

奈米級振動之頻率掃描量測

張元震¹、王永成¹、楊弘宇¹、鄭英毅¹、張中平³、徐力弘²

¹ 國立雲林科技大學機械工程系

² 國立虎尾科技大學光電工程系

³ 國立中央大學機械工程系

國科會計畫編號: NSC 100-2221-E-224 -015 -

摘要

由於高科技產業的蓬勃發展，對於零組件的尺寸與品質要求也越來越嚴格。微繼電器之共振頻率性質相當重要，因為此一性質可反推出其楊氏模數與殘留應力。

目前積體電路在科技迅速的發展下，當待測件尺寸微小化到 600nm 時，即難以找到適合量測儀器，另外進行掃描式檢測只能靠人為控制判斷。本研究主要目的為建構一套新型 Michelson 干涉儀光路，可自動計算並儲存訊號處理結果。實驗結果顯示，本研究實現連續自動量測功能，目前的量測能力達到頻寬在 20kHz 至 450kHz 及振幅 5nm 以上。

關鍵字：Michelson 干涉儀、奈米級振動，共振頻率

1. 前言

楊氏模數為微機電元件設計與運用上重要參數，其主要量測方法有靜電力吸附量測、微拉伸試驗、奈米壓痕與結構共振等方法。而本文中欲量測的待測件架橋式奈米繼電器[1]，其尺寸為寬600nm，長600μm，可以靜電力、磁力或者壓電驅動方式，促使結構產生振動，所以依其特性選用結構共振量測法，且此方法為非接觸量測，不會對待測件造成破壞，故較適合之量測法。

結構共振的檢出方法中又以超音波與雷射等技術最為適合，因待測物尺寸特殊所以在量測上有很大的困難，且此檢出技術測量頻寬較寬，及方便架設，故現今振動量測大都採用此類方法。

2. 量測工作原理

2.1 干涉儀架構

2.1.1 干涉儀干涉原理

本文使用的量測架構為改良式 Michelson 干涉儀，是在傳統光路中加入聚焦透鏡及增加量測光程，以利量測為小尺寸之待測物及提高量測解析度，將進行干涉儀的公式推導及比較。

Michelson 干涉儀的光路如圖 1 所示。為了方便解說干涉原理[2、3、4]，將入射光與反射光用錯位的方式描繪。

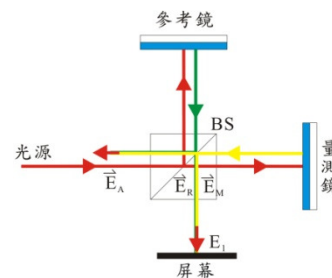


圖 1 邁克生干涉儀的分析圖

令入射光的電場為 E_A ，光波頻率為 ω ，行進距離為 r_A ，電場可表示成(1)式：

$$E_A = A_0 e^{i(\omega t + kr_A)} \quad (1)$$

A_0 是振幅， k 是波數。

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

式中的 λ 為波長，設 X_R 及 X_M 為分光鏡(BS)至參考鏡及量測鏡之距離，來回兩次經過 BS 分光後的電場以 E_R 及 E_M 可表示如下。

$$E_R = \frac{1}{\sqrt{2}} A_0 \times e^{i(\omega t + kr_A + 2kX_R)} \quad (2)$$

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

而干涉光束的電場 E_1 是由 E_R 與 E_M 組合而成，所以：

$$E_1 = \frac{1}{\sqrt{2}} A_0 e^{i\omega t + kr_A} \left[e^{i2kX_R} + e^{i2kX_M} \right] \quad (4)$$

而光強 I_1 等於電場的共軛相乘所以：

$$I_1 = \frac{1}{4} A_0^2 [2 + 2 \cos(2k(X_R - X_M))] \quad (5)$$

令 $\delta = X_R - X_M$ 代入式(5)得

$$I_1 = \frac{1}{2} A_0^2 [1 + \cos(2k\delta)] \quad (6)$$

為了能將光束聚焦於微奈米薄膜上，本文將透鏡加入干涉儀中，架構的光路如圖 2 所示。其中的透鏡 1 與透鏡 2 共焦於量測鏡 1 上，且兩透鏡的光軸線滿足反射定律，即入射角等於反射角。

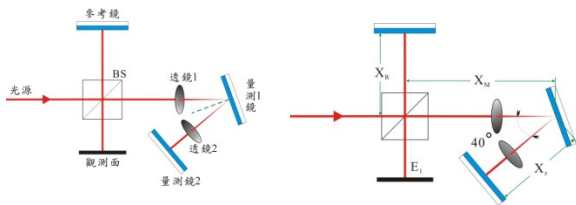


圖 2 本文的干涉儀架構及光路參數

假設光束完全聚焦於量測鏡 1， X_R 及 X_M 是參考鏡與量測鏡 1 至 BS 的距離， X_Z 是量測鏡 1 至量測鏡 2 之距離，由於同樣是經過 BS 兩次分光後，所以 E_R 與式(2)相等，而量測光 E_M 則如(7)所示。

$$E_M = \frac{1}{2} A_0 \times e^{i(\omega t + 2k(X_M + X_Z))} \quad (7)$$

Exit₁ 電場 E_1 等於 E_R 與 E_M 相加，結果為式(8)。

$$E_1 = \frac{1}{2} A_0 e^{i\omega t} \left[e^{i(2kX_R)} + e^{i(2k(X_M + X_Z))} \right] \quad (8)$$

令 $\delta' = (X_R - X_M - X_Z)$ 得光強 I_1 為：

$$I_1 = \frac{1}{2} A_0^2 [1 + \cos(2k\delta')] \quad (9)$$

假設量測鏡 1 向鏡面的法線方向移動了微小的距離 δ'_1 ，如圖 3 所示。若光點離焦(out-of-focus)的影響不計，則 X_M 及 X_Z 皆會引入額外的位移量 δ_M 及 δ_Z 。

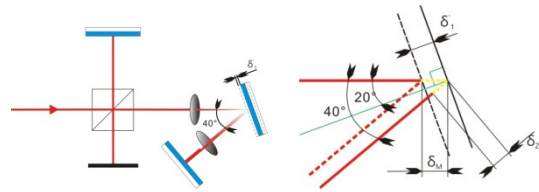


圖 3 位移分析圖

由圖 3 的幾何關係中可知 $\delta'_1 = \cos(20^\circ)\delta_M$ ， $\delta_Z = \cos(40^\circ)\delta_M$ ，所以 $\delta_M + \delta_Z = 1.8792\delta'_1$ ，將結果代入式(2.9)得

$$I_1 = \frac{1}{2} A_0^2 \left[1 + \cos(2k\delta' - 2 \times k \times 1.8792 \delta'_1) \right] \quad (10)$$

由於量測鏡在法線方向移動了距離 δ'_1 ，光程變化的放大率為 3.7584，而本文的雷射波長為 632.8nm，所以干涉條紋的週期對應的長度為 168.37 nm。

2.1.2 干涉訊號的感測原理

本研究在系統中用光電二極體 (Photodiode, PD) 檢測訊號[5、6]，信號正比於所接收的光強。由於干涉訊號為弦波分佈，條紋的間隔固定，而每通過一次就等於走了 3.7584 個波長的距離，因此可計數干涉條紋通過 PD 的次數來測量振動的幅度與頻率。

為了判斷干涉條紋的移動方向，需調整兩顆 PD 的位置(圖 4)，使接收的信號為相位差 90 度的正交訊號，如圖 5 所示。



圖 4 條紋與 PD 的關係圖

理想的正交訊號為一圓形的 Lissajou 圖，如圖 6 所示，本文利用 Lissajou 圖來調整 PD 的位置及信號的品質。

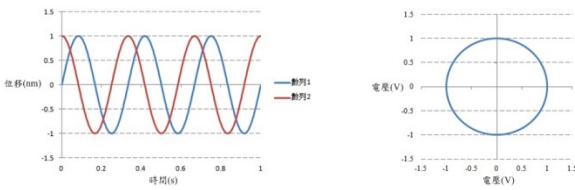


圖 5 ideal orthogonal signal[7] 圖 6 Lissajou figure

2.2 訊號處理原理

2.2.1 相位角的運算

在得到正交訊號後可用來判斷訊號的相位角，因相位角與位移量是正比關係，由於訊號有直流偏置，因此 Lissajou 圖的圓心並非零點，所以在運算相位角前須擬合圓心。

本文用最小平方擬合圓心，將光檢測器 PD 的信號代入此法擬合法來消除直流偏置，如式(10)。

$$A \cdot C = Y \tag{10}$$

$$\Rightarrow C = (A^T \cdot A)^{-1} \cdot A^T \cdot Y \tag{11}$$

而

$$A^T \cdot A = \begin{bmatrix} 4\sum x_i^2 & 4\sum x_i y_i & 2\sum x_i \\ 4\sum x_i y_i & 4\sum y_i^2 & 2\sum y_i \\ 2\sum x_i & 2\sum y_i & n \end{bmatrix} \tag{12}$$

$$A^T \cdot Y = \begin{bmatrix} 2(\sum x_i^3 + \sum x_i y_i^2) \\ 2(\sum x_i^2 y_i + \sum y_i^3) \\ \sum x_i^2 + \sum y_i^2 \end{bmatrix} \tag{13}$$

接著將式(12)取反矩陣後與式(13)代入(11)，即可得到圓心的座標，補償之後可求相位角。

2.2.2 快速傅立葉轉換

快速傅立葉轉換[8]為離散傅立葉的一個特例，而離散傅立葉如式(14)所示：

$$X(n) = \sum_{k=0}^{N-1} x_0(k) W^{nk} \quad n = 0, 1, \dots, N-1 \tag{14}$$

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 $N \times N$ 和 $(4N-2)$ 次實數相加，為了改進離散傅立葉算法，減少運算量，利用 W^{nk}

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疊代運算，其運算量為 $\frac{N}{2} \log_2 N$ ，可大幅減少運算量。

3. 量測系統架構

3.1 系統架構

本研究的整體架構如圖 7 所示。

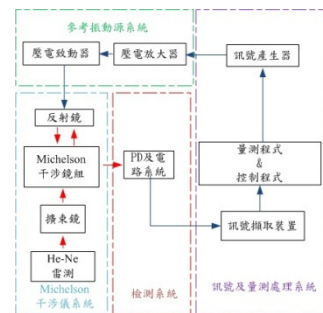


圖 7 系統架構示意圖

Michelson 干涉儀的主架構系統：

架構如圖 8 所示。此一系統以氦氖雷射為光源，當光束經準直擴束後形成近乎平行的擴束光束入射於分光鏡(BS)，形成參考光與量測光。量測光經聚焦透鏡 1 後，聚焦至待測物上，再反射於聚焦透鏡 2，形成平行光後經由反射鏡 4 反射，接著循原路徑回到 BS，再一次分光。而參考光經反射鏡 2 反射至反射鏡 3 後，循原光路回 BS 分光，然後與量測光疊加在一起形成干涉光束，在經一聚焦透鏡擴束後，由光檢測器接收。參考光經兩次反射鏡是為了讓參考光程與量測臂相等，目的在將死徑歸零，讓干涉光有最高的對比度。

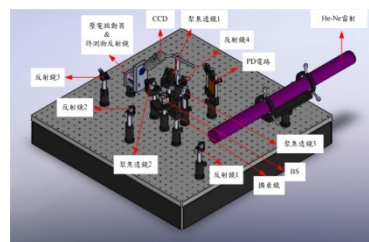


圖 8 Michelson 干涉儀的實驗架構

檢測系統[9]：

干涉訊號由光檢測器(PD)接收後轉換成光電流的形式，在檢測訊號前要適當的調整兩顆PD的位置，使信號彼此正交。此一調整程序需觀看示波器的波形，當信號的相位差90度時，示波器的Lissajou圖為一個正圓。正交訊號可用來判別干涉條紋的運動方向及位移量。圖9為PD及放大電路。

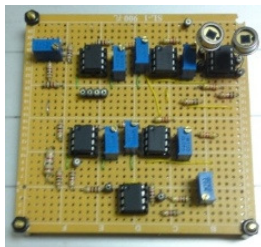


圖 9 PD 及放大電路

訊號及量測處理系統：

本系統主要由訊號及量測處理程式、訊號擷取裝置及訊號產生器所組成。訊號擷取裝置如圖10所示，是陳雲翔[10]研發的 CPLD EPM570 信號擷取裝置，單一通道的取樣率為5MHz，可接收的電壓範圍為0~2V，具有16位元的解析度。訊號產生器為雙儀科技公司編號TFG3500E的產品，具有可程式控制的功能，可用來建構掃描頻率。本系統的訊號及量測程式以C語言撰寫，功能有頻率掃描、前訊號處理及後續一系列的信號處理與分析。



圖 10 訊號擷取裝置[10]

參考振動源系統：

本文振動源為壓電致動器，可精準的產生各種振動的頻率與振幅。量測時將不同的待測物固定在壓電平台上，用訊號產生器、壓電放大器使待測物產生振動，經後級系統的處理後，可分析出待測件的振動頻率，圖11為本文組裝之壓電平台。

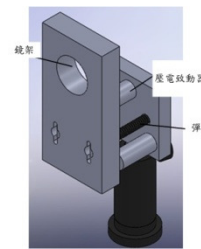


圖 11 三軸控制之壓電平台

4. 量測結果與分析

4.1 薄膜試片振動之測量

本系統的目的在測量架橋式奈米薄膜的振動，但因薄膜本身尺寸問題而塌陷，所以無法自行振動，因此只能用已塌陷的薄膜進行實驗，並進行分析。

4.2 規劃與流程

奈米薄膜不因塌陷而改變尺寸的數量級，為了確認本文對微小待測件的測量能力，因此將塌陷的奈米薄膜架設在壓電平台上，利用平台來振動奈米薄膜，圖12為實驗架構圖，實驗時以穩定的頻率振動奈米薄膜，條件為：

1. 100nm 以下的振幅。
2. 振動頻率 20kHz~50kHz 時的取樣率為 2MS/s。
3. 振動頻率 51kHz~450kHz 時的取樣率為 10MS/s。

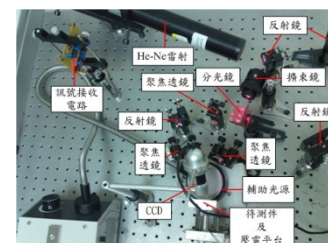


圖 12 薄膜量測架構圖

4.3 結果與分析

圖4-13~4-20為實驗結果的快速傅立葉轉換，結果顯示：

- 一. 在量測微奈米級的待測件時，本系統依然可以量測出待測物的振動頻率。
- 二. 因頻率與振幅成反比，會導致高頻時訊雜比下降，所以高頻時必須加大待測件的振幅提高訊雜比，以得到更好的結果。

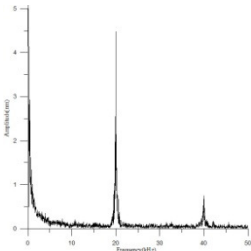


圖 13 實體量測 20kHz

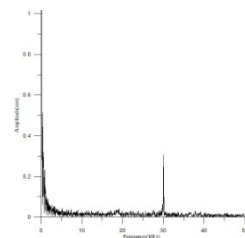


圖 14 實體量測 30kHz

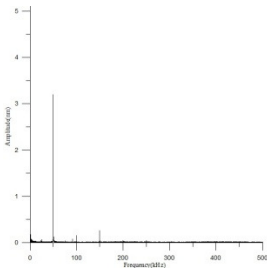


圖 15 實體量測 50kHz

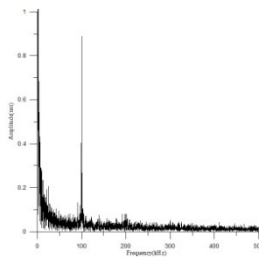


圖 16 實體量測 100kHz

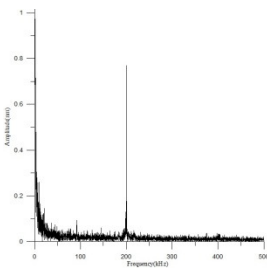


圖 17 實體量測 200kHz

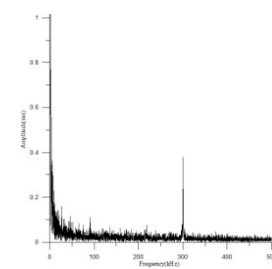


圖 18 實體量測 300kHz

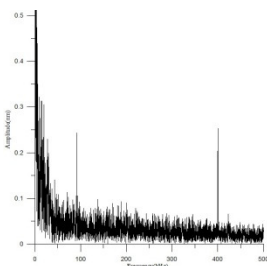


圖 19 實體量測 400kHz

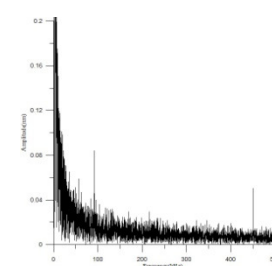


圖 20 實體量測 450kHz

5. 結論

本文用 Michelson 干涉儀的架構設計一套奈米振動的檢測系統。以下為本文的研究成果及性能：

- 對於尺寸小且對量測光強損耗高之奈米級的待測件，以透鏡聚焦在待測件進行量測，並降低參考光光強，以調整兩束光的光強比值，達到最佳條紋可視度。
- 藉由改變干涉儀光路使條紋週期由 $\lambda/2$ 提高至

$\lambda/3.7584$ 。

- 針對次微米元件，研發出振動量測級訊號處理的方法，且具有頻率掃描的功能。
- 掃描的頻率範圍在 20kHz~450kHz，對於頻率解析度為 0.1526 kHz，待測件的振幅需在 5nm 以上 167nm 以下。
- 設計雙干涉儀的比對系統，驗證了本系統對於振動的準確度。

根據研究的過程及結果，總結經驗提出以下的建議：

- 架構的微小化及一體性，可方便架設在作業的場所。
- 根據振幅與訊號的關係分析，完善訊號處理的能力，以降低雜訊的影響。

6. 參考文獻

1. 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。
2. Jack Stone, 1996, Correction for wavelength variation in precision interferometric displacement measurements, J. Res. Natl. Stand. Technol. Vol.101, pp.671-674.
3. Gerd Jaeger, 2010, Limitation of precision length measurement based on interferometers, Measurement, Vol.43, pp.652-658.B. Etkin, Dynamics of Atmospheric Flight, John Wiley and Sons, New York, USA, pp. 166-180, 1970
4. P, Hariharan, 2003, Optical interferometry second edition, School of Physics University of Sydney, Australia.
5. 安毓英、曾小東，2004，光學感測與測量，五南圖書出版公司，頁 181-187。
6. 劉紅麗、張菊秀，2007，傳感與檢測技術，國防工業出版社，頁 82-83。
7. 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。
8. 黎文明，1991，快速傅立葉變換，復漢出版社
9. Junyu Ren, 2010, Vibration-displacement measurement with a highly stabilised optical fiber Michelson interferometer system, Optics & Laser Technology, Vol. 42, pp.208-213.
10. 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。

Frequency scanning measurements for the vibration in the nanometer-order range

Yuan-Jen Chang¹, Yung-Cheng Wang¹,
Ying-Yi Cheng¹, Hong-Yu Yang¹,
Li-Hon Shyu², Chung-Ping Chang³

¹Department of Mechanical Engineering,
National Yunlin University of Science and
Technology

²Department of Electro-Optical Engineering,
National Formosa University

³Department of Mechanical Engineering,
National Central University

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 resonant frequency, because 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 experiemental results show that the measuring range of frequencies 20kHz~ 450kHz and amplitude over 5 nm can be achieved by the proposed automatic measurement system.

Keywords : Michelson interferometer; Nano-order
Vibration ; Resonance frequency