

Sc_xAl_{1-x}N 壓電共振器實現 5G 毫米波行動通訊積體化

Sc_xAl_{1-x}N Piezoelectric Resonator Promising the Applications for 5G Millimeter Wave Communication System

洪茂峰、洪肇蔚

Mau-Phon Hung, Jau-Wei Hung

行動通訊為現代人的生活帶來許多便利，而通訊系統中濾波電路決定了通訊品質的良窳。AlN 濾波器因具有可高頻操作、對溫度穩定性高及與 CMOS 製程相匹配等優點，可實現濾波晶片積體化，滿足行動通訊短小輕薄的要求，故為目前製作濾波晶片的主力。但現今行動通訊進展到 5G 境界，要求濾波器能操作於更高的頻率，更大的頻寬，具有信號損漏更低的 Q 值，對此，AlN 濾波器漸露窘態，但有學者發現在 AlN 中摻入 Sc 原子，其造成的應力將使 Sc_xAl_{1-x}N 產生較 AlN 更好的壓電表現。此一新材料的興起，當然帶來很多研發的挑戰。本文將對 ScAlN 的壓電特性與材料品質的相依性、各式 ScAlN 元件 (BAW、FBAR、LWR、SMR) 的製程與電特性、優化其電特性的方法以及應用於集能元件與高頻通訊系統之潛力等議題作詳細的介紹。

The 5G wireless standards is a promising solution for the increasing number of bands and the complexity in the wireless communication system. Due to CMOS compatibility and well-developed techniques, AlN has been popular in the wireless communication system. However, limited piezoelectric coefficients, k_t^2 , was observed in AlN films which affecting the bandwidth of the filter. Recent work shows an increase in k_t^2 values up to 4-5 times larger than AlN can be obtained by doping Sc into AlN, that means, Sc_xAl_{1-x}N-base filters can be played as a potential device in the 5G era. For such a new material, some kinds of important challenges, such as, material growth Parameters, devices fabrication techniques, improve methods on device characteristics and the roles of Sc_xAl_{1-x}N-base resonator applied on millimeter wave communication system and energy harvesting devices will be discussed.

一、5G 行動通訊技術

5G 是指「第五代行動通訊技術」，它代表了下一代的行動網路。拜積體電路技術快速

發展之賜使行動通訊的應用成為可能，為我們的日常生活帶來許多便利，如 1G 時期的語音通訊，到 2G 時進展到可以發簡訊、3G 時能基本上網，到 4G 時甚至用手機來看影片。不過比起 3G、4G 是為了回應消費者對行動服務的需求，但對產業應用而言要能容納更多的數據和更快的速度，如自動駕駛、虛擬實境、工廠自動化等應用，因此，研發出具有更快速和傳輸量的 5G 通訊技術要比過往幾代更受關注。5G 重要特性有三：一是高速度，而 5G 瞄準 3GHz 以上的頻段故不成問題；二是低時延，以往裝置與基地台在通訊前，需先交涉多次才能傳輸訊息造成能量的損耗，但現在 5G 標準要求裝置性能提升且交涉過程也要精簡；三是多連結，5G 因具有較大的頻寬可切分給不同裝置的通信屬性需要故能與上萬台的裝置同時連線。

由前述，我們知道 5G 行動通訊系統要感應行動中的標的須使用介於 30–300 GHz 之間的高頻信號，因為高頻信號的波長較短，可以提供較快的傳輸率與較多的資訊，而且天線的尺寸較小也較可控。即使是目前應用普遍的 WLAN 系統也須使用 6 GHz 到 24 GHz 的頻率，因這些頻段對應到的波長約介於 1 至 10 毫米，故通稱為毫米波。但毫米波技術存在著較高的技術門檻，如容易被建築物阻擋，也易被大氣中的氣體、植物和雨水等吸收，強烈的散射效應降低了信號傳輸效率故其傳輸範圍頗受限制，需要安裝甚多的小型基地台 (如蜂巢式網路)。但現有 6 GHz 以上的電磁波式共振器，因材料損較大易使能量耗損故 Q 值有限，體積也龐大，不利積體化，還有最令業界困擾的則是共振器材料特性掌控不佳，使得大量製造的相關元件可靠性倍受懷疑。

傳統上 X 波段 (8.0–12 GHz) 的通訊系統會採用電磁波式的共振器，因為設計與製造都很容易，但缺點則是體積很龐大，不利積體化，有研究就嘗試縮小之，但發現電磁波產生的寄生效應使它的 Q 值降低了，而且串話 (cross-talk) 干擾也更嚴重。因此研究者另提出在共振器上覆以一層 high-K 的介質材料來改善，其共振腔的尺寸確可縮小，但介質材料的負載效應仍然使共振器的特性變差了，…凡此，都使電磁波式的共振器於毫米波的應用蒙上了陰影。幸好，壓電材料的興起點燃了大家的希望。

表 1. 電磁波式共振器與壓電式共振器特性比較。

共振器	共振腔尺寸 (cm)	品質因素 (Q)
電磁波式矩形導波管	30,000	約 5,000
電磁波式 High-K 共振器 ($\epsilon_r \sim 80$)	3,400	約 1,000
壓電 AIN d_{33} 模共振器	1	約 500

二、壓電材料特性介紹

壓電材料於受壓縮時會逐漸累積電荷產生電勢，然後在電路中傳送電壓，這就是將機械能轉化為電能的方式。反之，它也能將電能轉換為機械能。表面聲波就是利用這種壓電效應來傳送響應到的訊號，而且其訊號能量會集中於材料表面。值得一提的是壓電材料可藉助半導體的微縮技術縮小尺寸，製作高頻的表面聲波以進行信號傳遞，而且微米尺寸的元件也有利於晶片濾波器積體化的實現，突破了前述電磁波式共振器的困擾。使得表面聲波元件成為高頻通訊系統積體化的最佳候選者。但微米尺度材料特性的掌控，如：結晶性、粗糙度、均

勻性等，向來就是製造量產的罩門，壓電材料可以免除這個魔咒嗎？壓電材料背負了大家對高頻行動通訊積體化的期望，故近年來成為研究的顯學，研究成果有如汗牛充棟，以下介紹一些較重要的發展。

三、表面聲波 (SAW) 元件出場

傳統的無線通訊系統如手機，常會有多個工作頻段的訊號鏈，而每個訊號鏈會各自使用一組濾波器讓自家頻率的訊號可以通過，並濾掉他家的雜訊，以確保通訊的穩定性。這些濾波器幾乎都採壓電材料製作的表面聲波 (surface acoustic wave, SAW) 共振器，因為壓電材料可應用半導體的微縮技術將 SAW 與其他電路元件整合起來，不但簡化了設計與製造的流程，還大幅減小了濾波器的尺寸，故倍受要求短小輕薄的行動通訊產品青睞，因而大量使用於手機的 RF 及 IF 單元。SAW 濾波器雖然很受歡迎，但受限於材料的介質損耗係正比於操作頻率的二次方，使其於頻率愈高時插入損耗也會愈大，劣化了通訊系統的表現。另於 2.5 GHz 以上的頻率也因製程技術的困難，難以滿足 IEEE 工作協定的要求，如 RF 濾波器須為大的頻寬，低的損耗與平滑的訊號延遲等，故無法適用於某些應用，如 WLAN，或 5 G 的系統。

SAW 濾波器會有這個困境乃是因為訊號是藉由表面聲波傳播於材料的表面，但即使是使用微縮技術，或 IDT (interdigital transducers) 結構，要製造微米尺寸的壓電元件仍是高難度的任務。不過若以半導體技術 (如 MOCVD 法) 成長微米厚度的薄膜卻是小事一樁，因此換個角度來思考，若改令訊號傳播於材料內部而非表面，不就可解決這個困擾嗎？因之，薄膜體聲波共振器 (BAW 或 FBAR) 的概念就此興起，也將壓電濾波器的應用往更高頻高性能推進了一大步。

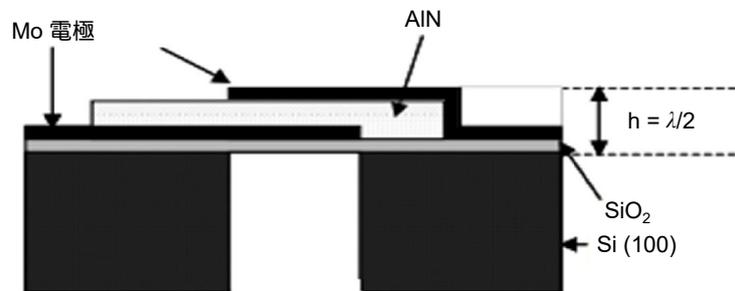


圖 1. FBAR 結構示意

四、大頻寬 AlN FBAR 的製作

薄膜體聲波共振器 (film bulk acoustic wave resonator, FBAR) 中聲波是沿著膜厚的方向來傳播的，故頻率響應由膜厚控制，MOCVD 技術可以勝任成長 0.1 微米左右的薄膜共振腔，甚且可將 FBAR 成長於 Si 基板上，使 FBAR 有望製作成單石微波積體電路 (monolithic microwave integrated circuit, MMIC)，這些優點都讓 FBAR 成為製作 RF 濾波器的最佳潛力結構。由於 FBAR 中使用了許多材料，而材料特性又很容易受溫度影響致改變了共振頻率，此一現象稱為壓電膜的頻率溫度特性 (frequency temperature coefficient, TCF)，又稱為頻飄係數，用以估量共振頻率隨溫度變化的程度。若 TCF 太大，則不夠大的頻寬將難以維持共振器的正常操作，因此 5G 通訊系統中共振器的頻飄係數就成為重要的考量參數。當今

用以製作 FBAR 的壓電材料且較受注目者有 AlN 與 ZnO，但比較兩者的元件特性，如頻飄係數，TCF，分別為 $-25\text{ppm}/^\circ\text{C}$ 與 $-60\text{ppm}/^\circ\text{C}$ ，AlN 顯然優異許多。再看看本質 Q 值，前者也較後者為佳，而 Q 值正代表訊號頻率在共振時保存於共振腔中能量的多寡，若 Q 值越大表示能量損耗越小，反之，若 Q 值越小則表示洩漏的能量越多。另外，機電耦合係數， K_t^2 ，也是用以評估壓電材料共振器電特性良劣的重要參數，其值恰正比於 $(f_p^2 - f_s^2)$ ，而 f_s 表共振頻率， f_p 表反共振頻率，它們都與材料的聲波速度有關，表 2 整理了上述元件表現所對應的材料特性數據，可見 AlN 是遠優於 ZnO。因此就 5G 系統須滿足低時延及多連結的要求來看，AlN 應是較 ZnO 更適合製作高頻共振器。⁽¹⁾

表 2. AlN 與 ZnO 元件的電特性比較。

	Material property	AlN	ZnO
機電合係數	K_t^2 (%)	6.5	8.5
頻飄係數	TCF (ppm/ $^\circ\text{C}$)	-25	-60
波速	Velocity (m/s)	11300	6080
Q 值	High Q	Easy	Difficult

由 Lakin 的研究⁽²⁾ 我們知道，大頻寬的 FBAR 濾波器必須有高 Q 值的 FBAR，而高 Q 值的 FBAR 則來自 AlN 膜的高機電耦合係數， K_t^2 ，而這個 K_t^2 又是由 AlN (0002) 膜的半高寬值 (FWHM) 所決定，所以總結這些相互的關係後可以發現欲製作大頻寬的 FBAR 濾波器，成長高 c- 軸導向的 AlN 膜乃是必要的條件。一般而言，在半導體磊晶成長時較重要的技術為 MBE 及 MOCVD 兩種方法，其中，MBE 是將兩種元素以分子束或化學束形式沉積到基板上形成磊晶薄膜，而 MOCVD 則是將元素變為金屬有機氣體，再靠基板的溫度裂解有機成分以形成磊晶薄膜，因此基板所需溫度較 MBE 為高。由於通訊晶片製作包含 HBT 和 PHEMT 兩種製程，而製造廠商各有所好，前者因主要應用於功率放大器，多採 MOCVD 法，而後者常應用於切換 IC，以 MBE 法生產較多。

雖然以往的文獻多有指出，以濺鍍法就可成長高 c- 軸導向的 AlN 膜，但因認知到高規格的 FBAR 濾波器中的 AlN 膜須滿足嚴格的材料要求，故 Yang 遂採用了以成長高品質薄膜聞名的 MOCVD 長晶術來成長 AlN 膜，並探討其濾波的特性⁽³⁾。Yang 的研究係將 AlN 膜成長於 Mo/SiO₂/Si 的基板，他們發現當溫度升至 1050 $^\circ\text{C}$ 時，AlN 晶體出現優選方向，即只有 (0002) 峰出現，而且 FWHM 僅 2.98 $^\circ\text{C}$ ，表面粗糙度， R_a 約為 1 埃，顯示此 AlN 膜確為原子級的平滑且為高 c- 軸導向。根據 Naik⁽⁴⁾ 的研究結果，Yang 估計自家 AlN 膜的 K_t^2 高達 6.4%，將此特性代入 ADS 模擬軟體來設計 5GHz 的 FBAR 帶通濾波器時，發現當共振腔膜厚為 1 μm ，共振面積為 $75 \times 75 \mu\text{m}^2$ ，且 K_t^2 為 6.0% 時，濾波器的頻率響應頻寬高達 137 MHz 且插入損僅有 1.5 dB，電性甚佳，完全滿足 5 GHz OFDM (orthogonal -frequency-division multiplexing) 系統的要求，可見欲製作高性能濾波器時高品質的壓電薄膜確是不可或缺。

五、Sc_xAl_{1-x}N 壓電特性探討

AlN 材質的提升固然使濾波器往高頻且積體化的願景更為清晰，但 AlN 膜本質性的低 K_t^2 仍讓前景披上一層陰影。2010 年 F. Tasnádi 等人以量子力學理論得出一個令人鼓舞的結

果：若在 AlN 中添加 Sc，為了應對增加的應力，AlN 晶格中原子間的配位狀態將強烈的反應，而使 $\text{Sc}_x\text{Al}_{1-x}\text{N}$ 合金產生更佳的機電耦合特性，故他們認為 $\text{Sc}_x\text{Al}_{1-x}\text{N}$ 將更有希望製得高頻寬的高頻濾波器。隨後，各家的研究陸續出籠來驗證此一理論，成果遍及各種成長方式與各種組成 (x) 的 $\text{Sc}_x\text{Al}_{1-x}\text{N}$ 薄膜的壓電特性，讓我們對 $\text{Sc}_x\text{Al}_{1-x}\text{N}$ 這個新材料有了比較明確的概念。村田公司 (Murata Manufacturing Co., Ltd.) Umeda 團隊即在 2013 年對 $\text{Sc}_x\text{Al}_{1-x}\text{N}$ 薄膜作了深入的探討並提出詳細的報告⁽⁵⁾。他們以濺鍍法在 Si 基板上成長 $\text{Sc}_x\text{Al}_{1-x}\text{N}$ 膜，其中 Sc 的含量，x 自 0 到 0.5 廣泛的變化，並以之製作體聲波共振器，然後量測其機電耦合係數、介電常數以及彈性堅度溫度係數 (temperature coefficient of elastic stiffness, TCE_ c_{33}) 等特性。

Umeda 發現： $\text{Sc}_x\text{Al}_{1-x}\text{N}$ 壓電膜的壓電電荷係數， d_{33} (縱向壓電係數) 與 $-d_{31}$ (橫向壓電係數)，會隨 Sc 含量 (x) 的增加而呈非線性的增大，當 $x = 0\%$ 時 $d_{31} \approx -2 \text{ pm/V}$ ，但 $x = 42\%$ 時則增至 -13 pm/V ，同時 ϵ_r 也增大為 17，若考量的是集能元件的製作，因集能元件的品質因素 (FOB) 正比於 d_{31}^2 且反比於 ϵ_r ，故估計 $\text{Sc}_x\text{Al}_{1-x}\text{N}$ 的 FOB 值幾達 60，這是目前製作集能元件所用壓電材料 (如 FOB_{PZT} 為 24， FOB_{AlN} 為 12) 之冠，這些優良的特性顯示 $\text{Sc}_x\text{Al}_{1-x}\text{N}$ 應是製作集能元件最佳的材料。事實上 P. M. Mayrhofer 就證明了以 $\text{Sc}_x\text{Al}_{1-x}\text{N}$ 取代 AlN 製作的堆疊型集能元件，其集能效率與功率輸出的表現都較現有的成果更優良⁽¹²⁾。值得一提的是，一旦 Sc 含量 (x) 超過 40% 時 $\text{Sc}_x\text{Al}_{1-x}\text{N}$ 晶體就會由 wurtzite 結構轉變為 cubic 結構，限制了其壓電模量 (piezoelectric modulus) 的增加，壓電特性變差。

再來看看 $\text{Sc}_x\text{Al}_{1-x}\text{N}$ 的 RF 特性，Umeda 製作了頻率為 2 GHz 的 $\text{Sc}_{0.35}\text{Al}_{0.65}\text{N}$ 體聲波共振器 (BAW)，發現此 BAW 的機電耦合係數 K_t^2 ，高達 15.5%，幾乎是相同結構的 AlN BAW 的 2.6 倍，這個優異的實驗結果非常近似於第一原理理論的計算，顯然隱喻著 $\text{Sc}_x\text{Al}_{1-x}\text{N}$ 的特性是可設計，可量身訂做的。但若分析元件的特性，卻發現 $\text{Sc}_x\text{Al}_{1-x}\text{N}$ 膜的共振頻率較 AlN 膜為低，顯示其波速變慢了，這應是 Sc 的併入降低了合金結構的彈性堅度，由實驗數據也能看到 $\text{Sc}_{0.35}\text{Al}_{0.65}\text{N}$ BAW 的並聯共振頻率， f_p 頻飄係數 (TCF) 確實較 AlN BAW 的為大，因為應力使 $\text{Sc}_x\text{Al}_{1-x}\text{N}$ 的材質變軟改變了波速的傳播。Umeda 亦指出：當 Sc 含量愈高時並聯共振頻率， f_p 變化不大，但串聯共振頻率， f_s 卻會往低頻移動，因為 K_t^2 係正比於 $(f_p^2 - f_s^2) / f_s^2$ ，今 f_p 不變而 f_s 又變小了，就使 $\text{Sc}_x\text{Al}_{1-x}\text{N}$ 機電耦合係數 K_t^2 顯著的增大了。對此有趣的現象，他們再以第一原理的計算結果來探討。發現 $\text{Sc}_x\text{Al}_{1-x}\text{N}$ 膜的 c/a 晶格常數比會隨 Sc 含量增加而降低，顯然 Sc 的加入造成了 AlN_4 四面體沿 a- 軸的方向膨脹，而對應的 c- 軸長度則是縮收的，此一結果使得 Al 原子更容易在 c- 軸方向移動，導致 d_{33} 與 d_{31} 的增加，但彈性堅度， c_{33} 卻降低導致波速也跟著下降了，如表 2 所示。無論如何，瑕不掩瑜， $\text{Sc}_x\text{Al}_{1-x}\text{N}$ 膜優越的機電耦合表現的確有利於頻寬的增大，也適合毫米波通訊的應用。

六、ScAlN FBAR 的電性表現

由前述我們認知到影響 FBAR 性能的因素甚多，如：壓電膜厚度需降至微米以下且結晶品質須為良好，以免缺陷太多導致散射強烈而劣化元件的 Q 值，使濾波器插入損增大且選擇性變差。又 k_t^2 值會影響濾波器的頻寬，研究發現其與金屬/壓電膜的厚度比值呈強烈相關，若金屬電極較薄將有助於增大 k_t^2 ，但太薄的金屬又會增大其片電阻，不利元件電性表現。再者下電極也是個需重視的因子，若其結晶性良好將有助於品質良好且介面均勻的壓電膜生成，這些種種的挑戰都與材料的成長技術有關，故 M. Park 團隊於 2019 年就以

高階的長晶技術，MBE 法，製作了 K_u - 波段泛音共振模態的 ScAlN FBAR⁽⁶⁾。因得利於優良的壓電薄膜與下電極的磊晶材質，故此 FBAR 呈現良好的 Q 值表現，以 $\text{Sc}_{0.12}\text{Al}_{0.88}\text{N}/\text{Mo}$ 元件為例，其基模為 4.6 GHz， $\text{FOM} (f \times Q \times K_t^2)$ 值為 56.55 GHz，至於第二模態 (11.8 GHz) 與第三模態 (19.0 GHz) 的泛共振模之 $\text{FOM} (f \times Q \times K_t^2)$ 值則各為 46.82 GHz 與 83.28 GHz，表現甚為優異。此一研究證實了若適當改善 ScAlN 的材料品質則多頻 (GHz) 且高性能的 FBAR 元件是可行的，為 ScAlN FBAR 應用於 5G 通訊系統的機會發出了一張可許可證。

2020 年 M. Park 團隊再接再厲又以 MBE 法在 Si 基板上成長單晶的 ScAlN 壓電薄膜，以之製作適用於 4G LTE/5G 的 Lamb-Wave 共振器 (LWR)⁽⁷⁾。經由量測，他們的 $\text{AlN}/\text{Sc}_{0.12}\text{Al}_{0.88}\text{N}$ 共振器操作頻率可達 3–10 GHz，機電耦合係數 5.3%，無載的 Q 值約為 192，其特性與現行文獻報告最佳的 AlN 共振器相較更佳，且 $\text{AlN}/\text{Sc}_{0.12}\text{Al}_{0.88}\text{N}$ 共振器的 FOM 值 (K_t^2 與 Q 的乘積) 高達 10.1，較之 AlN 共振器尤勝一籌，表示 ScAlN 的濾波器將有較低的插入損耗與更大的頻寬，顯示其於 5G 系統的發展中應甚具潛力。Park 認為本研究的高機電耦合係數，5.33%，應是得利於以 MBE 法成長的高品質 AlScN 單晶薄膜，惟因其與 Si 基板間仍存在著太大的應力，而且電極的阻值也未能降低，這些因素都是損耗 Q 值的殺手，也是 AlScN 要實用於 5G 時最需要克服的關卡。

由這些研究結果可知，雖然 ScAlN FBAR/BAW 與 ScAlN Lamé mode 兩種元件的機電耦合係數都很高，也都可與 CMOS 製程相匹配，但 ScAlN FBAR/BAW 不但有較大的阻抗，設計也較容易，相較之下 ScAlN Lamé mode 元件不易進行微影蝕刻，元件也需做溫度補償處理，增加了製造的困難度。故以製程的觀點，ScAlN FBAR/BAW 將因製程較單純使其在高頻發展中成為優勢的結構。

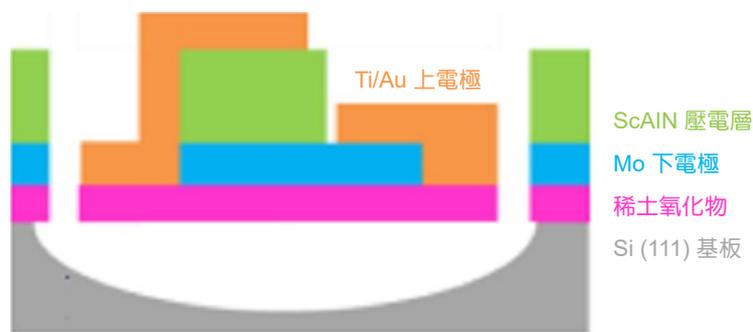


圖 2. 經 XeF_2 蝕刻完成的 K_u - 波段泛音共振模態的 ScAlN FBAR 結構。

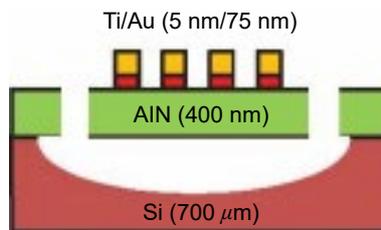


圖 3. 以 ScAlN 壓電薄膜製作之 4G LTE/5G Lamb-Wave 共振器 (LWR) 完成的結構。

七、製程對 ScAlN 元件特性的影響

在前述的介紹中我們可以發現 ScAlN 雖然可站在 AlN 既有的基礎上往更理想的電性表現邁進，但畢竟它是一種新材料，我們對它的諸般特性尚未能完全掌握，下列幾項製程參數是我們在發展其他壓電材料時曾遭遇到的挑戰，他山之石，ScAlN 要想建立它在高頻應用的重要地位也必須面對。

1. 壓電薄膜厚度

一般而言，若元件設計的尺寸為 $1\ \mu\text{m}$ ，則製程的控制能力需達到 nm 的等級。若壓電薄膜厚度增加，負載效應將使共振器的響應頻率隨之降低，AlN FBAR 的研究告訴我們，其元件頻率隨壓電薄膜厚度改變的趨勢幾為線性，約為每一 nm 會有 13 MHz 的頻降。而且 AlN 材料在鍍膜時其均勻性也不易控制，有研究就指出：AlN FBAR 在製作於 8 吋的 p-Si 基板時其各別元件的頻飄變異程度竟達 $0.2\ \text{GHz}^{(13)}$ ，這種良率表現對大量生產的廠商而言著實令人擔心。ScAlN 壓電薄膜是個新材料，雖然可以提升機電耦合特性，但聲速也會被降低，故薄膜不宜成長太厚，偏偏它的長晶機制對膜的表面狀況與又很敏感，也不容易蝕刻，微影蝕刻殘存的氧化物都會形成漏電流的路徑，使 Q 值降低。因此高階的長晶技術如 MOCVD 等就變成必備的工具了。ScAlN 製程參數的優化絕對值得我們關注。

2. 粗糙度 BAW

共振器若直接製作於基板時會因壓電膜與基板聲阻不匹配的問題而劣化元件的電性表現，故有研究提出為減少基板的影響，在設計共振器時可在壓電膜與基板間置入布拉格反射 (Bragg reflector, BR) 結構，此種結構就稱為堆疊型體聲波共振器 (solidly mounted resonator, SMR)。通常 BR 結構是用來做為共振元件傳播訊號時與基板之間作一阻絕，減小訊號的逸失。它由數對四分之一共振波長且彼此聲阻抗 (Z) 不同的材料所組成，對數多寡則與 BR 構成材料間聲阻差異的大小與共振元件規格而定，對數可多至 4–8 組，但對數愈多，總厚度就愈厚，也會使薄膜的粗糙度愈大，劣化元件的特性。

為了探討 SMRs 中 BR 反射結構的粗糙度對元件電性的影響 T.N. Tanskaya 等人製作了兩種 SMR，它們的壓電層都是 ZnO，BR 反射結構也各是 5 對的 Mo ($0.2-0.7\ \mu\text{m}$)/Al($0.45\ \mu\text{m}$) 高低聲阻金屬層，它們的差別只在製作 BR 時 Al 膜的製程參數不同⁽⁸⁾。他們發現不同的鍍 Al 參數會得到不同的 BR 粗糙度，而這個粗糙度應是主導 SMRs 電性的重要關鍵。因為 AFM 顯示，當 Mo 膜的表面粗糙度 (Sq) 為 $1.2\ \text{nm}$ ，而 Al 膜的 Sq 為 $40\ \text{nm}$ 時，SMR 整體的 Sq 亦高達 $40\ \text{nm}$ ，但若維持 Mo 膜的 Sq 為 $1.2\ \text{nm}$ ，而將 Al 膜的 Sq 改善至 $3.5\ \text{nm}$ 時，SMR 的 Sq 亦隨之下降到 $15.1\ \text{nm}$ 。BR 結構的粗糙程度獲得改善，也會反映到元件特性的提升。Tanskaya 就指出：前者的 SMR 於共振頻率 $2.74\ \text{GHz}$ 時 S_{11} 約為 $-0.66\ \text{dB}$ ，Q 值約 50–100。但後者的 SMR 因得利於 BR 粗糙程度的改善而有更優異的電性表現：共振頻率 $2.93\ \text{GHz}$ 時 S_{11} 約為 $-7.9\ \text{dB}$ ，Q 值則增加至 300–350。歸納 Tanskaya 的研究，我們可以得到下列參考的公式用以估計粗糙度的影響：即

$$Q \sim \pi * \lambda / (\text{粗糙度})$$

其中 λ 為對應於共振器頻率的波長。利用上式我們可估得欲製作 3 GHz，且 Q 值保持於 300 的 ZnO 共振器時，薄膜的粗糙度須小於 15 nm，然若設計的共振器頻率為 10 GHz (波長約為 1 μm)，且 Q 值要求大於 1000 時，壓電薄膜的粗糙度甚至須小於 1 nm，這可是個相當嚴格的要求，但也點出了高頻元件對元件表面的微結構甚為敏感，如製程殘餘的氧化物或缺陷造成的微粗糙都會造成能量損耗，劣化元件的電性。回顧前述 Park 等人的研究，當可瞭解即使他們以 MBE 法成長了高品質的 AlScN 單晶薄膜，但仍受害於其與 Si 基板間存在著太大的應力，以致損耗了 Q 值，觀之 Tanskaya 的研究：製作高度平滑 BR 反射層的 SMR，或許是個解決的方法。

3. 電極材料

壓電元件電極的製作也是個挑戰，因為電極特性會影響元件的 Q 值與共振頻率。一般 AlN FBAR 製作時都會以 Ti/AlCu (20/50 nm) 為下電極，而以 AlCu/TiN (50/20 nm) 為上電極，之所以使用 Ti-基材料是希望它與下層材料會有較好的附著力，而 nm 層級的金屬厚度則是希望減小電極的負載效應，但太薄的金屬也會導致電極電阻增加，產生的副作用就是影響 FBAR 的 Q 值。有學者以 BVD 模型分析：FBAR 的 Q 值會隨電極電阻的增減呈單調 (monotonically) 的變化，當電阻減少 10 倍時 Q 值可提升 30%，但電阻即使只微量增加 2 倍，Q 值卻將大降 30%⁽¹³⁾。然而此簡化的理論顯示，在 FBAR 的總串聯電阻中，電極電阻只占有 30% 而已，尚有不明原因耗損了 70% 的能量，顯然電極電阻並非造成 FBAR 能量損耗的主要機制，研究人員猜想禍首可能是金屬材料的阻尼特性 (damping) 或是元件的錨定損耗 (anchor loss) 所致。因此當設計更高頻且高 Q 值的 FBAR 時，必須更了解金屬的阻尼－頻率特性 (dispersion behavior) 在 FBAR 中所伴演的角色。至於減小錨定損耗以提升 Q 值的方法很多，例如有文獻⁽⁹⁾ 就建議錨定電極可改用光子晶體結構以將聲波能量侷限於共振腔內，避免它們自元件的支撐體洩漏出去。

4. 散熱問題

根據前人的研究，AlN 膜的 TCF 值相較於其他的壓電材料如 ZnO 或 LiNbO₃ 都要小，這種優良的耐熱能力使得 AlN 共振器成為可高溫高功率操作且頻率穩定的最佳選擇。即使如此，AlN 共振器仍苦於高功率操作時熱效應對頻飄的影響。依研究結果，小面積的 AlN 共振器較大面積者，因電容較小，訊號更乾淨，無雜訊 (spurs) 出現，但前者可能因散熱能力較差故其受功率生成的熱效應影響而頻飄的現象較明顯，惟當共振器面積增大時頻飄現象會較緩和。有研究指出指出：量測 AlN 共振器的 S 參數變化時，在小功率操作時其頻飄程度約為 42 ppm/°C，以應用觀點元件若能施以溫度補償措施訊號輸出當會更穩定^(10, 13)。溫度補償常用的方法是增加一層熱膨脹係數 (CTE) 較大的材料，以緩解壓電薄膜與下層基材因較大的應力所產生的變形，使聲波傳播的速度不致於受晶體扭曲的影響而降低，當然也可改善 TCF 的現象。K. Bhattacharjee 等人就對此想法提出了他們的研究結果⁽¹⁰⁾：他們在 LiTaO₃/Si 晶片背面電鍍了相當厚度的 Cu 薄膜，結果將元件的串聯共振頻率的頻飄從 -45 ppm/°C 大幅降至 -14.5 ppm/°C。他們還宣稱如果能找到更適當的第三者材料或許可將頻飄現象反轉為正值。

再來看看 AlScN 的情形，它係將 Sc 原子併入 AlN 膜而成，雖然增大了縱向的聲波速度與機電耦合係數，但也使 AlScN 的彈性模數 (elastic modulus) 變小，材質變軟將更易受熱而

膨脹，使 TCE_{c33} 增大，縱向聲波的速度降低，造成 TCF 值略為增加。AlScN 共振器若使用於高頻大頻寬的濾波器，以 AlN 共振器的經驗來看，施作溫度補償措施以解決頻飄的問題勢必無法避免，但又該怎麼做呢？已知 SiO₂ 的 TCE 恰與 AlScN 相反，或許取它們的適當組合可解決這個困擾，但是否又會衝擊到元件的其他特性呢，這些都還需更進一步的研究。

八、以蝕刻方法調變 FBAR 的 k_t^2 值

上述的介紹都顯示製作高機電耦合係數的壓電薄膜是製作高頻通訊系統的首要目標，但在元件的截止頻率已被決定的限制下要想再精準調變壓電薄膜的 k_t^2 並不容易。對此挑戰，C. Gao 等人⁽¹¹⁾ 以 COMSOL 的模擬結果提出了在 FBAR 主動區的壓電薄膜上蝕刻出一個溝槽的想法，這個溝槽等效於提供元件一個並聯電容的功能，所以溝槽的寬窄 (d 值) 若有改變，將如變化並聯電容的大小，當然也會影響 k_t^2 值。基於此一想法，他們製作了 580 nm 的 Sc_{0.20}Al_{0.80}N FBAR，當溝槽寬度，d 值，為 0 時，量得其 f_s 、 f_p 與 k_t^2 各為 5.257 GHz, 5.617 GHz 與 4.3%，但隨著 d 值增加，發現 f_s 沒有明顯的變化，但 f_p 則逐漸減小往 f_s 靠近，當 d 值達 12 μm 時， k_t^2 降為 2.7%。另，於 Sc_{0.20}Al_{0.80}N 壓電薄膜上蝕刻溝槽時若以較低的蝕刻率處理的話 (如 90 nm/min)，對於 Q 值的影響應可忽略。他們以 MBVD model 模擬的結果與上述實驗結果相符，顯示了溝槽蝕刻可提供一個簡易調變 SAW 濾波器頻寬的方法。圖 4 以蝕刻方法調變 FBAR 的 k_t^2 值

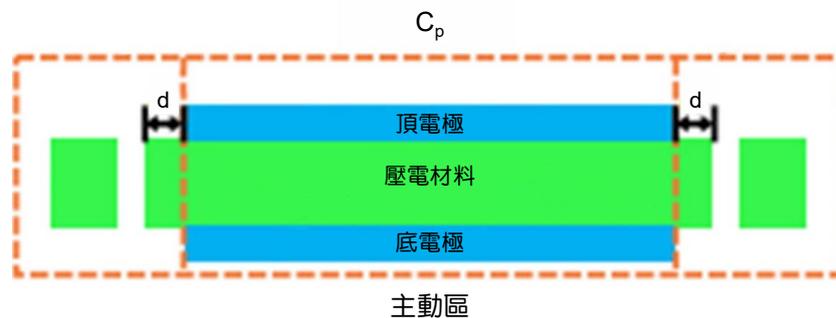


圖 4. 以蝕刻方法調變 FBAR 的 k_t^2 值 (取自參考資料⁽¹²⁾)。

九、結論

壓電材料可將傳統的毫米電磁波濾波器大幅縮減 10,000 倍以上，甚有利於高頻應用的積體化，而 AlN 壓電薄膜因具有甚高的聲速，並可與 CMOS 製程相匹配，且 AlN FBAR 已被證明其頻率可涵蓋 7–11 GHz，在 9.7 GHz 時 Q 值可達 500，FOM 為 28 的優異的表現，使其成為今日高頻通訊系統的主要元件。但在 X band 這麼高頻操作時，壓電共振器的可靠性有賴於對材料成長技術的掌握，AlN 共振器受限於其機電耦合係數， k_t^2 ，僅 2 至 5%，使其往更高頻寬的發展出現困難。Sc_xAl_{1-x}N 的出現給這困境帶來一束曙光，因為 Sc 併入 AlN 結構中造成的應力，不但會減小串聯電阻 R_s ，也將增大並聯電阻 R_p ，有效提升了機電耦合係數。就有研究指出 AlN/ Sc_{0.12}Al_{0.88}N 共振器的操作頻率可達 3–10 GHz，機電耦合係數

5.3%，無載的 Q 值約為 192，且 FOM 值 (K_1^2 與 Q 的乘積) 高達 $10.1^{(12)}$ ，顯示 ScAlN-基的濾波器將具有較低的插入損耗與更大的頻寬，也較其他競爭材料更有潛力應用於 5G 高頻通訊系統中。當然在高頻通訊中 Q 值的優化也是需要努力的目標，本文對相關製程的挑戰提出一些應對的方法，但是仍有很多努力的空間，如濾波器框架 (framing) 周邊形狀的設計對消除雜訊維持高 Q 值就是個關鍵技術，另外在通訊電子應用上，為因應高密度、低成本的扇外型構裝 (fanout package)，下世代半導體晶片也須逐漸朝向 3DIC 異質整合並具強韌性封裝 (robust package) 之方向發展，以滿足未來 5G 毫米波和高速／高頻寬無線通信之需求。

參考文獻

1. Y. SATOH et al., *Japanese Journal of Applied Physics*, **44** (5A), 2883 (2005).
2. L.M.Lakin, et al., *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, **41** (12), 2139(1993).
3. C.-M. Yang et al., *IEEE Symposium on Ultrasonics*, **170** (2003).
4. R.S.Naik, et al., *IEEE Trans. Ultrason. Ferro. and Freq. Cont.*, **47** (1), 292(2000).
5. K. Umeda et al., MEMS 2013, Taipei, Taiwan, 733 (2013).
6. M. Park et al., IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS), 1689 (2019).
7. M. Park et al., *Journal of Microelectromechanical Systems*, **29**, 490 (2020) .
8. T.N. Tanskayal et al., International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON), (2015).
9. R. Ardito et al., Proceedings of the IEEE International Ultrasonics Symposium, Tours, France, 1 (2016).
10. K. Bhattacharjee et al., *IEEE Frequency Control Symp.*, 189 (2007).
11. C. Gao et al., *Micromachines*, **13**, 102 (2022).
12. P. M. Mayrhofer et al., *Journal of Microelectromechanical Systems*, **26**, 102 (2017).
13. Christopher D. Nordquist et al., The Electronics Materials and Applications Conference , January 19-22, Virtual in Sandia National Laboratories, (2021).

作者簡介

洪茂峰為成大電機所博士，現為成大電機系兼任教授。

Mau- Phon Hounng received his Ph.D. in Electrical Engineering from National Cheng Kung University. He is currently an Adjunct Professor in the Department of Electrical Engineering at National Cheng Kung University.

洪肇蔚為成大交管所碩士，現為中華電信南分高雄營運處高級工程師。

Jau-Wei Hung received his M.S. in Business Administration from National Cheng Kung University. He is currently a Senior Engineer of Southern Region Branch, Chunghwa Telecom Co., Ltd.