

# 振動式微機械共振器的原理、製作及在無線通訊系統上之應用

## Introduction to Vibrating Micromechanical Resonators for Wireless Communication Applications

鄭裕庭

Yu-Ting Cheng

現今振動式微機械共振器 (vibrating micromechanical resonator) 擁有高因子值 ( $Q$  factor)、小體積、低耗能及可藉由半導體製程大量生產等優點。以其所組成之微機電射頻積體電路，如濾波器、混頻器與振盪器等，可能成為新一代個人行動通訊系統的主要架構。雖然相關的技術仍就處於研究開發階段，但近年來，在美國已開始陸續受到 Intel、IBM 與 Motorola 等半導體製造大廠的重視。因此本文即就振動式微機械共振器的原理、種類與製作作一簡介，並針對其在高頻的結構設計、製程整合，與真空封裝上所面臨之挑戰作一探討。

Utilizing micromechanical circuitry to process RF signal has been an enabling technology for portable wireless communication applications. The advantages include smaller volume, lower cost, and lower power consumption in comparison with the present technologies. The basic element of the micromechanical circuitry is vibrating micromechanical resonator, which have high  $Q$  (quality factor) performance more than 10,000 and can be implemented for filter, oscillators and mixer..., etc. to form an integrated RF transceiver. In this paper, we will introduce the fundamental principles, microfabrications and related technical prospects of the vibrating micromechanical resonators.

### 一、前言

近年來，隨著個人行動通訊系統需求的增加，開發具有便宜、體積小、耗能低、資料傳輸能力強等特性的射頻積體電路，已成為現今無線通訊系統的研究發展重點，而其中又以如何成功地設計與製作出高性能帶通濾波器 (bandpass filter) 最具關鍵。

具有高因子值 ( $Q$  factor) 的帶通濾波器將可減少其後端電路在訊號處理上的負荷，諸如降低低雜訊放大器 (LNA)、混波器 (mixer) 及類比數位轉換器 (A/D converter) 等在動態範圍 (dynamic range) 上的要求，此舉可大量減少射頻電路在整體功率上的需求，並達成低耗能的最終目的。然而高性能帶通濾波器的製作亟需搭配具有高因子值的射頻共振器。

在傳統上，該共振器皆是由石英或陶瓷材料所製成的聲波 (acoustic wave) 元件，但由於此類元件製程上的限制，始終無法與其他射頻電路系統製作於同一晶片之上，而必須藉由封裝的技術以達成整合。因此在整個射頻積體電路製作上，一直具有較高的製造成本、較大的體積與較差的訊號品質等不可避免的缺點。

為避免此類缺點，1967 年 Nathanson 氏在西屋研究實驗室曾開發以可調閘極之共振式場效電晶體 (resonant gate transistor)<sup>(1)</sup> 來作為高頻濾波器。但由於因子值較低、金屬閘極容易老化、頻率的溫度係數較高，以及動態範圍受限於非線性靜電作用力等問題，使得該研究計畫的發展無疾而終。然而隨著微機電元件製造技術的進步，大部分的機械裝置皆可微小化，並可搭配相關的微電子電路，將所有功能整合製成於單一矽晶片之上。因此 Lin 與 Nguyen 氏於 1992 年間，共同提出以振動式微機械共振器 (vibrating micromechanical resonators) 所組成之微機電高頻線路 (micromechanical circuits) 來處理射頻訊號的可行性<sup>(2)</sup>。由於振動式微機械共振器擁有高因子值、小體積、低耗能及可藉由半導體製程大量生產等優點，相關的研究就此展開，研究成果在美國已被視為有助於建立下一代高性能射頻積體電路的新架構。本章將就振動式微機械共振器作一介紹，並藉由相關技術的發展，探討其在無線通訊系統應用上所要面對的挑戰。

## 二、振動式微機械共振器的原理

現今，振動式微機械共振器隨著共振頻率的增加而有不同的設計，如圖 1 所示，基本上可分為 folded beam comb-drive resonator、clamped-clamped beam resonator、free-free beam resonator 與 disk like resonator 等四種。共振器基本原理乃是以靜電作用力啟動的電容式振動結構，其中包含了啟動電極 (driving electrode)、感應電極 (sensing electrode)、結構主體，與共振彈簧橫樑等四部份。當一電波訊號 ( $v_i = |v_i| \cos \omega t$ ) 輸入共振器的啟動電極之後，共振器會因電極之間的電位差所產生之靜電力作用而開始振動，如果該電波訊號與共振器之共振頻率

( $\omega_r$ ) 相同時，則所有輸入的能量將會被共振器完全吸收，並以結構共振的方式表現出來，此時在感應電極端上則會因電容 (C) 的變化而產生感應電流 ( $I_o$ ) 的輸出。其作用力與輸出之感應電流可由下列方程式表示<sup>(2,3)</sup>：

$$F_d \approx |v_i| V_p \cos \omega_r t \frac{\partial C}{\partial x} \quad (1)$$

$$I_o \approx V_p \frac{\partial C}{\partial x} j \omega_r x \quad (2)$$

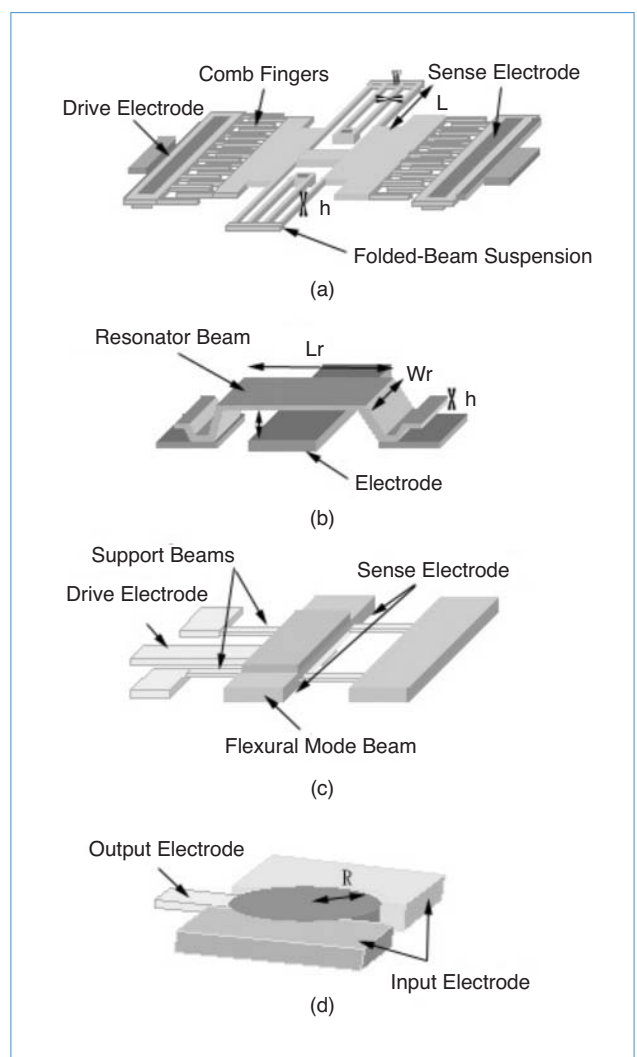


圖 1. 振動式微機械共振器：(a) folded beam comb-drive resonator，(b) clamped-clamped beam resonator，(c) free-free beam resonator，(d) disk like resonator。

表 1. 各共振器的頻率 ( $f_0$ ) 與其結構材料特性、幾何形狀等相關性，以及其使用的頻率範圍。

| 振動式微機械共振器種類                      | 工作頻率  | 操作範圍          | 因子值 ( $Q$ factor) |
|----------------------------------|---|---------------|-------------------|
| Folded beam comb-drive resonator | $f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{2Eh\left(\frac{\omega}{L}\right)^3}{\left(M_p + \frac{1}{4}M_t + \frac{12}{35}M_b\right)^2}}^*$ | < 1 MHz       | ~ 20000           |
| Clamped-clamped beam resonator   | $f_0 = 1.03 \sqrt{\frac{E}{\rho}} \frac{h_{\text{eff}}}{L_r} [1 - g(V_p)]^{\frac{1}{2}} **$                                       | < 20 MHz      | ~ 8000            |
| Free-free beam resonator         | $f_0 = 1.03 \sqrt{\frac{E}{\rho}} \frac{h_{\text{eff}}}{L_r} [1 - g(V_p)]^{\frac{1}{2}} **$                                       | Up to 100 MHz | ~ 8000            |
| Disk like resonator.             | $f_0 = \frac{\alpha}{R} \sqrt{\frac{E}{\rho}} ***$  | > 150 MHz     | ~ 9000            |

\*  $M_p$  是振動部分 (shuttle) 的質量， $M_t$  是折疊樑 (folding trusses) 的質量， $M_b$  是懸臂樑 (suspending beams) 的全部質量， $E$  是楊氏係數。

\*\*  $E$  與  $\rho$  分別是結構材料的楊氏係數與密度， $h_{\text{eff}}$  是在實作中對樑臂表面形狀造成影響的有效厚度。函數  $g$  表示加諸樑臂機械剛特性上而與直流偏壓相關之電剛性所產生的影響，其允許對振動頻率某種程度的電壓控制。

\*\*\*  $\alpha$  是與波松比 (Poisson's ratio) 及所用模態形狀有關的參數 (對此處所用的模態， $\alpha = 0.342$ )。  $R$ 、 $E$  與  $\rho$  分別是碟 (disk) 的半徑、楊氏係數與密度。

$V_p$  為一加於共振器之直流電壓，該直流電壓可幫助並增加靜電作用力的形成。其中共振器之共振頻率，則是由結構主體與共振彈簧橫樑的質量與橫樑的彈性係數決定。表 1 詳列各共振器的頻率 ( $f_0$ ) 與其結構材料特性、幾何形狀等相關性，以及其使用的頻率範圍。

由於 folded beam comb-drive resonator 在設計上，彈簧橫樑所需負荷之質量相較於其它共振結構要高出許多，儘管其因子值可達數萬，並不適用於高頻訊號的處理。而 clamped-clamped beam resonator 在設計上則可克服此種困難，該共振器所需負荷之質量即是彈簧橫樑本身。根據 Wang 氏的分析<sup>(4)</sup>，在適當材料選擇與結構幾何設計之下，clamped-clamped beam resonator 之共振頻率將可達到一億赫茲之上。然而根據 Wang 氏實驗結果，此共振器的因子值將會隨著共振頻率的升高而急劇下降，合理的工作頻率僅達數百萬赫茲。而該因子值的降低，導因於訊號能量會沿著元件之固定處 (anchor) 流失於下方的基材，此機制稱之為 anchor dissipation。為降低能量的流失，Wang 與 Hsu<sup>(5,6)</sup> 氏先後提出了 free-free beam resonator 的設計，將共

振器的共振結構改由四根橫樑所支撐，藉由精密的設計，將此四根橫樑位於共振模式中之節點 (node point)，如此因子值可大量提升。

儘管在設計與學理上，運用 free-free beam resonator 結構可以製作出高因子值共振器，為射頻積體電路所用，但隨著工作頻率的增加，共振結構體積勢必縮小，易言之，共振器所能處理的功率將會變小，再加上體積的縮小，容易受環境的影響，諸如濕度與溫度的變化對材料特性的影響，以及製程上的污染影響了共振器的運轉條件等，因此迄今仍無上億赫茲的 free-free beam resonator 開發出來。最近，Clark 與 Lee 氏<sup>(7,8)</sup> 先後分別提出以 disk-like resonator 來作為超高頻訊號處理的運用。以 Clark 氏為例，在相同的高頻設計下，其共振器體積為 free-free beam resonator 的 2-3 倍並且具有相當高的因子值，此種結構預期將有助於振動式共振器在一億赫茲或更高頻率上的應用。

### 三、振動式微機械共振器的製造

基本上所有的振動式微機械共振器的製造，皆

是利用表面式的矽微加工技術 (surface silicon micromachining technique) 製作而成<sup>(9)</sup>，其不外乎利用低壓化學氣相沉積技術成長氮化矽作為絕緣層，二氧化矽作為結構犧牲層，以及多晶複矽作為電極與結構層，其中需配合半導體製程技術中的微顯影、化學蝕刻、離子佈植、金屬濺鍍等技術，而詳細的製作流程，請參照相關的參考文獻。但在共振器製作上，仍有下列幾項重點值得注意。

首先，作為電極與結構層的多晶複矽，其異質摻雜劑量需高，以增加導電度並可減少訊號能量於傳輸間的損耗，而多晶複矽的摻雜方式是以離子佈植效果最佳<sup>(4)</sup>。此外，微共振器尺寸約在數百至數微米之間，在該尺度下，與表面積相關的物理現象變得相當明顯，諸如在移去微機械共振器結構犧牲層時，需利用液態二氧化碳的臨界變化現象來作為移除元件上殘留液體之用，如此將可避免殘留液體在揮發之後，因其表面張力將共振結構層黏著於晶片之上致使共振器無法運作。再者，傳統上 clamped-clamped 或 free-free beam resonator 的製作，是以氟化氫溶液侵蝕二氧化矽來達成結構犧牲層的移除，然而結構層與電極層之間的距離僅有數百埃，在如此狹小間距的限制下，溶液中同類分子間的內聚力將會使得氟化氫溶液不易進入，而使得化學侵蝕反應受限於氟化氫離子的擴散機制，較長的移除時間是必然的。此外在移除過程中，倘若殘留物未能被完全清理而留存於間隙之中，共振器的因子值會因殘留物對共振行為造成的阻礙而降低，如何提升氧化矽犧牲層的移除速率與減少殘留物的遺留，迄今仍為製程上尚待解決的問題。除上述所需注意的要點之外，所有振動式微機械共振器的製造，更需考量其未來如何與真空封裝上的製作，以及如何與現有之積體電路製程達成整合。

#### 四、真空封裝的製造

基於 air damping effect 與 mass loading effect 兩大因素，振動式微機械共振器有別於其他共振器。在射頻電路的運用上，它必須操作在真空環境之下以保持其優越的性能。首先，誠如先前所言，在微小尺度之下，所有與表面積相關的物理現象變得相

當明顯，而空氣分子與共振器之間的摩擦力 (dragging force) 大小即是正比於共振器的表面積，此摩擦作用即不可被忽視，事實上該作用會導致振動式微機械共振器因子值的降低，此種效應稱之為 air damping effect。如方程式 (3) 所示<sup>(9)</sup>，

$$Q \sim \frac{d}{\mu A} \sqrt{MK} \quad (3)$$

共振器因子值 ( $Q$ ) 反比於空氣分子的黏滯係數 ( $\mu$ ) 與有效之接觸面積 ( $A$ )。圖 2 為一 folded beam comb-drive resonator 其量測因子值與共振器操作環境氣壓的相關性，由於黏滯係數將隨著氣壓減少而降低，因此真空封裝是需要的。

此外，當利用振動式微機械共振器所組成的射頻電路，如濾波器、混頻器與振盪器 (oscillator) 等，其共振頻率漂移所造成之雜訊，將會對此類電路性能表現造成影響。譬如在振盪器應用上，共振頻率漂移將會大量增加電路上之相位雜訊 (phase noise)。而造成共振頻率漂移的原因，主要導源於共振器之質量的改變，由於微機械共振器的質量僅在  $10^{-13}$  kg 左右，對來自空氣分子於共振器表面的吸附與脫離，其所造成之些微的質量改變將引起共振頻率的明顯漂移，如方程式 (4) 所示，共振頻率 ( $f_0$ ) 的改變量 ( $\Delta f$ ) 正比於共振器質量的變化量與質

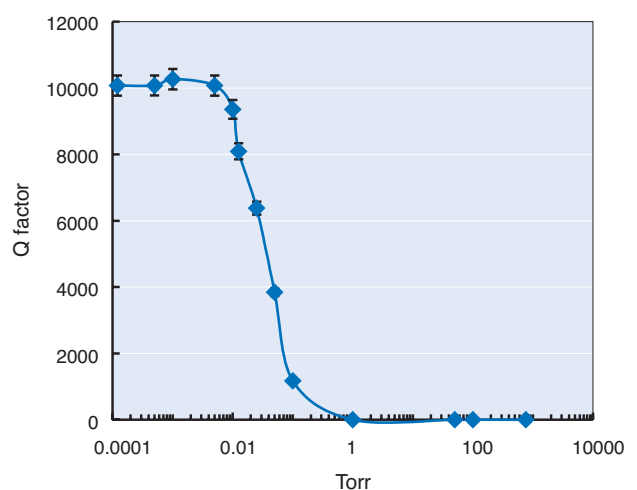


圖 2. Folded beam comb-drive resonator 的因子值與操作環境氣壓的相關性。

量的比值<sup>(3)</sup>：

$$f_0 \sim \sqrt{\frac{K}{M}} \Rightarrow \Delta f \approx -\frac{f_0}{2} \frac{\Delta M}{M} \quad (4)$$

Nguyen 氏已就相互間的關係作一理論上之分析<sup>(3)</sup>，藉由一 Stochastic model 推導出相位雜訊與共振器操作環境氣壓 ( $P$ )、溫度 ( $T$ )、空氣分子之分子量 ( $W$ ) 以及其於共振器表面的吸附與脫離的表面位能 ( $E_d$ ) 等因素有關。根據分析結果指出，低於  $10^{-9}$  Torr 的操作氣壓可大量減少相位雜訊的產生，因此高真空封裝在射頻電路的應用是必要的。

$$f_0 \sim \sqrt{\frac{K}{M}} \Rightarrow \Delta f \approx -\frac{f_0}{2} \frac{\Delta M}{M} \quad (5)$$

$$A_0 = 3.51 \times 10^{22} \frac{P}{\sqrt{TW}} \quad (6)$$

$$D_0 \sim \exp\left(-\frac{E_d}{RT}\right) \quad (7)$$

$$S_M(f) \sim \frac{1}{A_0} \frac{(\Delta f)^2}{f^2} + \frac{1}{D_0} \frac{(\Delta f)^2}{f^2} \quad (8)$$

現今微機電真空封裝的方式可概分類為兩種模

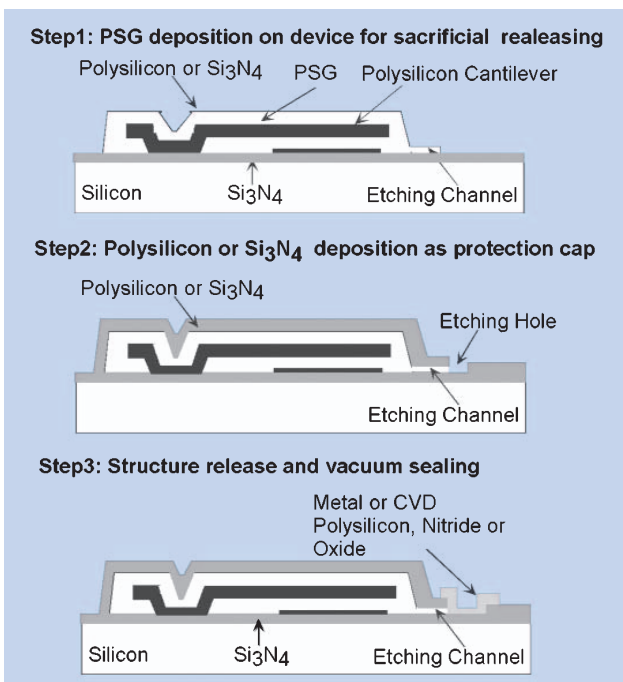


圖 3. 整合式真空封裝製程步驟。

式，分別為整合式 (integrated packaging) 與後製程式 (post-process packaging) 真空封裝。整合式是以多晶矽或氮化矽薄膜作為元件的保護層，製程步驟如圖 3 所示，當元件製作完成時，2-3 微米厚之氧化矽犧牲層與該保護層將隨後依序覆蓋其上，再利用顯影與蝕刻技術將保護層打開一數微米大小之孔洞，使氟化氫溶液滲入並移除犧牲層，最後再以低壓化學氣相沉積或金屬薄膜濺鍍方式，在真空方式下填補孔洞以完成真空封裝。此種技術可在晶圓尺度 (wafer level) 下完成，有助於封裝成本的降低，然而此法常受限於封裝時的製程條件，諸如，以低壓化學氣相沉積技術封孔時，封裝之真空度將無法掌控，必須由薄膜沉積時的條件決定；此外，部分薄膜材料將會附著於元件表面，使得該元件偏離元件設計時的工作條件。

後製程式封裝則是將封裝獨立於元件的製作，在傳統上，如圖 4 所示，元件首先被置入於一陶瓷載具，利用金屬線焊接方式 (wire bonding) 將元件訊號之輸出入端連結載具上之訊號輸出入端，再以金屬鎔接方式，將陶瓷蓋 (sealing lid) 與該載具黏合於高真空之下。由於金屬是最佳的真空材料，此法將可提供無受限於製程條件與較為可靠之真空封裝，然而在高成本的陶瓷載具與一次僅能封裝一個元件的限制下，已陸續有新的後製程式封裝方式被提出與開發。基本上，為降低封裝成本，新的後製程式封裝大抵是利用 chip scale wafer level packaging 的概念，如圖 5 所示，將保護蓋製作於一矽或玻璃晶圓之上，再利用晶圓結合術，於真空環境下使保護蓋移轉並黏合於含有元件的晶圓之上，達成高真空的封裝。

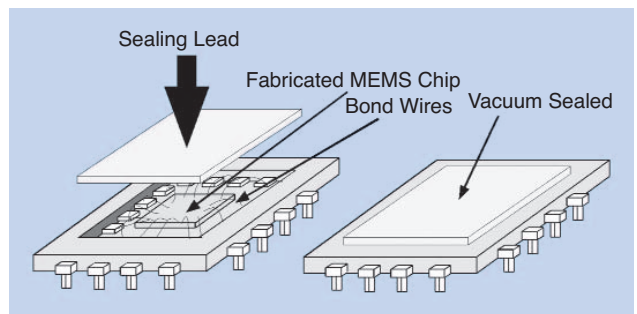


圖 4. 傳統工業上之後製程式真空封裝 (DIPS) 示意圖。

常用之晶圓結合術有金矽共晶低溫晶圓結合術 (Au-Si eutectic wafer bonding)、矽對矽與矽對氧化矽高溫晶圓鑲合術 (Si-Si or Si-SiO<sub>2</sub> fusion bonding)、矽對氧化矽之陽極結合術 (Si-glass anodic bonding)、鋁對氧化矽與鋁對氮化矽之結合術 (Al-SiO<sub>2</sub> and Al-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> bonding) 等，由於此類結合術多是由加熱或加高電壓於晶圓之上的方式而達成，該封裝技術的成功應用則端賴於晶圓結合時的條件以及其可靠性。諸如矽對矽與矽對氧化矽高溫晶圓鑲合術，其工作溫度高於 1000 °C。此法並不適合於含有積體

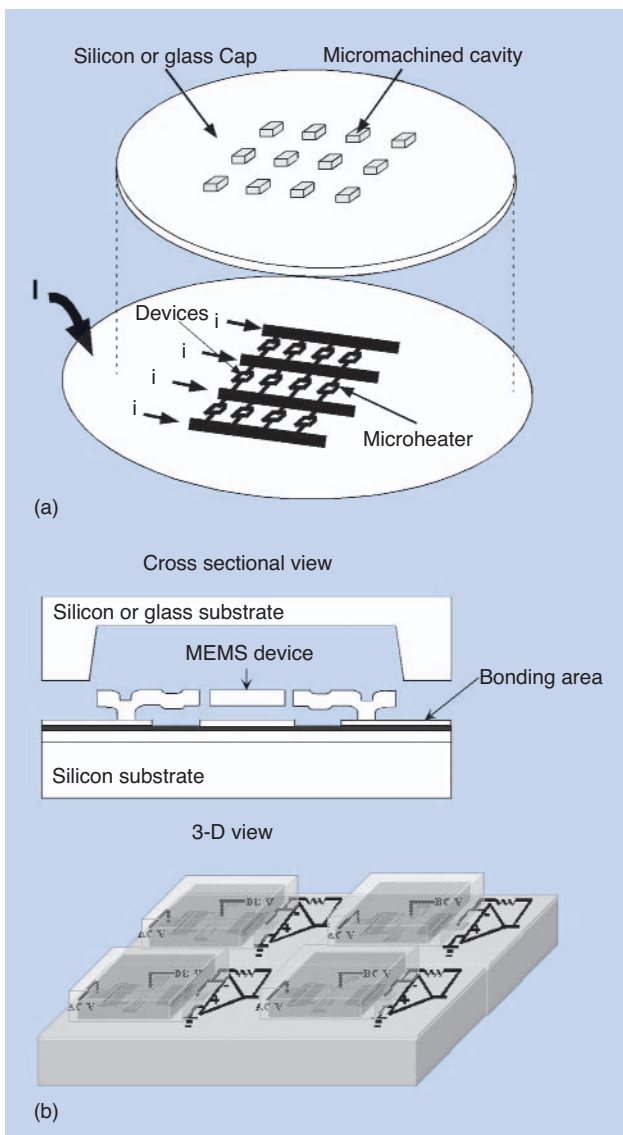


圖 5. Chip scale wafer level 之後製程式真空封裝示意圖，(a) wafer level，(b) chip scale。

電路的微系統封裝製作，實際上，上述需以晶圓加熱方式完成之晶圓結合術，並不適用於對製程溫度較為敏感之微系統封裝製作。2001 年，密西根大學一研究群於 IEEE MEMS Conference 發表<sup>(11)</sup> 以侷限性鋁對氧化矽結合術 (localized Al to glass bonding)，成功製作出後製程式真空封裝，並應用於振動式微機械共振器真空封裝上的製作。圖 6 顯示該侷限性鋁對氧化矽結合過程中之溫度分布<sup>(12)</sup>，利用有限元素分析法，分析出加熱區僅侷限於加熱源附近，而晶圓中其他非加熱區將可被控制於近乎室溫的環境，非常適用於對製程溫度較為敏感之微系統封裝製作，詳細的製作原理請參考相關文獻<sup>(13)</sup>。圖 7 展示一被破壞之玻璃保護蓋，此保護蓋藉由侷限性鋁對氧化矽結合術，將其黏著於矽元件晶片並保護其下之微機械共振器。圖 8 並展示以此法真空封裝之微機械共振器其因子值對時間的相關性，經過一年多之追蹤量測，證明此真空封裝相當可靠。

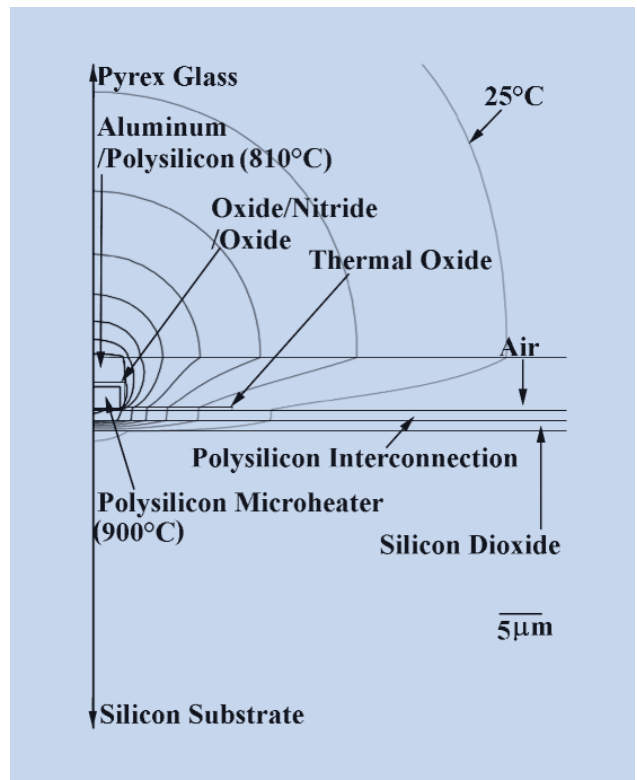


圖 6. 有限元素分析法所分析之侷限性鋁對氧化矽玻璃結合過程中之溫度分布<sup>(12)</sup>。

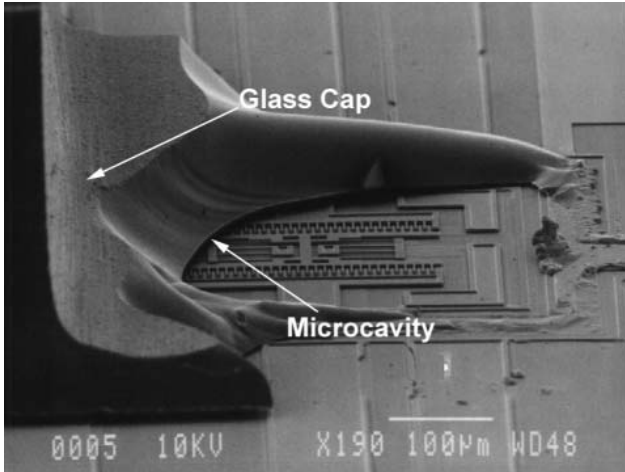


圖 7. 利用侷限性鋁對氧化矽玻璃結合術所製成之真空封裝，移除部分之玻璃保護蓋後可見其下之微機械式共振器。

## 五、應用前景與挑戰

基本上高因子值、高頻帶通濾波器的研發成功，將可使射頻積體電路具有性能強、耗能低及寬頻等優點。而利用振動式微機械共振器所組成的帶通濾波器，更可得該射頻電路系統擁有較低的製造成本與更為微小化的體積，此舉將有助於個人無線通訊技術的創新。然而就現今振動式微機械共振器的發展，不難看出，仍有許多技術上的挑戰仍待克服。首先以真空封裝技術而言，如前文所述，現有的真空封裝在製作上相當繁複且昂貴，在製造成本上無法為個人無線通訊系統所採用。雖然現階段已有 chip scale wafer level packaging 的觀念提出，如前例所示，在配合半導體晶圓製造技術之下，將第一步的封裝元素與所需要封裝的射頻積體電路元件，同時製成於單一晶片之上，此種大量且具選擇性的封裝方式，或許能降低製造成本，然而相關的可靠性測試結果卻相當缺乏。此外，迄今仍無利用此類封裝技術達成可靠的高真空工作環境 ( $< 10^{-7}$  Torr)，作為微機械共振器在超高頻或兆億赫茲電路上的應用。

雖然所有的振動式微機械共振器是由表面式矽微加工技術製作而成，所使用的技術雖與半導體積體電路製造技術極為相近，在射頻積體電路製程整合上並無太大的困難，然因主要的結構材料為摻雜

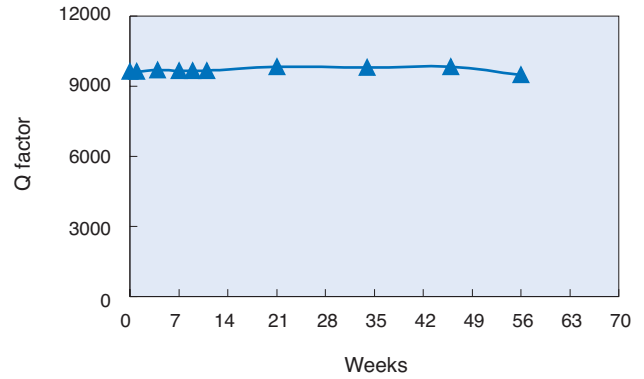


圖 8. 利用侷限性鋁對氧化矽玻璃結合術所製成之後製程式真空封裝，其封裝之微機械共振器的因子質與時間的關係。經過一年多的追蹤量測並無發現任何明顯之因子質變化。

型多晶複矽，其薄膜製程溫度 ( $> 600\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) 較高於積體電路元件後段製程溫度之限制，如何決定電子元件與共振器製作的先後次序 (pre-CMOS, post-CMOS or mixed processes) 並在相關製程上作修改，仍就處於研究開發的階段。譬如，一般射頻積體電路中的金屬導線材料為鋁，其熔點溫度 ( $\sim 660\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) 與共振結構薄膜的製程溫度相當，然而鋁原子在此製程溫度極易擴散滲入電晶體中，進而破壞導線與電極之間的界面電性，因此如果共振器優先於積體電路的製作，金屬導線材料則必須改用具有較高熔點溫度的金屬，例如以鎢作為導線材料並搭配防止界面擴散的鈦矽合金 (TiSi<sub>2</sub>) 膜等。雖然除了將此微機械元件與積體電路同製於單一晶片之模式外，完整射頻積體電路亦可由雙模組晶片接合的方式整合而成，其原理是將微機械共振器、濾波器所組成之晶片，與含有積體電路的晶片分別製作，並以覆晶接合技術，將雙晶片結合而成一射頻積體電路系統。但此舉需決定於接合技術的精準度、界面金屬之鍵結強度與界面電性等。

由於共振器的振動頻率取決於共振結構質量與振動彈簧之彈性係數，這些參數是由材料特性與結構幾何形狀決定，因此當共振器在晶圓尺度之下製作時，薄膜成長厚度與化學蝕刻的非均勻性將會影響共振器的振動頻率在晶圓尺度下的分布，並造成部分共振器的振動頻率偏離原先之設計。如何做好後製程的元件頻率修正，並減少修正時所需的成

本，亦是振動式微機械共振器應用於射頻積體電路系統上極為重要的一環。

## 六、結論

隨著個人行動通訊系統需求的增加，開發新一代射頻積體電路系統已成為國家電信發展重點之一。本文就振動式微機械共振器的原理、製作及在射頻積體電路上之應用作一介紹，並就其現今面臨之挑戰與應用前景作一探討。雖然利用振動式微機械共振器作為濾波器、混頻器與振盪器的概念與相關的技術仍就處於研究開發階段，但其便宜、體積小、耗能低、性能強等特性，可以預見其在新一代射頻積體電路系統的應用上極具潛力，尤其近年來，此概念已開始陸續受到 Intel、IBM 與 Motorola 等半導體製造大廠的重視。雖然超高頻或兆億赫茲的振動式微機械共振器迄今仍未開發成功，但隨著相關的技術陸續的開發，振動式微機械共振器在無線通訊系統上之應用將指日可待。

## 參考文獻

1. H. C. Nathanson, W. E. Newell, R. A. Wickstrom, and J. R. Davis, *IEEE Trans. Electron Devices*, **ED-14**, 117 (1967).
2. L. Lin, T. C. Nguyen, R. T. Howe, and A. P. Pisano, *Proceedings of the 1992 IEEE MEMS*, 226, Germany, February (1992).
3. Clark Tu-Cuong Nguyen, *Ph.D. Thesis*, UC Berkeley (1993).
4. Kun Wang, *Ph.D. Thesis*, The University of Michigan (1999).
5. K. Wang, Y. Yu, A. -C. Wong, and C. T. -C. Nguyen, *Proceedings of the 1999 IEEE MEMS*, 453 (1999).
6. W. T. Hsu, J. R. Clark, and C. T. -C. Nguyen, *The 11th Conf. Solid-State Sensors & Actuators*, Transducers'01, 1110 (2001).
7. J. R. Clark, W. T. Hsu, and C. T. -C. Nguyen, *IEEE IEDM*, 399 (2000).
8. K. B. Lee, S. Ryder, and Liwei Lin, 2002 ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, *Proceedings of the MEMS Symposium*, CD ROM, Vol. 2, New Orleans, Nov. (2002).
9. J. M. Bustillo, R. T. Howe, and R. S. Muller, *Proceeding of The IEEE*, 1552 (1998).
10. M. A. Schmitt, R. T. Howe, S. D. Senturia, and J. H. Haritonidis, *IEEE IEDM*, 750 (1988).
11. Y. T. Cheng, W.T. Hsu, Liwei Lin, C.T. Nguyen, and K. Najafi, *Proceedings of the 2001 IEEE MEMS*, 18 (2001).
12. Y. T. Cheng, Liwei Lin, and K. Najafi, *Proceedings of the 2000 IEEE MEMS*, 757 (2000).
13. Y. T. Cheng, W. T. Hsu, K. Najafi, C. T. Nguyen, and Liwei Lin, *IEEE/ASME JMEMS*, **11**, 556 (2002).

---

鄭裕庭先生為美國密西根大學（安娜堡）電機工程博士，現任國立交通大學電子工程研究所助理教授。

Yu-Ting Cheng received his Ph.D. degree in EECS department from the University of Michigan, Ann Arbor. He is currently an assistant professor in the department of electronics engineering at National Chiao Tung University.