

## 具溫度補償型表面聲波應變計

黃智勇、黃柏憲

CHIH-YUNG HUANG BO-XIAN HUANG

國立勤益科技大學機械工程系

Department of Mechanical Engineering,  
National Chin-Yi University of Technology  
E-mail: happycyhuang@gmail.com

### 摘要

本文中以  $41^\circ\text{YX}$  鋰酸鈮( $\text{LiNbO}_3$ )為表面聲波應變計基底材料，其波傳形式為水平剪向洩漏(SH wave)表面聲波，具更較快的傳播速度與較高的機電耦合係數。為了分析負載的應變和應力變化，實驗設計以  $41^\circ\text{YX}$  鋰酸鈮為基底，其中心頻率約為 59.9MHz 和 119.8 的雙延遲線型表面聲波共振器，和單埠表面聲波諧振器。利用表面聲波應變計受到應力而產生應變，使其電鍍在鋰酸鈮表面的薄膜金屬鋁的間距產生變化，進而改變其中心頻率。依據其中心頻率的改變量，可以推估負載重量。模擬中使用 PCB 玻璃纖維板作為試驗片假設，配合公式推估其中心頻率偏移量、衰減等。模擬結果顯示負載與中心頻率偏移量呈線性關係。且模擬溫度對表面聲波應變計的影響，並加以補償修正，使其表面聲波應變計在應用上更為精準。

**關鍵字詞：**表面聲波、應變計、表面聲波傳感器、負載量測

### 1. 前言

表面聲波元件至今已有相當成熟之技術，其因表面聲波元件感測器具備可微小化、高靈敏性、製作簡單、成本較低、並且可適用於半導體製程並且可大量生產，以上幾項優點使表面聲波元件廣用於工業上。

英國物理學家 Lord Rayleigh[1]在西元 1885 年發現在等方向性材料(Isotropic Material)的表面具有表面聲波(Surface Acoustic Wave, SAW)的存在，表面聲波會沿著介質的表面傳播，而分布幅度會隨著深度以指數的形式衰減。Synge 等人，在西元 1957 年對 Rayleigh Wave 提出一份分析[2]，並求出 Rayleigh Wave 振幅以指數型的阻尼衰減的解。直到西元 1965 年 White 與 Voltmer[3]等人將叉指狀的金屬電極，又稱之叉指換能器(Interdigital Transducer, IDT)將其鍍在壓電基材(Piezoelectric Substrate)上，成功的激發出表面聲波[4]，因此被廣泛的應用在各種不同的領域。航太工業對於表面聲波元件擁有的高穩定度、高靈敏度、反應時間快、結構簡單化及信號易擷取等優點，廣泛的應用在回積器(Convolver)、延遲線(Delay line)及濾波器等雷達及反雷達測試儀器內之通訊元件[5-7]。西元 1979 年表面聲波元件第一次被使用於感測實驗上，由 Dessy 及 Wohltjen 等人所發表[8]，2007 年 Riyo KONNO[9]等人使用石英基板製造 40MHz 的表面聲波應變感測器，使用 SS400 作為試驗片，感測分辨率低

於  $10^{-5}$  次方。2011 年 Brian Donohoe[10]等人使用石英表面聲波諧振器來製造應變感測器，使用一個特殊的測試裝置來測試重複的校準，並研究粘結效果和熱敏感性進行實證研究。2012 年 J.R. Humphries[11]等人使用正交頻編碼(OFC)應用在無線表面聲波應變感測器，製造出的表面聲波懸臂基板作為該應變感測機構。2012 年 Haekwan Oh[12]等人開發剪切水平表面聲波(SH SAW)應用在應變感測，並使用不同形狀試驗片提升靈敏度。2012 年 William C. Wilson[13]等人提出使用表面聲波應變感測器應用在飛機緊固件故障檢測上。2012 年 R. Stoney 等人使用無線表面聲波感測器應用在商業數控機床動態刀具狀態監測和過程監控，並與商用力感測器做比較。

表面聲波具有完全被動，不需電源且適合用在無線傳輸上，且對溫度具有極高的穩定性，可以進行溫度補償的差分測量各種負載應力。表面聲波應變計可以不須經常維護和更換電源，若未來用在無線使用上可以放置在無法訪問或密閉的地方，或者甚至嵌入到材料(橡膠，混凝土，鋼，複合材料)。他們可工作在惡劣的環境(腐蝕，抗輻射，磁場)，並可以執行應變、應力測量在負載或安全機制上。

透過此特性本文模擬表面聲波應變計，其表面聲波應變計的製作是利用微機電製程，在壓電材料基底上沉澱鋁金屬的叉指換能器(Interdigital Transducer, IDT)以產生表面聲波，並利用表面聲

波應變計產生的中心頻率偏移量進而推估負載大小，以利用其使用在負載量測或安全機制上。

## 2. 理論與設計

本實驗目的為模擬表面聲波應變計的應變量測，模擬量測上採用雙延遲線表面聲波共振器和單埠表面聲波諧振器，其中單埠表面聲波諧振器利用兩側的反射極間產生共振如圖 4 所示，單埠表面聲波諧振器元件中央 IDT 被施以電訊號時，因逆壓電效應激發出雙向傳遞之表面聲波，經兩側金屬反射元件反射後，幾乎完全反射回中央 IDT，與下一時間激發的表面聲波產生諧振，形成表面駐波，在因正壓電效應轉為電訊號輸出。而雙延遲線表面聲波共振器如圖 3 所示是利用輸入端的 IDT 作為激發電極，將電訊號轉變為表面聲波，並利用輸出端的 IDT 接收訊號，將表面聲波透過正壓電效應轉換為電訊號輸出。

表面聲波應變計的靈敏度是應變量  $\varepsilon$  對中心頻率  $f_0$  所造成偏移的影響。其方程式為：

$$\Delta f = -\varepsilon \times f_0$$

其中： $\Delta f$ ：頻率偏移量， $\varepsilon$ ：應變量， $f_0$ ：中心頻率，其方程式可視為應變對中心頻率偏移的簡易方程式。

表面聲波感測器在應變量測時，會因晶片受負載影響而使 IDT 的波傳距離產生變化進而影響波傳特性，如波速、相位、振幅、中心頻率，有所改變。在感測的聲電特性中主要受到機械特性影響。

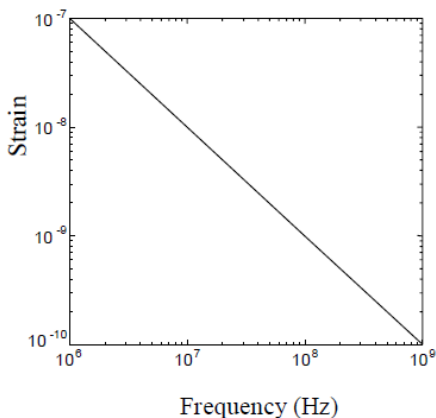


圖 1 響應頻率與表面聲波應變計之關係

上圖 1 中顯示表面聲波諧振頻率與應變之間的關係，根據文獻[9]由圖中可知假設量測的分辨頻率為 0.1Hz，則表面聲波應變計可以檢測高達  $10^{-10}$  次方。因此表面聲波應變計具有明顯的高靈敏度，適合用使用在高精密的機械或量測上。

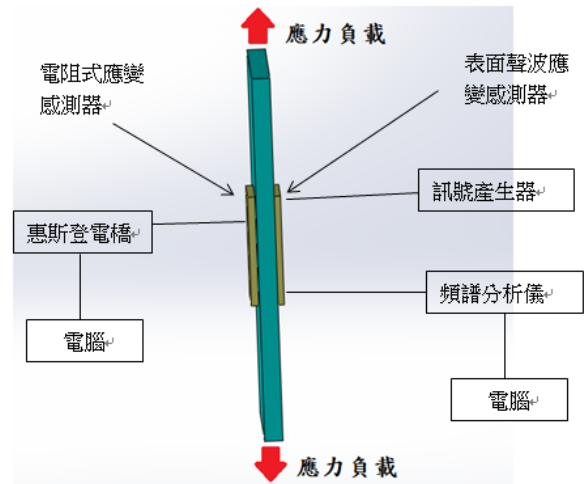


圖 2 表面聲波應變計與電阻應變計測試安裝

上圖 2 中顯示模擬使用拉伸試驗機進行應變試驗。其中試片使用 PCB 玻璃纖維板。其中感測晶片一側使用自製的表面聲波應變計，另一側使用商用電阻應變計，連接到惠斯登電橋進行量測。模擬中由拉伸試驗機產生拉伸應力，使得 PCB 因應力產生應變。其中表面聲波應變計如圖所示

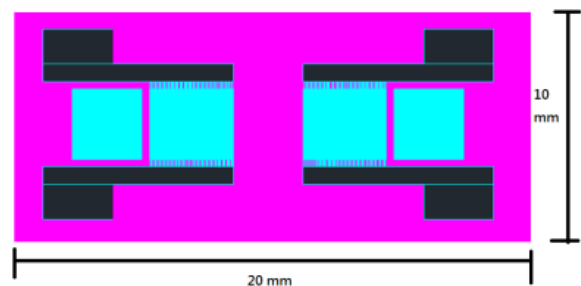


圖 3 雙延遲線表面聲波共振器

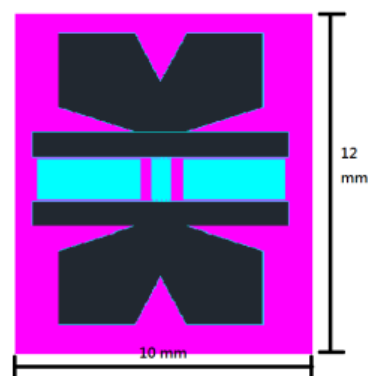


圖 4 單埠表面聲波諧振器

模擬拉伸試驗機產生的應力使得試片產生應變，而黏著在試片上的表面聲波應變計其延遲

線的長度增加，會導致到達輸出 IDT 的時間的改變，若視表面聲波為粒子橢圓運動傳播能量，則當延遲線的長度增加，傳播路徑的電場粒子將減少。而減少電場致的電位差減小。根據文獻[12]由下述公式說明表面聲波波速( $v_0$ )與電位差之間的關係：

$$K^2 y_0 = 2\pi f \varepsilon k \quad (1)$$

公式中， $K^2$  為機電耦合係數， $y_0$  為表面聲波的特徵導納， $\varepsilon$  是壓電基板的電常數， $k$  是波數。這些參數中， $y_0$  和  $k$  可以由下式表示：

$$y_0 = \frac{2P}{A|\Phi|^2} \quad (2)$$

$$k = \frac{2\pi f}{v_0} \quad (3)$$

其中， $P$  是表面波行進功率， $\Phi$  是表面波的表面電位和  $A$  是表面聲波應變計橫截面面積。由上述(2)和(3)方程式帶入(1)方程式中整理可知表面聲波波速( $v_0$ )為

$$v_0 = \frac{2\pi f^2 \varepsilon |\Phi|^2}{K^2 P}$$

因此，在電場作用下的導致了表面聲波波速降低。而第二個使表面聲波波速改變的原因是壓電基板因應力變化使基板密度發生變化。如果應變能量被施加在壓電基板上，基板密度被改變時，表面聲波的傳播速度也發生變化。如下式所示：

$$v_0 = \sqrt{c/\rho}$$

其中  $c$  是壓電基板剛性常數，而  $\rho$  是壓電基板密度。

由上述可知表面聲波的波速受 IDT 的本身的物理變形，和受壓電基板上的應變常數影響。最後壓電基板因應變使 IDT 的傳播距離產生變化，導致表面聲波應變計的中心頻率的變化，因此可以評估其變形程度與應力變化。

本實驗模擬採用  $41^\circ\text{YXLiNbO}_3$  壓電基板，其規格如下表一所示。

表一  $41^\circ\text{YXLiNbO}_3$  壓電基板規格

Wave propagation mode	SAW velocity $y(\text{m s}^{-1})$	Electro-mechanical coupling coefficient $K^2$ (%)	Temperature coefficient of delay (ppm $^\circ\text{C}^{-1}$ )
SH Wave	4792	17.2	75

壓電基板對溫度的影響是非常重要的，此影響為溫度頻率係數(Temperature coefficient of frequency, TCF)，TCF 為 TCD 與 TCV 的影響[15]。

TCD(Temperature coefficient of delay，延遲溫度係數)與延遲時間  $\tau$ (Time Delay)有關，且往往限制元件的溫度使用範圍，其方程式為：

$$\text{TCD} = \tau^{-1} \frac{d\tau}{dT} = \frac{1}{L} \frac{dL}{dT} - \frac{1}{v_0} \frac{dv_0}{dT}$$

$$\tau = \frac{L}{v_0}$$

其中 TCD 的單位為 ppm/ $^\circ\text{C}$ ，延遲時間  $L$  為 IDT 電極間的距離， $T$  為基板溫度，由表一可知 TCD 為 75 ppm/ $^\circ\text{C}$ 。

TCV(Temperature coefficient of velocity，波速溫度係數)為溫度對壓電基板熱膨脹造成的波速改變延遲現象，其方程式為：

$$\text{TCV} = \frac{1}{v_{T_0}} \frac{\partial v}{\partial T}$$

本實驗所設計之表面聲波應變計欲知溫度對中心頻率的變化需求得 TCF，可定義為：

$$\text{TCF} = \frac{1}{f_0} \times \frac{df}{dT} \cong \frac{1}{f_0} \frac{\partial(f \cdot \lambda)}{\partial T}$$

故表面聲波應變計受到溫升所造成的頻率變化：

$$\Delta f_{\text{TCF}} = f_1 - f_0 = \frac{v(1 + \text{TCF})}{\lambda} - \frac{v}{\lambda} = \frac{v \cdot \text{TCF}}{\lambda} = f_0 \times \text{TCF}$$

其中  $f_1$  為溫升 1 度之中心頻率。

### 3. 實驗

#### 3.1 表面聲波應變計模擬參數

本研究實驗參數，基板選擇  $41^\circ\text{YX}$  鈮酸鋰壓電基板，具有高波速，高機電耦合係數，低溫度延遲係數等優點，波形為 SH Wave，IDT 形式為雙延遲線表面聲波共振器和單埠表面聲波諧振器，各項參數，如表二所示：

表二感測器各項參數

	頻率 $f_0$ (MHz)	線寬 $d$ ( $\mu\text{m}$ )	傳播距離 $D$ (mm)	反射間長度 $S$ (mm)	IDT 對數	反射器對數	週期 $\lambda$
雙延遲線表面	59.9 MHz	20 $\mu\text{m}$	4 mm	4 mm	60	100	80 $\lambda$

聲波共振器	119.8 MHz	10 $\mu$ m	2 mm	4 mm	60	100	40 $\lambda$
單埠表面聲波諧振器	59.9 MHz	20 $\mu$ m	450 $\mu$ m	1.6 mm	10	100	80 $\lambda$
	119.8 MHz	10 $\mu$ m	250 $\mu$ m	0.8 mm	10	100	40 $\lambda$

實驗製作以微機電技術，利用玻璃光罩定義圖案，再利用微影技術在基板上製作成叉指換能器(IDT)，此製程包含了微影製程、金屬濺鍍(Sputter)最後再以舉離法(Lift-off)將其所需電極留在基板上，而完成表面聲波應變計，其光罩圖案如圖 5 所示。



圖 5 表面聲波應變計玻璃光罩

### 3.2 量測系統

本研究進行負載應變之量測，使用網路向量分析儀討論波傳速度和頻率受負載應力所產生應變之影響。該表面聲波應變感測器使用一個印刷電路板(PCB)製成的基板，它可以容易地安裝感測器，測量表面聲波應變感測器的電氣特性。以無負載中心頻率為基準，量測受負載之中心頻率、相位及振幅，且量測溫度對表面聲波應變計的影響，並加以補償。將其模擬結果與文獻加以比較及求證。最後在與商用應變計加以比較，量測系統示意圖如圖 6 所示。

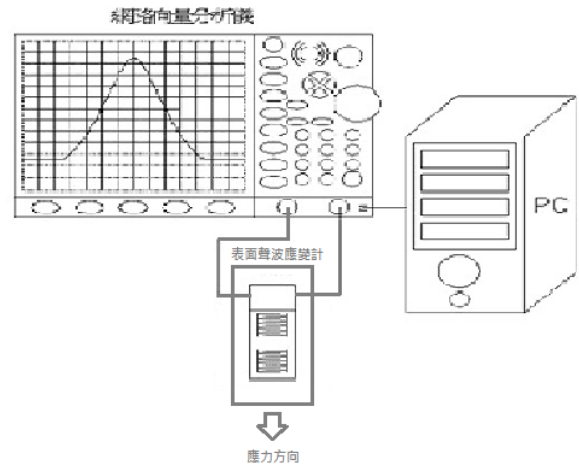


圖 6 量測系統示意圖

## 4. 結果與討論

本研究為分析表面聲波應變計之頻率響應特性，故使用 Cross & Schmidt 等人所提出的耦合模型(Coupling-of-Modes)分析理論，耦合模型有助於實現高效率和靈活的方法來模擬各種表面聲波元件，模擬其結果並加以討論。

### 4.1 頻率受應變的影響

本實驗研究表面聲波應變計受應力導致應變對頻率輸出的影響，由網路向量分析儀量測，結果如圖 7 所示。

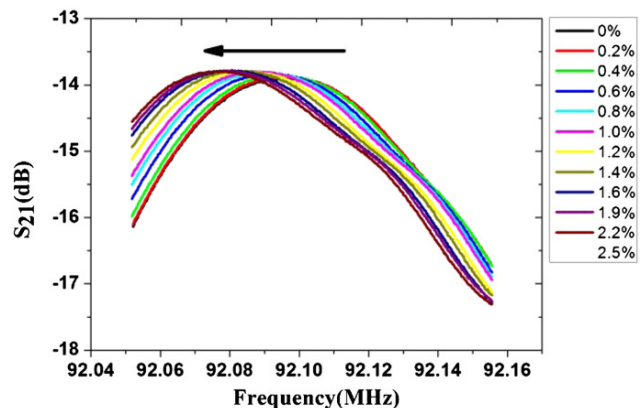


圖 7 不同應變量對其頻率輸出變化

因此可知當表面聲波應變計受應變影響，應變越大，中心頻率就越小，頻率偏移也越大，這是因為表面聲波應變計受到應變，使得表面聲波傳輸距離的增加和波傳速度的減小的影響。

### 4.2 不同中心頻率的影響

本研究將實驗不同的中心頻率 59.9 MHz 和 119.8 MHz 雙延遲線表面聲波共振器在相同測試進行比較，評估其表面聲波應變計的靈敏度，其結果如圖所示。

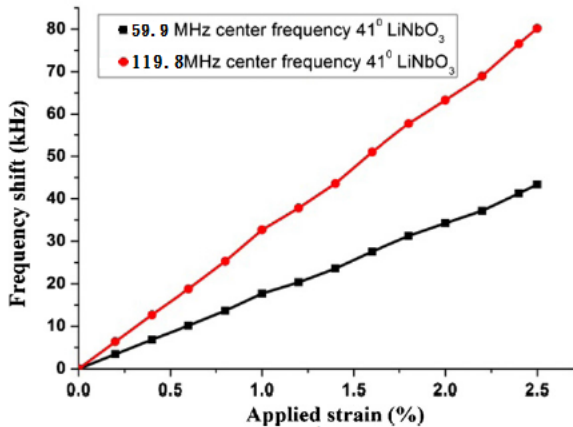


圖 8 不同中心頻率對輸出的頻率偏移

結果顯示表面聲波應變計的靈敏度與中心頻率成正比。這是因為波長變短(波長 $\lambda=V_s/f_0$ )，即頻率變高，在相同傳輸距離下，頻率偏移也越大。但是，中心頻率提高時，微影製程製作 IDT 將變得更加困難。

#### 4.3 不同溫度對表面聲波應變計的影響

由理論可知溫度的偏差會引起表面聲波應變計的頻率偏移，在未補償的表面聲波應變感測器溫度的偏差會出現明顯的熱變形和扭曲的結果。但是，一般應用場合的應變水平都遠大於溫度所引起的偏差，所以溫度補償不一定是必需的。

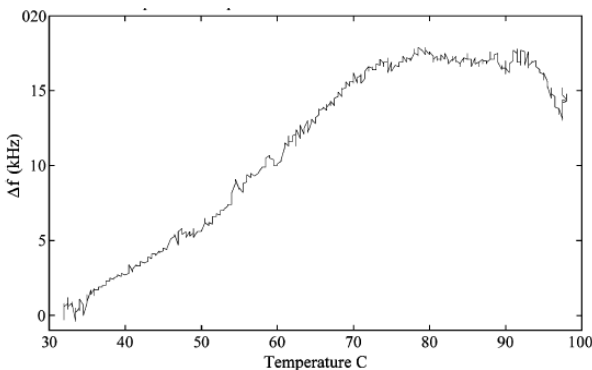


圖 9 表面聲波應變計對溫度的響應

圖 9 為溫度對表面聲波應變計的影響，在研究過程中，以不同溫度在相同條件下，探討溫度對表面聲波應變計的量測影響，由結果可知溫度在一定範圍內與中心頻率呈線性影響。

#### 4.4 具溫度補償型表面聲波應變計

本研究提出一種具溫度補償型的表面聲波應變計，其感測器使用單埠表面聲波諧振器，搭配黏著劑 M-BOND 200，其結構如圖 10 所示，在黏著過程中將其單埠表面聲波諧振器黏著半邊，使其半邊的感測器不受應力、應變影響。若加入溫度控制與應力可知左半邊的感測器受溫度與應力影響，而另一側的感測器只受溫影響，因此可以藉由右半邊的感測結果可知當前的溫度，再由相對應溫度對感測器的影響補償至左半邊量測的結果，由此可以精確知道應力、應變對感測器的影響。

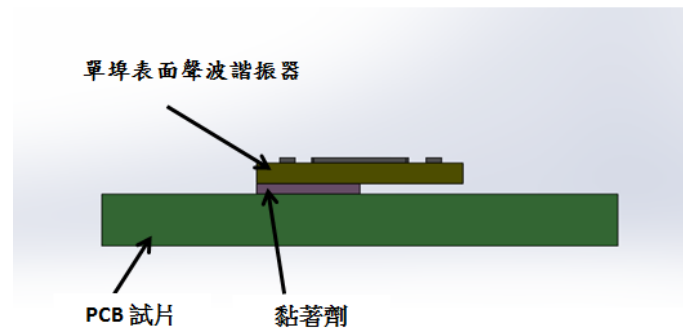


圖 10 具溫度補償型表面聲波應變計

#### 5. 結論

本文研究表面聲波以 41°YX 鋰酸鋁為基底在拉伸試驗機中量測表面聲波應變計與電阻應變計做比較。表面聲波應變計有多項優於傳統電阻式應變計的優點如具高精度，高靈敏度、較為堅固且適合在惡劣的工業環境中使用，但也有缺點如溫度導致的精確度漂移、易從過載和衝擊載荷造成損壞且價格昂貴等。實驗結果顯示表面聲波應變計受應變影響，應變越大，中心頻率就越小，頻率偏移也越大，且製作的中心頻率越高，受應力、應變的影響也越大，靈敏度也越好。表面聲波應變計感測時有其適合的量測溫度，且量測的結果受溫度所影響。因此本研究提出一種新型的具溫度補償型的表面聲波應變計來消除溫度對感測器的影響，且兼具溫度的量測。

#### 6. 參考文獻

1. Rayleigh J. W. S., "On waves propagated along the plane surface of an elastic solid", Proc. Lond. Math. Soc, Vol. 17, pp. 4-11, 1965.
2. R. M. White, surface Elastic Waves, Proc. IEEE, 58, p. 1238(1970).

3. R. M. white, and F. M. Voltmer, "Direct piezoelectric coupling to surface elastic waves," *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 7, pp. 314-316, 1965
4. "Special issue on surface acoustic wave devices and applications", *Proc. IEEE*, Vol. 64, pp. 579-788, 1976.
5. H. Deresiewicz and R. D. Mindilin, "Wave on the surface of crystal", *J. Appl. Phys.*, Vol 28, p.699, 1957.
6. H. Matthews, *Surface Wave Filters*, John Wiley and Sons, New York, 1977.
7. G. sauerbrey, "The use of quartz oscillators for weighing thin layers and for microweighing" *Z. phys.*, Vol. 155, p 206, 1959.
8. H. Wohltjen and R Dessy, "Surface acoustic wave probes for chemical analysis :gas chromatography detector", *Anal. Chem.*, vol 51, pp. 1458-1470, 1979.
9. Riyo KONNO, Misato Mitsui, "A Highly Sensitive Strain Sensor Using Surface Acoustic Wave and Its Evaluation for Wireless Batteryless Sensor Network," *IEEE SENSORS*, 2007
10. Brian Donohoe, Dermot Geraghty, "Wireless Calibration of a Surface Acoustic Wave Resonator as a Strain Sensor," *IEEE SENSORS JOURNAL*, VOL. 11, NO. 4, APRIL 2011
11. J.R. Humphries and D.C. Malocha, "Passive, Wireless SAW OFC Strain Sensor," *IEEE SENSORS*, 2012
12. Haekwan Oh, Keekeun Lee, "Development of a high-sensitivity strain measurement system based on a SH SAW sensor," *IOP PUBLISHING, J. Micromech. Microeng.* 22 025002 (10pp), 2012
13. William C. Wilson, Member, "Fastener Failure Detection Using a Surface Acoustic Wave Strain Sensor," *IEEE SENSORS JOURNAL*, VOL. 12, NO. 6, JUNE 2012
14. R. Stony, B. Donohoe, "The development of surface acoustic wave sensors (SAWs) for process monitoring," *proc.sciverse, Procedia CIRP* 1 569 – 574, 2012
15. 蘇柏昂, "A Wireless Surface Acoustic Wave Based Torque Sensor for Rotating Shaft Applications," 國立中正大學機械工程學系, 碩士論文, 2009