

# 微機械式射頻開關

## Micromechanical RF Switches

蔡宗佑、楊閔智、戴慶良

Zung-You Tsai, Ming-Zhi Yang, Ching-Liang Dai

微機械式射頻開關是利用標準互補式金氧半導體 (CMOS) 製程所製作，其驅動力為靜電力，開關的切換機制是以電容耦合方式進行運作，其構造包含金屬薄膜、訊號傳輸線、彈簧與圓形螺旋電感，電感結構用以提升微機械式開關的電性特性及增加工作頻率範圍。當微機械式開關需要後製程處理釋放懸浮結構，後製程處理採用反應性離子蝕刻 (RIE) 移除電感下方的矽基材以及濕蝕刻犧牲層。實驗結果顯示，微機械式開關的驅動電壓為 11 V，在工作頻率 35 GHz 時，其插入損失為  $-0.8$  dB；隔離度為  $-25$  dB。

The RF (radio frequency) switch is fabricated by the standard CMOS (complementary metal oxide semiconductor) process. The switch is capacitive type and actuated by the electrostatic force. The structure of the switch consists of a suspended metal membrane and a signal transmission line, springs and spiral inductors. The inductors are used to increase the electrical properties and the operating frequency of the RF switch. The finite element method software, Coventor Ware, is employed to simulate the mechanical properties of the RF switch. The high frequency analysis software, ADS (Advanced Design System), is used to simulate the electrical characteristics of the RF switch. The switch needs a post-process to release the suspended structures. The post-process uses a RIE (reactive ion etching) to remove the silicon substrate under the inductors, and then the sacrificial layer is etched by a wet etching. The experimental results showed that the pull-in voltage of the RF switch was 11 V, and it had an insertion loss of  $-0.8$  dB and an isolation of  $-25$  dB at the working frequency of 35 GHz.

### 一、前言

隨著科技的進步，人們生活型態受到科技的發展而有顯著的改變，人們從肉眼可探知的事物上轉換成探討肉眼所看不到的事物，於是微機電系統 (MEMS) 技術也跟著隨之蓬勃發展<sup>(1)</sup>。在微機電系統的應用上，包含了各種不同的領域，如機械、電子、電機、光學、材料、控制、通訊、物理、化學以及生物醫學科技等，在微機電系統元件中，可應用的領域也包羅萬象，其中包含資訊、通訊、交

通運輸、環境保護、醫學檢測與消費性電子等。在商品化產品當中，包括加速度計、無線式胎壓感測器、壓力計、微型麥克風、陀螺儀與手機通訊產品等，這當中最成功的商品化應用如：Wii、RF MEMS、手提式光學投影機等。近年來 CMOS-MEMS 製程的穩定度與誤差值都有顯著的進步，目前製作 MEMS 多以 CMOS 標準半導體製程製作，其擁有良好的可靠度、成本低與易量產製造等特性，並可同時將結構與電路一併設計與規劃在一塊晶片上，擁有電路與結構即可實現 SOC (system

on chip) 的目標<sup>(1)</sup>。筆者實驗室一直致力於 CMOS-MEMS 技術的發展與應用<sup>(2-4)</sup>，本研究以 CMOS-MEMS 技術研製微機械式射頻開關。

現今 CMOS 製程被廣泛地應用在無線通訊產品上，舉凡電視、衛星、電腦、無線電話、智慧型手機和無線區域網路都需要經過訊號的傳輸，其應用的訊號源是微波訊號，而微波訊號的接收與發射需要利用開關來控制。一般傳統的射頻微波開關皆使用固態元件，如場效電晶體和二極體的半導體開關。固態電子元件優點<sup>(5)</sup>包括低驅動電壓、開關切換速度快和製作簡單等；相對的，也有許多缺點，如隔離度低、插入損失高與線性度差等，並且隨著頻率不斷升高，其開關特性越來越低，這些缺點往往是固態元件無法往更高頻率邁進的關鍵。

微機電射頻開關相較於固態電子元件開關，具有以下優點<sup>(5)</sup>：(1) 微機電射頻開關在導通的狀態下，阻抗較大，因此可降低插入損失；(2) 微機電射頻開關在不導通的狀態下，有較大的隔離度，最高可達 -50 dB 左右；(3) 微機電射頻開關具有高線性度，可避免線性度不佳所產生的干擾；(4) 微機電射頻開關驅動電壓高，但是幾乎沒有消耗電流，因此功率消耗相對較低，約在 10-100 nJ；(5) 微機電射頻開關可與 CMOS 製程相容，可利用現有

的半導體廠大量生產、降低成本。相對於傳統電子式開關，應用在無線通訊系統上更能符合未來的趨勢，且體積小、低耗能及低成本需求，加上利用微機電技術所製作之被動元件，相較於傳統的固態電子元件，其線性度高、高頻響應特性佳，故在高頻通訊領域上，勢必將取代傳統式的固態式電子元件<sup>(6)</sup>。

## 二、微機械式射頻開關的設計

微機械式射頻開關使用標準 CMOS 製程製作，透過結構的設計與後製程的蝕刻，改善其微開關的性能，其開關包含：設計 U 型彈簧結構<sup>(7)</sup>，以降低驅動電壓；設計多組的圓型螺旋電感結構，可準確地獲得共振點，增加微開關的工作頻率範圍等。圖 1 為微機械式射頻開關的結構<sup>(8)</sup>，此開關包含了微波導線、驅動電壓端、懸浮金屬薄膜、彈簧、串聯圓形螺旋電感與固定端。微波導線與驅動電壓端是由鋁金屬層所構成。懸浮薄膜亦由鋁金屬層所構成，兩側分別利用彈簧將其與固定端連接固定，電感結構串聯在固定端的每一端，並連接至接地端。電感結構的下方，以反應離子蝕刻方式移除矽基材，再以濕式蝕刻形成懸浮結構。

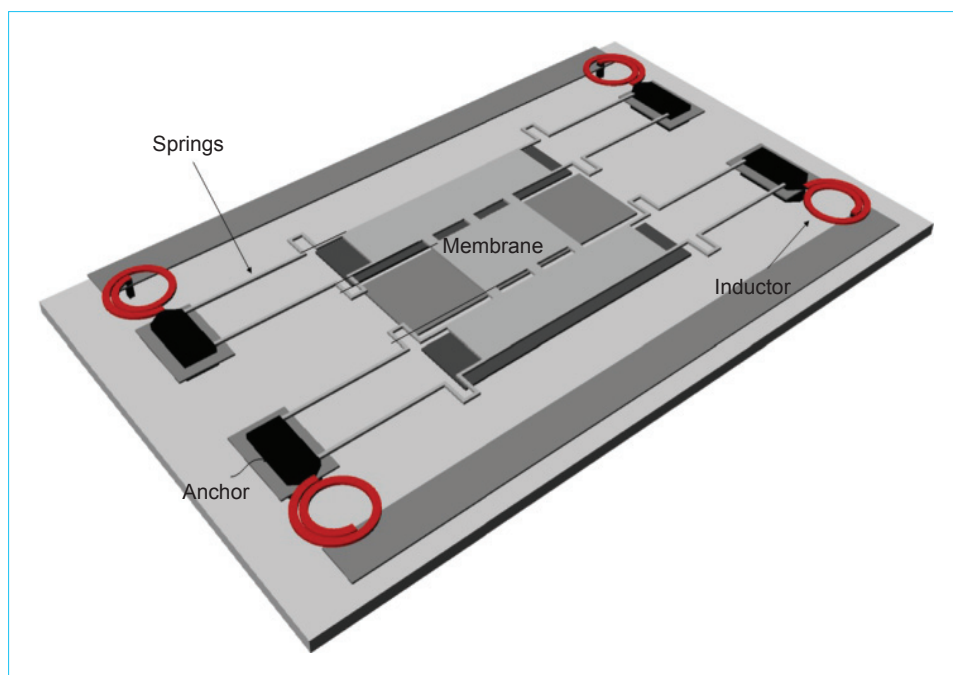


圖 1. 微機械式射頻開關的結構。

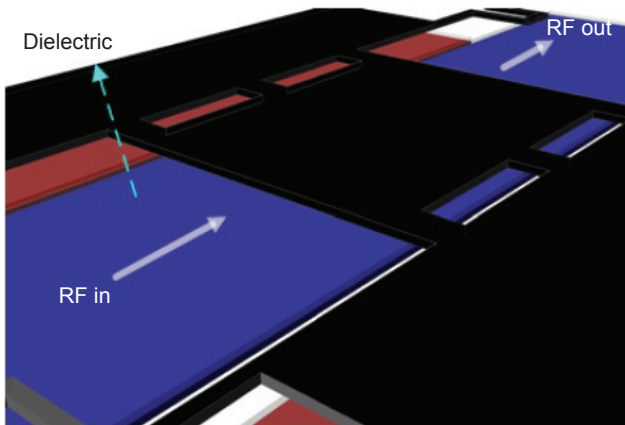


圖 2. 微機械式射頻開關訊號導通 (ON 狀態)。

微機械式射頻開關的作動原理如下：當開關未施加電壓時如圖 2 所示，高頻訊號可導通到另一端，但傳輸線都會有一定的衰減量，加上開關上電極與下電極間的高度有一定限制，因此會有少部分的電磁波經過此路徑而導通到接地端，故在開關處於 ON 時，可以量測  $S$  參數而得知其插入損失；當開關於偏壓端，輸入直流偏壓時，如圖 3 所示，施加的電壓達到驅動電壓以上時，上電極會受到靜電力的影響而與下電極的金屬吸附，中間隔著一層介電層，此時可以從此狀態的  $S$  參數得知隔離的效果，此效應主要決定在上電極與介電層吸附的情形與接觸面積的大小，若吸附表面越平坦，亦即較不會有能量透過間隙輻射出去；相同的，當吸附面積

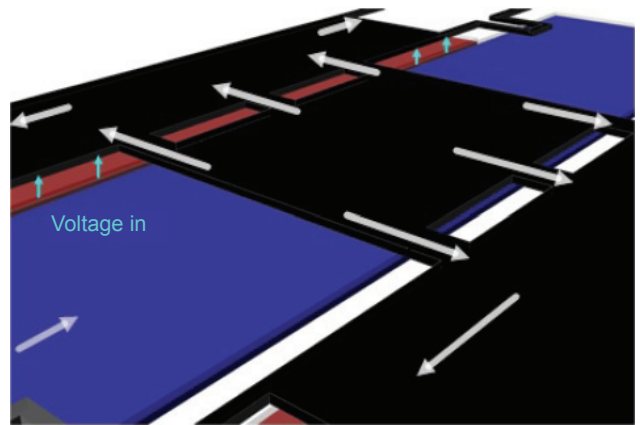


圖 3. 微機械式射頻開關訊號關閉 (OFF 狀態)。

越大，等效阻抗也就越小，訊號就越不易導通至另一端而造成損失。

### 三、微機械式射頻開關的模擬

微機械式射頻開關使用國家高速網路服務中心所提供之有限元素軟體 Coventor Ware<sup>(9)</sup>，模擬微開關的機械性質，Coventor Ware 模組可提供其模擬模型與操作方式，透過模型的建立與網格化後，給予 3D 模型邊界條件，並設定施加偏壓，得到吸附電壓 (pull-in voltage)、應力分布以及位移量。圖 4 為微射頻開關完成蝕刻後之模擬，其結構會因為殘留應力的影響而產生翹曲現象，設計之金屬板中

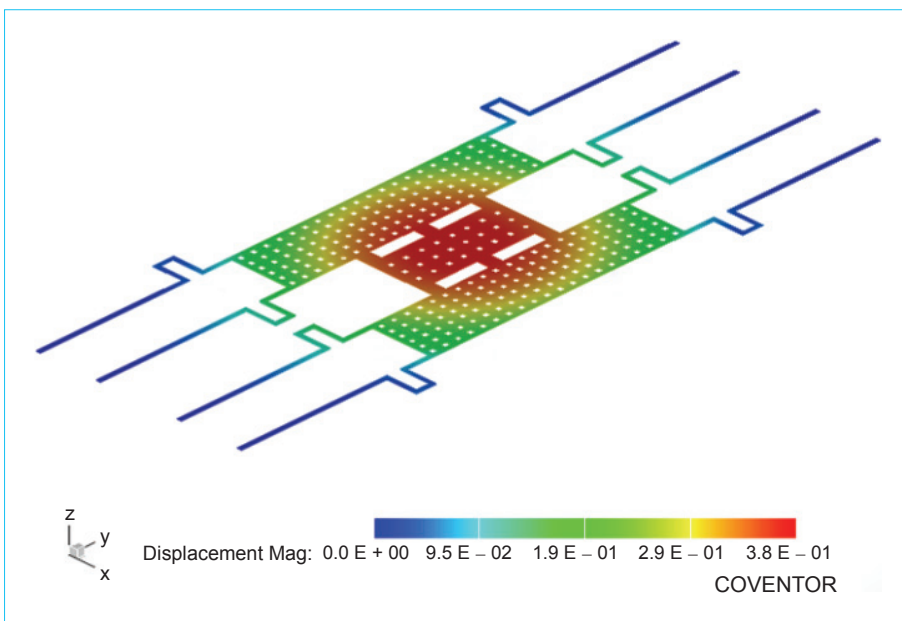


圖 4. 模擬微機械式射頻開關因製程殘留應力產生的翹曲位移 (單位： $\mu\text{m}$ )。

間，其高度差約為  $2.3 \mu\text{m}$ ，模擬往下塌陷的最大值約為  $0.23 \mu\text{m}$ ，在此殘留應力的影響下，並不會使懸浮結構與訊號端金屬板相互接觸，此模擬結果也顯示出，當蝕刻完成後，會使得初始電容值增加。最後，模擬驅動電壓與位移關係，如圖 5 所示。當施加電壓大於  $11 \text{ V}$  時，上電極板與訊號線接觸，當到達其吸附電壓時，微射頻開關即產生作動，使開關金屬薄膜吸附，進而使得訊號耦合至接地。當受到靜電力作動，使得結構拉伸，為了得知其拉伸時，是否會因為應力過大，而使金屬結構產生破壞，亦透過模擬軟體分析。當結構受到吸附拉伸時，微射頻開關結構上的應力分布，如圖 6 所示。由模擬結果可知，最大應力分布在兩端固定的懸臂桿上，拉伸應力約為  $23 \text{ MPa}$ ，遠小於鋁金屬的降服強度  $170 \text{ MPa}$ ，由此可知，結構受靜電力時，不會使結構產生永久變形，可使微射頻開關成功反覆作動。

為了得知微機械式射頻開關整體結構在高頻下之等效特性，需利用 Q3D Extractor<sup>(10)</sup> 模擬開關在高頻下之等效電阻、電容與電感。此微機械式射頻開關結構的等效電路模型 (equivalent circuit of switch model)，如圖 7 所示， $R_{\text{line}}$  與  $L_{\text{line}}$  分別表示為金屬傳輸線的等效電阻值與等效電感值；

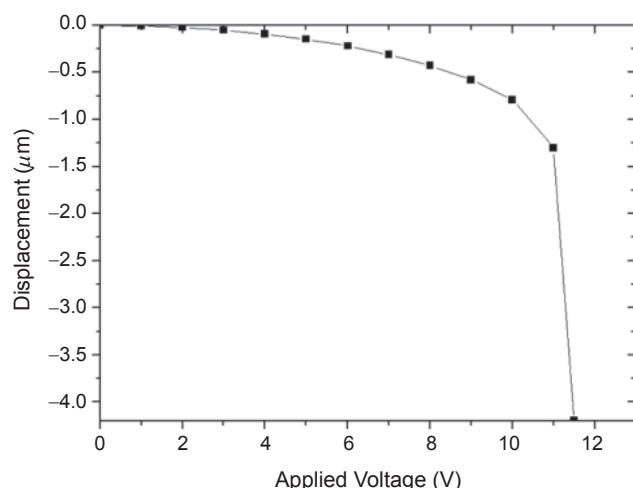


圖 5. 模擬微機械式射頻開關的驅動電壓。

$C_{\text{ox1}}$  與  $C_{\text{ox2}}$  表示為傳輸線中的二氧化矽與矽基材間的寄生電容值， $C_{\text{sub1}}$  與  $C_{\text{sub2}}$  為矽基材的寄生電容值， $R_{\text{sub1}}$  與  $R_{\text{sub2}}$  則為矽基材中的寄生電阻值； $C_{\text{tune}}$  為上電極板與訊號線之間的電容值， $R_{\text{shunt}}$  為微開關結構之等效電阻值， $L_{\text{shunt}}$  為微開關結構之等效電感值； $C_{\text{ind}}$  是電感結構和矽基材間的電容值， $R_{\text{ind}}$  是電感結構的電阻值， $L_{\text{ind}}$  是電感結構的電感值。將其匯入高頻分析軟體 ADS<sup>(11)</sup> 等效電路中模擬，可模擬出開關在 ON 與 OFF 狀態下的電

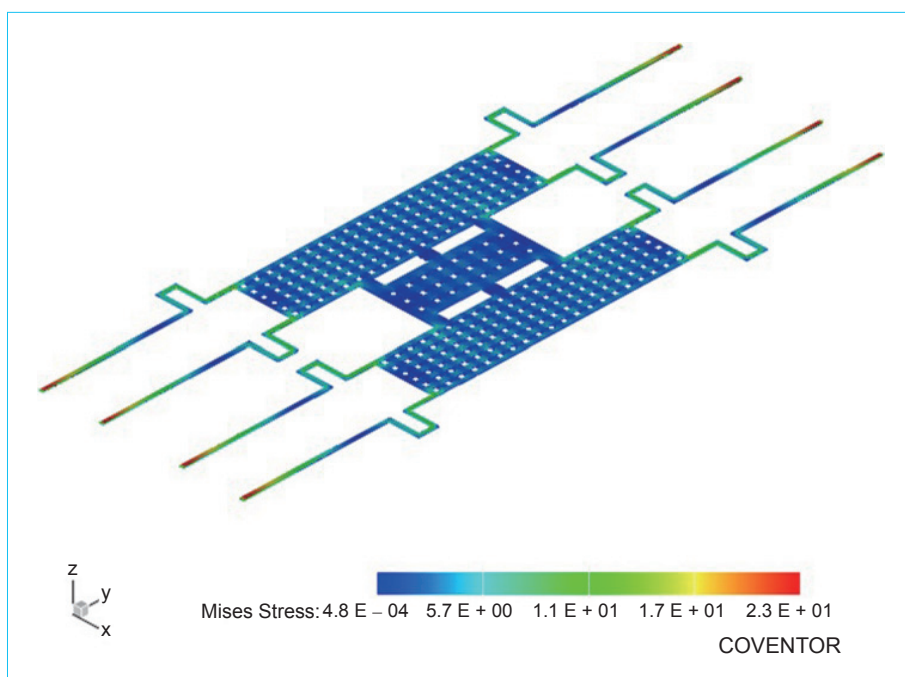


圖 6. 模擬微機械式射頻開關的的應力分布 (單位：MPa)。

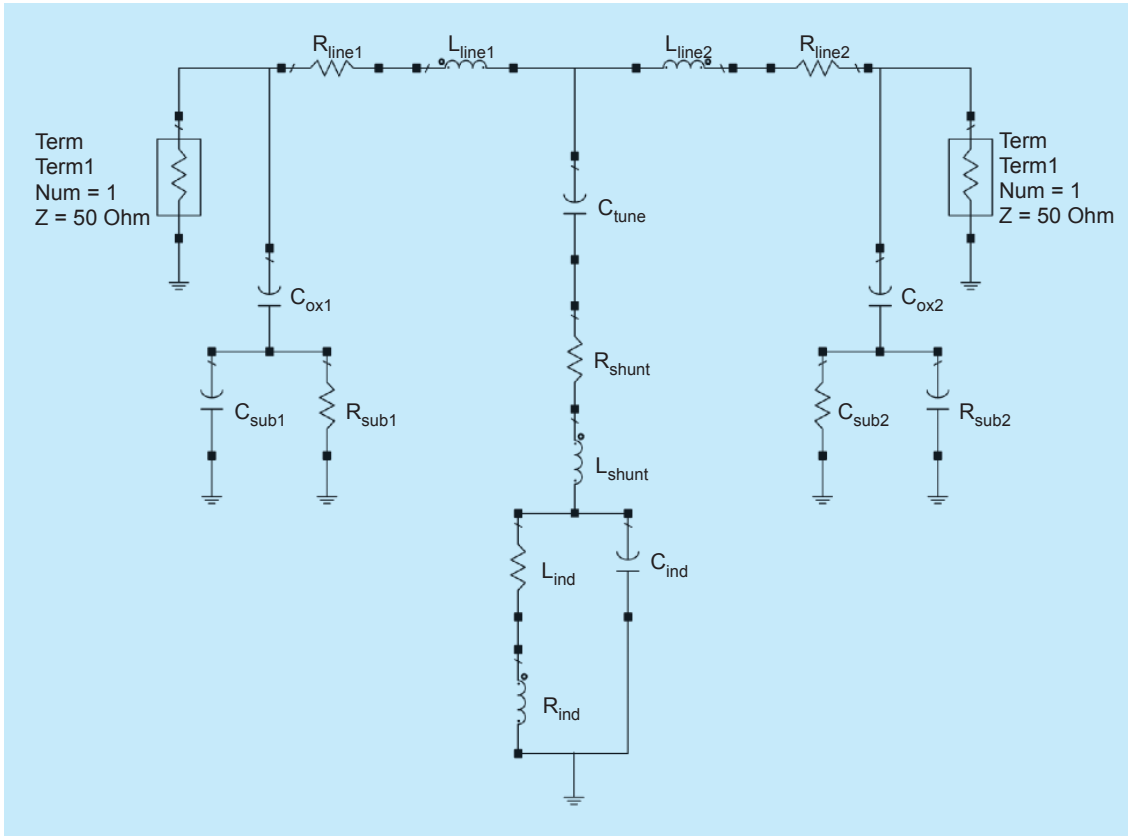


圖 7. 微機械式射頻開關的等效電路模型。

性特性。圖 8 是微機械式射頻開關的插入損失之模擬，其插入損失在 35 GHz 為  $-0.55$  dB，圖 9 是微機械式射頻開關的反射損失之模擬，其反射損失在 35 GHz 為  $-13.5$  dB，圖 10 是微機械式射頻開關的隔離度之模擬，其隔離度在 32 GHz 為  $-28$  dB。

#### 四、微機械式射頻開關的製作

此微機械式射頻開關之製程流程如圖 11 所示，標準的 CMOS 製程中，其間隙層由二氧化矽所填充，因此結構層與犧牲層是緊密的接合在一起，需要透過後製程處理，而後製程處理包括了晶

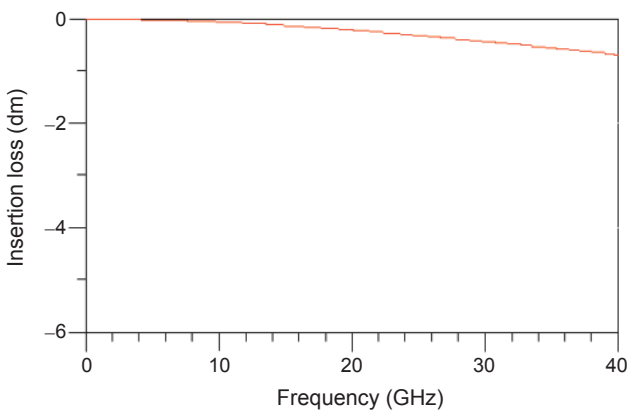


圖 8. 模擬微機械式射頻開關的插入損失。

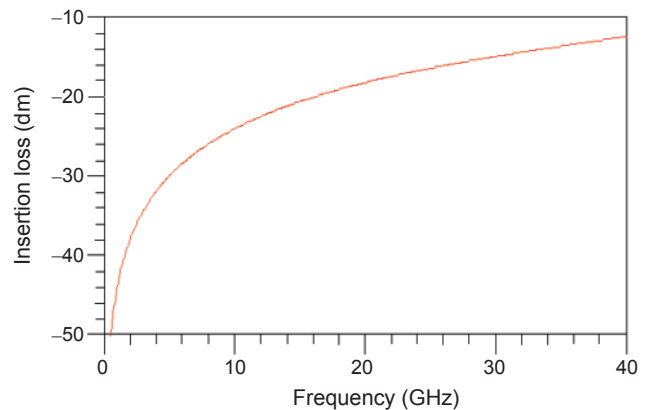


圖 9. 模擬微機械式射頻開關的反射損失。

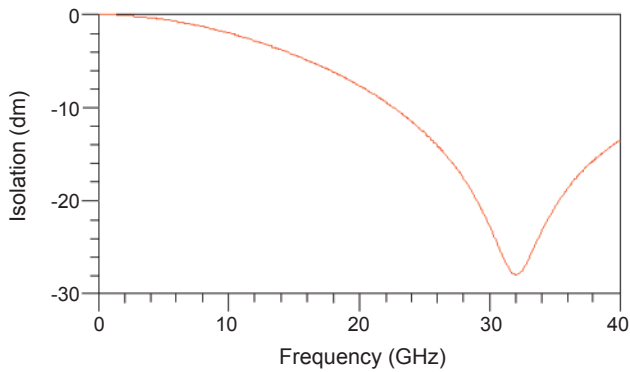


圖 10. 模擬微機械式射頻開關的隔離度。

片的清潔與犧牲層的移除等步驟。圖 11(a) 為射頻開關經由 CMOS 製程製作完成的剖面示意圖，晶片最上層部份為氮化矽 ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ) 所構成的保護層，而保護層未開孔的部份，則可保護結構。其次，以一道光罩與曝光顯影，將不需要蝕刻的部份以光阻覆蓋，只裸露出需要蝕刻的部份，如圖 11(b) 所示。未受到光阻保護的部份，使用反應性離子蝕刻方式蝕刻，首先，通入氣體  $\text{CF}_4/\text{O}_2$  蝕刻二氧化矽，之後通入氣體  $\text{SF}_6/\text{O}_2$  蝕刻矽基底材，再移除光阻，如圖 11(c) 所示，最後的步驟是以濕蝕刻方式蝕刻，其懸浮結構與犧牲層，如圖 11(d) 所示。

圖 12 為微機械式射頻開關經後製程處理之掃描式電子顯微鏡 (SEM) 影像<sup>(8)</sup>。圖 13 是微機械式射頻開關的懸浮電極板之 SEM 影像，由圖 13 可清楚獲知最上層為懸浮電極板，下方為訊號線，中間的介電層為空氣。圖 14 是微機械式射頻開關的電感結構，中間圓圈的部份是以反應性離子蝕刻所形成，下方黑色部份則是蝕刻至矽基材。

## 五、實驗結果

為了得知微機械式射頻開關吸附時所需要的驅動電壓，將製作完成之晶片經由打線連接在電路板上，並使用電源供應器提供電壓，以白光干涉儀量測懸浮電極板的位置，藉由白光干涉儀的量測結果可得知微開關所需的吸附電壓。

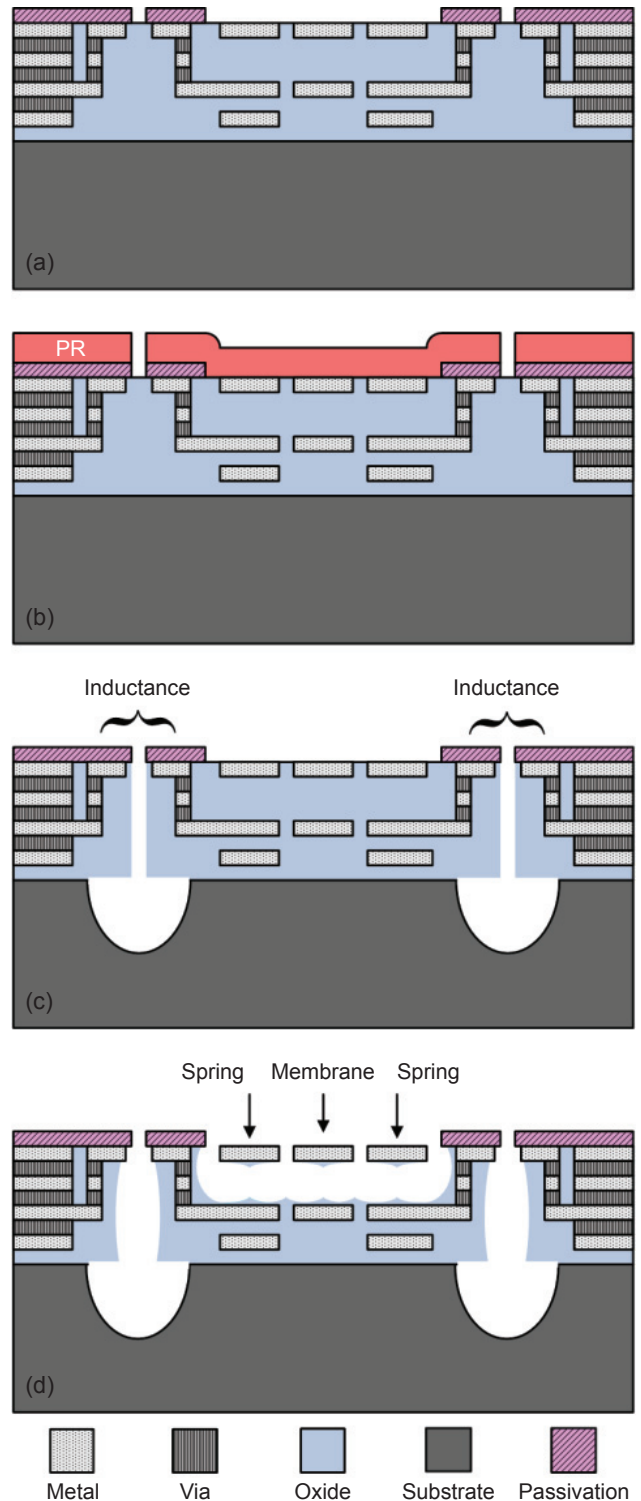


圖 11. 微機械式射頻開關製作流程：(a) 完成 CMOS 製程之晶片剖面；(b) 上光阻和微影；(c) 乾蝕刻犧牲層；(d) 濕蝕刻犧牲層。

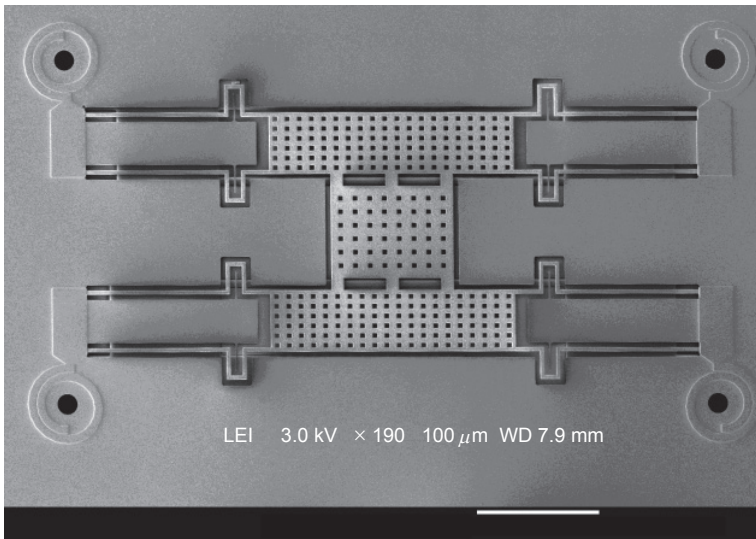


圖 12. 微機械式射頻開關之 SEM 影像。

圖 15 是未施加電壓時由白光干涉儀所測得之微開關輪廓，電極板 (圖 15 中之 B 點位置) 的高度為  $1.2 \mu\text{m}$ ，扣除其厚度後，其下方之空氣層間隙為  $0.7 \mu\text{m}$ ，由此得知電極板已經懸浮；當施加直流偏壓至 11 V，電極板受到靜電力的驅動，而使得電極板往下吸附至訊號端，圖 16 是施加 11 V 電壓後由白光干涉儀所測得之微開關輪廓，在圖 15 中之 B 點位置，其高度是零，代表施加 11 V 偏壓至開關後，電極板已達到吸附至下方基材。

微機械式射頻開關以國家晶片設計中心提供的 HP8510C 向量網路分析儀<sup>(12)</sup> (vector network analyzer, VNA) 量測高頻信號特性，網路分析儀包含高頻共平面波導探針 GSG 與外加 DC 偏壓探針 PGP，探針分別以訊號源、接地端和偏壓源作為架構。當未施加直流偏壓時，其 S 端所量測到的  $S_{21}$  參數代表開關的插入損失， $S_{11}$  參數則是表示反射損失；當對開關施加直流偏壓驅動後，所量測到的  $S_{21}$  參數則代表開關的隔離度。

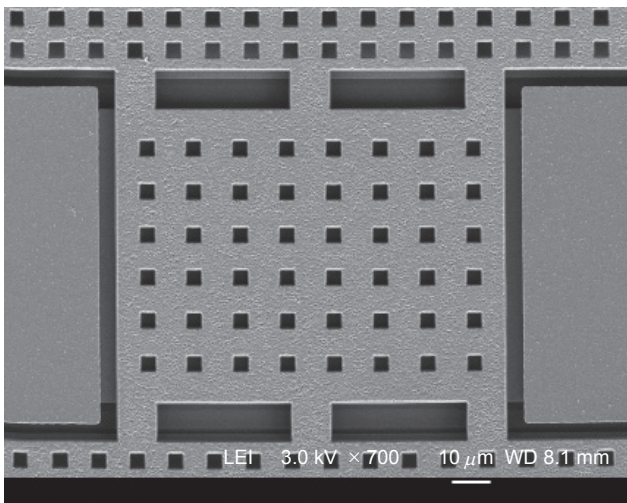


圖 13. 微機械式射頻開關的懸浮電極板之 SEM 影像。

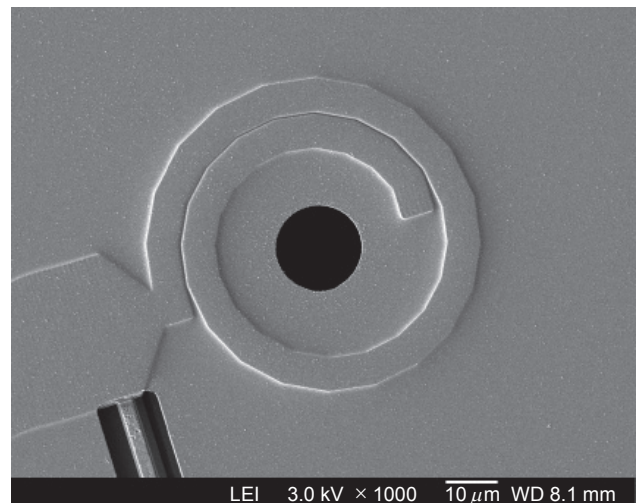


圖 14. 微機械式射頻開關的電感結構之 SEM 影像。

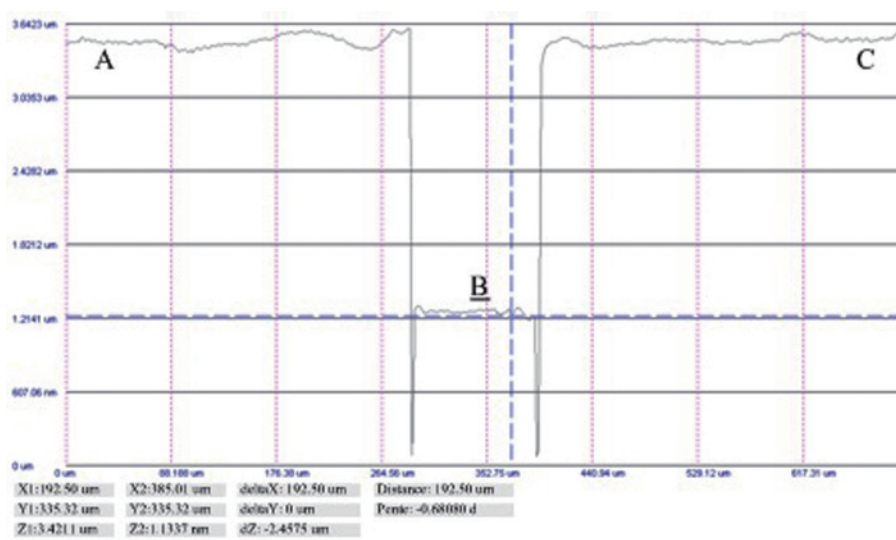
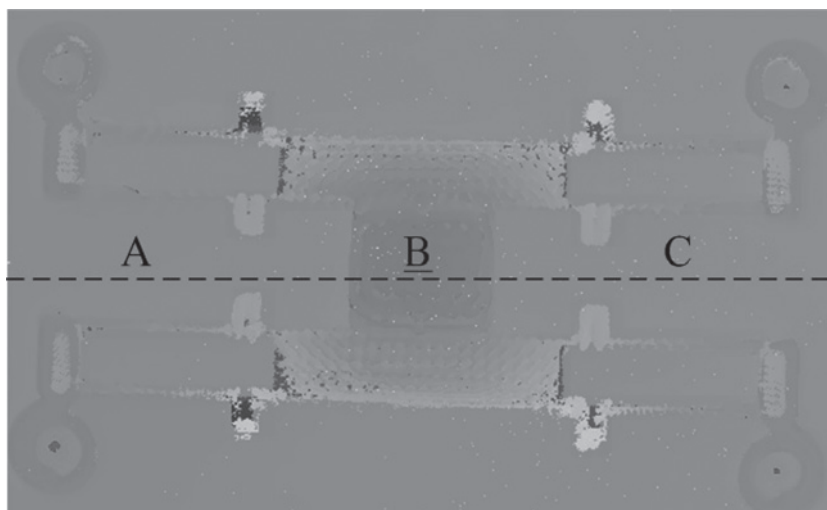


圖 15. 微機械式射頻開關未施加電壓之輪廓。

圖 17 為微機械式射頻開關的插入損失之量測結果，在頻率 35 GHz 時，其插入損失約為  $-0.85$  dB。圖 18 為微機械式射頻開關的反射損失量測結果，在頻率 35 GHz 時，其反射損失約為  $-10.5$  dB；圖 19 為微機械式射頻開關的隔離度量測結果，其最大隔離度發生在頻率 35 GHz，隔離度約為  $-25$  dB。

## 六、結論

本研究已經成功地利用商業化標準互補式金氧半導體製程製作微機械式射頻開關，微機械式射頻開關之電感結構使開關擁有最佳隔離度。本文利用有限元素軟體 Coventor Ware 模擬微開關的機械性

質，以及高頻分析軟體 ADS 模擬微開關的高頻特性。微機械式開關需要後製程處理形成懸浮結構，後製程處理採用反應性離子蝕刻移除電感下方的矽基材及濕蝕刻犧牲層。實驗結果顯示，當微機械式射頻開關未施加偏壓時，在頻率 35 GHz 時，其插入損失為  $-0.8$  dB，反射損失為  $-10.5$  dB；當施加偏壓後，上電極板向下吸附於訊號線，在頻率 35 GHz 時，其隔離度為  $-25$  dB。

## 參考文獻

1. 鄭英周, 李其源, 張培仁, 陳炳輝, 台大工程學刊, **91**, 21 (2004).
2. C. L. Dai, Tai. Y. W, and P. H. Kao, *Sensors*, **7**, 3386 (2007).
3. P. H. Kao, C. L. Dai, C. C. Hsu, and C. Y. Lee, *Sensors*, **9**, 2062 (2009).

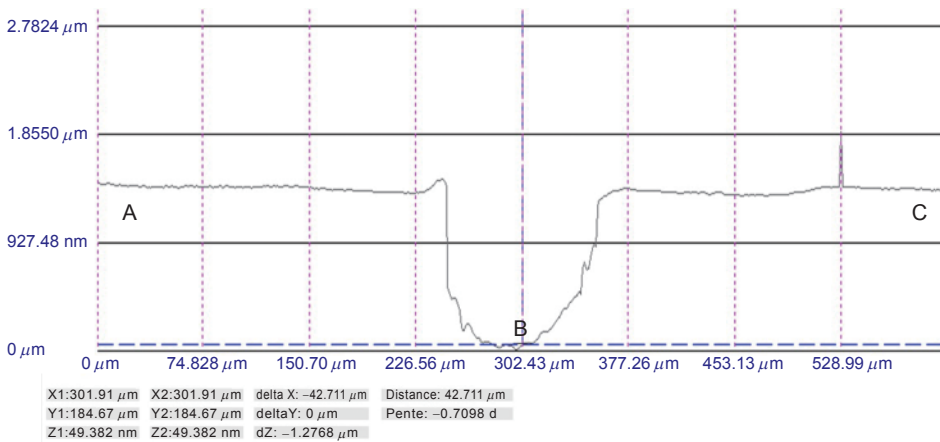
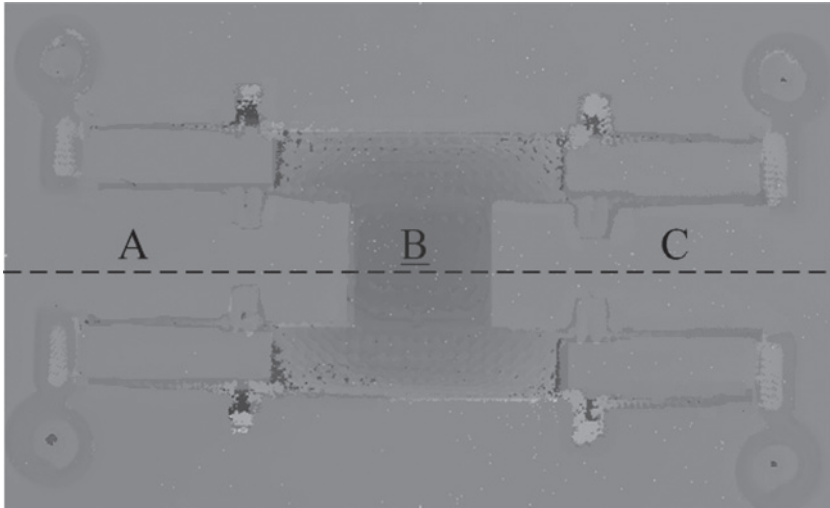


圖 16. 微機械式射頻開關施加 11 V 電壓後之輪廓。

4. M. C. Liu., C. L. Dai, C. H. Chan, and C. C. Wu, *Sensors*, **9**, 869 (2009).
5. 丁志明, 方維倫等, 微機電系統技術與應用, 初版, 新竹: 行政院國家科學委員會精密儀器發展中心, 1163 (2003).
6. C. T. C. Nguyen, L. P. B. Katehi, and G. M. Rebeiz, *Proceedings of the IEEE*, **86**, 1756 (1998).
7. D. Peroulis, S. P. Pacheco, K. Sarabandi, and L. P. B. Katehi, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, **51**,

- 259 (2003).
8. M.Z. Yang, C.L. Dai, P.J. Shih, and Z.Y. Tsai, *Microelectronic Engineering*, **88**, 2242 (2011).
9. Coventor Inc., *CoventorWare Version 2008 Tutorials*.
10. <http://www.ansoft.com/>
11. J. B. Muldavin and G. M. Rebeiz, *IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest*, 2119 (2001).
12. <http://www.cic.org.tw>

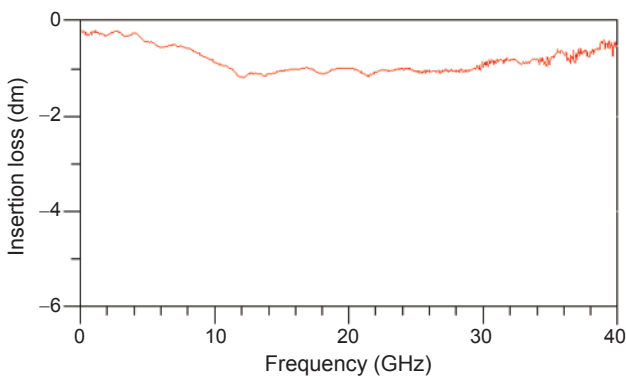


圖 17. 微機械式射頻開關的插入損失之量測。

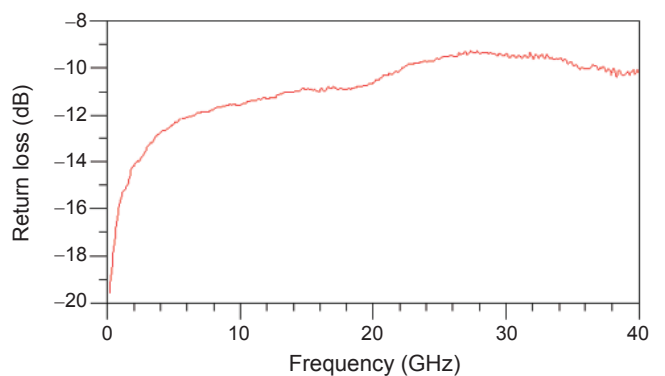


圖 18. 微機械式射頻開關的反射損失之量測。

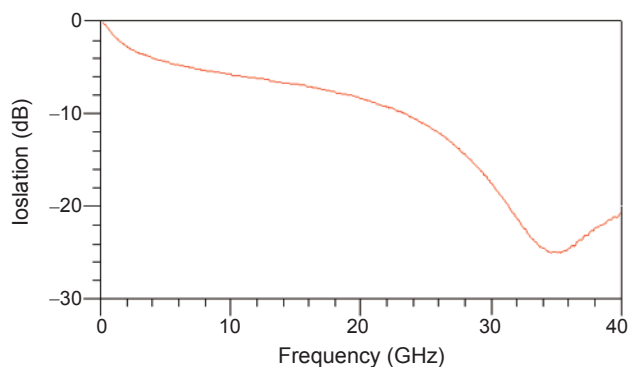


圖 19. 微機械式射頻開關的隔離度之量測。



蔡宗佑先生為國立中興大學機械工程碩士。

Zung-You Tsai received his M.S. in mechanical engineering from National Chung Hsing University.



楊閔智先生現就讀於國立中興大學機械工程研究所博士班。

Ming-Zhi Yang is currently a Ph.D. candidate in the Department of Mechanical Engineering at National Chung Hsing University.



戴慶良先生為國立台灣大學機械工程博士，現任國立中興大學機械工程系特聘教授。

Ching-Liang Dai received his Ph.D. in mechanical engineering from National Taiwan University. He is currently a distinguished professor in the Department of Mechanical Engineering at National Chung Hsing University.