

廣域型壓電真空感測元件之研製

Development of a Piezoelectric Vacuum Sensing Component for Wide-Range Pressure

吳嘉哲、林哲宇、陳劭恩、謝汎鈞、陳峰志

Chia-Che Wu, Che -Yu Lin, Shao-En Chen, Fan-Chun Hsieh, Fong-Zhi Chen

本研究研製一兩端固定之懸臂樑式壓電真空壓力感測元件，此一兩端固定之壓電樑由一層壓電材料層 (PZT) 與基板層 (銅) 組成。兩對電極分別置於懸臂樑的兩端，其中一對電極作激盪懸臂樑產生共振之用，另一對電極作汲取振動能量轉換回電訊號之用。由實驗結果得知，壓力感測元件量測範圍為 6.5×10^{-6} –760 Torr，不同的真空壓力氣體黏滯性所產生的阻力不同，懸臂樑擺動的電壓輸出便會不同。實驗結果得知，感測器輸出電壓與氣體阻尼成反比，可直接由電壓輸出值求得真空壓力。

A clamped-clamped beam type piezoelectric vacuum pressure sensing element was developed in this research. The clamped-clamped piezoelectric beam is composed of a PZT layer and a copper substrate. Two pairs of electrodes are set near both ends. Input voltage was applied to one pair of electrodes to vibrate piezoelectric beam and output voltage was measured at the other pair of electrodes. Experimental results showed that developed pressure sensor has a wide range from 6.5×10^{-6} to 760 Torr. Because the viscous forces on piezoelectric beam vary at different air pressure, the vibration of beam depends on vacuum pressure. Experimental results showed that output voltages of piezoelectric sensors were mverse proportional to gas damping ratio. Vacuum pressures were estimated from output voltage.

一、前言

真空技術在近代尖端科學技術，如表面科學、薄膜技術、空間科學、高能粒子加速器、微電子學、材料科學等領域中都佔有關鍵的地位，另一方面真空技術在工業生產中也有日益廣泛的應用，例如產品包裝、真空鑄造、真空乾燥等。真空壓力範圍已從大氣壓力 (760 Torr) 一直到極高真空 (10^{-13} Torr)。在這麼廣的真空範圍中，由於氣體分子的物理性質差異，其真空壓力已無法由單一原理來量測。

真空包含的壓力範圍很廣，在最初的階段，真空系統中的氣體有如一般流體呈氣流 (gas flow) 狀態，若壓力越來越低，低至 10^{-3} Torr 甚至更低時，則此種氣流的狀態漸漸轉變成氣體分子運動狀態，此時氣流形態實質上已非「流」的形態。在技術上為方便起見，通常多將真空區分成不同的範圍，比較嚴謹的區分常考慮真空中的氣流形態。不同氣流形態的條件，可用氣體分子的平均自由徑 (λ , cm) 大小來界定， $\lambda = 8.6 \times 10^3/P$ ，此式用於 20 °C，壓力單位為 Torr。

1. 黏滯氣流

抽真空必經過從大氣壓力開始逐漸壓力下降的抽氣階段，此最初階段的氣流形態稱為黏滯氣流 (viscous flow)，亦簡稱為黏滯流， $d/\lambda > 100$ ， d 為儀器尺寸，單位為 cm。其特徵為氣體分子之間有互碰撞的作用，每一氣體分子的運動受其周圍氣體分子的限制，氣體分子之間有摩擦力 (即黏滯性)，氣流的方向與氣體分子運動的方向一致，故此氣流為連續流。

2. 過渡氣流

真空系統維持連續被抽氣，氣體的壓力下降至氣流形態改變，此時有一部分氣流已轉變成下面所述的分子氣流，而剩下的部分仍維持在黏滯氣流，此氣流範圍稱為過渡氣流 (transition flow)，簡稱過渡流， $2 < d/\lambda < 100$ 。此氣流的狀況頗為複雜，除非真空系統必須在此壓力範圍操作而且需要精確控制其壓力變化外，因為真空系統的壓力很快經過此範圍而進入下一範圍，故通常多不考慮其特徵。

3. 分子氣流

當真空系統中氣體的壓力降低至一定程度時，氣體分子完全呈自由任意運動 (random motion) 的形態，此時已進入分子氣流簡稱分子流的範圍。其特徵為氣體分子完全向各方向任意運動，氣體分子之間無互相作用，氣體分子相遇時為彈性碰撞，碰撞作用遵守動能守恆與動量守恆定律，氣體分子與容器壁碰撞的機會較互相之間碰撞的機會為大，氣體分子漫步到真空幫浦而被抽入其中為抽氣的機制。一旦真空系統中的氣流形態進入分子流範圍，因為此時氣體分子已經為各別自由運動，事實上已非氣流，故不論壓力降至多低，真空系統中的氣流形態均為分子流 (molecular flow)， $2 > d/\lambda$ 。

一般應用真空時常將真空度分為幾個不同的範圍。比較合理的區分方式為按氣流的形態來區分，但是實用時則以壓力來區分較常見，而本文將真空範圍以壓力作為區分。

真空系統中的壓力僅為量測的量，很少用理論方法計算求出，量測壓力的儀器為真空計 (vacuum gauge)，實際上真空計即是壓力計或氣壓計，因在

不同的壓力範圍量測壓力的原理及技術不同，且構造及原理與普通的壓力計差異很大，故用真空計名詞以與一般的壓力計做區別。

真空計以操作原理分類可分為絕對真空計與相對真空計兩大類：絕對真空計 (absolute vacuum gauge) 和相對真空計 (relative vacuum gauge)。絕對真空計為直接測定單位面積上所受的力。相對真空計為間接利用氣體壓力與一些量的關係，測定該量而導出壓力，如利用熱傳導、氣體分子離子化等技術而間接測定壓力，不同的氣體所測到的壓力並不一定相同。

一般採用不同類型的真空計分別進行相應範圍內真空度的測量⁽¹⁻²⁾，如圖 1 所示。在粗略真空 (1–760 Torr) 多採用彈性元件真空計，中度真空 (10^{-3} –1 Torr) 多採用熱傳導式真空計^(3, 4)，高真空 (10^{-7} Torr) 多採用離子真空計^(5, 6)。

上述所提到的真空計有薄膜式真空計^(7, 8)、熱傳導真空計、離子真空計、黏滯性真空計⁽⁹⁻¹²⁾ 等。薄膜式真空計是利用氣體作用於薄膜表面，薄膜受力變形使電容值產生變化，故電容變化可估算壓力值。熱傳導真空計中的發熱物體受到氣體分子碰撞所導致的熱量傳導，其傳導之熱量與氣體分子碰撞發熱物體之機率成正比，由此可推算出真空壓力與傳導之熱量亦成正比，估算出真空壓力值。離子真空計是利用量測真空系統內剩餘氣體分子數量來推導出真空壓力大小。黏滯性真空計則利用殘存氣體分子之黏滯特性來計算真空環境的壓力值，旋轉轉子黏滯性真空計^(13, 14) 可量測的真空範圍在 10^{-7} – 10^{-1} Torr 範圍之間，氣體黏滯性造成的空氣阻力會與真空度成正比。

近年來國內半導體生產製造、光電產業及真空等產業蓬勃發展，鍍膜和蝕刻為半導體製程重要的技術之一，鍍膜和蝕刻等技術皆須於真空環境中進行，故此範圍的真空量測相當重要。蒸鍍時真空度必須在 10^{-7} – 10^{-5} Torr 之間，因為較低的氣壓可以提高蒸鍍速率及保持薄膜的純淨度與緻密度。濺鍍時壓力須小於 10^{-2} Torr，才能減少離子與氣體分子產生碰撞，增加粒子的平均自由徑，使薄膜在基板上的厚度均勻分布。活性離子蝕刻 (reactive ion etcher, RIE) 為了增加蝕刻之方向性，蝕刻系統

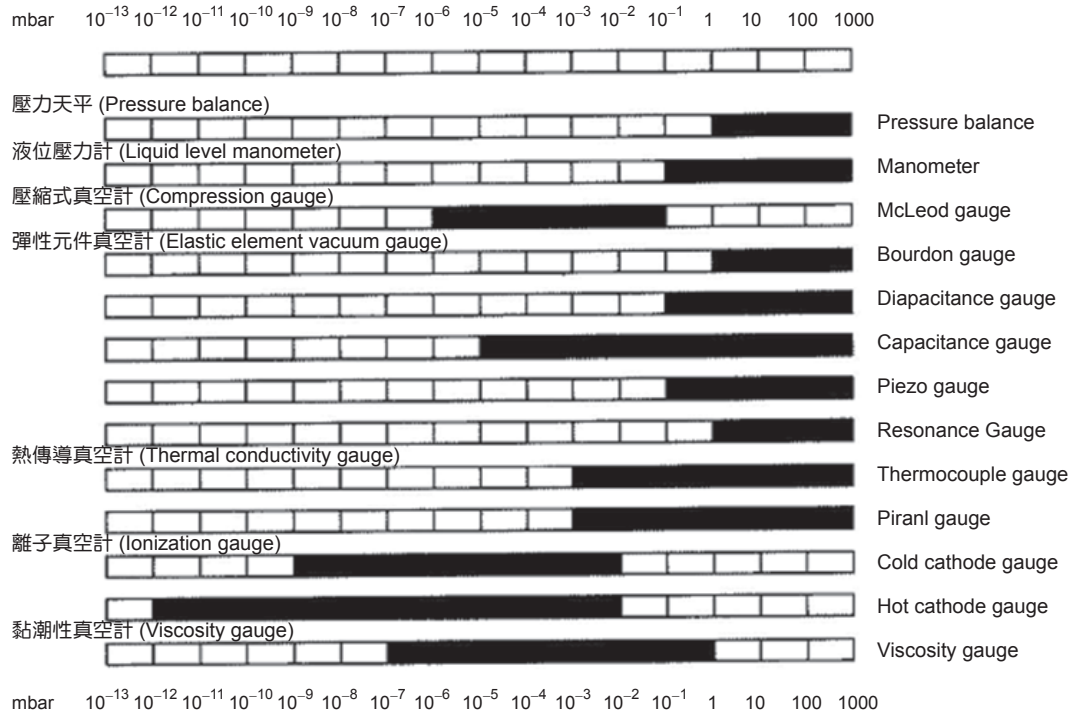


圖 1. 典型真空計之量測範圍⁽¹⁾。

操作於真空度低於 10^{-2} Torr 環境中，以減低離子與中性粒子碰撞機率。電子磁旋共振電漿 (electron cyclotron resonance plasma, ECR) 為了能達到製程所需高密度與均勻度的特性，操作壓力低於 10^{-4} Torr 以下。高密度電漿 (high density plasma, HDP) 操作於真空度 10^{-6} – 10^{-2} Torr 之間，可以提高蝕刻速度，以及增強蝕刻方向。

由上文中我們可以得知，現今並無一真空計其量測範圍包含一般半導體製程所運用之真空壓力 10^{-7} – 10^{-2} Torr，雖然現今旋轉轉子黏滯性真空計可量測 10^{-7} – 10^{-1} Torr 真空範圍之間，但由於其他附加裝置如鋼球、控制線圈等，使體積與重量增加不少並增加了系統的複雜度，侷限了此真空計應用範圍。而其他利用黏滯性原理所發展的真空計體積較微小，但須另外透過一致動器驅動元件，甚至還需光學感測設備，將光學訊號轉換為電訊號，量測設備過於繁雜。

本研究設計一橋式懸臂樑壓力感測器。感測器裝置利用兩 PZT 當作不同作用元件，分別為一感測元件與一致動元件，當給 PZT 致動元件供給電壓時，會造成懸臂樑產生形變，當樑在擺盪時，PZT 感測元件會隨著樑的彎矩而受力造成正壓電效應，造成電壓的輸出。藉由不同的真空度下氣體

黏滯性不同，PZT 隨著懸臂樑擺動的電壓輸出便會不同，藉此來達到量測真空壓力的目標。

本研究有以下四個具體目標：

- (1) 利用壓電材料設計製造一可用來量測廣域真空壓力之壓電式壓力感測器，其量測範圍可包含 10^{-6} –760 Torr。
- (2) 感測器裝置體積小、重量輕、量測方式簡單、成本低以及尺寸小於 20 mm × 20 mm × 500 μ m。
- (3) 探討不同真空壓力區間與阻尼比的關係。
- (4) 比較不同氣體 (N_2 、Ar) 阻尼比對感測器之影響。

二、運作原理與尺寸設計

1. 元件運作原理

因為在不同的真空壓力下氣體運動的形式不同，其氣體阻尼也不同，因此本研究中提出利用自我感知壓電微共振器來偵測真空環境的阻尼係數，進而推算真空腔體內的壓力。其做法是在共振結構上沉積一層 PZT 壓電材料薄膜，利用其中的 PZT 致動器振盪結構，PZT 感測器會隨著結構的彎矩而受力造成正壓電效應，造成電壓的輸出。藉由不

同的真空度下氣體黏滯性不同，PZT 隨著結構擺動的電壓輸出衰減率便會不同，藉此來達到量測真空壓力的目標。此方法不僅能增加其靈敏度，同時可以省去在很多文獻中所需之外在繁複的訊號處理設備，本研究的元件設計模型如圖 2 所示。

2. 元件材料選擇

我們選用 PZT-5A 作為壓電層材料，因其擁有較高的壓電常數與力電耦合常數，在機械能與電能轉換過程所損耗的能量較小。由於壓電感測器之結構由基板層與壓電層組合，為了下電極的方便製作，我們使用銅做為基板材料，銅的楊氏系數較低 (148 GPa) 且具高導電性，一方面可以降低我們的工作頻率，另一方面方便傳導電流。

3. 元件尺寸設計

我們設計的真空壓力感測器裝置利用兩 PZT 當作不同作用元件，分別為一感測元件與一致動元件，當給 PZT 致動元件供給電壓時，會造成懸臂樑產生形變，當樑在擺盪時，PZT 感測元件會隨著樑的彎矩而受力造成正壓電效應，造成電壓的輸出，藉由不同的真空度下氣體黏滯性不同，PZT 隨著懸臂樑擺動的電壓輸出便會不同，藉此來達到量測真空壓力的目標。

我們以 Euler-Bernoulli beam^(15, 16) 假設為基礎，進行推導之數學模型⁽¹⁷⁾ 進行尺寸設計力保守方程式如公式 (1)。

$$\begin{aligned}
 & YI \frac{\partial^4 w(x,t)}{\partial x^4} + c_s I \frac{\partial^5 w(x,t)}{\partial x^4 \partial t} + c_a \frac{\partial w(x,t)}{\partial t} + \\
 & m \frac{\partial^2 w(x,t)}{\partial t^2} + \alpha v_{in}(t) \left[\frac{d\delta(x)}{dx} - \frac{d\delta(x-x_1)}{dx} \right] + \\
 & \alpha v_{out}(t) \left[\frac{d\delta(x-x_2)}{dx} - \frac{d\delta(x-L)}{dx} \right] = 0
 \end{aligned} \quad (1)$$

其中， YI 為複合樑之斷面剛性，代表結構抵抗彎矩的能力， $w(x,t)$ 為懸臂樑的撓曲函數，即懸臂樑各斷面中性軸的側向位移 (以 y 方向為正向)， $c_s I$ 為組合斷面因結構的黏滯性造成的等效的阻尼項， c_s 為應變率阻尼系數， I 為壓電材料層與基板層之組合斷面的慣性二次矩， c_a 為空氣阻尼系數， m 為

單位長度之質量， α 則視為施加電壓造成懸臂樑內部產生力矩的係數，此懸臂樑壓電感測器含有兩對電極，且輸入電極的位置從 $x = 0$ 至 $x = x_1$ ，輸出的電極從 $x = x_2$ 至 $x = L$ ，而只有電極涵蓋的範圍有電場產生，其中 $v_{in}(t)$ 與 $v_{out}(t)$ 分別為輸入與輸出電極的電壓差。

假設壓電感測器的運作只考慮在共振頻率 (第一模態) 的影響，則數學模型推導出的輸出電壓與輸入電壓的比可以寫成公式 (2)。

$$\left| \frac{v_{out}}{v_{in}} \right| = \frac{|\omega \tau_c \lambda_1 x_1|}{\sqrt{[-2\xi \tau_c \omega^3]^2 + [2\xi \omega^3 + \tau_c \lambda_1 x_2 \omega]^2}} \quad (2)$$

其中， ω 為懸臂樑第一個模態的共振頻率， τ_c 為輸出電路的時間常數， λ_1 為積分因子， ξ 為模態座標函數中之阻尼項，可表示如公式 (3)，其合併了空氣阻尼跟結構阻尼造成的效果。

$$\xi = \frac{c_s I \omega}{2YI} + \frac{c_a}{2m\omega_r} \quad (3)$$

為了真空壓力感測器實際運用的考量尺寸不宜過大，我們懸臂樑長度訂為 20 mm，寬度訂為 5 mm，且壓電片最薄厚度為 200 μm ，訂立了壓電感測器之材料參數後，接著利用數學模型解析解尋找出符合我們需求之基板與壓電材料厚度，由於我們不知實際上阻尼比為何，故先假定一值 0.01 以進行數學模型計算，當銅基板厚度為 200 μm 時有最佳的壓電輸出，故銅基板厚度訂為 200 μm 。

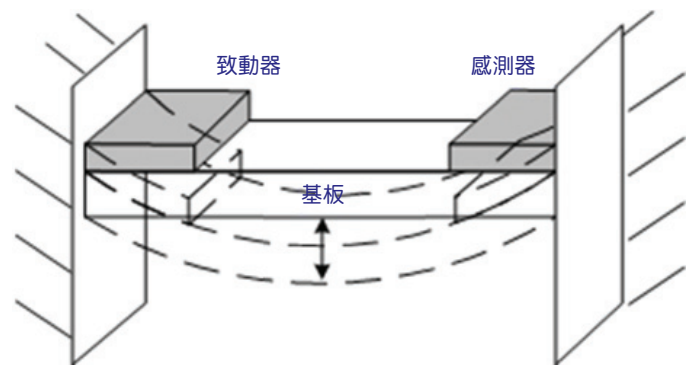


圖 2. 微真空壓力感測元件模型。

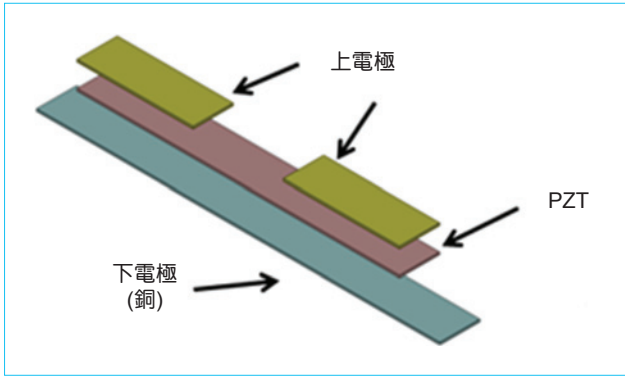


圖 3. 元件試片設計示意圖。

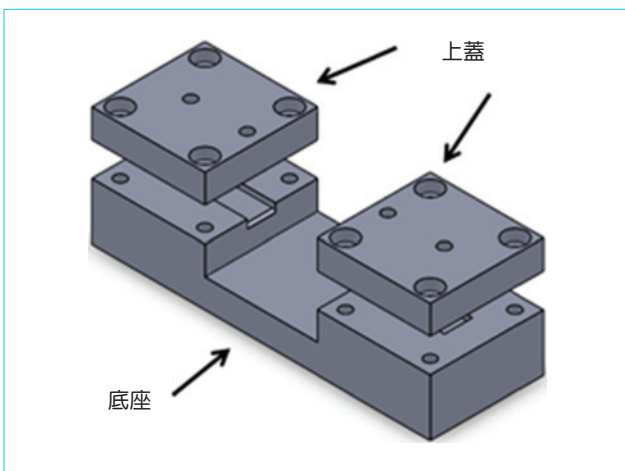


圖 4. 夾具模型示意圖。

4. 元件電極設計

兩對電極分布在壓電材料層的上表面與下表面，分別置於懸臂樑的兩端，其中一對電極位於懸臂樑的固定邊界旁，作為一致動元件用來使懸臂樑產生共振，另外一對電極則位於另一邊固定邊界旁，作為一感測元件來擷取振動能量轉換回電訊號，如圖 3 所示。關於電極的尺寸設計由前述所提出之力保守方程式，可以得到兩項結論，其一，輸入電極在緊鄰著固定端時且長度在 4.4 mm 時，致動端可產生最大的致動力，其二，輸出電極在緊鄰著固定端時，其長度越短時輸出之開路電壓 (open circuit voltage) 越大，文獻中實際測試之輸出電壓可達輸入電壓之兩倍。

為了使懸臂樑得到最大的致動力以及方便製作，我們將輸入與輸出電極尺寸皆訂為 4.4 mm。

PZT 層平均厚度約為 10 μm ，上電極之製作是以銀漆網刷的方式塗佈於其上表面，下電極則將整層的銅基板當做下電極。

5. 夾治具設計與製作

為了使真空壓力感測器每次量測時皆為相同邊界條件，我們需設計一可將懸臂樑兩端固定之夾治具，包含了上蓋與底座兩個部分，上蓋中分別有兩個孔可用來將致動元件與感測元件之上下電極導出，而底座中有一溝槽可以將設計過後的試片置於其中，而最後利用 M2 螺絲將上蓋與底座鎖住，使試片達到固定無位移之目的的夾具，如圖 4 所示。本研究選用透明的壓克力做為夾治具材料，壓克力有密度低 (1190 kg/m^3)、機械强度高、抗拉伸和抗衝擊的能力佳、具有高透明度、低價格且易於機械加工等優點。

三、實驗架設與實驗步驟

1. 實驗設備

實驗設備包含一個不鏽鋼材質的真空腔體，將氣體抽出腔體的抽氣幫浦，以及控制氣體流量大小的氣體流量裝置，同時真空腔體包含數個可以傳輸內外電訊號的真空電引入裝置，為了量測即時的真空度，實驗裝置中也包含一個參考用的真空計。

本實驗使用頻譜分析儀來量測電壓輸入與輸出的頻率響應圖，而輸入訊號則由訊號產生器產生正弦波訊號，過程中裝設一個放大器將訊號放大傳遞至元件運作。

2. 實驗步驟

本研究量測系統的架設如圖 5 所示，由於我們的裝置需在真空環境中作量測，所以訊號皆透過電引入傳遞。首先利用訊號產生器製造一個掃頻的正弦波，並利用功率放大器將輸入的訊號振幅放大增加驅動力，使輸出訊號更容易量測，驅動 PZT 致動元件振盪懸臂樑，會造成懸臂樑產生形變，當樑在擺盪時，PZT 感測元件會隨著樑的彎矩而受力造成正壓電效應，造成電壓的輸出。將 PZT 感測元件輸出的訊號與 PZT 致動元件驅動的訊號回傳

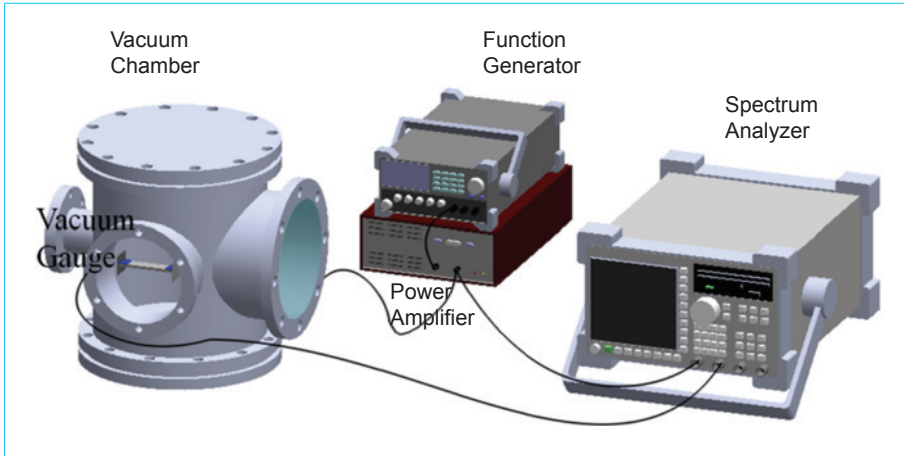


圖 5. 量測系統示意圖。

至頻譜分析儀，則可由頻譜分析儀直接將兩輸入訊號在一頻率下進行比對，並且將每筆量測資料紀錄，以利後續結果探討。

由於真空環境仍含有殘存的氣體，而不同真空度下此殘餘氣體分子的黏滯特性不同，對懸臂樑所造成的不同阻力，PZT 感測器隨著懸臂樑擺動所得到的訊號輸出便會不同，藉此來達到量測真空壓力的目標。

四、實驗結果與討論

1. 不同壓力下之頻率響應

本研究利用真空量測系統中頻譜分析儀求得之頻率響應圖，如圖 6 為氮氣 (N_2) 環境下的量測結果，其中包含了四種真空壓力 (5×10^{-6} , 7.5×10^{-4} , 1, 75 Torr) 下之結果。由於不同真空度下腔體內殘存氣體對懸臂樑所造成不同的阻力，我們可以發現從低真空到高真空， v_{out}/v_{in} 值隨壓力降低而逐漸上

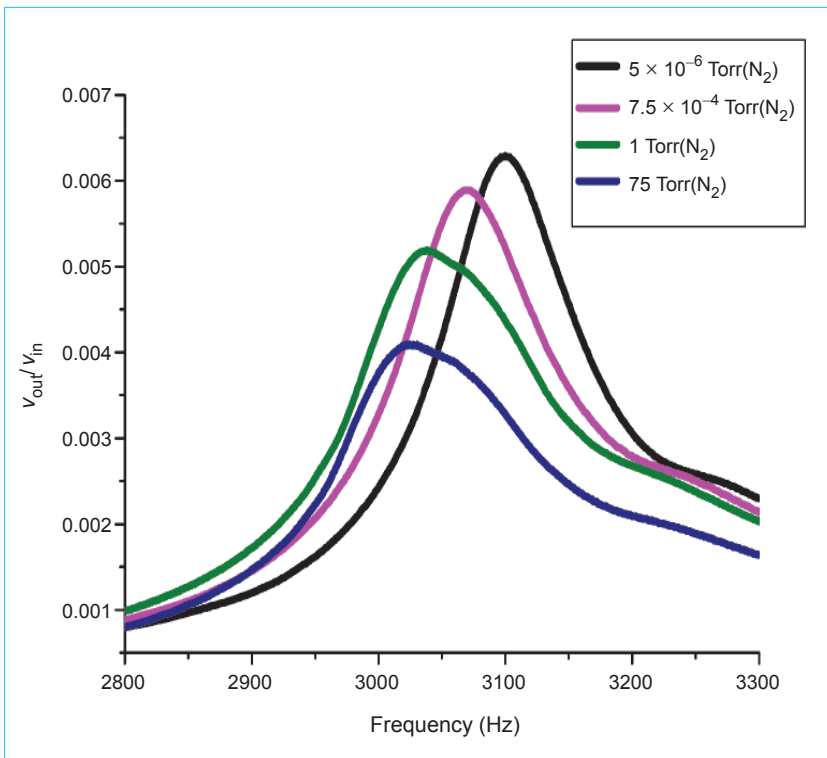


圖 6. 頻率響應圖。

升，代表腔體中殘存氣體越稀少，氣體黏滯力對懸臂樑所造成的阻力越小，因此輸出越大；反之腔體中殘存氣體越多，氣體黏滯力對懸臂樑造成的阻力越大，輸出的訊號將越微弱。

由頻率響應圖對照出懸臂樑的共振頻率，真空壓力感測器在此頻率下有最大的振幅，其對應的頻率即感測器之工作頻率，工作頻率包含結構自然頻率 (structure nature frequency, ω_n) 以及阻尼自然頻率 (damping nature frequency, ω_d)，結構自然頻率為無阻尼下之共振頻率，阻尼自然頻率會隨著空氣阻尼增加而降低。在結果中也可以發現當腔體內壓力增加，阻尼自然頻率受到空氣阻尼增加之影響而下降，而感測器之工作頻率亦隨之下降。

2. 輸出與壓力之關係

本實驗量測範圍涵蓋 $6.5 \times 10^{-6} - 760$ Torr，腔體內通入之氣體為氮氣，將各工作頻率下之最大振幅量測結果歸納如圖 7 所示，實驗結果中每一壓力值均對應 v_{out}/v_{in} 值，由此得知本研究之真空壓力感測器，可以直接由 v_{out}/v_{in} 值間接知道腔體之真空度，其量測範圍涵蓋了 $6.5 \times 10^{-6} - 760$ Torr。

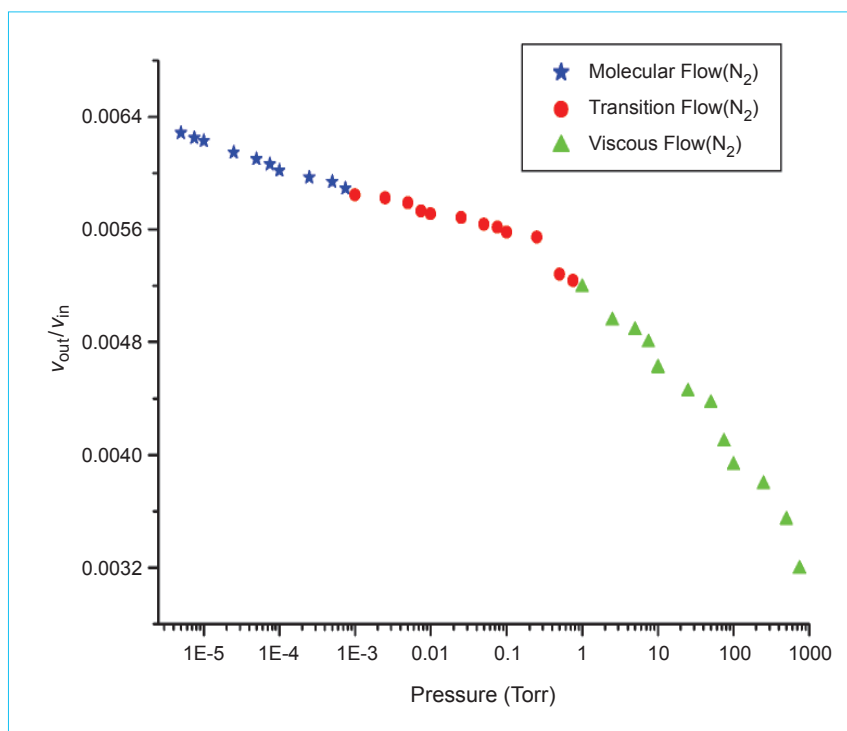
圖中將我們以壓力來將真空區分為三個範圍並進行探討。壓力在 10^{-3} Torr 以下屬於高真空為分子流 (molecular flow)，壓力涵蓋範圍 $0^{-3} - 1$ Torr 之間屬於中度真空為過渡流 (transition flow)，而壓力大於 1 Torr 以上屬於粗略真空為黏滯流 (viscous flow)，將各區間之結果以線性回歸的方式求得最佳線段，以探討各區間之線段。

黏滯流線段之斜率大於過渡流線段之斜率大於分子流線段之斜率，由此我們可以推論黏滯流之氣體黏滯力大於另外兩種氣流，且黏滯流之氣體黏滯力改變量也較過渡流與分子流大，故黏滯流之 v_{out}/v_{in} 值變化量較顯著。

3. 阻尼比與壓力之關係

由上一節可以推論黏滯流之氣體黏滯力改變量較過渡流與分子流大，本章節我們將上一節之結果利用半功率法求得各壓力之阻尼比 (damping ratio)，並以壓力來將真空區分為分子流、過渡流、黏滯流三個範圍進行探討，結果如圖 8 所示，此求得之阻尼比為結構阻尼比以及氣體對結構造成的阻尼比之和。

圖 7. 不同壓力下之 v_{out}/v_{in} 值 (氮氣)。



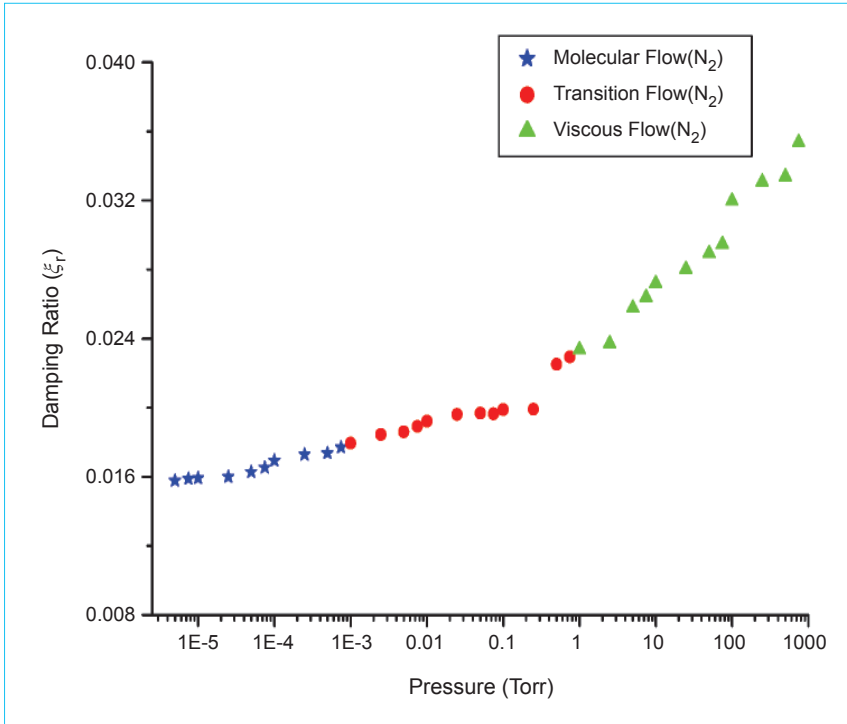


圖 8. 不同壓力下之阻尼比 (氮氣)。

當壓力越大時，代表腔體中氣體分子越多，分子間更加容易產生碰撞，而氣體對感測器造成的阻尼會隨著壓力增加而增加。將結果經由線性回歸之後，我們可以發現在分子流區間其阻尼比受到壓力影響並不顯著，在稀薄的氣體環境下其氣體越不容易產生碰撞，氣體對結構造成的阻尼比並不大，而所量得之阻尼比會越趨平緩，惟其結構之阻尼比約為 0.0155。

4. 不同氣體之比較

前面幾個章節均是在腔體中通入氮氣，並量測其真空環境下之輸出 v_{out}/v_{in} 值，而後利用半功率法推算出其壓力下之阻尼比，以及討論不同壓力區間之量測結果。本章節將比較不同氣體環境下所量測之結果，我們將通入的氣體改為氬氣 (Ar) 進行量測，圖 9 為氬氣與氮氣在不同壓力下之輸出結果。

由量測結果我們可以發現無論在氮氣環境或是在氬氣環境中，其輸出結果有相近似的趨勢，當高真空時腔體中氣體較稀薄，此氣體分子對懸臂樑造成的阻力不大，主要為懸臂樑本身振動所產生的壓電輸出，而輸出之 v_{out}/v_{in} 值較平穩。而在較粗略真

空時腔體中氣體分子較多，此流層懸臂樑的壓電輸出主要受氣體分子的影響，故輸出之 v_{out}/v_{in} 值變化較明顯。

在相同壓力下，於氬氣環境中的輸出皆較氮氣環境中小，我們可以斷定氬氣之氣體黏滯力對懸臂樑造成的阻力較大，輸出的訊號較氮氣環境中微弱，其阻尼比我們也利用半功率求得。我們將氬氣與氮氣之阻尼比整理於圖 10 所示。

利用半功率法求得不同壓力下的阻尼比，其阻尼比與氮氣環境量測結果有相近似的趨勢，在高真空環境下氣體分子較稀少，對懸臂樑碰撞所造成的阻力較小，其阻尼比主要為懸臂樑結構本身的阻尼，阻尼比約為 0.016。而在較粗略真空環境下氣體分子較多，越容易對懸臂樑造成碰撞，故此區間之阻尼比變化主要受到氣體壓力影響為主。

在相同壓力下，雖然氬氣與氮氣之平均自由徑相同，氣體分子相互碰撞的頻率相同，但氬氣之分子質量 (39.948 amu) 較氮氣 (28 amu) 大，故氬氣碰撞所產生的阻力較氮氣大，因此於氬氣環境中的阻尼比皆較氮氣環境中大，可以驗證本小節 v_{out}/v_{in} 值之結果。

上述兩節我們討論壓力與 v_{out}/v_{in} 值以及壓力與阻尼比之關係，當壓力越大時 v_{out}/v_{in} 值越小而阻尼比越大，而本章節將相同壓力下之 v_{out}/v_{in} 值與阻尼比結果對照，如圖 11 所示。每一 v_{out}/v_{in} 值均只對

應一阻尼比，且 v_{out}/v_{in} 值僅受到阻尼比的影響呈現線性相關，本研究設計之感測器為一理想真空壓力感測器。

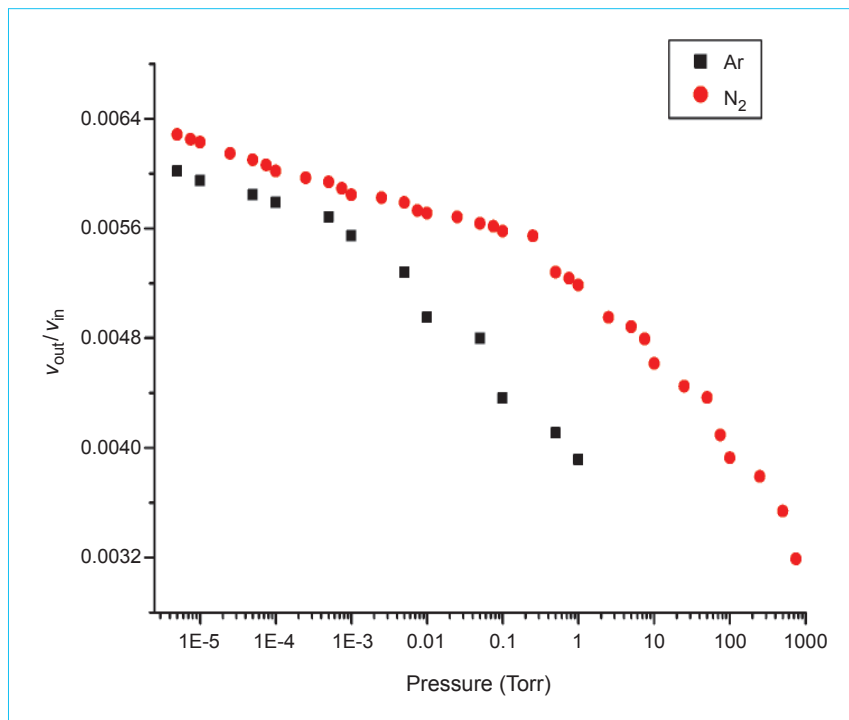


圖 9. 氮氣與氬氣之 v_{out}/v_{in} 值比較。

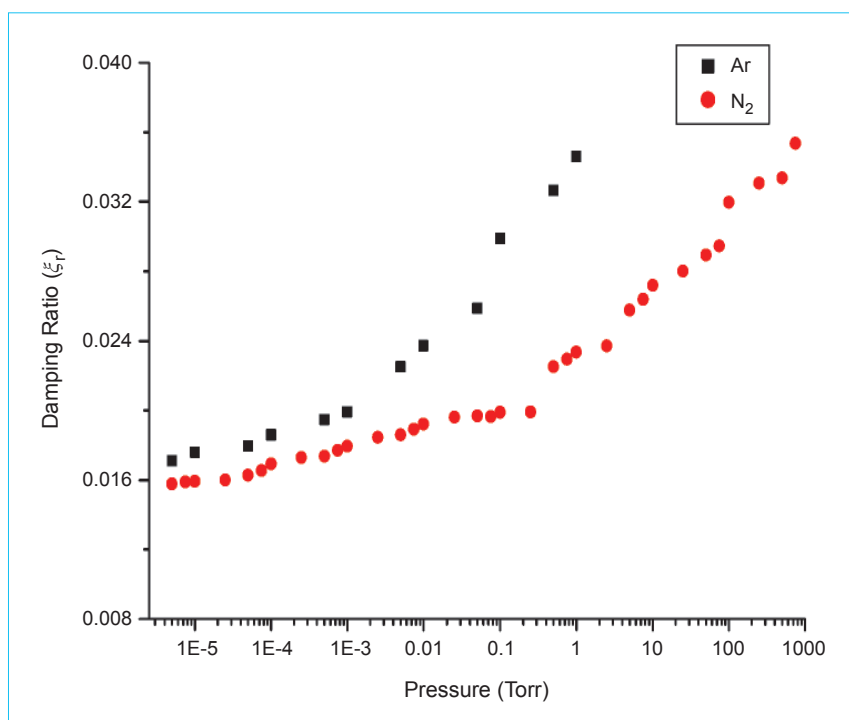


圖 10. 氮氣與氬氣之阻尼比比較。

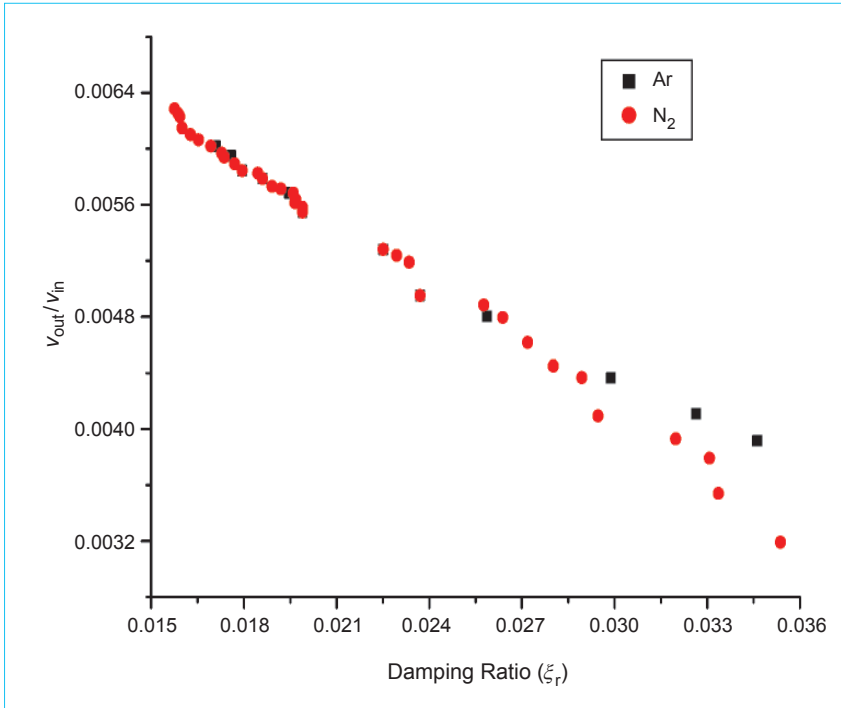


圖11. 阻尼比與 v_{out}/v_{in} 值之關係 (氮氣與氬氣)。

五、結論

本論文以 PZT 致動元件與 PZT 感測元件應用於微型懸臂樑感測器上，以達到量測真空壓力之目的，並且探討真空壓力、壓電輸出、阻尼比之間的關係，以及利用不同氣體對照量測結果，並有下列幾點作為總結。

1. 本研究成功發展出以壓電材料鋇鈦酸鉛 (PZT-5A) 製作之微形懸臂式的真空壓力感測器。
2. 本研究之壓力感測器，每一壓力值均對應不同 v_{out}/v_{in} 值，可以直接由 v_{out}/v_{in} 值間接知道腔體之真空度，量測範圍於 $6.5 \times 10^{-6} - 760$ Torr 間。
3. 從低真空到高真空，真空感測器工作頻率下之 v_{out}/v_{in} 值隨壓力降低而逐漸上升。
4. 輸出與真空壓力關係圖中，黏滯流線段之斜率大於過渡流線段之斜率大於分子流線段之斜率。
5. 真空壓力越大時，腔體中氣體分子碰撞對感測器造成的阻尼隨之增加，真空壓力越小時，系統中的阻尼主要為感測器結構本身的阻尼。
6. 粗略真空環境中氣體黏滯力隨壓力增加的量較高真空環境中大。
7. 通入氣體選用氮氣與氬氣比對結果，發現壓電輸

出、阻尼比皆與真空壓力有相同趨勢，且氬氣對結構所造成的阻尼比較氮氣大。

8. 每一 v_{out}/v_{in} 值均只對應一阻尼比，且 v_{out}/v_{in} 值僅受到阻尼比的影響呈現線性相關，本研究設計之感測器為一理想真空壓力感測計。

參考文獻

1. 陳建人, 真空技術與應用, 行政院國家科學委員會精密儀器發展中心 (2001).
2. 蘇青森, 真空技術精華, 五南圖書出版股份有限公司 (2004).
3. F. T. Zhang, Z. Tang, J. Yu, and R. C. Jin, *Sensors and Actuators A*, **126**, 300 (2006).
4. F. Volklein, M. Schild, A. Meier, and F. Wiesbaden, *Journal of Physics: Conference Series*, **100**, Part 9 (2008).
5. J. R. Dobrott and R. M. Oman, *Journal of Vacuum Science and Technology*, **7**, 214 (1970).
6. R. O. Woods, *Journal of Vacuum Science and Technology*, **10**, 433(1973).
7. M. Esashi, *Vacuum*, **47**, 469 (1996).
8. A. Brill, Y. Me-Bar, M. Siman, O. Sadot, and G. Ben-Dor, *International Journal of Impact Engineering*, **38**, 765 (2011).
9. T. Gronych, R. Ulman, L. Peksa, and P. Repa, *Vacuum*, **73**, 275 (2004)
10. S. Bianco, M. Cocuzza, S. Ferrero, E. Giuri, G. Piacenza, C. F. Pirri, A. Ricci, L. Scaltrito, D. Bich, A. Merialdo, P. Schina, and R. Correale, *Journal of Vacuum Science & Technology B*, **24**,

1803 (2006).

11. K. Yohei and K. Akira, *Journal of vacuum science and technology A*, **25**, 1248 (2007).
12. H. Sumali and T. G. Carne, "Air-drag damping on micro-cantilever beams," Sandia National Lab Technical Report.
13. D. C. Witt, *Metrologia*, **36**, 607 (1997).
14. 陳峰志, 周榮源, 廖鶯鶯, 林進祥, 微熱離子真空計發展現況, 真空科技, 12 (2), (2000).
15. 張翔, 應用壓電片於有與無缺陷固定樑之模態分析, 國立高雄海洋科技大學輪機工程研究所碩士論文 (2005).
16. F. J. Shaker, "Effect of axial load on mode shapes and frequencies of beams," Lewis Research Center Report NASA-TN-8109 (1975).
17. 陳奇劭, 雙邊固定式懸臂樑壓電變壓器, 國立中興大學機械工程研究所碩士論文 (2011).
18. J. K. Fremerey, *Vacuum*, **32**, 685 (1982).
19. O. E. Meyer, *Annalen der Physik*, **201**, 564(1865).
20. J. L. Hogg, *Proceedings of the American Academy of Arts and Sciences*, **42**, 115 (1906).
21. M. Knudsen, *The Kinetic Theory of Gases*, Methuen, London (1934).
22. R. Evrard and P. Beaufile, "Calibration of ionization gages using the diamagnetic suspension absolute gage," *Vide (France)*, **20**, 116 (1965).
23. G. Comsa, J. K. Fremerey, B. Lindenau, G. Messer, and P. Rohl, *Journal of Vacuum Science and Technology*, **17**, 642 (1980).
24. 陳冠綸, 童麒嘉, 鄭雅琪, 王瑜婷, 林明澤, 新型廣域型真空量測技術, 第十五屆奈米工程暨微系統技術研討會, 國立台北科技大學 (2011).
25. 彭泰龍, 壓電式發電裝置研究, 國立中興大學機械工程研究所碩士論文 (2007).
26. 莊峻佑, 銦鈦酸鉛薄膜製程參數對機電性質之影響, 國立中興大學機械工程研究所碩士論文 (2010).
27. 薛竣鴻, 低溫沉積二氧化矽和銦鈦酸鉛複合薄膜於可撓性基板之研究, 國立中興大學機械工程研究所碩士論文 (2009).
28. 張爵堂, 利用紫外線圖案化銦鈦酸鉛薄膜, 國立中興大學機械工程研究所碩士論文 (2011).



林哲宇先生為國立中興大學機械工程研究所碩士。

Che-Yu Lin received his M.S. in mechanical engineering from National Chung Hsing University.



陳劭恩先生現為國立中興大學機械工程研究所碩士班學生。

Shao-En Chen is currently a M.S. student in the Department of mechanical engineering at National Chung Hsing

University.



謝汎鈞先生為國立交通大學機械工程博士，現任國家實驗研究院儀器科技研究中心副研究員。

Fan-Chun Hsieh received his Ph.D. in mechanical engineering from National Chiao Tung University. He is currently an associate researcher at Instrument Technology Research Center, National Applied Research Laboratories.



陳峰志先生為國立成功大學機械工程博士，現任國家實驗研究院儀器科技研究中心研究員兼副主任。

Fong-Zhi Chen received his Ph.D. in mechanical engineering from National Cheng Kung University. He is currently a researcher and Deputy Director General at Instrument Technology Research Center, National Applied Research Laboratories.



吳嘉哲先生為美國華盛頓大學機械工程博士，現任國立中興大學機械工程學系助理教授。

Chia-Che Wu received his Ph.D. in mechanical engineering from the University of Washington, USA. He is currently an assistant professor in the department of mechanical engineering at National Chung Hsing University.