

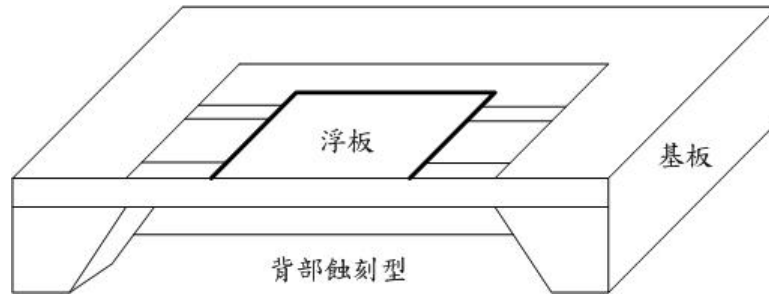
第三章 模擬及製程設計

本章以專業微機電軟體(CoventorWare)做製程上的模擬，針對一般表面懸浮結構(即浮板層,membrane)容易塌陷之兩大原因：液體黏滯效應(sticking effect)與殘餘應力(residual stress)，在製作懸浮結構前，先預測可能塌陷的位置及趨勢，進而在製程中隨時修正參數。唯仍需注意的是，模擬數值並非製程中真正大小，而僅提供各種趨勢發生之可能。

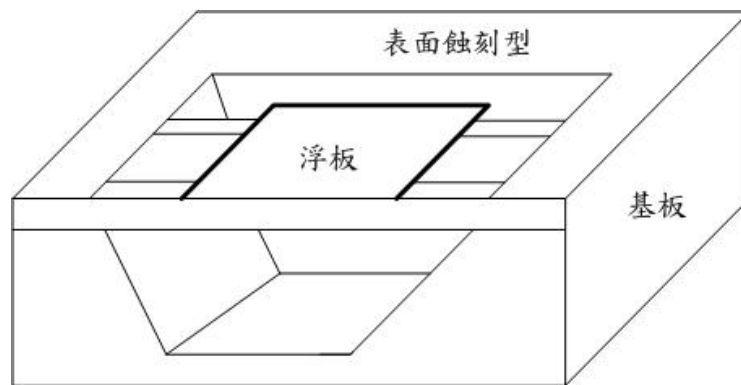
3.1 元件結構說明



一般紅外線感測器(microbolometer)以矽微加工技術製作之方式可分為：塊體微加工技術(bulk micromachining)和表面微加工技術(surface micromachining)，兩者所使用的材料和製程都是從 VLSI 技術轉移過來，而塊體微加工技術是目前比較成熟的技術，因為利用此種方式很容易製作出平整的懸浮薄板，圖(3.1)與(3.2)即為塊體微加工技術其中兩種不同的類型[14]，圖(3.1)是背部蝕刻型(back side etching type)，圖(3.2)則是表面蝕刻型(surface side etching type)。

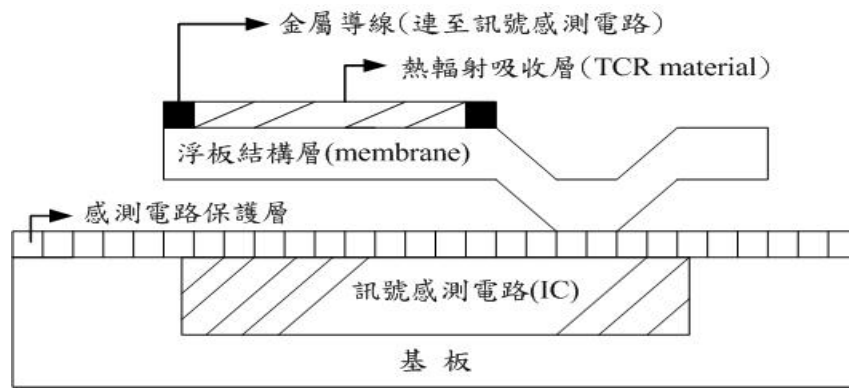


圖(3.1) 背部蝕刻型塊體微加工



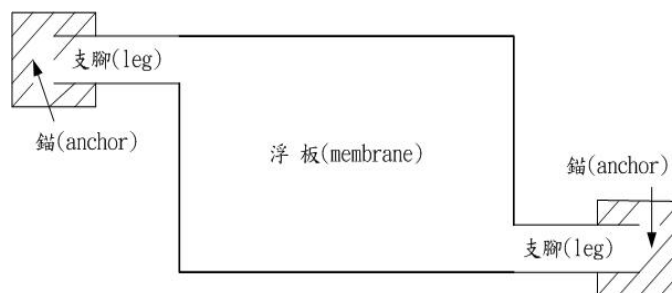
圖(3.2) 表面蝕刻型塊體微加工

從上圖可看出，浮板結構下方都被挖空以降低熱輻射散失速度，所以浮板下方已無法放置感測電路，感測積體電路因此就會佔去晶圓其他面積，若紅外線感測懸浮結構不能和感測電路達成系統積集化的目標，元件整體面積必然增加。圖(3.3)是以表面微加工技術製作的紅外線感測器結構，用表面微加工技術的優點在於：可將感測電路放置於懸浮結構(浮板層)下方，達成系統積集化之目標，進而縮小元件整體面積。



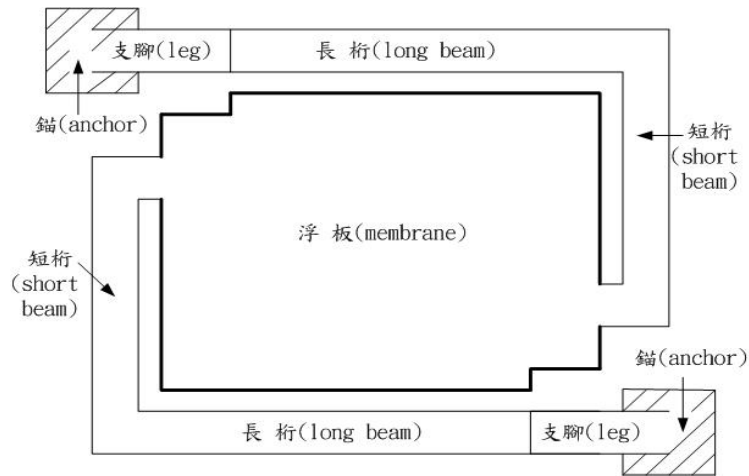
圖(3.3) 以表面微加工技術製作的紅外線感測器側視圖

文獻中，以表面微加工技術製作紅外線感測器較容易實現的幾何形狀，其俯視圖如(3.4)所示[18]，感測器支腳(leg)從基板爬升後直接連至浮板，沒有經過長桁(long beam)和短桁(short beam)，所以在去除犧牲層時，液體黏滯效應以及內部殘餘應力所產生的問題會比較小，但是相對地，浮板與基板間支腳較短，所吸收之熱輻射會很容易地經由支腳固體熱導散失，因此，本文所設計的感測器俯視圖如圖(3.5)所示，其支腳從基板爬升後要先經過長桁、短桁，才連接至浮板，而且短桁特意拉長以延伸相接到浮板中央，目的就是希望藉由上述幾何形狀，有效將所吸收的熱輻射保持在浮板上，不會經由固體熱導輕易散失。



圖(3.4) 一般以表面微加工技術製作的紅外線感測器幾何形狀俯視

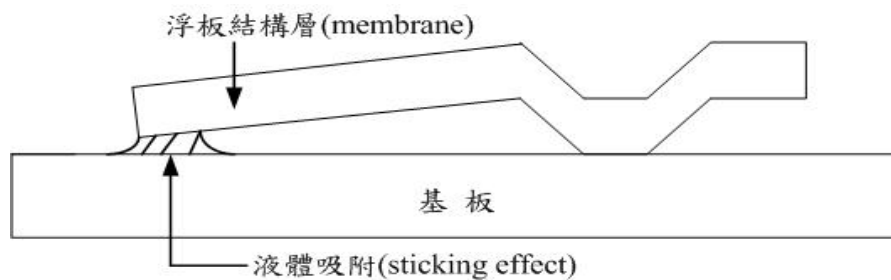
圖



圖(3.5) 本論文所設計的紅外線感測器幾何形狀俯視圖

3.2 元件黏滯效應(Sticking Effect)模擬

黏滯效應(sticking effect)發生於去除浮板結構層和基板間的犧牲層時，中間會有一水層出現，這一水層便產生毛細力(capillary force)，將浮板結構層拉下[22,23]，如圖(3.6)所示：



圖(3.6) 浮板被黏滯效應所下拉示意圖

其毛細力可表示為： $F = \frac{2A\gamma_1 \cos \theta_c}{d}$ ， A 是沾濕面積， γ_1 為液體的表面張力， θ_c 為液體與固體的接觸角， d 為懸浮薄板與基板之間距。

假設，此液體黏滯力大於浮板結構形變的彈性恢復力，浮板結構便會被拉往基板，即使後來液體全部蒸發完，導致黏滯力降為零，也會因為凡得瓦力而使已經接觸在一起的浮板與基板無法分離，因此，浮板結構便會產生永久形變甚而整塊塌陷至基板上。

所以，要解決上述問題可以在去除犧牲層時，採用較低表面張力的液體，以及增加懸浮薄板與基板間之距離。前者與液體的種類和溫度有關，當溫度越高，液體表面張力越低；若液體表面張力越小，黏滯效應就會隨之減少，因此，使用本身表面張力低的液體，如：甲醇、丙酮、IPA(異丙醇)等，對減緩黏滯效應也有助益。增加懸浮薄板與基板間之距離即是加大犧牲層厚度，但如果犧牲層厚度太厚，其伴隨而來的是階梯覆蓋面問題(step coverage)，也就是支腳(leg)爬坡過陡，造成此處應力上升、且光阻旋塗不易，在反應性離子蝕刻(RIE)時，支角爬坡處便容易被打斷，以致懸浮結構製作失敗。

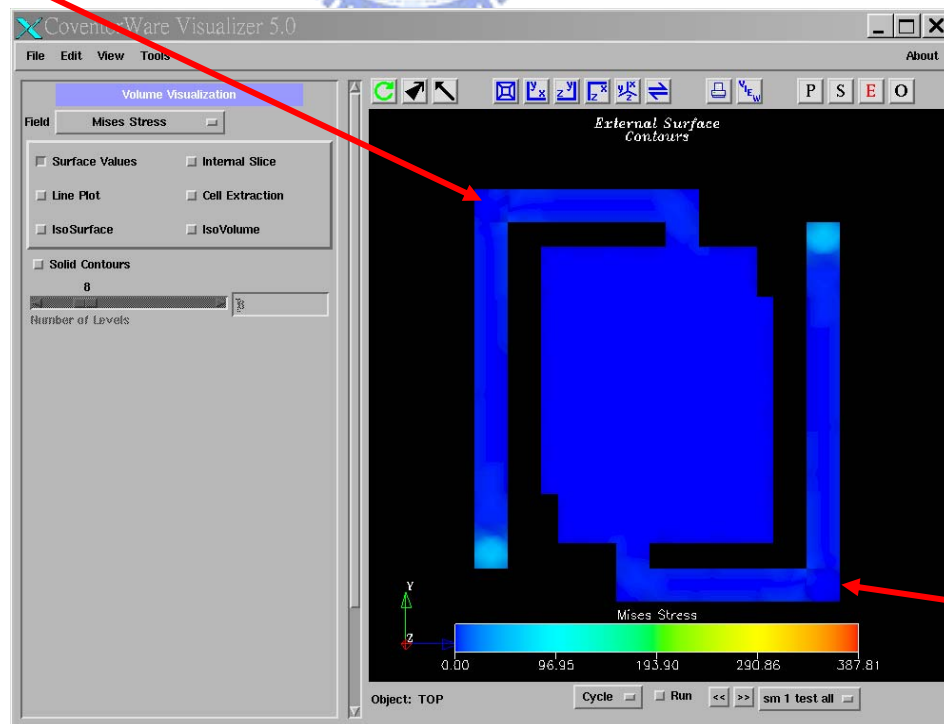
根據文獻[24]，若感測器設計使用於吸收紅外線 8~14 μm 的輻射波段，有著頻寬範圍寬廣、應用容易等優點，並且在考量上述黏滯效應和階梯覆蓋相關問題後，本論文紅外線感測懸浮結構其犧牲層厚度採用 2.5 μm (形成四分之一波長的共振腔)，浮板(懸浮結構層)厚則為 0.5 μm ，以利穿過浮板層的熱輻射經基板反射後，能再一次被懸浮薄板上之熱敏阻材料吸收。

依據以往的經驗，懸浮結構因黏滯效應而塌陷大都在支腳轉角處(因為液體表面張力傾向在最小面積上發生黏著，即下圖(3.7)A.B兩點)，故本節將模擬重點放於：A.B兩點因黏滯效應產生的應力，對整體浮板結構位移形變趨勢之影響。

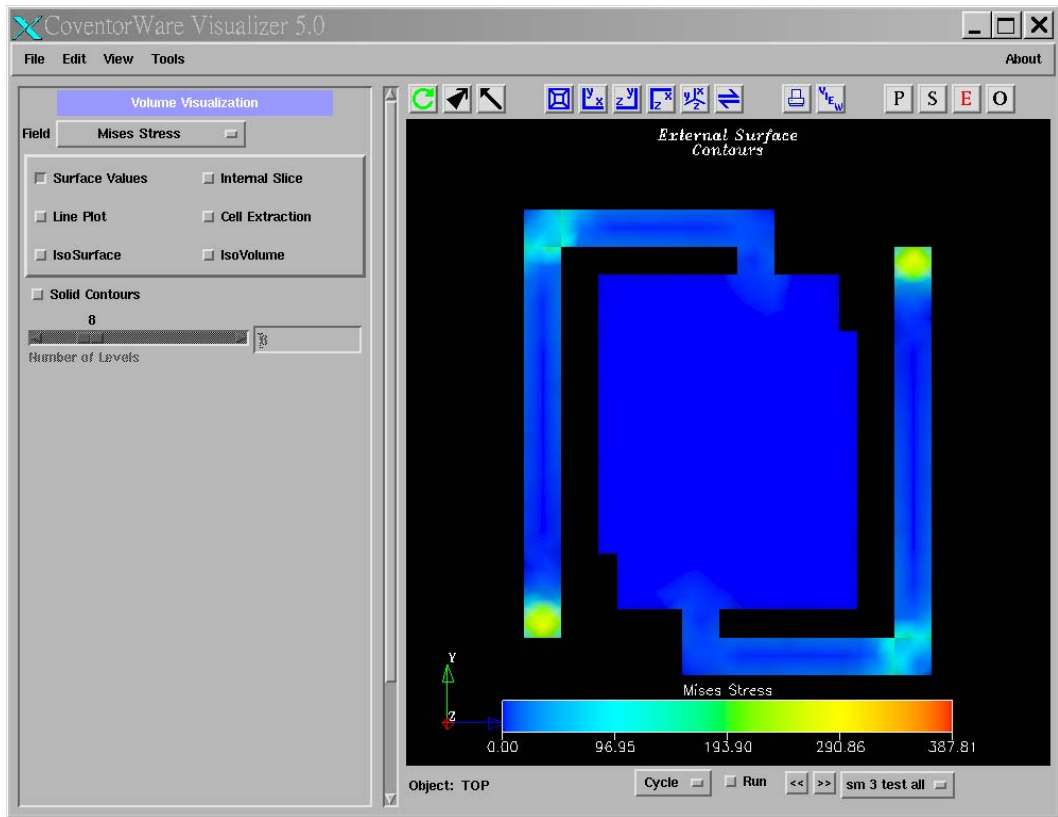
圖(3.7)到(3.9)所示，分別為施加 0.001 MPa、0.005 MPa、0.012 MPa 外力於 A.B 兩點的應力變化圖，而圖(3.10)為施加 0.012 MPa 外力時，整體浮板 3D 立體結構應力表示圖。

圖(3.11)到(3.13)所示，分別為施加 0.001 MPa、0.005 MPa、0.012 MPa 外力於 A.B 兩點的懸浮結構形變位移圖，而圖(3.14)為施加 0.012 MPa 外力時，整體浮板 3D 立體結構形變表示圖。

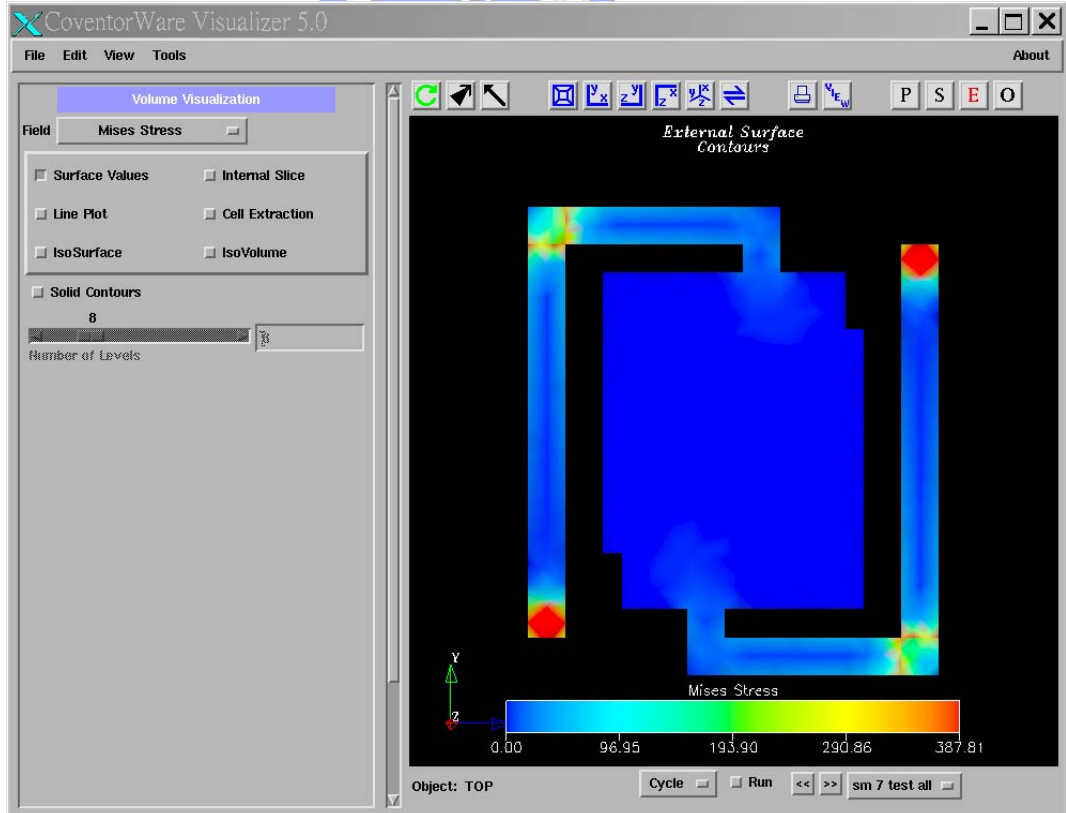
A 點



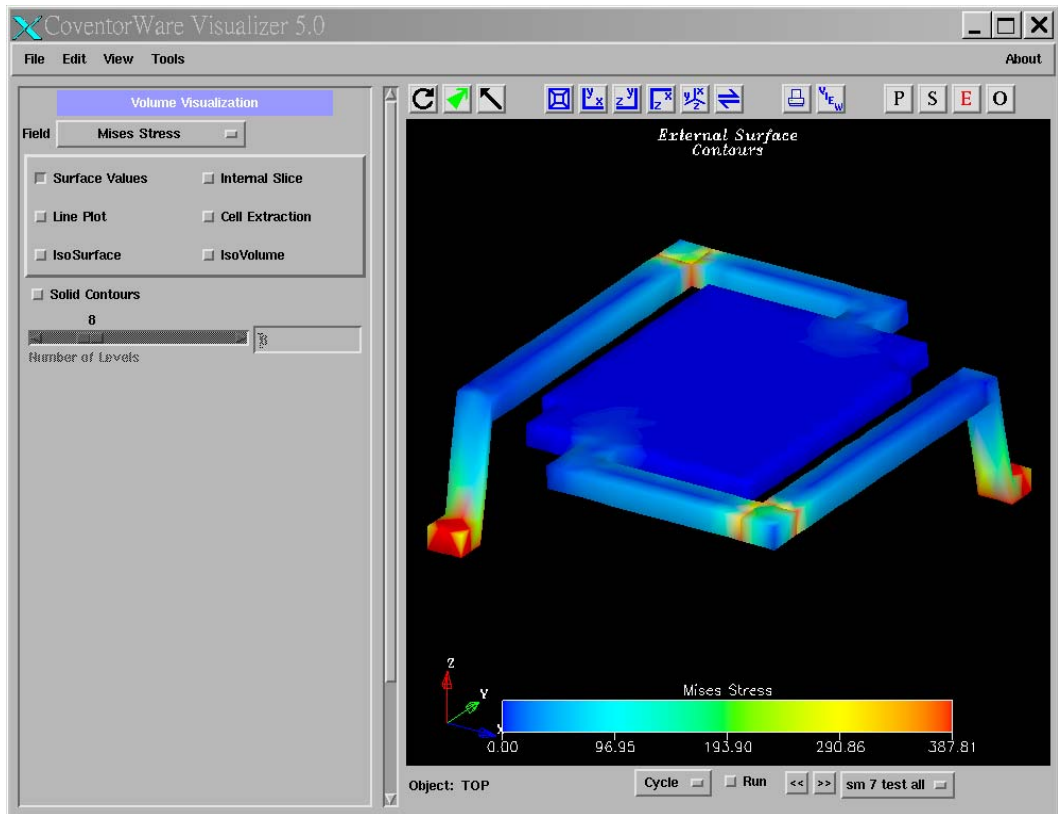
圖(3.7) 施加 0.001 MPa 外力於浮板支腳轉角處的應力變化 B 點



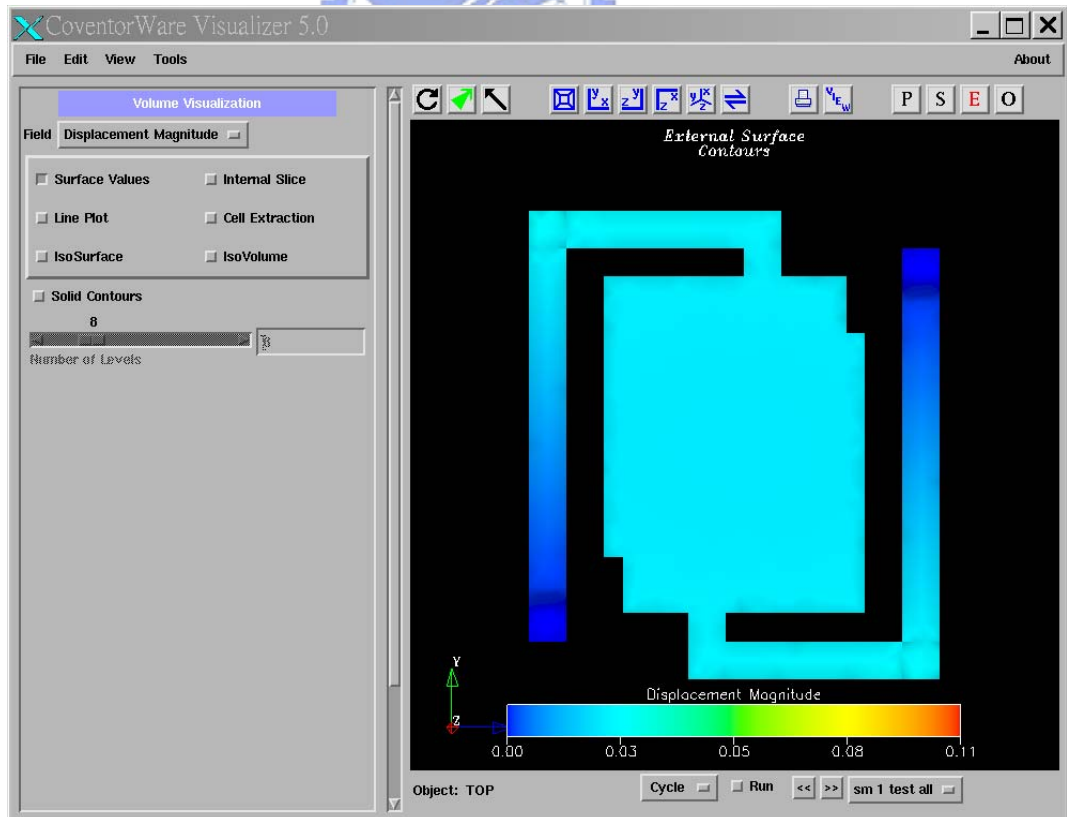
圖(3.8) 施加 0.005 MPa 外力於浮板支腳轉角處的應力變化



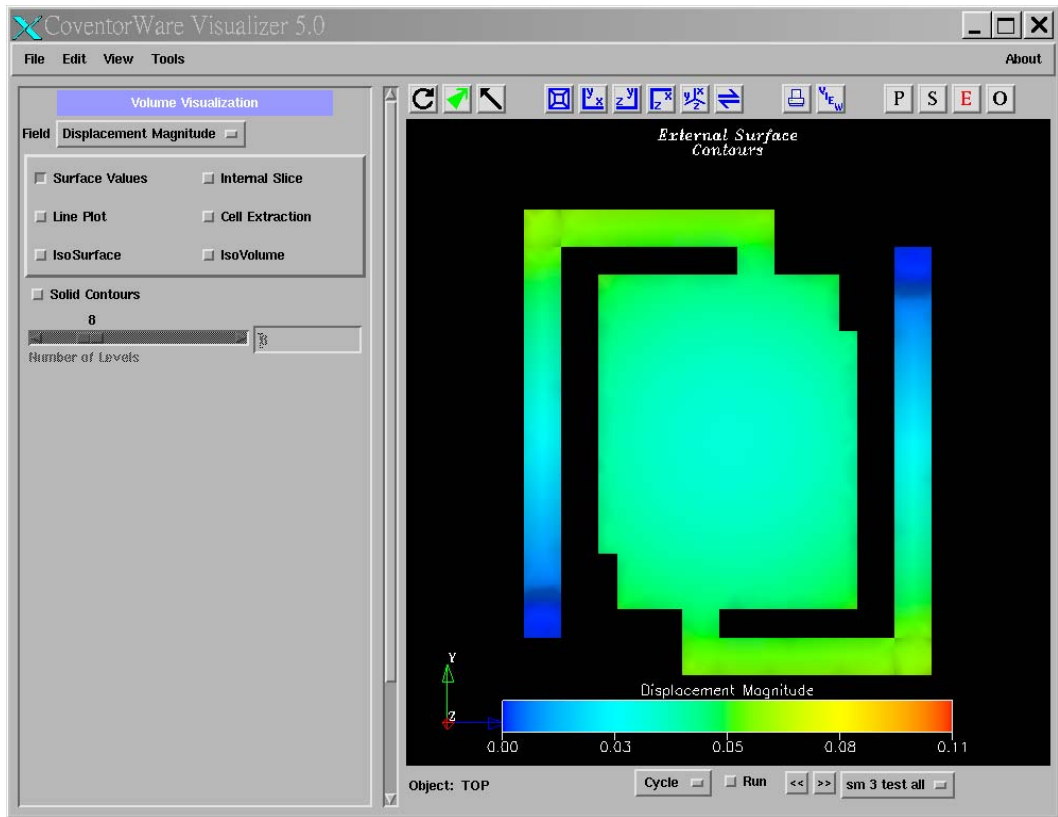
圖(3.9) 施加 0.012 MPa 於浮板支腳轉角處的應力變化



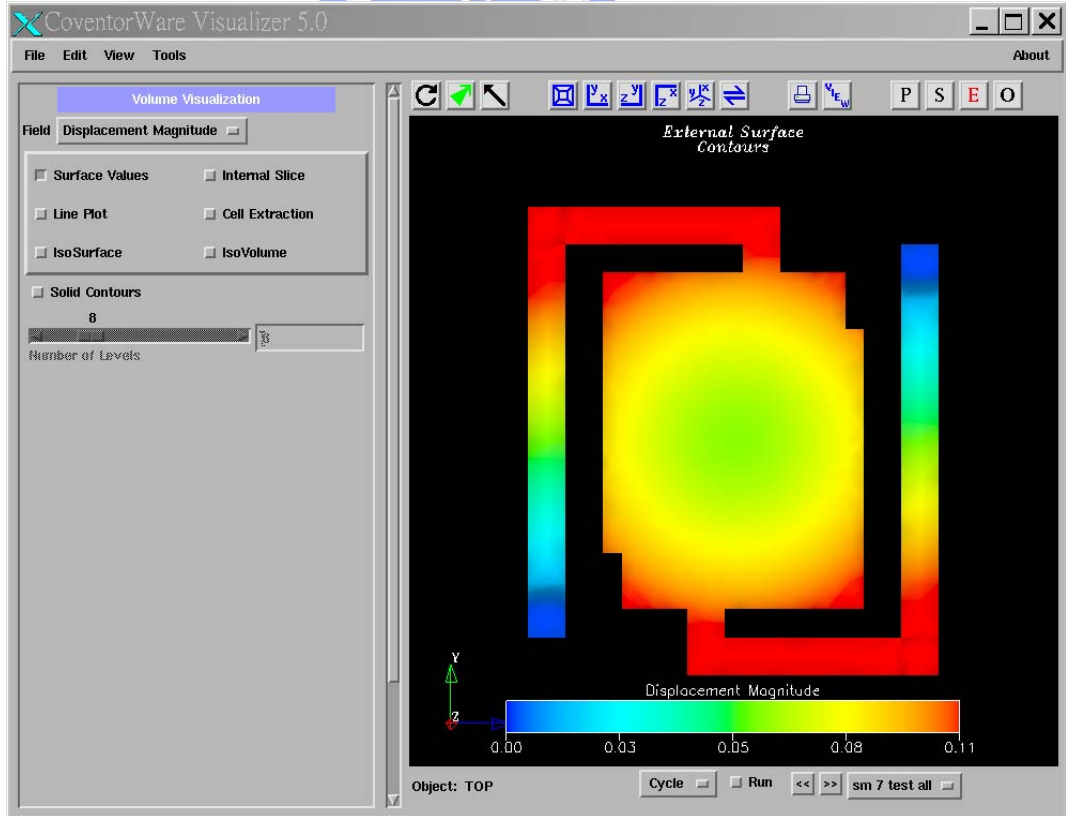
圖(3.10) 施加 0.012 MPa 外力時，整體浮板 3D 立體結構應力表示圖



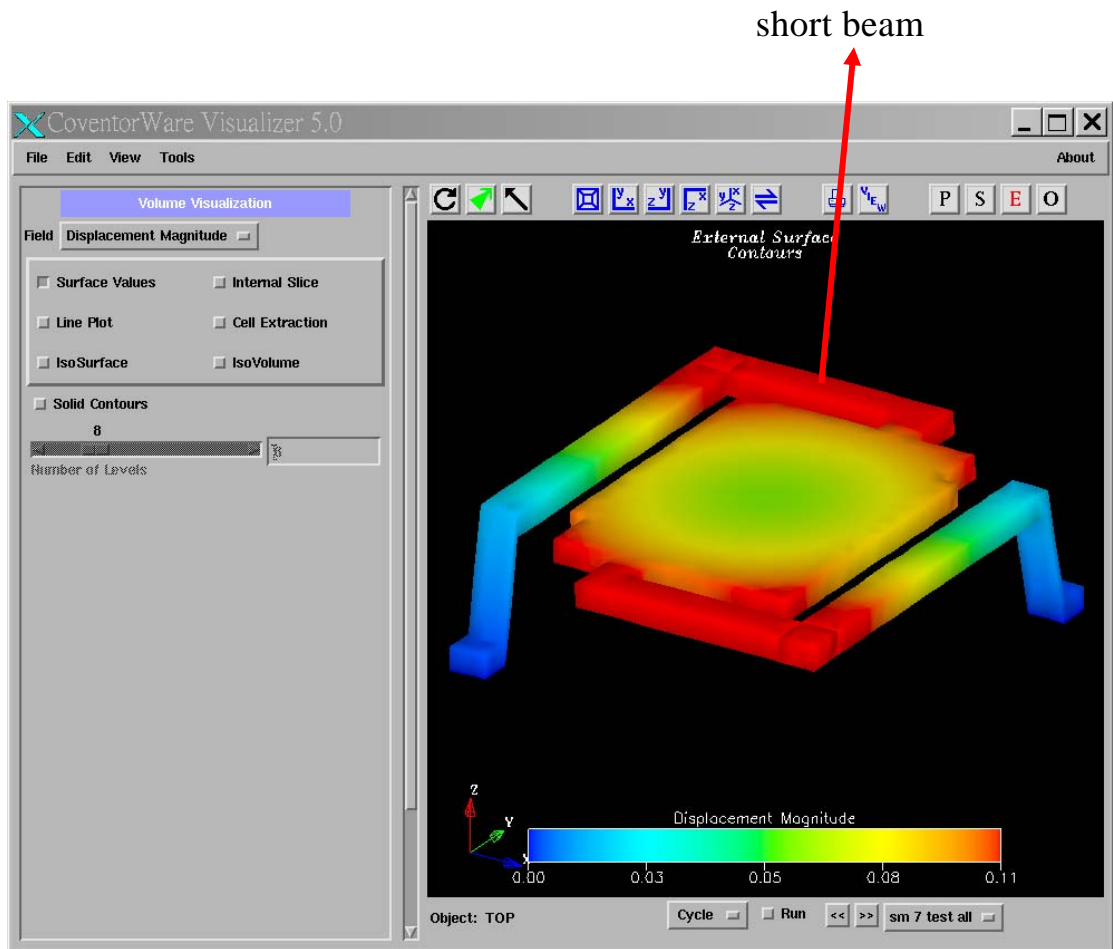
圖(3.11) 施加 0.001 MPa 外力於支腳轉角處之浮板結構形變位移圖



圖(3.12) 施加 0.005 MPa 外力於支腳轉角處之浮板結構形變位移圖



圖(3.13) 施加 0.012 MPa 外力於支腳轉角處之浮板結構形變位移圖



圖(3.14) 施加 0.012 MPa 外力時，整體浮板 3D 立體結構形變表示圖

上圖中，顏色越紅代表著應力與形變量越大，我們可發現應力最大的地方在長短懸桁(long beam and short beam)相接處、以及黏附在基板上的兩錨狀(anchor)點；而整體懸浮結構形變位移較大的地方也產生於長短懸桁相接的位置，以至短桁區、短桁與浮板相接等處，另外值得注意的是，浮板四緣也是黏滯效應導致大形變量的地方，且浮板中央的形變位移趨勢正如前所推測，因為表面張力使液體傾向吸附於懸浮結構中最小面積，所以，並沒有明顯的形變量產生。

3.3 元件殘餘應力(Residual Stress)模擬

殘餘應力定義為：材料經製造或加工後，應力未完全釋放，並且仍殘存於材料中的現象。在單一軸向上(uniaxial)的殘餘應力，可以數學多項式的總和表示為：

$$\sigma = \sum_{K=0}^{\infty} \sigma_K \left(\frac{y}{h/2} \right)^K \quad (3.1)$$

其中 h 是薄膜厚度， y 為縱向座標，它的原點位在膜厚 $h/2$ 的平面，範圍從 $(-h/2)$ 到 $(h/2)$ 。假設我們只考慮(3.1)式的近似解(只展開至一次項)，則殘餘應力可視為由一均勻應力(uniform stress, σ_0)和一梯度應力(gradient stress, $\sigma_1(2y/h)$)疊加而成，而且，均勻應力又可細分為壓應力或張應力。

在半導體製程中，舉凡薄膜沉積(如：電漿輔助化學氣相沉積,PECVD)、反應性離子蝕刻(RIE)或製程中有熱處理(有熱梯度變化)等步驟時，均會產生應力，這是因為材料經離子(電漿)撞擊，形成各種缺陷，導致原子與原子間，鍵結結構改變；或者因為兩層材料的熱膨脹係數不同，造成熱應力。如果製程後能量繼續殘留於晶格或塊體中，成長出的薄膜(film)，便會具有殘餘應力(residual stress)。這些不同的應力對材料也有不同程度的影響和破壞，例如，壓應力會

造成薄膜挫曲形變(buckling)，而張應力會導致薄膜產生裂縫(crack)[25]，至於梯度應力則會因等效的彎曲力矩(bending moment)而使得微結構彎曲變形。

另外，當浮板結構成功被釋放(release)後，仍有可能因電荷累積或晶圓掉落、處理不當，以及在封裝、輸送時遇到種種外力，這些外力也有很大的機會再使懸浮結構塌陷。所以，本節除了模擬製程後產生的殘餘應力外，外界所造成的應力也一併放入模擬範圍中。

如表(1)所示，為幾種常見細微加工材料的熱導、比熱以及楊氏係數..等比較關係：

表(1) 常見之矽微加工材料特性比較表

材料名稱	熱膨脹係數 ($10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)	楊氏係數 (dyne/cm^2)	熱導係數 ($\text{W}/\text{cm}^{\circ}\text{C}$)	比熱係數 ($\text{J}/\text{g}^{\circ}\text{C}$)
矽 (Silicon)	2.33~2.6	1.90×10^{12}	1.57	0.30
二氧化矽 (SiO_2)	0.4~0.55	0.73×10^{12}	0.014	0.4
氮化矽 (Si_3N_4)	2.8~7.0	1.55×10^{12}	0.185	--
複晶矽 (polySilicon)	2.33	--	--	0.32

從上表我們可知氮化矽有較高的楊氏係數，所以機械結構較強，但是相對的，其熱膨脹以及熱導都較二氧化矽高出許多。表(2)列舉本校毫微米中心 PECVD 機台薄膜沉積之常用參數[26]，表中顯示，氮化矽的應力也比二氧化矽來的高；然而，為了模擬製程中可

能會遇到應力控制較差的情況，因此，對於浮板材質，我們採用氮化矽薄膜做模擬。

表(2) 常見矽微加工材料的 PECVD 機台參數與特性比較表

材料名稱	製程壓力 (mT)	製程功率 (W)	製程溫度 (°C)	應力 (MPa)	組成成分 (sccm)		
					SiH ₄	NH ₃	N ₂
氮化矽-1 (SiN _x H _y -1)	950	50	300/250	-300~400	65	25	1000
氮化矽-2 (SiN _x H _y -2)	500	50	300/250	-800~1000	20	80	500
二氧化矽 (TEOS-SiO ₂)	300	200	300/250	+150~250	400	10	
非晶矽 (amorphous-Si)	300	15	250/100	+300~400	100		

對於浮板結構層之氮化矽，在模擬程式中的材料參數設定如下：

Elastic Constant(MPa)	2.22e+5
Poisson Ratio	2.7e-1
Density(kg/um^3)	2.85e-15
Stress(MPa)	(+/-)1.0e+2
TCE(1/K)	1.6e-6
Thermal Conductivity(pW/umK)	1.5e+7
Specific Heat(pJ/kgK)	7.106e+14
Dielectric Constant	8.0

針對殘餘應力的模擬，總共分成六種狀況，如下表(3)所示，兩個主要的變數為製程本身產生的殘餘應力和外界所造成的外來應力(簡稱外力)，模擬方法為先將其中一個變數固定，讓另一個變數隨設定參數變動(此變數稱為可變動變數)，待此狀況模擬完畢後，把之前固定與可變動的變數角色互換，再進行模擬，最後把兩個變數皆設

成可變動變數，在兩者同時變化的情況下，得到交互影響之模擬結果。以狀況(一)為例，固定變數、可變動變數分別是製程殘餘應力以及外力，所以製程殘餘應力被固定在-100 MPa，而外力則從 0.001 MPa 一直增大到 0.012 MPa，因此，藉由模擬狀況(一)我們可以推知，當浮板結構殘留有 100 MPa 的壓應力時，施加外力所造成的影響。

	狀況(一)	狀況(二)
殘餘應力(MPa)	固定-100	固定+100
外力(MPa)	0.001, 0.002, 0.005, 0.008, 0.009, 0.01, 0.012	0.001, 0.002, 0.005, 0.008, 0.009, 0.01, 0.012
	狀況(三)	狀況(四)
殘餘應力(MPa)	-100, -1000, -2000, -3000, -4000	+100, +1000, +2000, +3000, +4000
外力(MPa)	固定 0.001	固定 0.001
	狀況(五)	狀況(六)
殘餘應力(MPa)	-100, -1000, -2000, -3000, -4000	+100, +1000, +2000, +3000, +4000
外力(MPa)	0.001, 0.002, 0.005, 0.008, 0.009	0.001, 0.002, 0.005, 0.008, 0.009

(表中“-”號代表壓應力，“+”號代表張應力，外力施力方向為由上往下)

如下表(4)所示，為表(3)之模擬結果分析與比較：

	狀況(一)	狀況(二)
浮板結構應力變化趨勢 (stress trend)	應力產生始於支腳(leg) 爬坡位置以及長短懸桁 等處，隨著外力變大，會	與狀況(一)相同

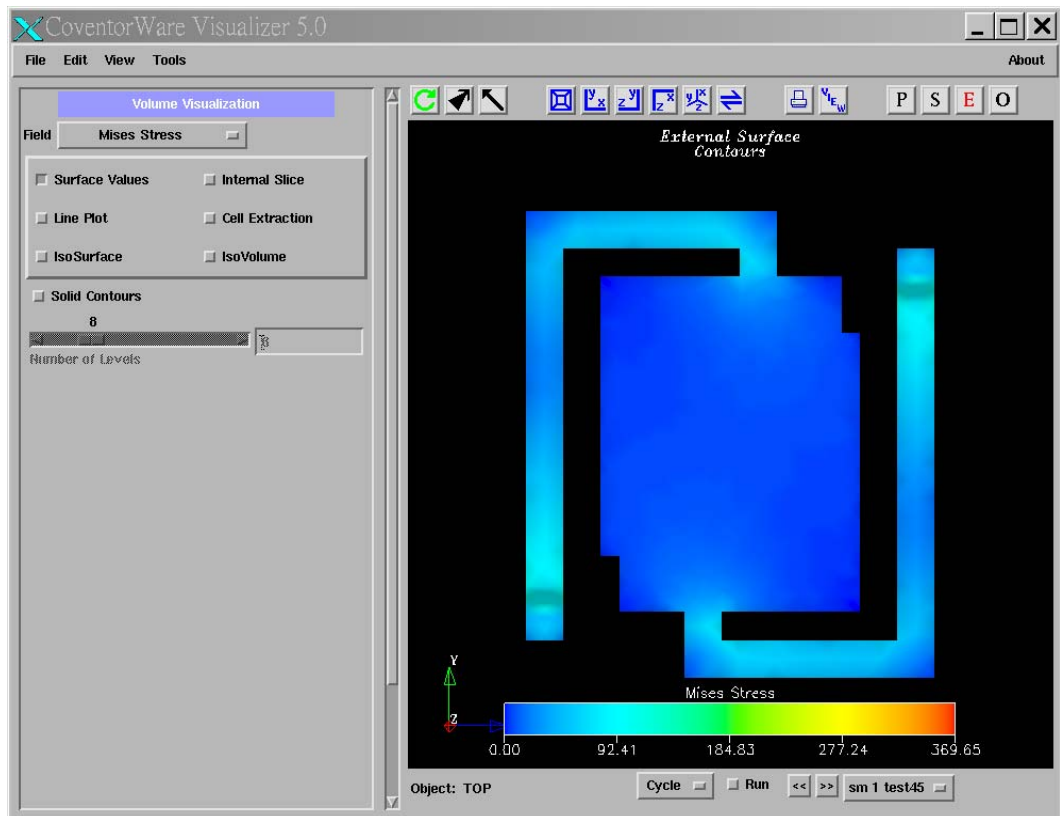
	從長桁(long beam)一直延伸到短桁(short beam)以至和浮板相接處，其中，最大應力變化量發生於支腳爬坡的位置；但是在長短懸桁轉角處、浮板中央及黏附在基板上的兩錨狀(anchor)點，應力並沒有明顯的變化	
浮板結構形變位移趨勢 (displacement trend)	形變位移由浮板正中間開始，並且隨外力變大延伸至短桁處；在兩錨狀點、支腳爬坡處以及長桁並沒有明顯的變形	與狀況(一)相同
	狀況(三)	狀況(四)
浮板結構應力變化趨勢 (stress trend)	應力產生始於支腳爬坡以及長短懸桁等處，隨著結構殘餘壓應力上升，最大應力變化量會發生於黏附基板上的兩錨狀點，而分部在長桁和短桁之應力也會跟著增加	應力產生點、最大應力發生的地方以及變化趨勢和狀況(三)大致相同；但不同的是，隨著殘餘張應力上升，整體浮板結構之總應力變化相較於狀況(三)，有明顯地下降
浮板結構形變位移趨勢 (displacement trend)	形變位移由浮板正中間開始，並且隨著結構殘餘壓應力變大延伸至短桁處，其中，最大形變位移量發生在短桁要和浮板相接的轉彎角位置；在兩錨狀點、支腳爬坡處以及長桁並沒有明顯的變化	形變位移趨勢和狀況(三)完全相反。最大位移量一開始便產生，並在整塊浮板結構以及部分短桁區域造成明顯位移，但隨著結構殘餘張應力上升，較顯著的變化量即轉移至短桁要和浮板相接之轉彎角與浮板邊緣處，最後，整體懸浮結構位移變化趨緩
	狀況(五)	狀況(六)
浮板結構應力變化趨勢 (stress trend)	應力產生始於支腳爬坡以及長短懸桁等處，隨著結構殘餘壓應力與外力上升，黏附在基板上之兩	與狀況(五)相同

	<p>錨狀點開始有明顯的應力變化，並且此應力變化會延伸至支腳爬坡處，最後使長短懸桁、支腳、兩錨狀點和短桁連接浮板處均承受很大的應力值</p>	
<p>浮板結構形變位移趨勢 (displacement trend)</p>	<p>形變位移由浮板正中間開始，並且隨著結構殘餘壓應力與外力變大延伸至短桁處，其中，最大形變位移量發生在短桁要和浮板相接的轉彎角位置；但是在兩錨狀點、支腳爬坡處以及長桁靠近支腳部分並沒有明顯的變化</p>	<p>整體趨勢和狀況(五)相同，唯獨當結構殘餘張應力上升，有效地減少了懸浮薄板之形變位移量</p>

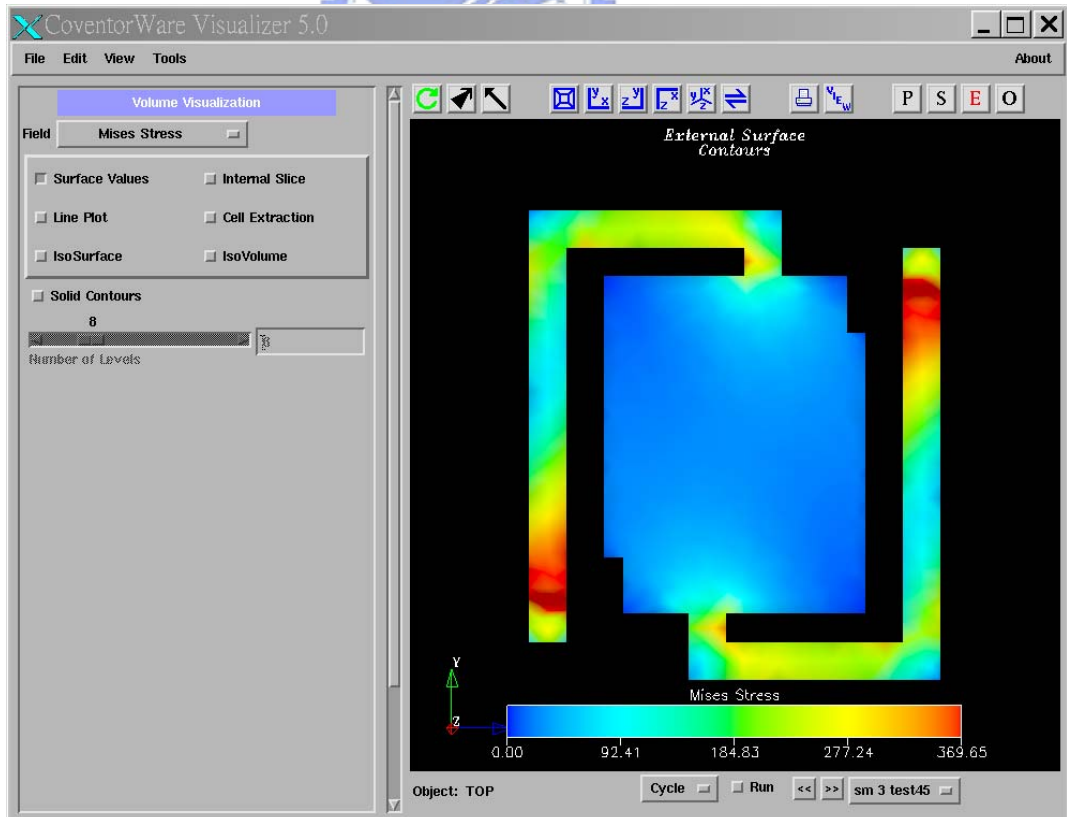
根據以上所探討的六種狀況，在圖例方面僅列舉狀況(一)做說明，其餘狀況之浮板應力變化和形變位移表示圖，將一一詳列於附錄中。

如下圖(3.15)到(3.17)所示，分別為施加 0.001 MPa、0.005 MPa、0.012 MPa 之外力於懸浮結構的應力變化圖，圖(3.18)為施加 0.012 MPa 的外力時，整體浮板 3D 立體結構應力表示圖。

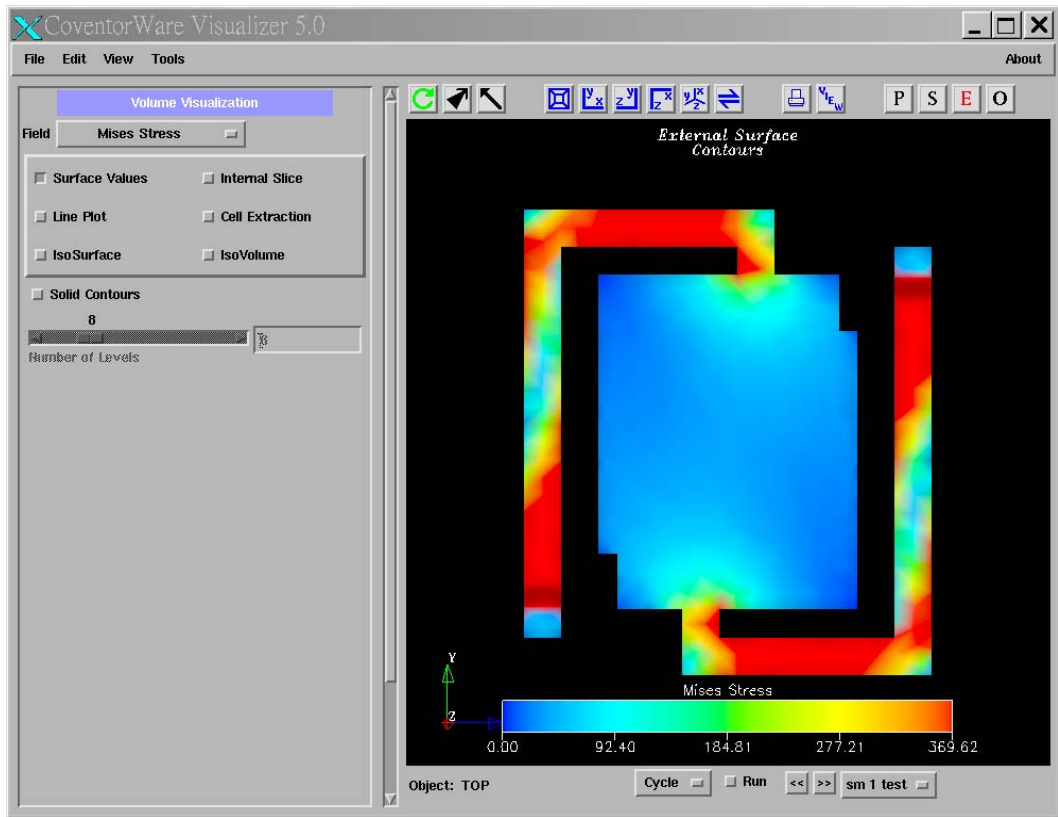
圖(3.19)到(3.21)分別為施加 0.001 MPa、0.005 MPa、0.012 MPa 之外力於懸浮結構的形變位移圖，而圖(3.22)為施加 0.012 MPa 的外力時，整體浮板 3D 立體結構形變表示圖。



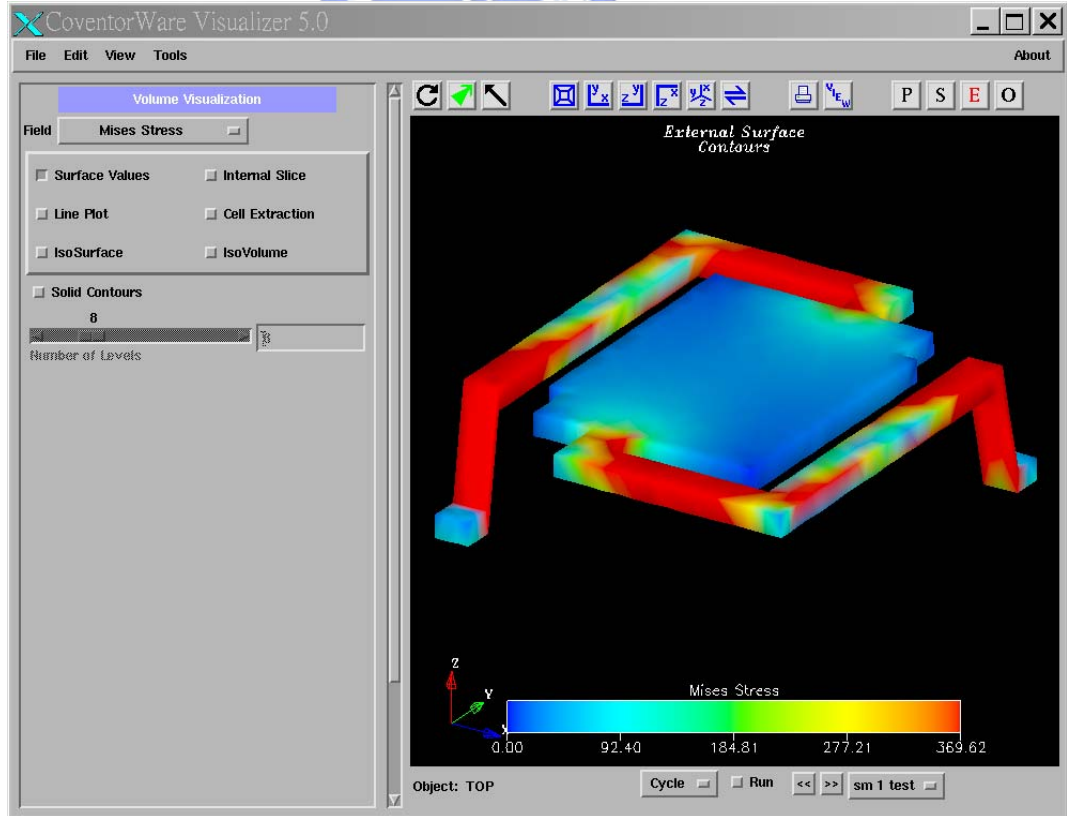
圖(3.15) 施加 0.001 MPa 外力於浮板結構的應力變化圖



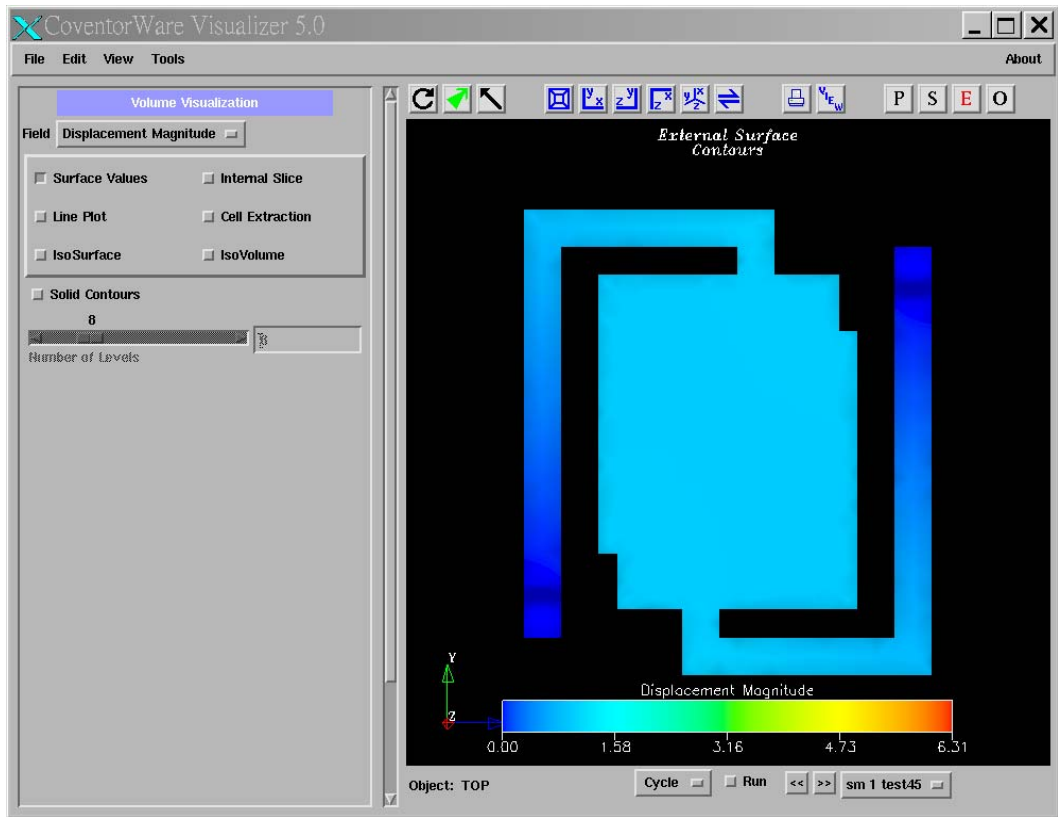
圖(3.16) 施加 0.005 MPa 外力於浮板結構的應力變化圖



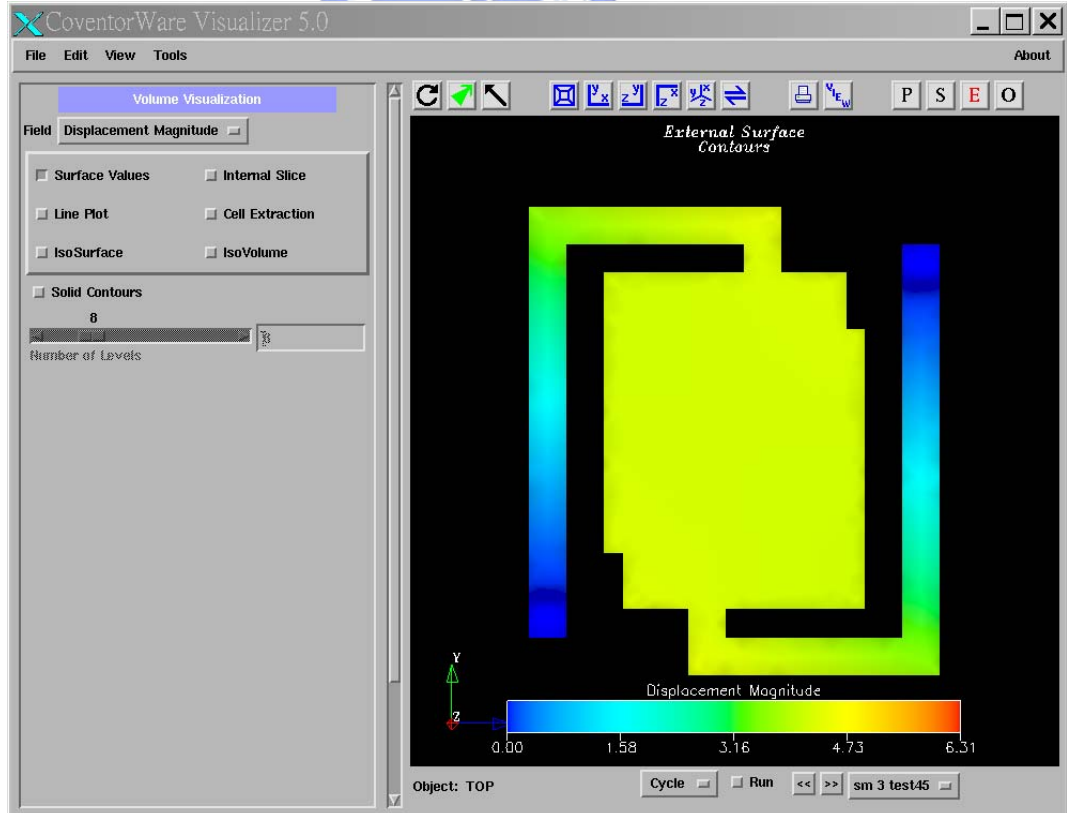
圖(3.17) 施加 0.012 MPa 外力於浮板結構的應力變化圖



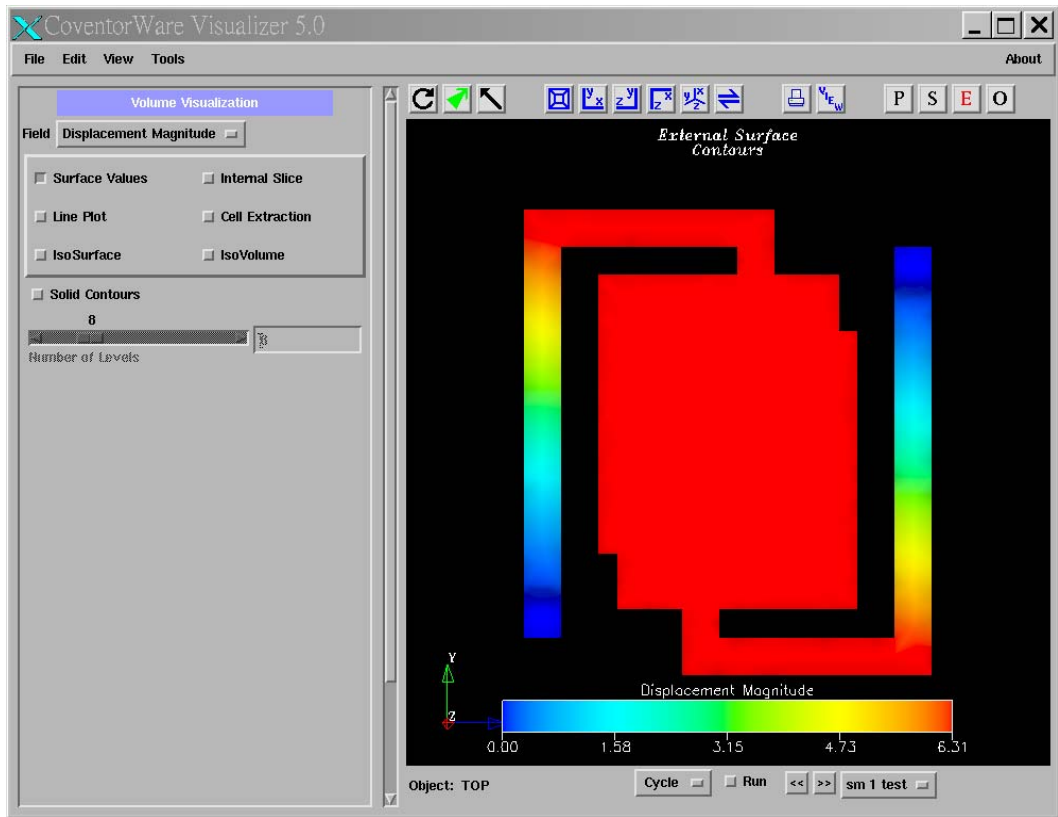
圖(3.18) 施加 0.012 MPa 外力時，整體浮板 3D 立體結構應力表示圖



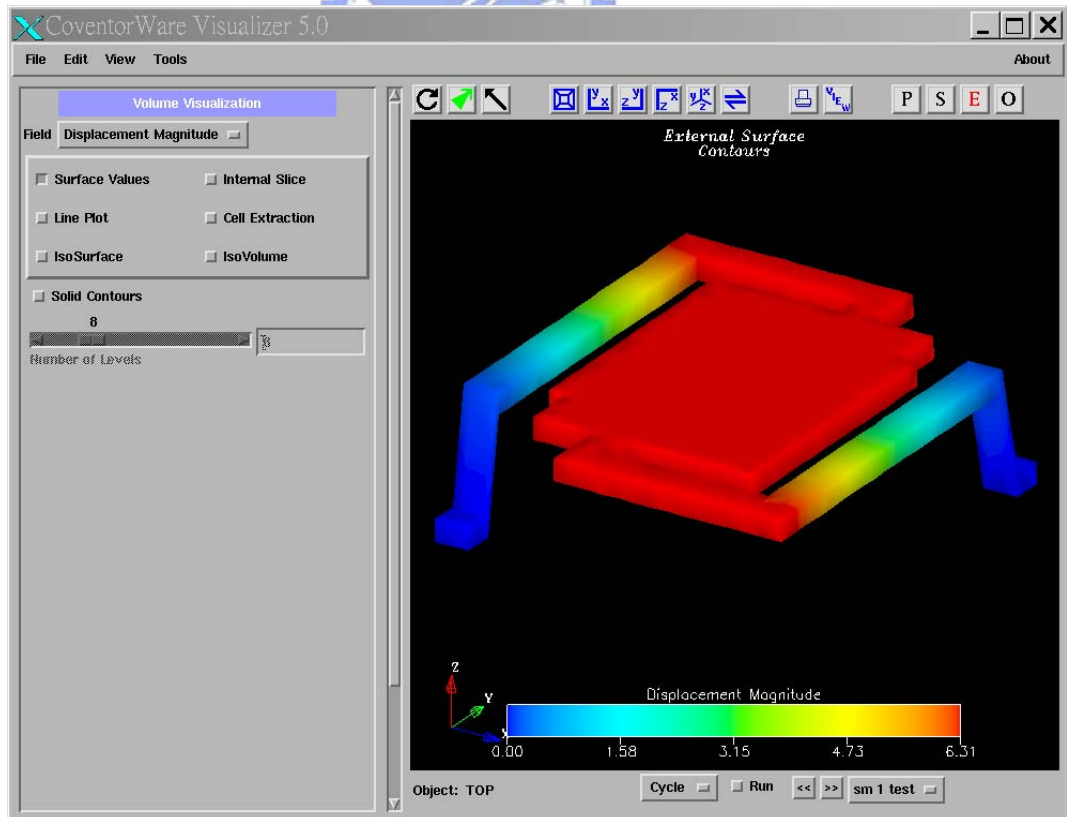
圖(3.19) 施加 0.001 MPa 外力於浮板結構的形變位移圖



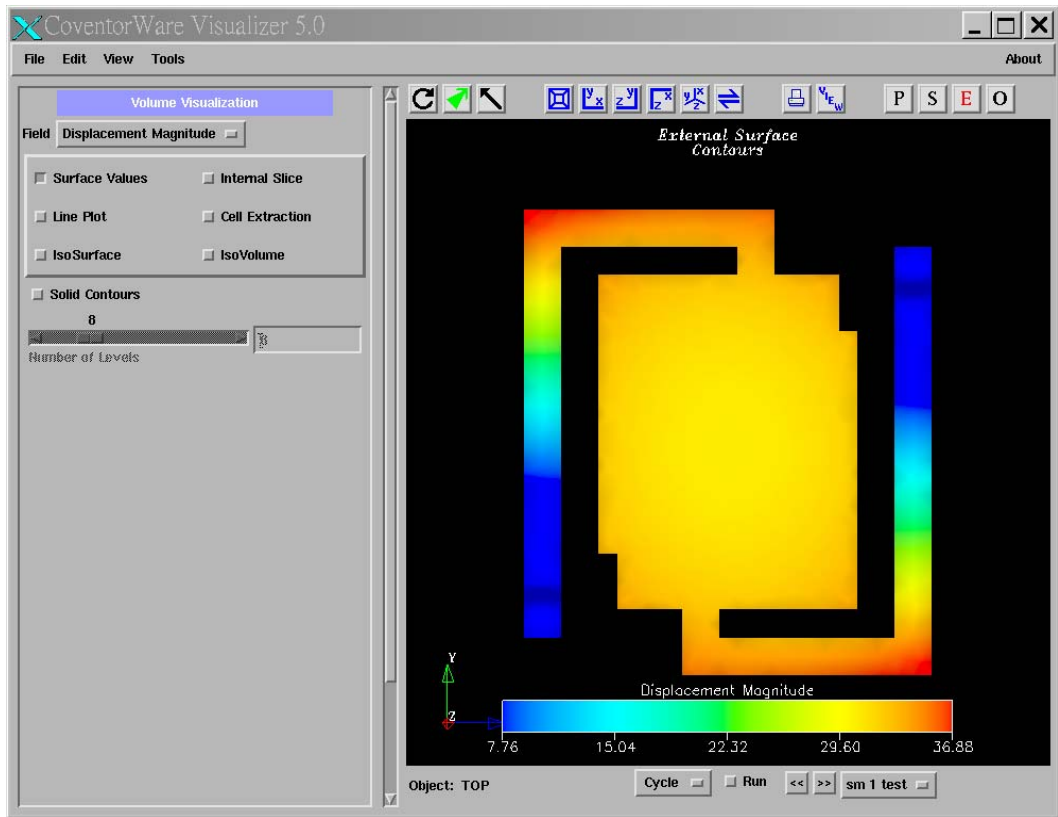
圖(3.20) 施加 0.005 MPa 外力於浮板結構的形變位移圖



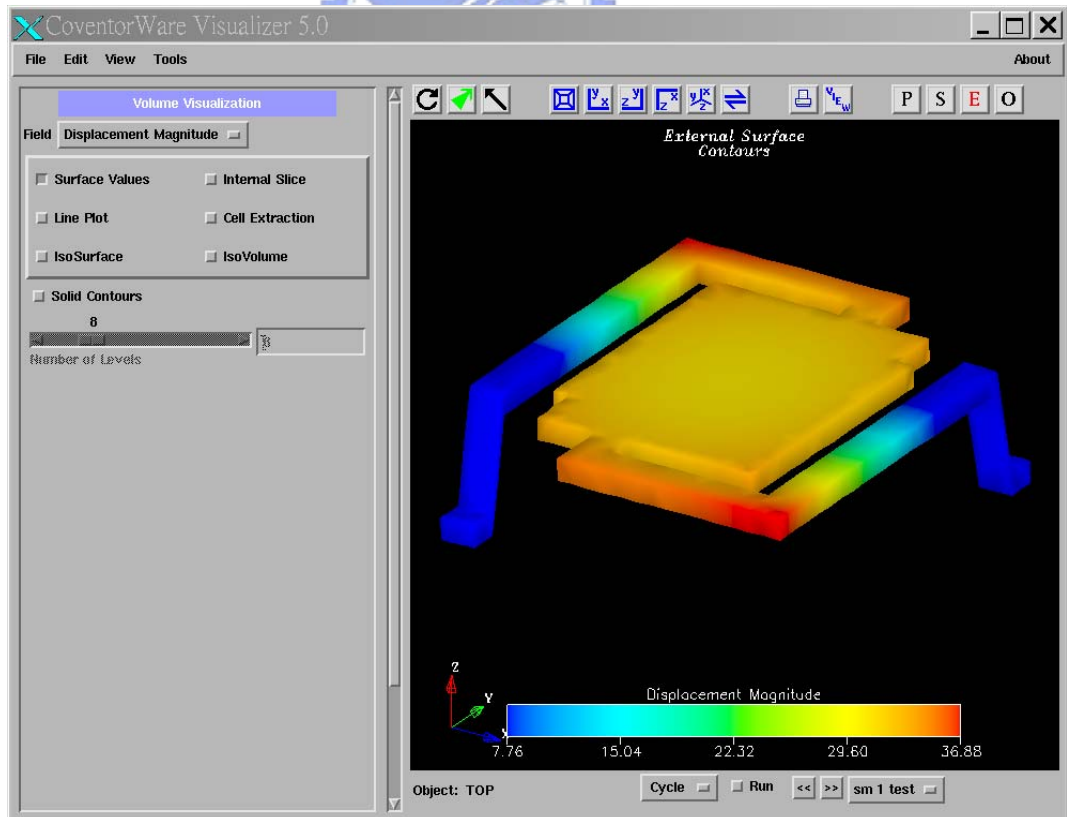
圖(3.21) 施加 0.012 MPa 外力於浮板結構的形變位移圖



圖(3.22) 施加 0.012 MPa 外力時，整體浮板 3D 立體結構形變表示圖



圖(3.23) 施加 0.1 MPa 外力於浮板結構的形變位移圖



圖(3.24) 施加 0.1 MPa 外力時，整體浮板 3D 立體結構形變表示圖

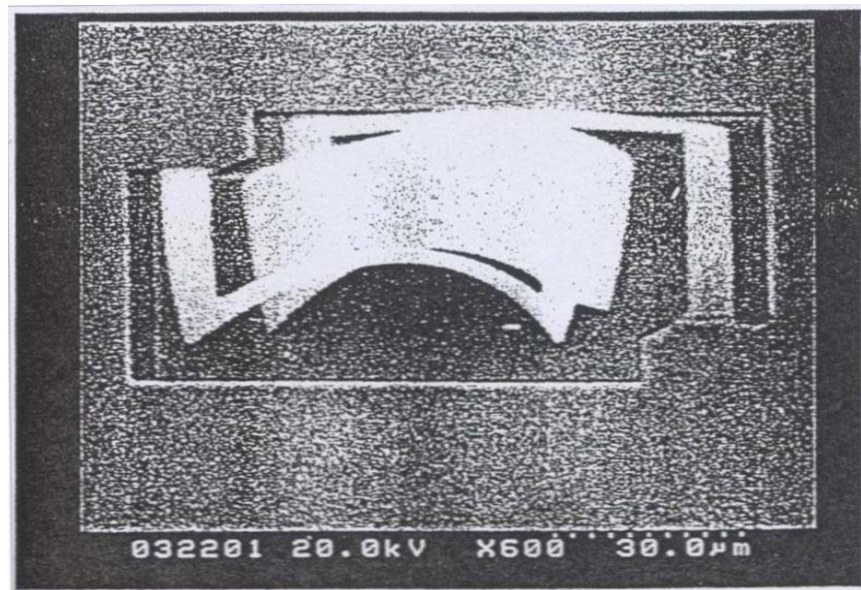
另外，圖(3.23)則為施加較大外力(0.1 MPa)於懸浮結構的形變位移圖，而(3.24)是整塊懸浮薄板的 3D 立體結構形變位移表示圖。

上圖中，顏色越紅代表著應力與形變量越大，我們可發現當外力由小變大，懸浮結構所呈現的應力會由支腳爬坡處開始增大，接著從長桁(long beam)以至短桁(short beam)跟著上升，最後延伸至與浮板相連處，並非產生於浮板中央或黏附在基板上的兩錨狀(anchor)點，另外，長短懸桁轉角處之 A.B 兩點應力並沒有明顯地隨上述趨勢增加。

在形變位移量(displacement)部分，整體浮板結構之位移是由浮板正中間延伸至短桁處，在兩錨狀(anchor)點、支腳爬坡處以及長桁並沒有明顯的變形，結果和應力變化之趨勢相反。另外，如圖(3.23)以及(3.24)所示，當外界應力大幅上升至 0.1 MPa 時，整體浮板結構最大位移量已非在浮板正中間，而是發生於長桁和短桁相接的轉彎邊角(即 A.B 兩點)，這表示當外力大到一個數量級後，將會和黏滯效應一起加大長短懸桁在轉彎邊角的位移形變量。

圖(3.25)是受黏滯效應、殘餘應力與外界應力交互影響下，元件懸浮結構的 SEM 照片[26]。因為浮板結構兩端被固定於基板上，導致圖中懸浮薄板和長短懸桁均明顯變形，我們也可以看到，在兩支角處有塌陷的傾向，所以，整體浮板結構形變位移之趨勢，和模擬

所預測的結果完全吻合，藉此，驗證了模擬可靠度。



圖(3.25) 受黏滯效應、殘餘應力與外力影響下，浮板結構的 SEM 照片

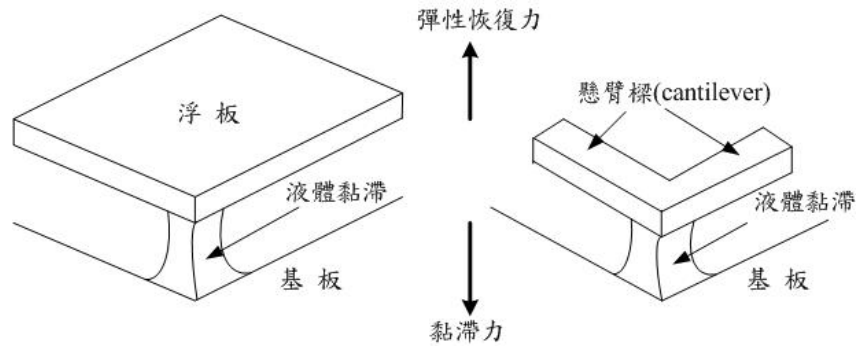
藉由上述各種模擬，實驗中我們即可依據懸浮結構塌陷或形變的趨勢，判斷形成之主要原因，進而特別注意容易使懸浮結構塌陷的關鍵點，在需要修正製程參數時，便有了依循方向。

3.4 針對模擬結果修正元件結構與討論

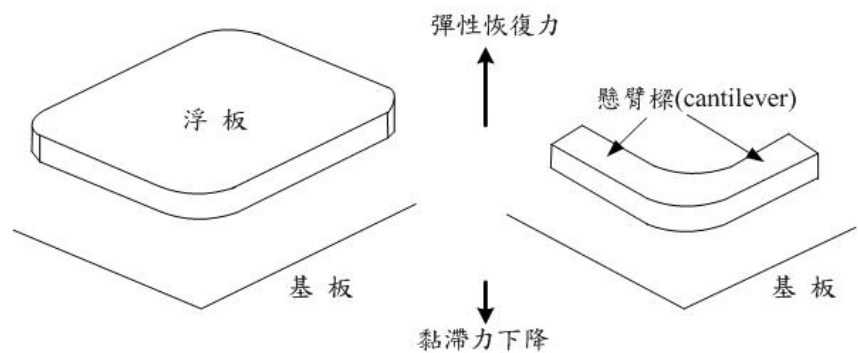
依據以往經驗，當犧牲層被蝕刻後，為確保懸浮薄板的結構完整、不塌陷至基板，必須經由二氧化碳超臨界蒸乾(CO₂ supercritical drying)以避免液體黏滯效應帶來的問題，然而用此方式所得到的完整結構良率太低，以及液體取代過程中耗時甚多，因此能不使用此

方法就盡量不予使用。所以，當我們用蝕刻液體去除犧牲層後，可以先將晶圓置於水中(D.I. water)一段時間，再將晶圓放入丙酮、甲醇或 IPA(異丙醇)以取代水，最後使其自然烘乾或平放在烤盤上快速烤乾，這是因為甲醇或丙酮、IPA 的表面張力都比水小很多且極易揮發，如此便可以最經濟、最快速之方式減輕黏滯效應所帶來的影響。

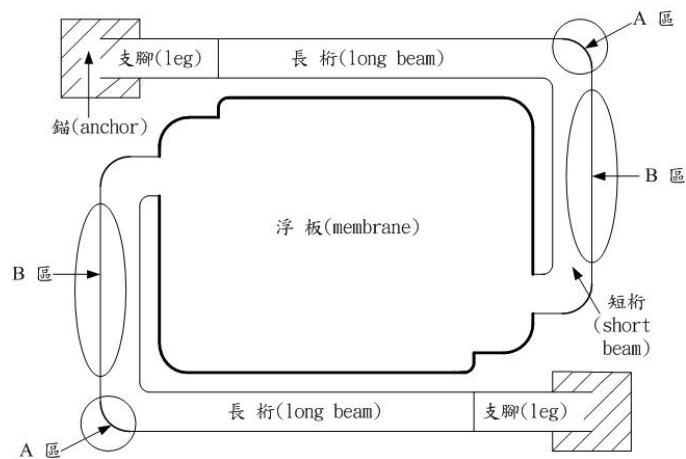
另外，我們也將從懸浮結構幾何形狀作修改，試圖以不同的結構形狀克服黏滯效應與應力集中等問題。從前面的模擬可知，懸浮薄板和長短懸臂樑(cantilever)發生液體黏滯效應時會如圖(3.26)所示，因為，一定體積的液體，在沒有外力作用下，其平衡狀態具有最小的表面積，若增大表面積，則需要克服表面張力而做功，所以，液體表面張力會使液體表面積收縮趨向最小。當整片晶圓平放自然烘乾時，液體便會往懸浮結構中，可黏附且面積最小的地方集中，像是轉彎邊角等處，如果黏滯力大於彈性恢復力，浮板結構就會被拉往基板，最後造成整塊浮板塌陷或懸臂樑斷裂。如果要避開上述問題，我們可以將長短懸臂樑轉彎直角處以及懸浮薄板的四個頂角改成圓弧形，如圖(3.27)所示，此一結構除了可以避免黏滯效應，還可以減少應力在轉角集中的問題。當浮板結構殘餘內應力與集中應力越低，去除犧牲層後的懸浮薄板結構也就會越平整，所以修改後的整體浮板結構，其幾何形狀俯視圖如(3.28)所示。



圖(3.26) 懸浮薄板和長短懸臂樑在結構轉角處產生黏滯效應



圖(3.27) 將懸浮薄板的四個頂角及長短懸臂樑轉角處，改成圓弧形以減少應力集中與黏滯效應



圖(3.28) 修改後的整體浮板結構幾何形狀俯視圖

從 3.2 小節的模擬結果可推知，當長、短懸桁轉彎直角處改成圓

弧形後，如圖(3.28)所示，液體不易吸附於 A 區，就會滑移並黏滯在 B 區，造成 B 區有大形變量(displacement)的產生，所以，我們在製作懸浮結構時要特別注意，並隨時調整製程參數(如：晶圓傾斜角)，預防液體黏滯在 B 區，導致整體浮板結構塌陷。

在降低懸浮結構層應力上，一般可以經由對材料進行退火(annealing)等熱處理步驟達到，這是因為薄膜形成過程中，產生過多的晶界及空孔，所以，當退火溫度至材料的再結晶(re-crystallization)溫度時，可使材料進行晶粒重排而減少晶界與空孔的數目。以多晶矽薄膜為例，一般由表面微加工製程常見的低壓化學氣相沉積法(LPCVD)生成，沉積溫度通常介於 570°C 與 650°C 之間，成長的薄膜會先在不同材料的界面形成非晶態的矽，而後隨著鍍膜厚度增加逐漸轉為結晶態，晶格大小也會漸增至一定尺寸，所以，在此種沉積狀況下，材料會有自生的本質應力(intrinsic stress)，如果，其後將材料置於溫度在 900°C 到 1000°C 的爐管中三十分鐘至一小時，材料會因為再結晶而使應力有效降低。

當雙層或多層材料在製程中做上下堆疊時，因彼此熱膨脹係數不同，往往會產生熱應力(thermal stress)或熱應變(thermal strain)造成結構變形，所以製程溫度較高時，殘餘應力的組成大都以熱應力為主。要降低熱應力造成浮板結構形變的問題，可由下列方式著手：

減少犧牲層相對於浮板結構的厚度比、增加浮板厚度、在浮板的兩側鍍上相同應力與厚度的薄膜結構作為補強、調降鍍膜時的溫度(如：使用 PECVD 技術沉積薄膜)及選擇應力較低的薄膜。

3.5 元件製程

本文所設計之紅外線感測器結構，因為懸浮薄板可直接置於感測電路上方，所以在單一像素面積上，有較高的填充比(fill factor)，也因此，整體浮板結構需要藉由表面微加工技術實現，並且，考慮到是 IC 電路之後段製程(post-process)，故全程溫度必須低於 400°C，所使用的製程也要和 CMOS 技術完全相容。

一個好的紅外線感測元件，關鍵在於形成一具有低熱導的感測懸浮薄板，因此，在元件製程上，我們將研究重點放於感測結構是否能成功地懸浮，對下方感測電路與熱敏阻材料之設計，並不加以討論。以下是本文所設計的紅外線感測器浮板結構之相關基本規格：

表(5) 紅外線感測器浮板結構之基本規格

單一像素(pixel)元件尺寸	50 x 50 μm^2
兩錨狀(anchor)區域面積	10 x 10 μm^2
長短懸桁(beam)寬度	6 μm ($\pm 2 \mu\text{m}$)
懸浮薄板厚度	0.5 μm
懸浮薄板材料	氮化矽、二氧化矽
犧牲層厚度	2.5 μm
犧牲層材料	鋁(aluminum)

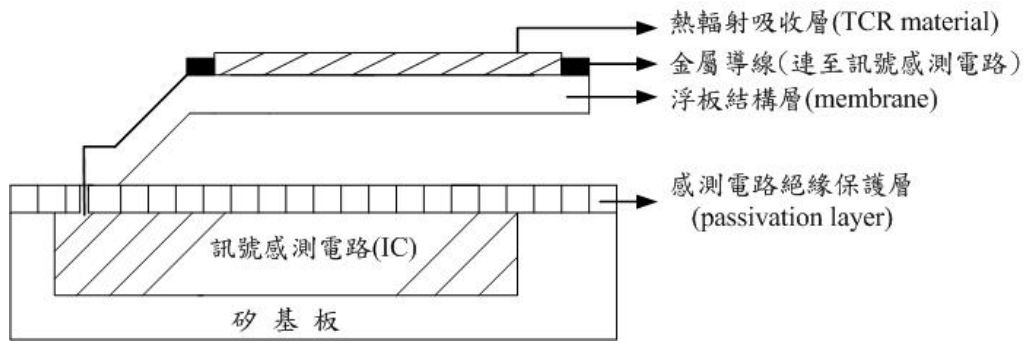
如表(5)所示，為了吸收紅外線 8~14 μm 的輻射波段，我們要在結構層下製作一四分之一波長的共振腔，所以犧牲層厚度設定為 2.5 μm ，也就是 0.5 μm 厚之結構層要從基板往上爬升 2.5 μm ，這對製程技術來說是一個很大的挑戰。

製作浮板結構的詳細步驟如下，而整體感測元件完整製程如圖(3.29)所示：

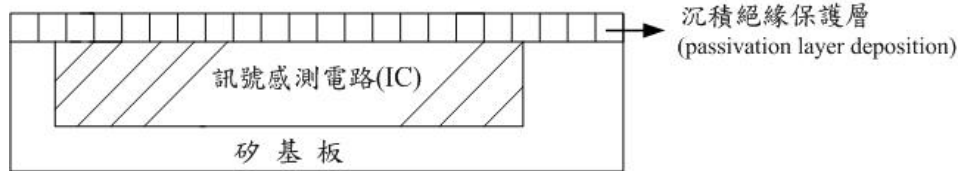
1. 試片準備 (包含 RCA clean，沉積絕緣保護層)
2. 鍍鋁 2.5 μm (當作犧牲層)
3. 上 HMDS (HMDS coating，以增加光阻對金屬附著力)
4. 上光阻 FH-6400L
5. 軟烤 (soft baking，90 $^{\circ}\text{C}$ ，90 秒)
6. 曝光 (exposure，時間隨機台狀況而定；mask 1)
7. 曝後烤 (post exposure baking，90 $^{\circ}\text{C}$ ，1 分鐘)
8. 顯影及定影 (FHD-5 和 D.I. water)
9. 硬烤 (hard baking，120 $^{\circ}\text{C}$ ，4 分鐘)
10. 蝕刻鋁 (開 pad，作為結構層之兩 anchor)
11. 用丙酮去除光阻 (振盪 1~2 分鐘，沖水 2 分鐘)
12. 鋁退火 (Al annealing，400 $^{\circ}\text{C}$ ，2 小時)
13. 沉積結構層薄膜 0.5 μm (氮化矽、二氧化矽薄膜)

14. 在含 N_2 的爐管中回火，去除薄膜中大部份的氫氣和水氣，以及讓結構更加穩定(membrane annealing， $400^{\circ}C$ ，2 小時)
15. 重複步驟 4.到步驟 9.(mask 2)
16. 開結構層 pattern (用 HDPRIE 做乾式蝕刻)
17. 晶片進爐管再退火一次($400^{\circ}C$ ，進一步驅除薄膜中的氫原子，並使結構緻密)
18. 用丙酮去除光阻 (浸泡 3 分鐘，沖水 2 分鐘，水流量不可過大)
19. 切取所要觀測試片
20. 釋放(release)懸浮結構層
(用 $HCl:H_2O_2 = 1:1$ 做濕式蝕刻，浸泡直至鋁犧牲層完全蝕刻乾淨)
21. 將晶片置於丙酮中取代蝕刻溶液
22. 再將晶片置於甲醇中 (用以取代丙酮，得到較乾淨的試片)
23. 放於低溫烤盤上快速烤乾
24. 完成元件結構製作
(用掃描式電子顯微鏡觀察結果)

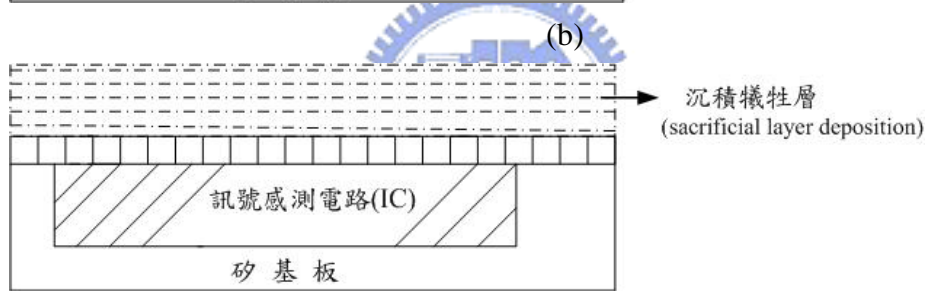




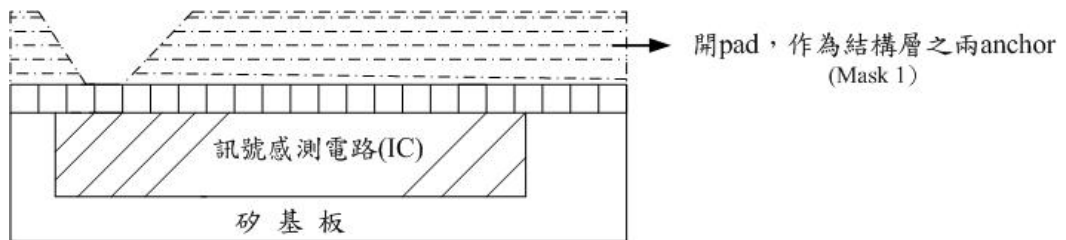
(a)



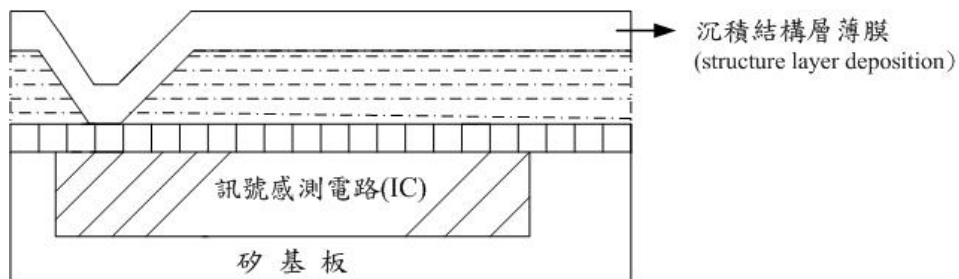
(b)



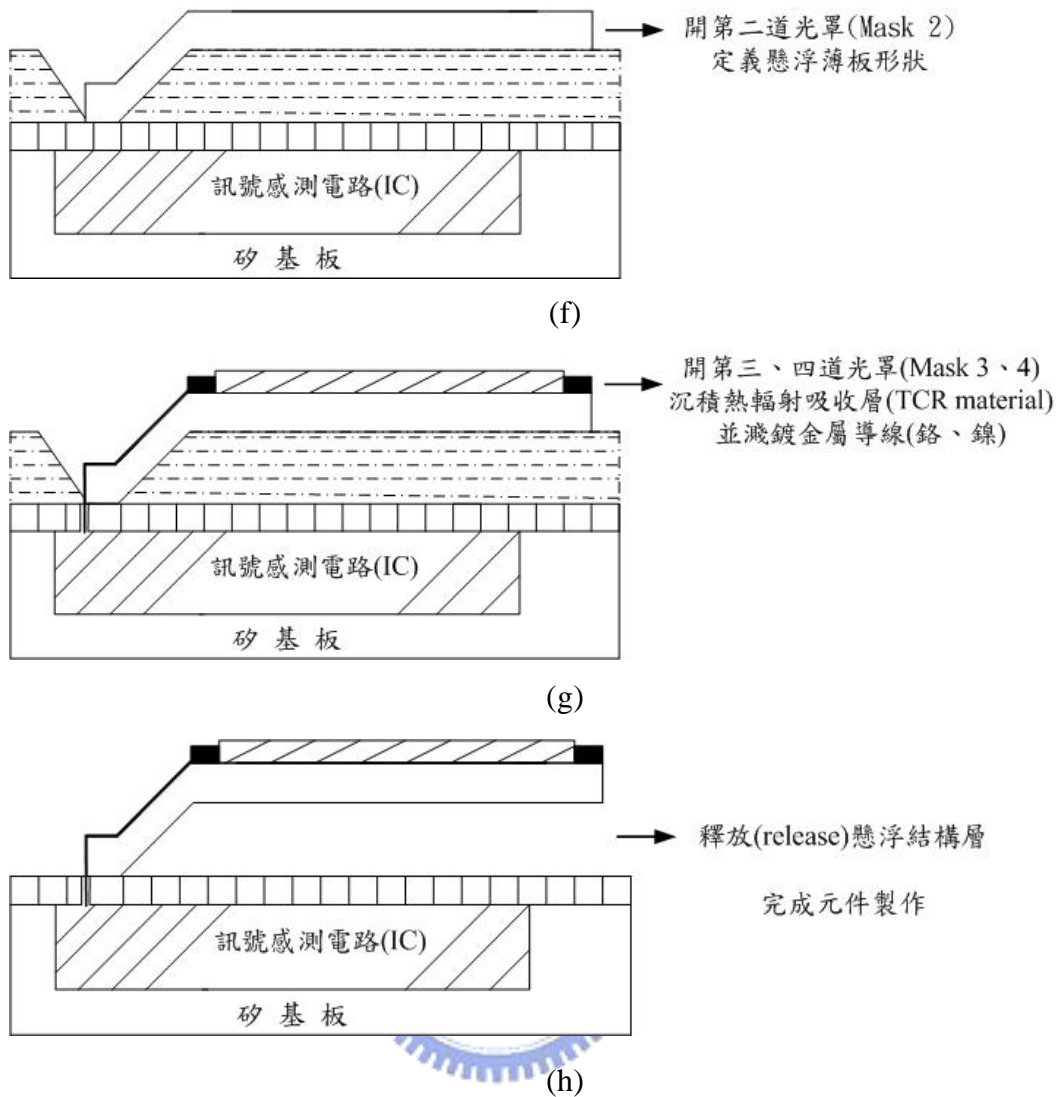
(c)



(d)



(e)



圖(3.29) 紅外線感測器製作流程圖

3.5.1 製程說明

在製程中，不管懸浮結構層或是熱輻射感測層，都會用到大量的薄膜材料，薄膜沉積過程中若有化學機制參與反應，稱為化學氣相沉積(chemical vapor deposition, CVD)，否則稱為物理氣相沉積(physical vapor deposition, PVD)；而要形成低應力介電薄膜(如：多

晶矽或氮化矽)，一般是以低壓化學氣相沉積(LPCVD)技術達到，不過，考量到懸浮結構下方的感測電路 IC 不能承受高溫製程，因此，我們選用電漿輔助化學氣相沉積(PECVD)技術，來製作所需薄膜或浮板結構層。下表(6)是各種常見之化學氣相沉積技術比較[11]：

表(6) 各種常見之化學氣相沉積技術比較

	APCVD (常壓)	PECVD (電漿輔助)	LPCVD (低壓)
沉積溫度(°C)	300-500	100-350	500-900
沉積材料	二氧化矽、磷玻璃	二氧化矽、氮化矽 氮氧化矽	多晶矽、二氧化矽 磷玻璃、硼磷玻璃 氮化矽、氮氧化矽
使用範圍	防護、絕緣、間隙	防護、絕緣 結構元素	防護、開金屬 結構元素、間隙
製程產量	高	低	高
階梯覆蓋	差	差	一致
污染顆粒	多	多	少
薄膜性質	佳	差	極佳

從上表可知，電漿輔助化學氣相沉積(以下簡稱 PECVD)，因為階梯覆蓋不佳，所以不能用來填充間隙壁，但其適用範圍包含防護、絕緣與結構層，已足夠我們製程上的需要，唯在實驗過程中，對於薄膜性質及微粒污染要特別注意。

1.絕緣保護層

絕緣保護層(以下簡稱保護層)最主要的功能在保護懸浮結構下，已在前段製程中完成之感測電路 IC，讓感測電路於後段製程中，

能不受離子蝕刻、電漿轟擊等破壞。所以，一般對絕緣層的要求有：低應力、低蝕刻率、低溫製程、高附著力、高均勻度、能形成良好的阻障層(good barrier to moisture and ions)。實驗中，我們將採用 PECVD 形成的氮化矽薄膜當作保護層，其優缺點分列於下表：

表(7) 以 PECVD 技術沉積的氮化矽薄膜優缺點比較表

	優點	缺點
1	低溫沉積(250~350 ⁰ C)	氮氣含量高
2	沉積速率快	高應力
3	黏附(adhesion)性好	
4	低孔洞(pinhole)密度	
5	成本低廉	

2.犧牲層

犧牲層被廣泛地使用於表面微加工技術，它讓要懸浮的結構先沉積於上方，待結構堆疊完成後，再將犧牲層蝕刻去除，使結構能順利懸浮於基板，因此，一般對犧牲層的要求是：低應力、低製程溫度、高蝕刻速率、與保護層黏著度佳、以及和其他結構的材質有很高的蝕刻選擇比。

在相關文獻中，大都以 polyimide 或二氧化矽(SiO₂)當犧牲層 [27]，主要是因為此材質易於形成、且易於蝕刻(SiO₂用氫氟酸或者 BOE 均有很高的蝕刻速率)，然而，在浮板結構材質的選擇上，我們可能同樣會採用二氧化矽或氮化矽，所以，本論文以鋁(Al)當犧牲層，以提高浮板結構層和犧牲層之蝕刻選擇比。另外，鋁在室溫下

有較高的擴散常數，且熔點較低，在濺鍍或是蒸鍍時比較容易有足夠的能量移動到適當位置沉積，因此，相對於其他高熔點金屬，鋁膜在沉積後之內應力較小，均覆性較佳，這也是使用鋁當犧牲層的優點。

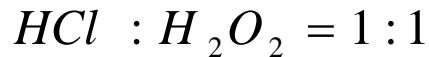
在蝕刻方面，我們將以濕式蝕刻開出浮板的兩錨狀點(以下稱為 anchor)，蝕刻液之配方如下：



此蝕刻液在 70°C 對鋁的蝕刻速率約為 2000 Å/min.，所以溶液需要先升溫一段時間後，對鋁才有顯著的蝕刻率；實驗中須注意的是，當液體開始對鋁膜蝕刻時，不能馬上把晶片從液體中抽出，而要多增加一些蝕刻時間，盡量讓 anchor 側壁能比較傾斜，因為其後的浮板結構將從 anchor 處爬升 2.5 um 高，如果蝕刻時間不足，會使只有 0.5 um 厚的浮板支腳(leg)在爬坡處過薄，以致集中應力過大而產生裂縫，亦或在定義浮板形狀時，光阻因坡度太陡，覆蓋不均，無法有效阻擋離子轟擊，最後造成支腳斷裂；當然，也不能因此就過度蝕刻，否則 anchor 面積過大，也會導致浮板形狀定義困難。所以，anchor 結構之完整性，是浮板結構能否成功懸浮最主要的關鍵之一。

因為上述溶液，長時間對浮板材質(氮化矽等)同樣有蝕刻效果，所以在去除犧牲層，釋放(release)浮板結構時，我們將採用不同

蝕刻液做濕式蝕刻，配方如下：



此蝕刻溶液相較於以往，不同的地方是降低了氯化氫的濃度，也因此其蝕刻速率較為緩慢，然而必須特別注意，此溶液在混合後會產生大量氯氣，毒性極強。所以需要在有抽風的蝕刻台進行，並且不能馬上把試片置入剛配好的蝕刻中，因為液體內會有大量氣泡冒出，須待溶液達穩定後，再小心將試片放入，以免結構遭受直接外力衝擊而損毀。

3.懸浮薄板結構層

在製作浮板結構時，我們選擇二氧化矽及氮化矽當作材質，因為以目前薄膜成長技術而言，兩者都是相當成熟且穩定之製程。以下分別就一般常用的二氧化矽和氮化矽薄膜做相關說明：

(1)二氧化矽薄膜

二氧化矽可以在矽基材上以熱氧化生成，也可以有不同的沉積製程，以滿足不同需求。對於 MEMS 的應用而言，藉由 PECVD 技術，可以在微製造氣體渦輪引擎的絕緣層中，沉積出低應力且非常厚(10~20 um)的二氧化矽薄膜[28]，而 PECVD 另外一個主要優勢是因為它的低溫製程，且可以提供合理的沉積速率，沉積出所期望之

膜厚，故本文選擇 PECVD 沉積所需浮板結構。PECVD 可使用的沉積氣體除了 SiH_4 、 N_2O 外，還可以使用具有 TEOS(tetraethoxysilane) 的平行板反應器；研究發現，薄膜應力與分解氣體濃度極為相關。此外，值得注意的是，藉由使用薄的氮化矽薄膜結合厚的二氧化矽薄膜，可以製造出低應力和無龜裂的二氧化矽薄膜。

(2) 氮化矽薄膜

氮化矽(SiN_x)被廣泛使用在 MEMS 中[11]，由於它的楊氏係數(146 GPa)與矽(約 190 GPa)同等級，使得它在微機械元件材料上極具吸引力；除此之外，氮化矽薄膜也可應用於電絕緣層、表面保護層、蝕刻罩幕等[39]。沉積氮化矽薄膜常使用的技術為 LPCVD 和 PECVD；雖然 PECVD 氮化矽薄膜的製程溫度較低，但在階梯覆蓋性以及雜質數量上皆比 LPCVD 來的差，另外，PECVD 通常是非化學計量比的 Si_3N_4 、且含有顯著之氫濃度。因為薄膜的多孔性質，所以在微加工應用中有些限制，然而，PECVD 能沉積接近無應力的氮化矽薄膜，正因為這項優點，它提供了實驗上，低應力薄膜可能的解決方案。

(3) 降低二氧化矽/氮化矽薄膜應力之相關文獻探討

因為薄膜應力是控制浮板結構完整性與穩定性之關鍵，更是浮

板結構能否順利懸浮的主要因素，故以下就先對國內外文獻中，探討降低二氧化矽及氮化矽應力的方法做一說明，希望在製程實驗中能提供不同的選擇方案。

根據 Haque[29]的論文，PECVD 二氧化矽薄膜中，因為高 Si-O-Si 鍵結應變和內部雜質，造成薄膜應力在其後的沉積製程中不穩定，然而，藉由回火(annealing in N₂ ambient)和覆蓋一層氮化矽薄膜可增加穩定度；另外，文中也說明，經過回火後的二氧化矽薄膜，壓應力會漸漸變小(即趨向張應力)，且差值可達到 115 MPa，因此，在實驗中可經由回火步驟，適度降低二氧化矽薄膜本質應力。

Hsieh[30]則以 TEOS 對 O₂ 流量，在二氧化矽薄膜性質上提出：當相對流量比(TEOS/O₂)高時，薄膜具有極強張應力(範圍從 100 MPa ~500 MPa)，此應力使薄膜易於碎裂，如果流量比降為 1 後，應力可減至 100 MPa，完全不供給氧氣時，薄膜將些微變成壓應力，且形成的厚膜將不具裂縫(crack)。另外，氧氣流量增加會使薄膜的氮含量上升，當接觸到空氣時，薄膜中形成的水氣就會使其化性不穩定，所以適當的 TEOS/O₂ 流量比，對以 TEOS 為沉積源之二氧化矽薄膜極為重要。

在 Zamboni[31]所提出的論文中，以 ICPCVD 在 350^oC 沉積氮化矽薄膜，發現薄膜中的 Si/N 比例及氮含量，均會影響薄膜的機械

特性與電性，如：應力、導電性、崩潰電壓等。

文中提及，當薄膜形成於 RF 功率分別為 25 瓦特(W)和 50 瓦特(W)之環境，在未經退火時，25W 有較高的氫含量，經退火後，兩者氫含量均明顯下降，而且 25W 降幅遠大於 50W，因此，當外加功率越大，薄膜的化學性質也會越穩定。此外，文中也說明， N_2 對 SiH_4 的流量比和薄膜應力有關，在 25W 時，不管流量比為何，薄膜均為壓應力(compressive stress)，如果 N_2 含量上升，N-H 鍵結數增加，薄膜壓應力值會更大。當 RF 功率大於 50W 後， N_2 對 SiH_4 的流量比上升，薄膜應力也會跟著上升，將更趨向於張應力(tensile stress)，但是當流量比大於 8 後，50W 和 75W 的應力開始下降，且張應力會轉變為壓應力。這個現象可以解釋為， N_2 在薄膜中的濃度改變了膜內結構，因此本質(intrinsic)應力跟著改變[32]，高的 N_2 濃度會導致缺陷(defect)形成，進而使薄膜總應力下降、或由張應力變為壓應力。

根據文獻，如果薄膜應力反轉曲線會經過零應力點，在實驗中，我們就能夠利用應力表徵反轉之特性，藉由調整 RF 功率以及流量比，達成低應力氮化矽浮板結構的要求。

此外，對於同一機台成長出不同材質的薄膜，其應力會有不一樣的表徵，例如，利用 PECVD 技術所沉積的二氧化矽和氮化矽薄膜，兩者在退火後應力剛好相反(一為張應力，另一個為壓應力)，因

此，我們便可利用三明治結構($SiO_2 + Si_3N_4 + SiO_2$)將薄膜相互堆疊，藉由應力補償(stress compensation)方式[33,35,37,39]，實現平整的懸浮薄板，唯仍須留意彼此因熱膨脹係數不同帶來之熱應力影響。當然，若能夠使用特性較好的機台來沉積薄膜，殘餘應力也會有顯著地改善。

4.浮板結構層之蝕刻與去除犧牲層

為了讓浮板結構的深寬比提高、使蝕刻後所轉移的浮板圖案能和光罩原圖相同，所以，實驗將採用乾式蝕刻(HDPRIE)來定義浮板層形狀；然而，乾式電漿蝕刻是用粒子轟擊的物理行為進行，這些帶電粒子不僅會蝕刻薄膜，連光阻也會被侵蝕，故在進行此步驟時，要特別考慮光阻厚度及注意蝕刻時間。

當犧牲層被完全蝕刻後，要把強酸溶液從懸浮結構和基板間除去時，液體產生的黏滯效應，將是決定浮板結構層能否成功懸浮的最後關鍵。如前所述，實驗中除了把懸浮結構直角處改成圓弧形外，也因為考量到製作成本和製程時間，並不採用二氧化碳超臨界蒸乾法、或特意增加基板表面粗糙度來降低黏滯效應，而是將含有蝕刻液的試片直接放入丙酮中稀釋第一次，然後再把試片放入甲醇中做第二次的液體取代；這是因為丙酮和甲醇表面張力皆較小，所以對浮板產生的黏滯力會比傳統用去離子水小，而第二次放入甲醇的原

因，是因為它的揮發性比丙酮高，而且液體較潔淨，可減少浸泡丙酮後所遺留的微粒；當試片從甲醇中取出後，為儘速蒸乾甲醇，試片將放在低溫烤盤上快速烤乾，因為，液體存在於浮板結構和基板間的時間越少，黏滯效應所帶來的影響也就會越小。

