

皮秒超音波技術應用於鑲嵌式薄膜諧振器元件設計及改良

李大青¹ 蒲念文^{2*} 羅本喆³ 高進興⁴ 李鍾嵐⁵

¹中山科學研究院材料光電所

²國防大學中正理工學院應用化學及材料科學系

³國防大學中正理工學院機電能源及航太工程系

⁴智旺科技股份有限公司

⁵國防大學理工學院國防科學研究所

摘 要

本研究使用具有高空間解析度的皮秒超音波技術，應用在鑲嵌式諧振器各層薄膜之聲學特性分析及聲速量測。其次，針對降低布拉格反射器寄生電容問題，本文研製出具有高電阻率且高聲阻抗之氮化鉬(TaN_x)薄膜，相較於金屬薄膜可降低電容值一半以上。最後，本研究以氮化鉬作為高聲阻抗層，二氧化矽作為低聲阻抗層，氧化鋅為壓電層，金為上下電極層，製作低寄生電容鑲嵌式薄膜諧振器。經量測操作頻率為 11.8 GHz，諧振器之並聯諧振 Q 值為 6.9。

關鍵詞：布拉格反射器，皮秒超音波，鑲嵌式諧振器

Application of Picosecond Ultrasonics to the Design and Improvement of Solidly Mounted Resonators

Ta-Ching Li¹, Nen-Wen Pu^{2*}, Ben-Je Lwo³, Chin-Hsing Kao⁴ and Chung-Lan Li⁵

¹*Materials and Electro-Optics Research Division, Chung Shan Institute of Science and Technology*

²*Department of Applied Chemistry and Materials Science, Chung Cheng Institute of Technology, National Defense University*

³*Department of Mechatronic, Energy, and Aerospace Engineering, Chung Cheng Institute of Technology, National Defense University*

⁴*Power Flash Technology, Inc.*

⁵*Graduate School of National Defense Science, Chung Cheng Institute of Technology, National Defense University*

ABSTRACT

In this study, picosecond ultrasonics with high spatial resolution was employed to analyze the acoustic properties of constituent nanofilms in the solidly mounted resonators (SMRs). In addition, a new TaN_x film with large acoustic impedance and extremely high resistance, which led to low-capacitance Bragg Reflectors, was fabricated. A low-parasitic-capacitance SMR was finally constructed with TaN_x as the high acoustic impedance material, SiO_2 as the low acoustic impedance material, ZnO as the piezoelectric layer, and Au as the top and bottom electrodes, respectively. The parallel Q factor and the central frequency of the SMR were, respectively, 6.9 and 11.8 GHz.

Keywords: Bragg reflector, picosecond ultrasonics, solidly mounted resonator (SMR)

文稿收件日期 98.9.7; 文稿修正後接受日期 100.3.22;*通訊作者

Manuscript received September 7, 2009; revised March 22, 2011;* Corresponding author

一、前言

微波無線通訊包括行動通訊、無線電話、無線區域網路(WLAN, Wireless Local Area Network)、衛星通訊、衛星直播電視、全球定位系統(GPS, Global Positioning System)等應用領域。而隨著個人通訊自主化、即時化需求的大幅增加，以及微波通訊技術的快速發展，個人行動通訊已成為無線通訊市場的主流；而由於材料及各項製程技術之純熟發展，整合通訊系統成為系統晶片(SoC, System on a Chip)或射頻晶片(RFIC, Radio Frequency Integrated Circuits)，已成為當代微電子技術在射頻微波系統發展之趨勢。藉由微波單晶積體電路(MMIC, Microwave Monolithic Integrated Circuits)整合的技術，不僅可以將元件的尺寸縮小，且訊號的傳遞不需經由金屬線的傳遞而減少寄生效應，可提升高頻訊號的效能。隨著良率與再現性的提升，越來越多的微波元件可製作在單一晶片上。目前可實現電晶體的種類，包含異質接面雙載子電晶體(HBT, Heterojunction bipolar Transistor, 1-20 GHz)、金屬-半導體場效電晶體(MESFET, Metal Semiconductor Field Effect Transistor, 1-40 GHz)及高速電子移動電晶體(PHEMT, Pseudomorphic High Electron Mobility Transistor, 1-100 GHz)[1]。但是並非所有的微波實體元件皆可使用 MMIC 技術整合成單一晶片，例如高品質因子(Q factor)之帶通濾波器，即因為材料或製程因素無法整合。由於濾波器的規格嚴謹且頻寬相當窄，目前仍是以表面聲波(SAW, Surfaces Acoustic Wave)濾波器、低溫共燒陶瓷技術(LTCC, Low Temperature Co-fired Ceramics)或是介電陶瓷濾波器(Dielectric Ceramic Filter)三種濾波器為主，元件製作完成後，再以打線方式整合在晶片上。

諧振器的良窳是以品質因子(quality factor, Q factor)作為評估依據，傳統積體電路諧振器是以半導體製程在矽基板上製作電容、電感及電阻所形成之 RLC 諧振電路。由於矽基板具有半導體特性而非良好的絕緣體，使得矽基板與傳導高頻電磁波相互影響，進而產生電、磁能量損耗，因此在製作平面螺旋電感時常有矽基底損耗，影響電感品質因子，進而造成積體電路諧振器品質因子降低。

表面聲波諧振器(surface acoustic wave resonator, SAWR)則不同於傳統 RLC 諧振電路，因此具有相當高品質因子。

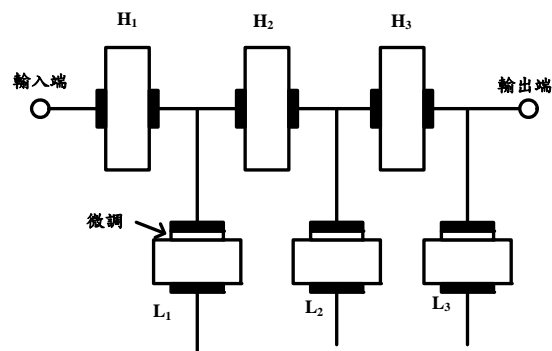


圖 1. 具有六個串併聯諧振器之梯狀濾波器電路示意圖。H 代表較高頻率諧振器，L 代表較低頻率諧振器

一般濾波器電路基本結構如圖 1，由三個串聯 H 諧振器與三個 L 併聯諧振器所組成，H 諧振器之共振頻率高於 L 諧振器，這些諧振器的頻率以及品質因子將決定濾波器通帶寬度以及拒帶頻率變化。因為比例通帶寬度(fractional bandwidth)與品質因子關係為 $B/f_c \approx ak_{eff}^2 - b/Q$ ，其中 B/f_c 為比例通帶寬度、 k_{eff}^2 為有效壓電耦合係數(effective piezoelectric coupling coefficient)、 a 及 b 為常數，當 Q 值越高，則比例通帶寬度越大[2]。此外，SAW 濾波器相較於積體電路濾波器具有高的通帶外拒斥(out-of-band rejection)，而且在通帶與拒帶間有陡峭的過渡邊緣(steepest transition edge)，因此 SAW 等以聲波共振的諧振器元件將比積體電路諧振器元件有較佳的濾波器特性。

雖然上述之表面聲波元件是相當優異的濾波器，但是在高頻應用時，決定頻率的指叉狀電極(IDT, Interdigital Transducer)間距，因為受到製程線寬的限制而遇到瓶頸，另外尚有元件的承受功率，以及封裝等問題亟待克服；若採用鑽石薄膜增加表面波波速以解決高頻問題，則會有高成本且面積過大的問題。至於 LTCC 技術及介電陶瓷濾波器，則是受限於其陶瓷製程，無法與半導體製程整合，因此目前所使用的濾波器或相關技術，仍無法實現系統晶片或射頻晶片。

利用薄膜的體聲波原理，以及半導體材料及製程製作的薄膜體聲波諧振器 (FBAR,

Film Bulk Acoustic Resonator)是 MMIC 設計者將濾波器整合的方案之一。FBAR 是由高 Q 值機械諧振器所組成，製程和材料的相容性使此類諧振器有機會實現單晶片的整合。FBAR 可提供相當窄頻的濾波特性，並且操作頻率可以達到 10 GHz。近年更有不少研究者嘗試在單晶片上製作 FBAR，因為其優點有：(1)可簡化電路以及提升效能，(2)諧振器的體積與電磁波所製作的諧振器比較起來可大幅減少，以及(3)可完全的單晶製作[3]。然而 FBAR 發展數年後迄今，仍遇到蝕刻製程、易碎結構、製程良率等因素的技術瓶頸，使得系統晶片的整合過程仍無法順利進行。

近年來，利用薄膜體聲波原理，直接將壓電轉能器(Piezoelectric Transducer)製作在聲波布拉格反射器(Bragg Reflector)上方，所形成的鑲嵌式諧振器 (SMR, Solidly Mounted Resonator)已強烈吸引業、學界的注意。由於其製程簡單、強韌結構等優點，已克服傳統 FBAR 的缺點，因此探討如何提升 SMR 諧振器效能，已有相當多研究的成果。但是當 SMR 往高頻、微小化趨勢發展時，需面對下列兩個問題：(1)薄膜形成機制可能造成的薄膜微結構變化，進而影響聲學特性；(2)SMR 主要結構中的 Bragg Reflector 是屬於電容結構（亦即，金屬層-介電層-金屬層），因此在整體的系統電路設計中，會產生寄生電容效應[4]而降低傳輸訊號的效能。目前 FBAR 及 SMR 諧振器元件材料及製程技術整理如表 1。

本論文基於上述對於高頻 SMR 的兩項問題，針對組成高頻諧振器的奈米薄膜進行聲學及電性分析。由於高頻 SMR 的各層薄膜厚度在 100 奈米左右，傳統的超音波技術無法量測，而且通常奈米薄膜的聲學特性取決於其鍍膜方式及厚度，與塊材(Bulk)的特性明顯不同，因此本研究採用具有高空間解析度的皮秒超音波技術進行薄膜量測，此技術已被成功地用於奈米級薄膜聲速之量測。其次，在研究降低 Bragg Reflector 寄生電容效應方面，我們尋求具有高電阻率及高聲阻抗之替代材料，以取代傳統金屬-高聲阻抗層，進而製作低電容之濾波器，使得整體的寄生電容效應降低。最後，我們依據皮秒超音波技術的量測結果，設計並製作高頻聲波諧振器，且進行性能測試，完成本論文低電容效應之高頻 SMR 研製目的。以上的研究結果，不但可提供設計高頻聲

波元件參考，並期望本研究能對高頻聲波濾波器整合技術有所貢獻。

表 1. FBAR 及 SMR 諧振器技術整理

作者/年代	Q 值	頻寬	技術差異性
M. Ylilammi /2002[2]	400	25MHz @950MHz	使用玻璃基板以消除電容效應
T. Nishihara /2002[5]	910	250 MHz @5GHz	1.使用微加工應用於新結構。 2.使用磊晶技術成長氮化鋁壓電薄膜。 3.使用新覆晶技術。
F. Martin /2006[6]	140	-	在矽基板上以氮化鋁為壓電薄膜製作 8GHz 諧振器
J.Berge /2007[7]	120-140	-	以固態鑲嵌式諧振器結構，製作 $Ba_xSr_{1-x}TiO_3$ 壓電薄膜諧振器，可透過偏壓方式微調整頻率。

二、基本理論

2.1 鑲嵌式諧振器(SMR)

聲波諧振器(Acoustic Resonator)是聲波濾波器(Filter)的基本元件，所以諧振器的品質將影響濾波器整體效能。傳統諧振器 FBAR 的組成要件，主要以電磁能與機械能互相轉換的“壓電轉能器”為核心，以及可使機械能振動損耗降至最低的氣隙(Air Gap)結構，如圖 2(a)所示。

此類諧振器稱為浮板型 FBAR，其壓電轉能器所產生的機械振動，藉著聲阻抗值近乎為零的氣隙結構，使得聲波在電極-空氣界面，形成聲波能量之完全反射，所以可造成相當高的聲波能量侷限(Energy Confinement)，使 FBAR 有高品質因子(Q Factor)及低插入損耗(Insertion Loss)等優點。但是浮板型 FBAR 的結構，由於電極與基板的接觸面積過小，故不利於散熱及承受高功率，以致影響元件可靠度及製程良率；而且欲在壓電薄膜下方形成氣隙結構，必須使用背向蝕刻(Back Etching)或表面

微加工(Surface Micromachining)等製程技術才能完成，此類製程在標準的半導體製程中，需另闢生產線因應。加上浮板結構容易破裂，對於實現 SoC 有極大障礙。

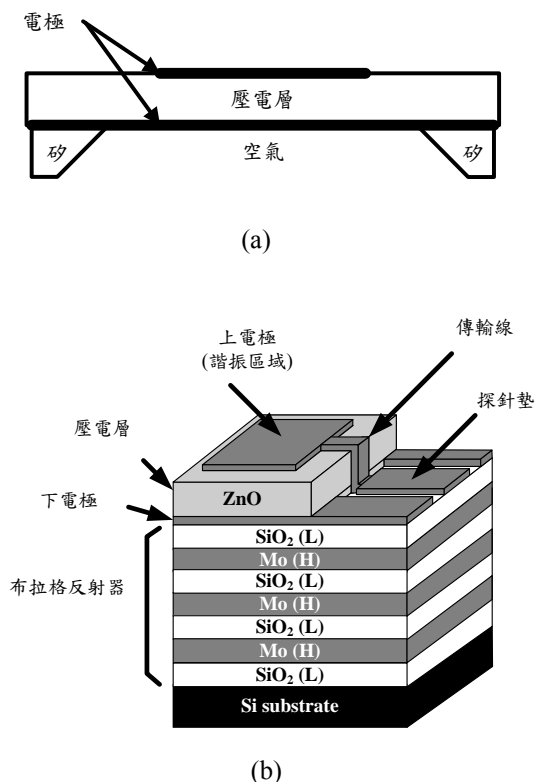


圖 2. (a)薄膜體聲波諧振器；(b)鑲嵌式諧振器

為克服 FBAR 浮板的易碎、散熱不良及蝕刻製程等問題，於是 SMR 結構於 1995 年發表。此新式諧振器與浮板型 FBAR 最大的差異，是將壓電轉能器直接沈積在聲波 Bragg Reflector 上，如圖 2(b)；其中聲波 Bragg Reflector 的功能與氣隙相同，皆是為了使聲波在壓電層與 Bragg Reflector 之界面，產生最大的聲波能量反射。因此新式元件具有耐撞擊、散熱佳、及可克服蝕刻製程的優點，但是相對亦有寄生電容及厚度控制等問題有待克服 [4]。

以下針對壓電轉能器以及聲波 Bragg Reflector 的原理、材料、製程等相關細節，逐一討論及整理，以期能對此基本核心部分有更深一層認識。

(1) 壓電轉能器

所謂壓電轉能器就是在壓電材料的兩邊，施加正負相反的電壓，由於材料內部的正電荷及負電荷中心，受到電場的作用後，分別

向異性電極移動，使材料產生變形；當外加的電場移除後，材料又回復至原來形狀。如果外加的電場為具有一定頻率的交流電，則壓電材料亦會隨著外加的交流訊號頻率而作相同頻率的振盪。反過來說，若在無電場作用下，施加一固定的外力使得壓電材料產生應變，則材料內部形成電偶極，並使表面電荷密度增加，造成材料兩端產生電位差；若將外力改為固定頻率之往復式外力，則輸出的電壓訊號為相同頻率的交流訊號。所以壓電材料具有電子-機械能相互轉換的特性 [8]。

要成為 FBAR 的壓電轉能器，必須符合 MMIC 技術對於 FBAR 製程的要求。在厚度極薄的情形下 (0.1-10 μm)，必須有極高的優選方向 (High Degree of Preferred Orientation) 以及較大的壓電耦合係數，此外，其他的要求如高電阻率、薄膜再現性高等 [3] 亦是考量因素。符合上述的壓電材料要求的有硫化鎘 (CdS)、ZnO、AlN、鈮酸鋰 (LiNbO₃)、鉭酸鋰 (LiTaO₃) 等。由於對硫化鎘而言，要得到高電阻率相當困難，LiNbO₃、LiTaO₃ 則較難獲得正確的化學計量比 (Stoichiometry)，所以目前獲得業界、學界相當注意的壓電材料為 ZnO 及 AlN 兩種 [9-11]。這兩種材料可由濺鍍技術沈積且製程溫度均在 400°C 以下之低溫 (因為此類聲波元件屬於後段製程整合，為避免影響前段製程已完成的主動元件特性，所以聲波元件製程溫度都有限制)，可獲得高品質壓電性。但若直接以濺鍍方式將 ZnO 或 AlN 靶材轟擊而形成薄膜，因陶瓷靶散熱不佳，以致沈積速率較低且成本太高。據此，目前有研究學者改用反應式濺鍍技術沈積 [9,10]，如後文所述。

(2) 聲波布拉格反射器

1965 年 W. E. Newell [12] 提出以四分之一波長 ($\lambda/4$) 厚度的多組高、低聲阻抗 (Acoustic Impedance) 薄膜相互堆疊所形成的聲波反射器 (聲阻抗 $Z = \text{材料密度 } \rho \times \text{聲速 } v$)，將有助於提升 Q 值，這是首次將高反射鏡的概念應用在聲波。當入射聲波進入一個週期性排列的高、低聲阻抗介質 (H、L) 堆疊結構，且各層厚度皆為入射波四分之一波長時，則此入射波將無法穿透而強烈反射，此種週期性排列結構稱為 Bragg Reflector，如圖 2(b) 所示。關於聲波在不同介質傳播的相位變化特性，說明如下：

- (i) 入射波與反射波的相位差：若從 H 介質入射到 L 介質，則相位相差 180° ；反之若從 L 介質入射到 H 介質，則反射相位不變。（注意：聲波與光波之邊界條件不同，故其反射相位差恰好相反。）
- (ii) 入射波與穿透波在界面處相位相同。
- (iii) 路徑差造成的相位差：依 $\Delta\theta = 2\pi\Delta d/\lambda$ 的關係計算，其中 Δd 為兩道波的路徑差， $\Delta\theta$ 為對應路徑差為 Δd 的相位差。

因此透過疏密介質的相互堆疊，加上厚度為 $\lambda/4$ 時，由所有界面反射的聲波皆為同相，所以會有最大的反射波能量。至於其他波長的入射波，因為在薄膜的傳遞過程中厚度並非 $\lambda/4$ 的倍數，因此反射波無法達到同相位，能量會因相互干涉而有所損耗。

2.2 皮秒超音波激發及傳播機制

傳統超音波術量測固體材料的縱向聲速或厚度，是在試片平行的上下兩側以黏貼薄壓電轉能器 (piezoelectric transducer) 或蒸鍍壓電層以產生及偵測超音波進行聲波量測。在上方壓電層使用射頻脈衝訊號驅動而產生機械波，頻率 $1\sim 1000\text{MHz}$ ，持續時間 (duration time) 為 1 至數微秒 (μs)，機械波產生後即在試片之間來回傳播；當機械波入射到下方的壓電層時，便產生電訊號，再經由放大及記錄，從兩次的回波時間及試片厚度即可求出聲速，此種技術稱為脈衝-回波法 (pulse-echo)。然而當試片厚度太薄時，回波會發生重疊現象，因此傳統的超音波技術無法量測 [13] 奈米薄膜結構。1988 年，Maris [14] 等人利用脈衝寬度為 200 飛秒 (femtosecond) 之鎖模染料雷射在薄膜中激發出頻寬達數百 GHz 之超音波脈衝，從此雷射超音波更上層樓，正式登上 THz 的範圍，Maris 等人特將此種技術命名為皮秒超音波術 (picosecond ultrasonics) [13]。有別於傳統雷射超音波術以壓電轉能器偵測超音波訊號的作法，皮秒超音波術是純光學的泵激-探測 (pump-probe) 瞬間反射率量測的技術 [15][16]，以飛秒雷射脈衝泵激材料，產生皮秒超音波，接著用另一較弱之“偵測”雷射脈衝來量測此超音波造成之反射率變化。

產生皮秒超音波的條件，需要有短脈衝雷射以及能吸收光能的金屬薄膜，因為所產生的超音波波長為數個奈米，所以可量測的薄膜厚

度需為數十奈米以上。另外，透過具有光彈效應的薄膜，可偵測超音波所造成的光學反射率變化，藉由此變化便可量測薄膜的相關訊息。

當超快雷射的超短脈衝光聚焦在金屬薄膜表面時，金屬表面電子因為吸收光子能量而被激發至較高能態，此時被激發的電子稱為熱電子 (Hot Electrons)。這些熱電子與周圍晶格在 $0.1\text{-}1$ 皮秒 (ps, Picosecond) 的時間尺度產生交互作用 (亦即電子-聲子交互作用) 而建立局部熱應力場。此應力場的分佈與溫度分佈變化有關，而溫度變化又與光能量在金屬薄膜內的空間分佈 (亦即吸收長度) 成正比。由文獻 [17] 可知此溫度變化 (ΔT) 的初始值為

$$\begin{aligned} \Delta T(x, y, z, t = 0) dx dy \\ = \frac{(1-R)}{\rho C \zeta} e^{-z/\zeta} dx dy \int_0^{t_p} I(x, y, t) dt \end{aligned} \quad (1)$$

其中 C 、 ρ 、 ζ 分別為材料的比熱、密度以及光吸收長度 (Absorption Length)， t 以及 t_p 分別為時間及雷射脈衝的持續時間 (Duration Time)， I 為光強度。一般而言，金屬對於近紅外光的穿透長度約為 $10\text{-}30\text{ nm}$ ，而實驗的光點聚焦實際大小約為數十微米 (μm)，遠大於穿透長度，因此 ΔT 可視為一維分佈。在超短脈衝雷射作用並忽略熱擴散 (Heat Diffusion) 及彈性釋放 (Elastic Relaxation) 效應的前提下， ΔT 可改寫成為一維方程式：

$$\Delta T(z, t = 0) = \frac{(1-R)}{\rho C A \zeta} Q e^{-z/\zeta} \quad (2)$$

其中 R 、 A 、 Q 分別表示光反射率、照射面積及單一脈衝的能量。材料受熱後所造成的應力場 σ_{ij} 與溫度變化關係為 [13]，

$$\begin{aligned} \sigma_{ij}(z, t = 0) &= -3B\beta\Delta T(z, t = 0)\delta_{ij} \\ &= -3B\beta \frac{(1-R)}{\rho C A \zeta} Q e^{-z/\zeta} \delta_{ij} \end{aligned} \quad (3)$$

其中 β 代表熱膨脹係數 (Thermal Expansion Coefficient)、 B 為體模數 (Bulk Modulus) 以及 δ_{ij} 為 Kronecker delta。當只考慮一維方向傳遞時，應變脈衝僅有 η_{33} 為非零值，因此由彈性方程式以及初始條件，可得到應變波 η_{33} 的解，如圖 3 所示。

雷射照射所產生的應變脈衝，其大小隨著

薄膜厚度呈指數衰減，如圖 3(a)虛線所示。當 $t > 0$ 時應變脈衝將往兩邊傳遞，其中往表面傳遞之應變脈衝，在空氣/薄膜界面處產生反射，由於空氣屬於自由端，因此反射脈衝與入射脈衝的相位相差為 180° （參考 2.1 節），此時的應變脈衝外型形成二個極性，如圖 3(b) 所示。圖 3(b) 箭頭所指之處，即為在 $t = 0$ 時應變脈衝在表面的位置，此位置點的訊號在偵測反射率變化以及判讀訊號時相當重要。

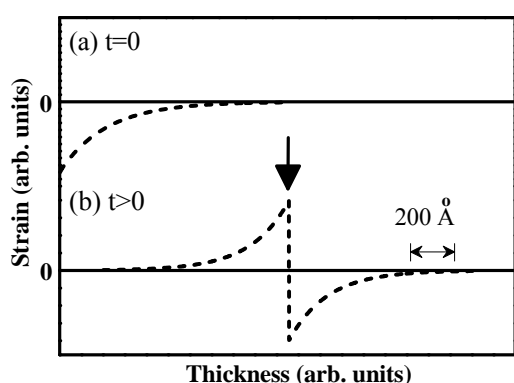


圖 3. 皮秒超音波脈衝產生及傳播示意圖。(a) $t = 0$ 時超快雷射產生之皮秒超音波；(b) $t > 0$ 時皮秒超音波向下傳播之脈衝波形

當此應變脈衝在不同的聲阻抗界面時，有部分能量會穿透，其餘部分能量會反射，反射係數為：

$$r = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \quad (4)$$

其中 Z 為聲阻抗，下標 1 及 2 分別指聲波所在介質與下一個介質。反射回來的聲波稱為回聲 (echo)。聲阻抗差越大，則反射越強。

當回波到達表面附近，可以透過材料的光彈效應 (photoelastic effect) 量測回波的訊號。所謂光彈效應即是材料內部因為受到應變形變的影響而改變材料的折射係數，進而造成材料的光學反射率變化 $[\Delta R(t)]$ 。光學反射率變化可由材料的靈敏函數 (sensitivity function, f) 與聲波應變脈衝 (strain pulse, η) 乘積的積分 [18] 求得：

$$\Delta R(t) = \int f(z) \eta(z, t) dz \quad (5)$$

其中 f 與材料的光彈係數 (亦即 $dn/d\eta$ and $dk/d\eta$) 有關， n 及 k 分別代表折射係數的實部與虛部。除了應變脈衝造成折射率變化外，材料表面的熱效應亦會造成折射率變化。因此在光學反射率變化訊號圖形中，有初始階段的熱效應變化再加上應變脈衝造成的反射率變化。在後續的實驗結果討論過程中，量測訊號將會扣除熱效應所造成的反射率變化。由於此反射率之變化量只有約十萬分之一，因此必須使用高靈敏度訊號量測及放大系統。

聲速量測是以聲波之產生-傳遞-反射-抵達四個過程傳播路徑長度與所需時間比值而得，亦即

$$v = \frac{2d}{\tau} \quad (6)$$

其中 v 、 d 及 τ 分別代表聲速、薄膜厚度及傳播時間。

三、實驗設計

3.1 實驗規劃

本研究規劃以皮秒超音波技術探測奈米薄膜的聲學特性及聲速，以求得更精確的薄膜參數；同時藉由尋找高聲阻抗及高電阻率材料，降低 Bragg Reflector 的電容效應。最後，再以上述兩項研究參數，製作 SMR 並執行微波訊號量測，以完成高頻 SMR 及降低整體電容效應之研製目的。

整體的實驗規劃流程，如圖 4 所示。本研究第一部份是使用皮秒超音波技術，應用在高頻諧振器的聲學研究，以探討組成 SMR 之各種奈米尺度薄膜之聲學特性，奈米薄膜包括壓電材料、低聲抗、高聲抗之材料。

第二部份針對降低 Bragg Reflector 寄生電容效應，係以非金屬之高聲抗材料 TaN_x 為研究對象。其步驟是首先以不同反應氣體分壓比為製程條件下沈積薄膜，再對薄膜的密度、聲阻抗等機械特性詳細分析，並歸納薄膜機械特性與製程條件的關係。其次，量測薄膜的電阻率後，並實際製作成 MOS 電容，以便確認可降低電容值。最後，依其電容值及聲阻抗值，評估是否可作為取代金屬層的材料。最後依據上述製程結果及條件取代金屬層，製作 Bragg Reflector 及完成 SMR 製作，然後進行

量測微波訊號，以驗證諧振器的性能。

3.2 奈米薄膜之聲學研究

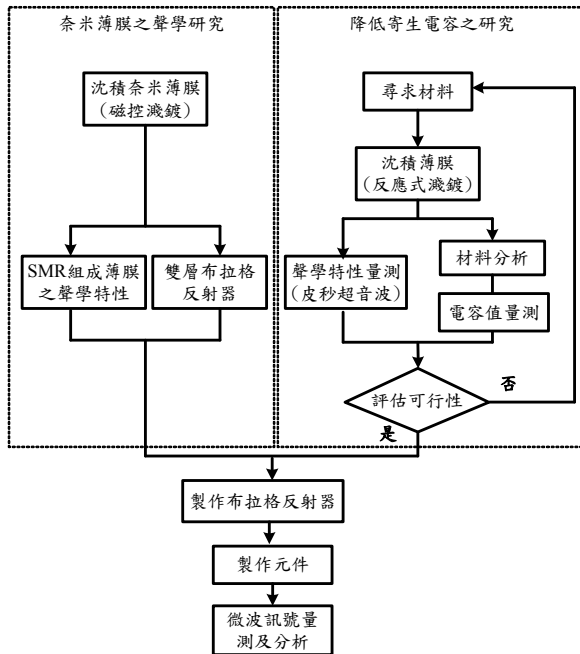


圖 4. 實驗規劃流程圖

體聲波諧振器是藉由壓電材料的厚度控制諧振頻率，當諧振器自 2 GHz 提升至 10 GHz 時，薄膜厚度減少 5 倍，此時薄膜厚度僅約數百奈米。而奈米薄膜的機械及聲學特性與厚膜或晶體有顯著不同，所以皮秒超音波便成為研究奈米薄膜聲學特性的最佳工具。本論文針對 SMR 的組成薄膜進行聲學探討，規劃的薄膜包括壓電材料 ZnO、低聲抗之 SiO₂、高聲抗之 TaN_x 等化合物材料。所有薄膜的沈積方式，皆以磁控濺鍍技術進行。由於皮秒超音波技術需有產生及偵測超音波的介質，因此無法產生超音波的薄膜如 SiO₂ 及 ZnO，需要再搭配一層金屬如 Ni，作為超音波激發源及光彈轉能器；TaN_x 則可以自行產生皮秒超音波，無需再外加一層金屬。

3.3 材料製備及分析

本文所研究之 ZnO 及 SiO₂ 薄膜，以傳統磁控濺鍍技術沈積。另外本研究為消除 Bragg reflector 寄生電容效應[4]，提出之非金屬 TaN_x 薄膜，將以反應式磁控濺鍍技術沈積，藉由調整氮氣分壓達到控制電阻率的目的，並進行機

械、電性以及聲速特性的量測。

所有薄膜皆以 p-型矽晶圓為基板，濺鍍前真空腔體的背景壓力，皆抽至 $2-3 \times 10^{-6}$ torr 後再通入氣體，靶材至基板的距離為 60 mm，執行濺鍍之前先以 80W 射頻功率，執行靶材表面清潔 10-15 分鐘。ZnO 及 SiO₂ 濺鍍壓力為 7 mTorr，以射頻模式(13.56 MHz)為輸入電源，功率為 80-100 W。TaN_x 薄膜濺鍍功率為 200 W，濺鍍壓力為 3 mTorr，氮氣分壓比 N₂/(N₂+Ar) 為 0%-30%。

在分析 TaN_x 材料特性方面以電子掃描顯微鏡(SEM, Jeol, model 6340F)觀察 TaN_x 之薄膜微結構；在製作試片時使用剝離法(lift-off)所形成的階梯並以表面形貌儀(surface profilometer, Dektak III)量測薄膜厚度。另外以四點探針量測片電阻後，再乘以薄膜厚度即求得薄膜電阻率。

另外，本實驗將待測 TaN_x 薄膜沈積在 SiO₂/Si 基板上形成 MOS 結構，再使用電容-電壓量測設備(Keithley 590 及 595)量測 MOS 結構的電容值，藉以評估 Bragg Reflector 之寄生電容是否可順利降低。

3.4 皮秒超音波設備

本研究中皮秒超音波的激發源為自鎖模摻鈦藍寶石超快雷射(Self Mode-locked Ti:sapphire Ultrafast Laser)，雷射的脈衝寬度約為 50 飛秒(fs)，波長 800 nm，功率 200 mW，脈衝重複率 86 MHz。

圖 5 為皮秒超音波裝置，使用偏振分光晶體(Polarizing Beam Splitter, 50:50)將超快雷射分成泵激及偵測兩道光束。此兩道光束有二項特點：第一為偏振方向互相垂直，以避免泵激光束在後段光路中干擾偵測光束訊號；第二為

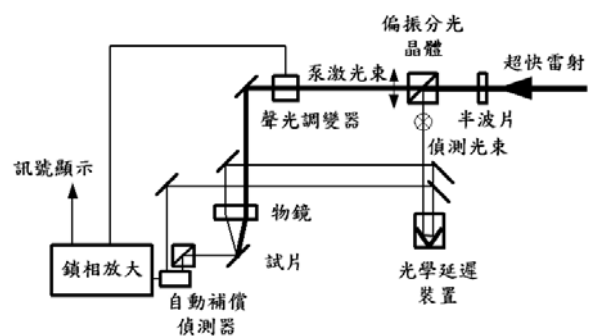


圖 5. 皮秒超音波實驗裝置示意圖

泵激與偵測光束的功率比約為 10:1，此功率比值由前段的半波片(Half-wave Plate)及偏振分光晶體搭配調控。另外在裝置中亦引入光程延遲器，將泵激及偵測兩道光束之脈衝時間點作光程延遲，以偵測在不同時間的聲波傳遞情形。

此外因為偵測光的反射率變化相當弱，約 10^{-5} 等級，因此必須提高訊雜比(SNR, Signal to Noise Ratio)，具體作法有下列三項重點：

(1) 利用鎖相放大系統(Lock-in Amplified System)提高訊雜比。本實驗中，以鎖相放大器(Stanford Research Systems, SR844)抑制雜訊，且使用聲光調變器(Acousto-optic Modulator, IntraAction, AOM-40N)作為截波器(Chopper)。該鎖相放大器提供 1.4 MHz 的參考頻率至聲光調變器，鎖相放大器可擷取在此頻率內的真正訊號而排除其他雜訊。

(2) 在偵測器前面放置偏振分光晶體以阻擋 s 偏振的泵激光束，避免其干擾到訊號光束；

(3) 將偵測光束利用 1:1 分光鏡分成參考光束及訊號光束，參考光束直接進入自動補償偵測器(Auto-balanced Detector, New Focus, Nirvana 2007)，訊號光束則經過聚焦在試片表面後，帶著聲波訊號進入偵測器內。使用自動補償偵測器的差動放大原理，可將訊號光束扣除參考光束後，微小聲波訊號放大，以抑制低頻雜訊。

3.5 元件製作及特性分析

依據實驗流程執行各項實驗分析後，評估出具有高電阻率、低電容及高聲阻抗之新材料，以及使用奈米薄膜的聲學特性及聲速量測分析的結果，設計並製作中心頻率為 10 GHz 之 Bragg Reflector (低聲阻抗層薄膜材料仍以 SiO_2 為主)。對於 SMR 而言，Bragg Reflector 表面粗糙度將直接影響壓電薄膜的品質，故我們以原子力顯微鏡(AFM, Digital Instruments MultiMode SPM, NanoScope IIIa controller)觀察表面粗糙度，儀器探針採用矽針，掃瞄方式為敲擊模式(Tapping Mode)，掃瞄速率為 0.25 Hz，掃瞄範圍大小為 $1.0 \times 1.0 \mu\text{m}^2$ ，取樣點為 128 點。最後再沈積壓電換能器，完成 SMR 元件製作。本研究壓電材料使用 ZnO，其聲速則以本實驗之量測值為主。

最後，再以網路分析儀量測 SMR 元件，

由於此元件僅以 1-port 輸出入訊號，因此僅量測 S_{11} 或 S_{22} 訊號。將訊號加以計算後，求出元件之 Q 值及相關性能參數。

Q 值是評估元件對於能量損耗的指標之一，可由下列兩種方式定義：第一種輸入阻抗(Input Impedance $|Z|$)值在平行(f_p)及串聯(f_s)共振頻率時的頻寬 Δf_s 及 Δf_p ，

$$Q_p = \frac{f_p}{\Delta f_p} \quad (7)$$

$$Q_s = \frac{f_s}{\Delta f_s} \quad (8)$$

第二種使用阻抗相位的斜率以及相位響應可計算出 Q 值為

$$Q = \frac{f_x}{2} \left| \frac{d\angle Z_{in}}{df} \right|_{f_x} \quad (9)$$

其中 $\angle Z_{in}$ 為以徑度表示的相位響應， f_x 分別代表 f_p 及 f_s 。

四、實驗結果與討論

在本節中，將依次討論 SMR 之壓電薄膜、低聲阻抗薄膜及高聲阻抗薄膜之特性研究，其高聲阻抗薄膜將尋找新材料，取代傳統之金屬高聲阻抗層，以降低寄生電容效應。最後，我們將利用前述實驗成果，設計並製作 SMR 元件，同時也將進行微波訊號分析，以驗證整體成效。

4.1 壓電薄膜

本研究中我們採用氧化鋅 ZnO 作為 SMR 之壓電薄膜，這是由於它具有良好的光彈效應 [19]、電光效應 [20] 及壓電效應，而成為應用相當廣泛的材料。在壓電領域中，ZnO 薄膜之結晶性及聲速，將影響諧振器的 Q 值及操作頻率。

為測出 ZnO 之聲速，首先將 ZnO 沈積在 Si 基板上，厚度為 243 nm。由於 ZnO 吸光性差，因此 ZnO 層之上再沈積一層厚度為 20 nm 的 Ni 作為轉能器。圖 6 為光學反射率變化 ($\Delta R(t)$) 圖，其中熱背景效應已扣除。從圖中 0 至 20 ps 可發現聲波脈衝在 Ni 內部的來回反

射，其中部分聲波能量穿透至 ZnO 層。實際的聲波回波訊號發生在 $t = 82$ ps 附近，此時 ΔR 呈現一個類似字母 W 的訊號，這是非常典型的回波訊號，其中央的尖峰極性向上，表示 $Z_{\text{ZnO}} > Z_{\text{Si}}$ 。另一個較為奇怪的訊號發生在在 $t = 41$ ps 時，其峰值極性為向下的訊號，其時間約為應變脈衝來回一趟所需時間的一半。這種訊號在皮秒超音波的相關文獻中並未被報導過，為本團隊首先發現之現象，我們推斷應該與 ZnO 獨特的光彈效應、電光效應及壓電效應有關。發生此訊號的原因是當應變脈衝抵達 ZnO/Si 的界面時，應變脈衝透過 ZnO 之光彈(Photo-elastic)效應造成折射率變化(並導致光學反射率變化 ΔR)。文獻中曾報導 ZnO 有二種光彈效應[21]：(1)直接光彈效應；(2)間接光彈效應—由應變波透過壓電(Piezo-electric)效應產生局部電場，此局部電場再透過電光(Electro-optic)效應影響 ZnO 的折射係數變化而發生 ΔR 。

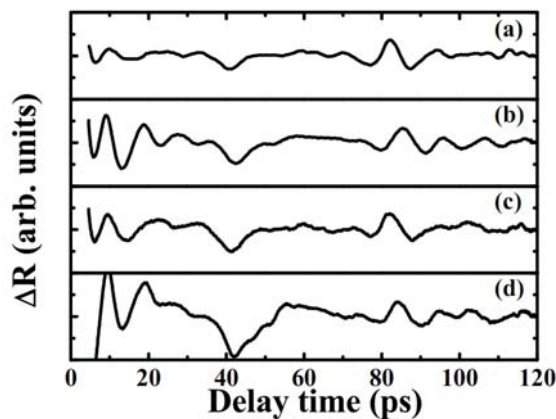


圖 6. ZnO 壓電薄膜之 $\Delta R(t)$ ，退火溫度：(a)未退火；(b)350°C；(c)450°C；(d)550°C

另外，我們對 ZnO 進行不同溫度的退火，發現退火條件對其光彈效應有明顯的影響。圖 6 之四條曲線中，(a)為未退火，(b)、(c)、(d)之退火溫度分別為：350°C、450°C、550°C。很明顯地，退火溫度愈高，其光彈效應愈強，而反射率變化 ΔR 訊號愈大。

厚度在數十奈米左右的 Ni 薄膜聲速經本團隊量測的結果為 5190 ± 50 m/s。根據圖 6 的回波時間扣除聲波在 Ni 薄膜層的時間差，以及 ZnO 的厚度，可計算出 ZnO 薄膜之聲速為 6560 ± 50 m/s。這個數值較文獻[22]中 ZnO 的

聲速 6330 m/s 高出 3.6%。因此，在設計 SMR 時，不能倚賴文獻中的材料特性參數。

4.2 布拉格反射器低聲阻抗薄膜

由於 SiO_2 具有低成本、容易沈積以及可補償溫度效應等特性[23]，同時其密度及聲阻抗相當低，使得此薄膜成為 Bragg reflector 低聲阻抗薄膜的常用材料。在此篇研究中我們以濺鍍法沈積 SiO_2 ，其聲速同樣以皮秒超音波術加以分析。

SiO_2 薄膜對 800 nm 雷射光而言為透明，因此也無法透過吸收雷射光來激發皮秒超音波，必須透過另鍍一層金屬轉能器，這裡我們同樣沈積一層約 26 nm 厚之 Ni 作為轉能器。 SiO_2 的厚度為 163 nm，由 $\Delta R(t)$ 量測結果可看出回波返抵 Ni 表面之時間為 69.8 ps，扣除聲波在 Ni 薄膜層的時間差，我們推算出 SiO_2 之聲速為 5450 ± 50 m/s。這個數值較文獻[24]中 SiO_2 的聲速 6500 m/s 低了 16%。這是由於奈米薄膜的特性與塊材不同，同時也取決於製程，因此在設計 SMR 時，有必要重新量測材料特性參數。

4.3 布拉格反射器高聲阻抗薄膜

由於聲阻抗值與材料的密度及聲速有關，而材料的聲速一般差異不大，密度卻可相差數倍，因此高聲阻抗材料通常必須具有密度高的特性。在半導體製程中最高之聲阻抗材料為 W，但因殘留應力、製成溫度等限制不易製作；鉭(Ta 密度約 16 g/cm^3)也是常用材料，其密度僅次於 W (密度約 19 g/cm^3)，同時其氮化物亦是半導體銅製程的擴散阻絕層[25]，以及應用在電阻器(Resistor)之常用材料，加上具有優異的熱穩定效應、光學特性[26-29]、高導電率[30-33]及高抗腐蝕[34,35]等特性，因此可作為降低 Bragg Reflector 寄生電容的最佳選擇。由反應式濺鍍技術沈積的 ZrO_2 ，經初步分析可獲知：調整反應氣體的分壓，可調變薄膜特性[36]；因此我們期望藉由類似製程條件的控制嘗試調整 TaN_x 薄膜的電阻特性，以改善傳統 Bragg Reflector 的寄生電容效應。

TaN_x 薄膜電阻率量測結果如表 2，顯示隨著 N_2 分壓比升高至 25%，電阻率可達到 $1.4 \times 10^8 \mu\Omega\text{-cm}$ 。

表 2. TaN_x 薄膜電阻率量測結果

氮氣分壓比(%)	電阻率 $\rho(\mu\Omega\text{-cm})$
1.5	3.0×10^2
3.3	3.9×10^2
10	5.0×10^3
15	2.4×10^4
20	1.0×10^6
25	1.4×10^8

此結果與一般文獻[34]所探討的低電阻率(170~300 $\mu\Omega\text{-cm}$)不相同。根據文獻[33]，TaN_x 薄膜內多餘的氮氣原子可作為施子(Donors)而增加薄膜導電率；本研究使用高濃度功率密度製程條件下，氮氣分子與相當多的 Ta 原子充分反應，使得薄膜內並無多餘的氮氣原子可當作 Donors，因此導電載子濃度較低；另外，在反應氣體高分壓比條件下，薄膜形成多孔隙非晶結構，使得載子的遷移率降低；綜合以上兩種效應，造成整體電阻率高於文獻[33]發表的數據。

藉由增加分壓比提高薄膜電阻率的結果，可應用於降低 Bragg Reflector 的寄生電容，為了驗證這種效應，我們應用四種不同分壓條件沈積的 TaN_x 薄膜當成金氧半電容器(MOSC)的金屬閘極；經電容-電壓(C-V)量測系統的測量結果，如圖 7 所示。四種 MOSC 試片的 C-V 曲線，比較對應於聚集區(Accumulation Region)的電容值，顯示隨著氮氣分壓增加，電容值隨之降低；以 15%分壓比試片的 C-V 曲線為例，其聚集區的電容值相較於金屬閘極 MOSC 的對應數值，降低了一半以上。

圖 8 為 TaN_x 密度量測圖，可看到密度隨著氮分壓比之增加而減少。這可能是因為其薄膜之孔隙增加，使得結構較為鬆散。由於聲阻抗正比於密度，因此氮氣分壓的變化的確會影響 TaN_x 的聲阻抗。

最後，我們以皮秒超音波術量測 TaN_x 的聲速，選定氮氣分壓比分別為 0%(純 Ta)、3.3%、8.5%、15%、以及 25%的 TaN_x 薄膜進行量測，其中氮氣分壓 8.5%及 15%之 TaN_x 薄膜無法獲得可判讀的回波訊號，這可能是由於界面品質不佳或聲阻抗匹配問題所致。其它三

個的薄膜由回波時間差推算出聲速分別為 5000 ± 50 m/s(0%)、 5300 ± 50 m/s(3.3%)及 4600 ± 50 m/s(25%)。

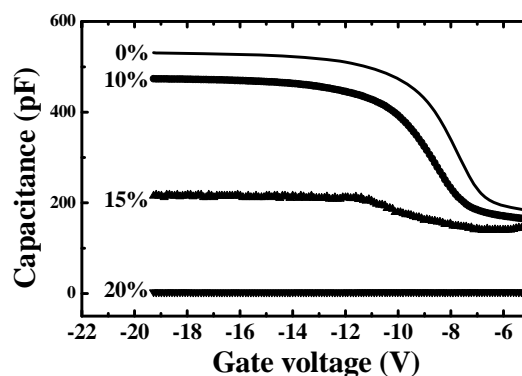


圖 7. 不同分壓比 TaN_x 薄膜之金氧半電容量測

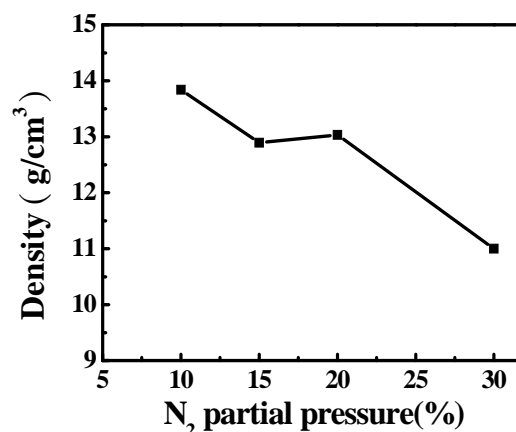


圖 8. 不同分壓比氮化鉭薄膜之密度

4.4 SMR 元件製作及特性分析

本研究中最終選擇 TaN_x 薄膜，主要係以三項特性，即電阻、電容以及密度來決定。當氮氣分壓比越高時，電阻越大，電容值就越高；但相對的，密度就越小；而研究的目標即是消除 SMR 的寄生電容，因此電阻及電容優先考慮，接著才是密度。所以當氮氣分壓比為 15%時，電容效應已經降為 0% (純 Ta) 的一半以上，已可達到需求，加上此時的密度亦僅損失降低 7%，故選擇分壓比 15%之 Ta_xN 薄膜。經過上述量測 TaN_x 薄膜的機械、電子及聲學特性後，最後我們決定以氮氣分壓比 15%製作的 TaN_x 薄膜，取代高聲阻抗金屬層製作

元件。這主要是因為其電阻率達到 $10^4 \mu\Omega\text{-cm}$ ，使得電容值降低到 200pF，比純金屬的電容值(>500pF)降低一半以上，故可有效的抑制寄生電容。由於無法量測到氮氣分壓比為 15%之 Ta_xN 薄膜之皮秒超音波反射的數據，因此，我們改由微硬度量測、彈性模數、及密度來推算此 Ta_xN 薄膜之聲速。

初期本研究所規劃的元件，以 10 GHz 為目標操作頻率，因此根據上述的 SiO_2 及 TaN_x 聲速，各層的厚度統計如下： SiO_2 ：136 nm、 TaN_x ：125 nm。以此厚度設計所製作的 Bragg Reflector 之 SEM 照片，如圖 9。

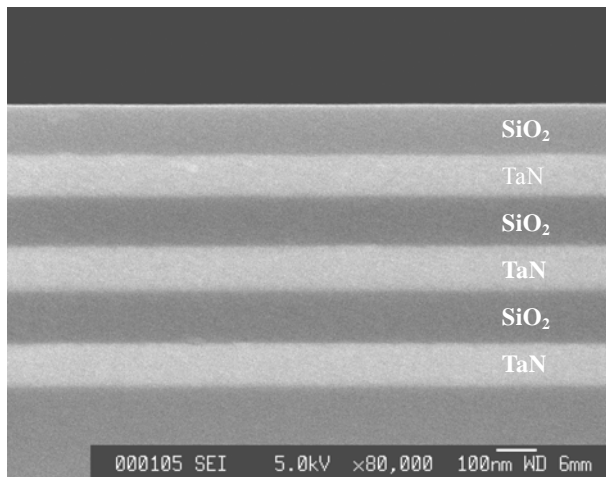


圖 9. 濺鍍布拉格反射器 SEM 照片

為得知沈積六層薄膜後，對於最上層薄膜粗糙度的影響，以 AFM 量測最上一層 SiO_2 表面粗糙度如圖 10 (上視圖) 及圖 11 (立體圖)。由量測數據得知基板的平均粗糙度為 0.23 nm，對於製作 ZnO 壓電薄膜而言，已達可接受的程度。

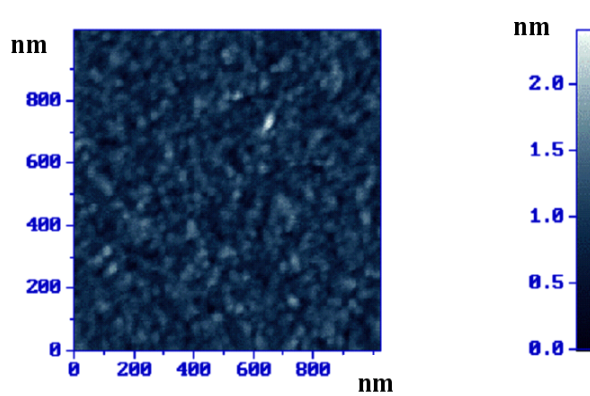


圖 10. 第六層 SiO_2 之 AFM 上視圖

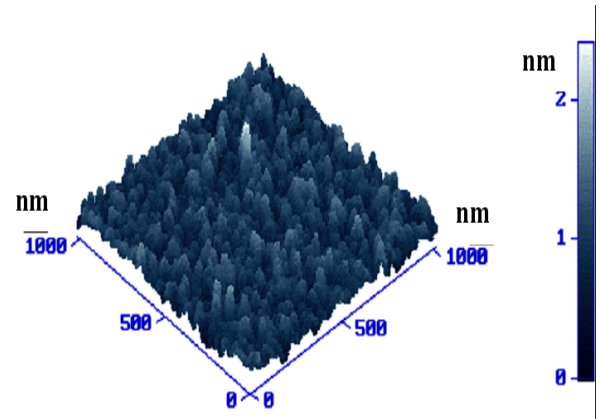


圖 11. 第六層 SiO_2 之 AFM 立體圖，平均粗糙度為 0.23 nm

以此 Bragg Reflector 為基板，先沈積一層數十奈米的 Ni/Au 層作為下電極，接著以室溫沈積 ZnO 壓電薄膜以及上電極 Ni/Au，並以剝離法製作出諧振區域後，最後將元件以網路分析儀量測微波訊號 S_{22} ，頻率自 100 MHz 至 20 GHz 掃瞄，量測結果如圖 12。

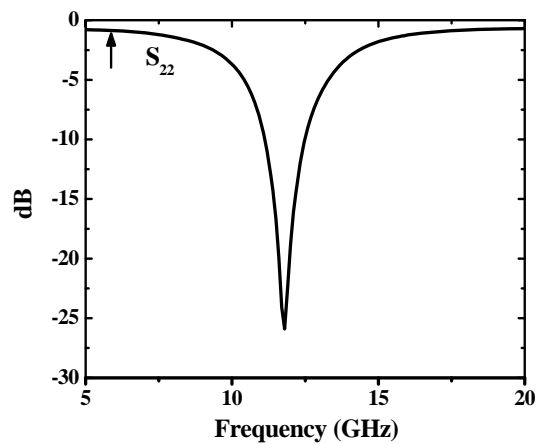


圖 12. 網路分析儀量測元件 S_{22} 訊號圖

由圖 12 可得知中心頻率約在 11.8 GHz，其插入損失約 -2~-3dB，如圖中箭頭所示大小。再將圖 12 轉成輸入阻抗(Z)圖如圖 13 所示，另外，圖 12 結果之 Smith 圖如圖 14 所示。由輸入阻抗的共振頻率以及頻寬，並根據(7)及(8)式可計算出 Q_p 約為 6.9。

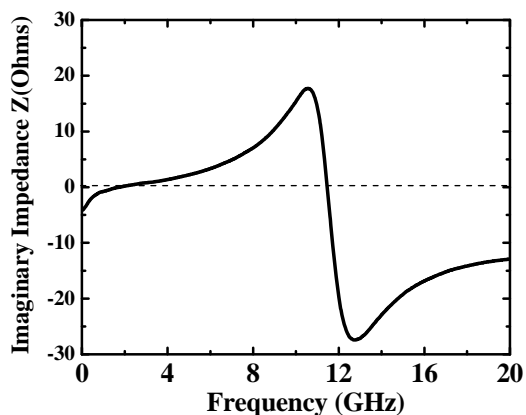


圖 13. 圖 12 結果之虛部阻抗圖

五、結 論

本文第一部份，使用皮秒超音波技術，量測組成鑲嵌式薄膜諧振器的壓電薄膜、低聲阻抗薄膜及高聲阻抗薄膜，發現聲速值與文獻值有所差異，表示在不同製程且薄膜在奈米尺度下，若要提升元件性能，對於聲速確有必要加以研究探討，以符合設計的要求。

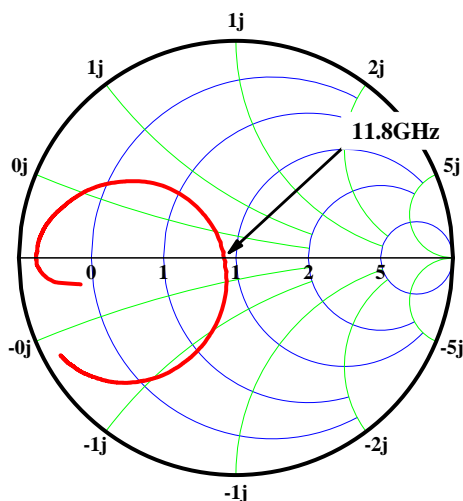


圖 14. 圖 12 結果之 Smith 圖

本研究發現，透過不同氮氣分壓比，可調整 TaN_x 電阻，藉以降低 Bragg reflector 的電容，在低氮氣分壓比時，薄膜富含金屬成分，因此有低電阻率；當氮氣分壓比升高時，電阻率可高達為 $10^8 \mu\Omega\text{-cm}$ ，已達半導體電阻率。

次將薄膜製成金氧半電容結構之電極，並量測其電容值，發現隨著 N_2 分壓增加，電容值有減小的趨勢。由以上氮化鉬的電阻、電容及聲學性質，本文研判高分壓比的氮化鉬薄膜，相當適合作為較低寄生電容之布拉格反射器的高聲阻抗層材料。

本文最後以分壓比 15% 之氮化鉬作為高聲阻抗層， SiO_2 為低聲阻抗層，製作完成聲波布拉格反射器；再依序沈積下電極、氧化鋅及上電極層，完成壓電換能器製作後，量測此 SMR 元件之操作頻率為 11.8 GHz， Q_p 為 6.9，插入損失約為 -2~-3 dB。

本論文透過皮秒超音波的高空間解析度，及脈衝-回波法之聲波傳遞的特性，成功地探討組成鑲嵌式薄膜諧振器奈米薄膜的聲學性質及聲速。最後，選擇具有高電阻、高聲阻抗的氮化鉬薄膜，取代傳統金屬的高聲阻抗層，並成功研製高頻的鑲嵌式諧振器。

誌 謝

本研究感謝國科會 No. NSC 97-2221-E-606-001 專題研究計畫補助，使實驗得以完成。

參考文獻

- [1] Stokes, R. B., Crawford, J. D., and Cushman, D., "Monolithic Bulk Acoustic Filters to X-Band in GaAs," Proceedings of the IEEE Ultrasonics symposium, Vol. 1, pp. 547-551, 1993.
- [2] Ylilammi, M., Jella, J., Partanen, M., and Kaitila, J., "Thin film bulk acoustic wave filter," IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, Vol. 49, No. 4, April, 2002.
- [3] Krishnaswamy, S. V., Roesnbaum, J., Horwitz, S., Vale, C., and Moore, R. A., "Film Bulk Acoustic Wave Resonator Technology," Proceedings of the IEEE Ultrasonics symposium, Vol. 1, pp. 529-536, December 1990.
- [4] Lakin, K. M., Kline, G. R., and McCarron, K. T., "Development of Miniature Filters for Wireless Applications," IEEE Transactions on Microwave Theory and

- Technique, Vol. 43, No. 12, pp. 2933-2939, 1995.
- [5] Nishihara, T., Yokoyama, T., Miyashita, T., and Satos Y., "High performance and miniature thin film bulk acoustic wave filters for 5 GHz," IEEE Ultrasonics symposium, Vol. 1, pp.962-972, 2002.
- [6] Martin, F., Jan, M. E., Belgacem, B., Dubois, M. A., and Muralt, P., "Shear mode coupling and properties dispersion in 8 GHz range AlN thin film bulk acoustic wave (BAW) resonator," Thin Solid Films, Vol. 514, pp. 341-343, 2006.
- [7] Berge, J., Vorobiev, A., Steichen, W., and Gevorgian, S., "Tunable Solidly Mounted Thin Film Bulk Acoustic Resonators Based on $Ba_xSr_{1-x}TiO_3$ Films," IEEE Microwave and Wireless Components Letters, Vol. 17, pp.655-657, 2007.
- [8] Rosenbaum, J. F., Bulk Acoustic Wave Theory and Devices, Artech House, Boston, pp. 125-136, 1975.
- [9] Cheng, H., Sun, Y., Zhang, J. X., Zhang, Y. B., Yuan, S., and Hing, P., "AlN Films Deposited Under Various Nitrogen Concentrations by RF Reactive Sputtering," J. of Crystal Growth, Vol. 254, pp. 46-54, 2003.
- [10] Kang, D. J., Kim, J. S., Jeong, S. W., Roh, Y., Jeong, S. H., and Boo, J. H., "Structural and Electrical Characteristics of R.F. Magnetron Sputtered ZnO Films," Thin Solid Films, Vol. 475, No. 1-2, pp. 160-165, 2005.
- [11] Lee, J. G., Jung, J. P., Lee, M. H., and Park, J. S., "Effects of Bottom Electrodes on the Orientation of AlN Films and the Frequency Responses of Resonators in AlN-based FBARs," Thin Solid Films, Vol. 447-448, pp. 610-614, 2004.
- [12] Newell, W. E., "Face-Mounted Piezoelectric Resonators," in Proc. IEEE , Vol. 53, pp. 575-581,1965.
- [13] Grahn, H. T., Maris, H. J., and Tauc, J., "Picosecond Ultrasonics," IEEE Journal of Quantum Electron., Vol. 25, pp. 2562-2569, 1989.
- [14] Grahn, H. T., Young, D. A., Maris, H. J., Tauc, J., Hong, J. M., and Smith, T. P. III, "Sound velocity and index of refraction of AlAs measured by picosecond ultrasonics," Applied Physics Letters, Vol. 53, pp. 2023-2024, 1988.
- [15] Wright, O. B., Hyoguchi, T., and Kawashima, K., "Laser Picosecond Acoustics in Thin Films: Effect of Elastic Boundary Conditions on Pulse Generation," Japanese Journal of Applied Physics , Vol. 30, pp. L131-L133, 1991.
- [16] Wright, O. B., Hyoguchi, T., and Kawashima, K., "Characterization of Transparent and Opaque Thin Films Using Laser Picosecond Ultrasonics," Nondestructive Testing and Evaluation, Vol. 7, pp. 149-163, 1992.
- [17] Pu, N. W., "Picosecond Ultrasonic Characterization of Mo/Si Multilayers for Extreme Ultraviolet Lithography," Ph.D. Dissertation, Engineering-Electrical Engineering and Computer Sciences, University of California, Berkeley, California, pp. 15-21, 2000.
- [18] Thomsen, C., Grahn, H. T., Maris, H. J., and Tauc, J., "Surface generation and detection of phonons by picosecond light pulses," Physical Review B, Vol. 34, pp. 4129- 4138, 1986.
- [19] Ashida, A ., Otha, H., Nagata, T., Nakano, Y., Fujimura, N., and Ito, T., "Optical Propagation Loss of ZnO Films Grown on Sapphire," Journal of Applied Physics, Vol. 95, pp. 1673-1676, 2004.
- [20] Eknayan, O., Taylor, F., Tang, Z., Swenson, V. P., and Marx, J. M., "Strain Induced Optical Waveguides in Lithium Niobate, Lithium Tantalate, and Barium Titanate," Applied Physics Letters, Vol. 60, pp. 407-409, 1992.
- [21] Sasaki, H., Tsubouchi, K., Chubachi, N., and Mikoshiba, N., "Photoelastic effect in piezoelectric semiconductor: ZnO," Journal of Applied Physics, Vol. 47, pp. 2046-2049, 1976.
- [22] Krishnaswamy, S. V., Roesnbaum, J., Horwitz, S., Vale, C., and Moore, R. A., "Film Bulk Acoustic Wave Resonator Technology," Proceedings of the IEEE Ultrasonics symposium, Vol. 1, pp. 529-536, 1990.
- [23] Profunser, D. M., Vollmann, J., and Dual, J., "Determination of the Materials of Microstructures by Laser Based Ultrasound," Ultrasonics, Vol. 42, pp. 641-646, 2004.

- [24] Grahn, H. T., Maris, H. J., and Tauc, J., "Elastic Properties of Silicon Oxynitride Films Determined by Picosecond Ultrasonics," *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 53, pp. 2281-2283, 1988.
- [25] Chen, G. S., Lee, P. Y., and Chen, S. T., "Phase Formation Behavior and Diffusion Barrier Property of Reactively Sputtered Tantalum-based Thin Films Used in Semiconductor Metallization," *Thin Solid Films*, Vol. 353, pp. 264-273, 1999.
- [26] Olowolafe, J. O., Mogab, C. J., Gregory, R. B., and Kottke, M., "Interdiffusions in Cu/reactive-ion-sputtered TiN, Cu/chemical-vapor-deposited TiN, Cu/TaN, and TaN/Cu/TaN thin-film Structures: Low Temperature Diffusion Analyses," *J. Appl. Phys.*, Vol. 72, pp. 4099-4103, 1992.
- [27] Oku, T., Kawakami, E., Uekubo, M., Takahiro, K., Yamaguchi, S., and Murakami, M., "Diffusion Barrier Property of TaN Between Si and Cu," *Appl. Surf. Sci.*, Vol. 99, pp. 265-272, 1996.
- [28] Tsai, M. H., Sun, S. C., Sun, C. E., Tsai, C. E., Shuang, S. H., and Chiu, H. T., "Comparison of the Diffusion Barrier Properties of Chemical-vapor-deposited TaN and Sputtered TaN Between Cu and Si," *J. Appl. Phys.*, Vol. 79, pp. 6932-6938, 1996.
- [29] Aouadi, S. M. and Debessai, M., "Optical Properties of Tantalum Nitride Films Fabricated Using Reactive Unbalanced Magnetron Sputtering," *J. Vac. Sci. Technol. A*, Vol. 22, pp. 1975-1979, 2004.
- [30] Sun, X., Kolawa, E., Chen, J-S., Reid, J. S., and Nicolet, M-A., "Properties of Reactively Sputtering-deposited Ta-N Thin Films," *Thin Solid Films*, Vol. 236, pp. 347-351, 1993.
- [31] Mehrotra, B. and Stimmel, J., "Properties of Direct Current Magnetron Reactively Sputtered TaN," *J. Vac. Sci. Technol. B*, Vol. 5, pp. 1736-1740, 1987.
- [32] Riekkinen, T., Molarius, J., Laurila, T., Nurmela, A., Suni, I., and Kivilahti, J. K., "Reactive Sputter Deposition and Properties of Ta_xN Thin Films," *Microelectronic Eng.*, Vol. 64, pp. 289-297, 2002.
- [33] Lu, Y. M., Weng, R. J., Hwang, W. S., and Yang, Y. S., "Study of Phase Transition and Electrical Resistivity of Tantalum Nitride Films Prepared by DC Magnetron Sputtering with OES Detection System," *Thin Solid Films*, Vol. 398-399, pp. 356-360, 2001.
- [34] Nordin, M., Larsson, M., and Hogmark S., "Wear Resistance of Multilayered PVD TiN/TaN on HSS," *Surf. Coat. Technol.*, Vol. 120-121, pp. 528-534, 1999.
- [35] Kim, S. K. and Cha, B. C., "Deposition of Tantalum Nitride Thin Films by D.C. Magnetron Sputtering," *Thin Solid Films*, Vol. 475, pp. 202-207, 2005.
- [36] Li, T. C., Pu, N. W., Lwo, B. J., Hu, L. J., and Kao, C. H., "The effects of oxygen partial pressure on the acoustic velocity in zirconia films studied by picosecond ultrasonics," *Thin Solid Films*, Vol. 496, pp.208-213, 2006.