理,為清楚表示,將入射光與反射光用錯位的方式描述,並定義參數, 如圖1所示。



#### 圖1傳統麥克森(Michelson)干涉儀

入射光的電場為 EA, 振動頻率為 ω, 行進距離為 rA, 根據電場公式可表示成式(1):

$$E_A = A_0 \times e^{i(\omega t + \kappa r_A)} \tag{1}$$

A0 是振幅, k 是波數。

$$k = \frac{2\pi}{2}$$

 $E_1 = E_R + E_M$ 

設 XR 及 XM 為分光鏡(BS)至參考鏡及量測鏡之距離, 在經過兩次 BS 分光後得到 ER 及 EM 兩電場, 其公式如下。

$$E_R = \frac{1}{2} A_0 \times e^{i(\omega t + 2kX_R)}$$
<sup>(2)</sup>

$$E_M = \frac{1}{2} A_0 \times e^{i(\omega t + 2kX_M)}$$
(3)

而 Exit1 的電場 E1 是由 ER 與 EM 組合而成,所以:

$$=\frac{1}{2}A_0e^{i\omega t}\left[e^{i(2kX_R)}+e^{i(2kX_M)}\right]$$
(4)

而光強 I1 等於電場的共軛相乘所以:

$$I_{1} = E_{1} \times E_{1}^{*}$$

$$= \frac{1}{4} A_{0}^{2} \Big[ 1 + e^{i(2k(X_{R} - X_{M}))} + 1 + e^{i(2k(X_{M} - X_{R}))} \Big]$$

$$= \frac{1}{4} A_{0}^{2} \Big[ 2 + 2\cos(2k(X_{R} - X_{M}))) \Big]$$
(5)
(6)

 $\phi \delta = (X_R - X_M) 代入式(6)$ 得

$$I_1 = \frac{1}{2} A_0^2 [1 + \cos(2k\delta)]$$
<sup>(7)</sup>

接著將本架構之干涉儀光路進行推導比較,光路如圖 2 及 3 所示。本架構與傳統 Michelson 干涉儀不同,在(1) 增加了 XZ 的光程,目的在於提高整體量測的解析度,(2)配合測量奈米元件及增加量測光的反射率在光路中加入兩凸透鏡聚焦。參考上述推導後將進行本架構解析度與傳統干涉儀 Michelson 的解析度分析。



圖 2 本文 Michelson 架構



圖 3 本文 Michelson 光路參數

假設光束完全聚焦在焦點上,XR及XM一樣是參考鏡與量測鏡1至BS的距離,XZ是量測鏡1至量測鏡2之 距離,電場經過BS兩次分光後,ER及EM與式(2)及(3)相等,EZ如式(8)。

$$E_Z = \frac{1}{2} A_0 \times e^{i(\omega t + 2kX_Z)}$$
(8)

Exit 電場 E1 等於 ER、EM、EZ 相加:

$$E_{1} = \frac{1}{2} A_{0} e^{i\omega t} \left[ e^{i(2kX_{R})} + e^{i(2kX_{M})} + e^{i(2kX_{Z})} \right]$$
(9)

12 2012, Volume 1, Issue 1, PP. 37-46

光強 I1 為:

$$I = \frac{1}{4} A_0^2 \Big[ 2 + e^{i (2k(X_R - X_M - X_Z))} + e^{-i (2k(X_R - X_M - X_Z))} \Big]$$
(10)

$$=\frac{1}{4}A_0^2 \left[2 + 2\cos(2k(X_R - X_M - X_Z))\right]$$
(11)

 $\diamond \delta' = (X_R - X_M - X_Z) 代入式(11) 得$ 

$$=\frac{1}{4}A_0^2\Big[2+2\cos\Big(2k\delta'\Big)\Big]$$

假設量測鏡1向鏡面法線方向移動了微小的距離δ1,光點的失焦影響不計,如圖4所示。



圖 4 位移分析圖

因此 XM 及 XZ 皆會有 $^{\delta_M}$  及 $^{\delta_Z}$  的位移量增加,所以接下來是分析 $^{\delta_1}$  與 $^{\delta_M}$  及 $^{\delta_Z}$  的關係:



圖 5  $\delta_1^{\prime}$ 與 $\delta_M$ 及 $\delta_Z$ 的關係圖

由圖 5 中可知 $\delta_1 = \cos(20^\circ)\delta_M$ 及 $\delta_Z = \cos(40^\circ)\delta_M$ ,所以 $\delta_M + \delta_Z = 1.8792\delta_1$ ,將結果帶回式(11)得:

$$= \frac{1}{4} A_0^2 \Big[ 2 + 2 \cos \Big( 2k\delta' - 2 \times k \times 1.8792 \delta_1' \Big) \Big]$$

所以理論上量測鏡往其法線方向移動了 $\delta_1$ ,本系統由光路部分可得解析度為 $\overline{3.7584}$ ,本架構所使用的雷射波長為 632.8 nm,所以解析度約為 168.37 nm。

#### 1.1.2 干涉訊號的感測原理

本文是使用 Michelson 干涉儀的架構,所以干涉訊號為弦波訊號,而此檢測器選用光電二極體元件(PD)進 行訊號的檢測。PD 輸出的信號電壓正比所接收的總光強,雖然干涉訊號為弦波分佈的條紋位置較不明確,但條 紋的間隔固定,因此可計數干涉條紋通過 PD 的次數。 為了能判斷干涉條紋的移動方向,所以要妥善安排兩顆 PD 的位置,使接收的光強信號相位差 90 度,為一 正交訊號<sup>[9]</sup>,因此可進行干涉訊號的方向判別,如圖 7 所示。



圖 7 條紋與 PD 的關係圖

而理想的正交訊號如圖 8 所示,在得到正交訊號後可由 Lissajou 圖得到一正交圓,如圖 9 所示,利用此一圖形就可以進行後續的訊號處理。



## 1.2 訊號處理原理

#### 1.2.1 相位角的運算

由参考文獻[3]得知奈米薄膜的振動振幅只有奈米等級,所以需由相位的變化來分析振動量。由於兩顆 PD 的電壓訊號,其 Lissajou 圖的圓心並非在原點,所以在進行相位角的運算前,必須先整理資料並取一擬合的圓 心,之後才可進行相位角的運算。本文使用最小平方法公式擬合圓心,圓心矩陣 C 如式(12)所示。

$$C = (A^{\wedge}T \bullet A)^{-1} \bullet A^{\wedge}T \bullet Y$$
(12)

而 A^T • A 與 A^T • Y 如式(13)(14)所示。

$$A^{\Lambda}T \bullet A = \begin{bmatrix} 4\Sigma x i^2 & 4\Sigma x i y i & 2\Sigma x i \\ 4\Sigma x i y i & 4\Sigma y i^2 & 2\Sigma y i \\ 2\Sigma x i & 2\Sigma y i & n \end{bmatrix}$$
(13)
$$\begin{bmatrix} 2(\Sigma x i^3 + \Sigma x i y i^2) \end{bmatrix}$$

$$A^{\Lambda}T \bullet Y = \begin{bmatrix} 2(\sum xi^3 + \sum xiyi^2) \\ 2(\sum xi^2 yi + \sum yi^3) \\ \sum xi^2 + \sum yi^2 \end{bmatrix}$$
(14)

在得到圓心之後, 接著求相位角的變化量, 程式的邏輯如圖 10 所示。



## 圖 10 相位角分析程式的流程

在經過上述兩個流程後即可得到一組相位角的變化量值。

#### 1.2.2 快速傅立葉轉換[10]

快速傅立葉轉換<sup>[13]</sup>為離散傅立葉的一個特例, 而離散傅立葉如式(15)所示:

$$X(n) = \sum_{k=0}^{N-1} x_0(k) W^{nk} \qquad n = 0, \quad 1, \quad \dots, \quad N-1$$
(15)

其中W等於 $e^{-j2\pi/N}$ ,由於離散傅立葉對於X(n)中的每個 n 值需要進行 4N 次實數相乘和(4N-2)次相加,對於 N 個 n 值,共需 N×N 和(4N-2)次實數相加,為了改進離散傅立葉演算法,減少運算量,利用 Wnk 的週期性和對稱性,將X(n)按奇偶分組,使一個 N 點的離散傅立葉分解成兩個 N/2 點的離散傅立葉,接著再繼續進行分解運算變成一系列的反覆運算運算,可大幅減少運算量,其運算量為 $\underline{N}_{c}$ 

## 2 量測系統架構

#### 2.1 系統架構

本研究的系統架構如圖 11 所示,包含 1.訊號輸出及比對系統:壓電制動器、電壓放大器。2. Michelson 干涉儀系統: Michelson 干涉鏡組、擴束鏡、He-Ne 雷射、反射鏡。3.擷取電路: PD 電路<sup>[11]</sup>、示波器。4.量測及控制程式:電腦及量測軟體、訊號產生器、訊號擷取裝置<sup>[12]</sup>。



圖 11 系統架構

## 2.2 Michelson 干涉儀光路與系統調整

光路系統上修改傳統 Michelson 的光路。首先雷射光經一反射鏡後進入擴束鏡,接著擴束光進入(分光鏡)BS分成參考光與量測光。量測光先經過一凸透鏡聚焦於待測物上,參見圖2量測鏡1之位置,目的在量測微小待測物。接著將光反射入另一個凸透鏡,將光束垂直入射於量測鏡2上,目的在於提高整體干涉儀的精度,由於聚焦光必須精確的調整,以確保光點聚焦的最佳狀態,否則量測光失焦後,會產生嚴重的量測誤差,所以為確保得到最佳的聚焦光,需再待測件上方加一高倍率 CCD,以利觀察光點大小,在調整完兩凸透鏡後, 才由另一個反射鏡讓量測光尋圓光路回到 BS。參考光部分則多加一個反射鏡增加光程,目的在於避免參考光與 量測光光程差太大,而造成的拍頻效應,導致量測訊號出錯。在 BS 與 PD 光檢測器之間,需要加一個凸透鏡來 放大干涉條紋,以利兩個光檢測器的訊號調整為相差 90°的正交訊號,如圖7所示。完整的光路架構圖如圖12 所示。



圖 12 光路架構

## 2.3 程式設計

本研究使用 Visual C++ 6.0 的程式語言撰寫軟體,並依據訊號的計算邏輯,及訊號變化的模式撰寫所需的 功能,程式的流程如圖 13 所示。主要有控制訊號產生器與 DAQ 擷取卡的工作流程,流程包括 DAQ 卡接收資 料後的計算及處理,圖中圈起的是訊號產生器的輸出訊號變數,可進行掃描範圍的調整。



圖 13 程式流程圖

## 3 量測結果與分析

## 3.1 驗證規劃與流程

為了驗證一量測系統的功能,本文將代表待測物的量測鏡1與壓電致動器結合,如此可模擬待測物的振動,並可與輸出源進行比較。驗證實驗前,為避免誤差或錯誤出自於控制及量測程式,須用一理想的正交訊號 來確認程式的正確性。

在實際架設後,本架構圖如圖 14 所示,為了能量測微小尺寸的待測物及獲得好的量測結果,因此聚焦部分 需調整到最佳裝態,聚焦光束的光腰直徑約 100 μm,干涉條紋如圖 15 所示,之後才能將訊號間的相位調整至 90°。



圖 14 整體架構實體圖



圖 15 干涉條紋

當完成 Michelson 干涉儀的光路後,接著使用示波器輔助調整訊號,當訊號滿足設定的要求後,方可進行驗證。接著以振幅小於 50 nm 的訊號在 10 kHz 至 450 kHz 的範圍內進行檢測,並記錄與分析資料。

## 3.2 量測結果與分析

在完成掃描式檢測的驗證實驗後,分別對 10 kHz,200 kHz,300 kHz,400 kHz,450 kHz FFT 的資料進行 分析的結果。



實驗結果顯示本系統可量測出微小的振動,但隨著頻率的增高,訊雜比下降,如果將角度換算成位移量,在 400 kHz 時的振幅約為 4.67 nm,因此如何提高訊雜比是系統頻寬的重要關鍵。

## 4 結語

本文藉由整合所研發之量測技術與改良型 Michelson 干涉儀的光路,(1)由實驗結果顯示,可檢測微奈米振 動之振幅及頻率。(2)測量頻寬 10 kHz 至 450 kHz。雖然振幅在 4.67 nm 時的訊雜比不高,但仍然測出振動頻 率,若能提升訊雜比,將仍可提升量測頻寬。(3)由於系統中的測量光點小,可用於檢測微小的待測物上,如本 文中所提線寬 600 nm 的微繼電器。(4)程式部分控制與擷取已做好整合,待測物可因需求進行區域性掃描檢 測。(5)藉由改變干涉儀光路使條紋週期由 λ/2 提高至 λ/3.7584。

#### 參考文獻

- [1] 郭惠民, 壓電型加速規量測系統之研製, 聖約翰技術學院, http://www.docin.com/p-225997271.html.
- [2] 何展効. 2004. Mirau 干涉術應用於超音波量測之研究. 中華民國音響學會. 第十七屆學術研討會論文集. 頁 35-41.
- [3] 劉大佑, 2011, 應用奈米壓印技術製作奈米級繼電器, 碩士論文, 國立雲林科技大學.
- [4] Denys Dontsov, 2002, Homodyninterferometer zur berührungslosen Schwingungsana- lyse, Fakult ät für Maschinenbau Technischen Universit ät Ilmenau.
- [5] F. Gario, 2010, Interferometric Vibration Displacement measurement, Romanian Reports in Physics, Vol. 62, No. 3, pp. 671-677.
- [6] Jack Stone, 1996, Correction for wavelength variation in precision interferometric displacement measurements, J. Res. Natl. Stand. Technol. Vol. 101, pp. 671-674.
- [7] Gerd Jaeger, 2010, Limitation of precision length measurement based on interferometers, Measurement, Vol. 43, pp. 652-658.
- [8] P, Hariharan, 2003, Optical interferometry second edition, School of Physics University of Sydney, Australia.
- [9] 鄭恭凱, 2008, 應用於位移量測用之 Fabry-Perot 干涉儀其設計及驗證, 國立雲林科技大學, 碩士論文.
- [10] 黎文明, 1991, 快速傅立葉轉換, 複漢出版社.
- [11] Junyu Ren, 2010, Vibration-displacement measurement with a highly stabilised optical fiber Michelson interferometer system, Optics & Laser Technology, Vol. 42, pp. 208-213.
- [12] 陳雲翔, 共振式掃描量測系統之研製, 碩士論文, 國立虎尾科技大學, 2010.

## 【作者簡介】



王永成(1068),男,漢族,副教授,工學博士(Dr.-Ing.),研究方向:精密機械量測、 光電檢測技術,學習經歷:臺灣成功大學航太所、德國伊棉瑙工科大學量測與感測技術研 究所。Email: wangyc@yuntech.edu.tw