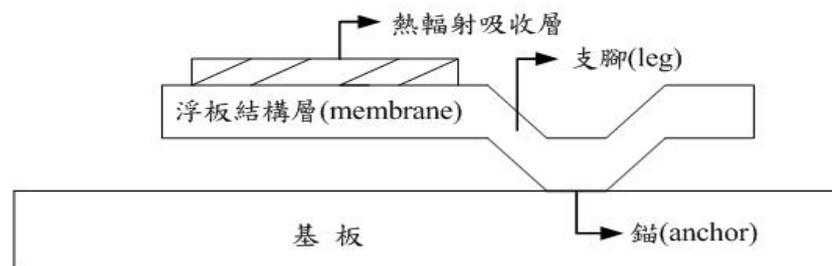


## 第二章 紅外線感測器基本工作原理與結構考量

如圖(2.1)，通常以表面微加工技術製作的熱型紅外線感測器 (microbolometer) 會包含兩個主要部分，一為熱輻射吸收層，另一為支撐此吸收層之浮板結構。因此，熱型紅外線感測器的基本工作原理，可分為以下三個步驟：

- (1) 光子訊號轉換成熱輻射流訊號，射向紅外線感測元件。
- (2) 熱輻射流被感測層的熱敏阻材料吸收後，材料產生溫差，進而改變熱敏阻材料之電阻值。
- (3) 最後在懸浮薄板良好絕熱性的配合下，將此差值轉換成可利用之電訊號。



圖(2.1) 表面微加工技術製作之紅外線感測器示意圖

雖然，本論文只對熱型紅外線感測器最關鍵元件-懸浮薄板結構層做製程模擬與實做，但是懸浮薄板的形狀、尺寸、以及材質等規

格，仍需藉由不同之熱、電分析找到設計方向，因此，以下就先從紅外線感測器整體架構切入，進行各種相關探討。

## 2.1 熱分析

當紅外線感測元件在穩態情形下操作時，假設元件所吸收之熱輻射功率是  $\Phi = \Phi_0 e^{j\omega t}$  ( $\Phi_0$  為其振幅)，一部分為浮板吸收，使溫度上升  $\Delta T$ ，其他則分別由固體熱導(浮板與基板間的支腳)、氣體熱導及輻射方式散失。因此，動態熱平衡方程式可如下表示為[11]：

$$C \frac{d\Delta T}{dt} + G\Delta T = \varepsilon\Phi \quad (2.1)$$

其中  $C$  和  $G$  分別為感測元件的熱容與總熱導， $\varepsilon$  為感測薄膜的發射率(emissivity)。當起始條件  $t=0$ ， $\Delta T=0$  時，即可解得溫度響應：

$$\Delta T = \frac{\varepsilon\Phi_0}{G(1 + \omega^2\tau^2)^{1/2}} \quad (2.2)$$

其中  $\tau = C/G$ ，為熱時間常數(thermal time constant)。

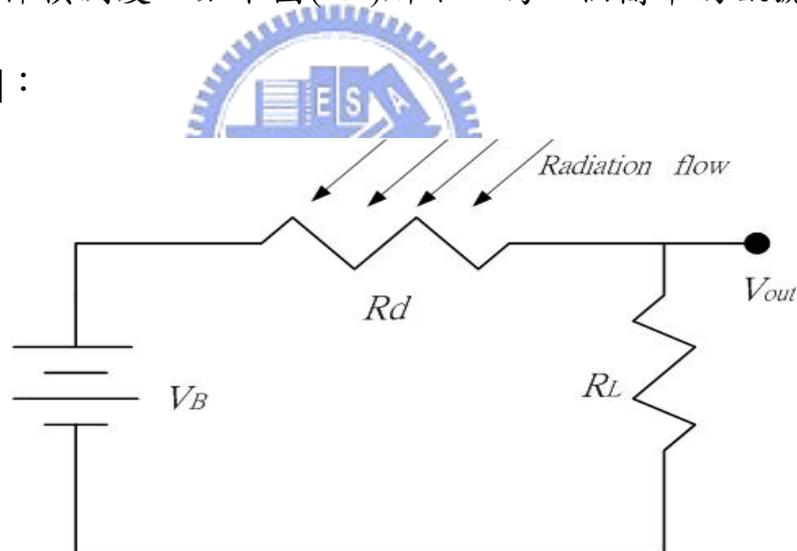
所以，若將元件應用於高靈敏度、需快速反應(high speed)之軍事要求上，必須降低  $\tau$  值(即提高熱導、降低熱容)；但如果元件是應用在需要高解析度(high resolution)的儀器上，則必須提升  $\Delta T$  值，這意謂熱容和熱導都需要降低，其具體的做法為：將感測結構層製作

成懸浮薄板狀，使薄板下方產生一隔熱空腔體(cavity)，而連接此懸浮薄板和基板間的支腳結構則是越細、越長愈佳。

## 2.2 電訊號分析

紅外線感測器的性能最主要以電壓響應(voltage responsivity)和偵測度(detectivity)來判別，而偵測度又往往受限於干擾雜訊；所以在本節將先推導電壓響應數學表示式，在下一節則探討雜訊相關數學式與元件偵測度。如下圖(2.2)所示，為一個簡單的訊號讀取電路

[20,24,26]：



圖(2.2) 訊號讀取電路

$R_d$  為吸收熱輻射的感測電阻， $R_L$  為一個未受熱輻射照射的串聯負載電阻。其熱平衡方程式可表示為：

$$C \frac{dT}{dt} + G(T - T_0) = P + \epsilon\Phi \quad (2.3)$$

其中  $T_0$  為室溫， $P=I^2R$  為元件因自熱效應(self-heating)所生之功率消耗，若將上式改為：

$$C \frac{dT}{dt} + G\Delta T = \frac{dP}{dT} \Delta T + \varepsilon\Phi \quad (2.4)$$

並考慮在穩態操作，且未受熱輻射照射下，則功率消耗視同經由熱導散失(意即  $\Phi=0$ ， $P=I^2R=G\Delta T$ )，可得下式：

$$\frac{dP}{dT} \Delta T = \alpha G (T - T_0) \left( \frac{R_0}{R_d} \right) \left( \frac{R_L - R_d}{R_L + R_d} \right) \Delta T \quad (2.5)$$

其中  $\alpha$  為熱敏感測材料的電阻溫度係數(temperature coefficient of resistivity, TCR)，定義為  $\alpha = \frac{1}{R} \frac{dR}{dT}$  (R:電阻，T:溫度)；對於金屬物質，由於溫度升高會造成電子與晶格間的碰撞機率增加，使導電率降低，導致電阻增加， $\alpha$  為一正值，但是對於半導體材料，則因為溫度升高會造成電子、電洞對增加，反而使電阻降低，故  $\alpha$  為一負值。另外，我們定義  $R_0$  為熱敏感測材料在溫度  $T_0$  時之電阻值，因此可用下式描述感測電阻和溫度之間的關係：

$$R_d = R_0 [1 + \alpha(T - T_0)] \quad (2.6)$$

將(2.5)式代回(2.4)式，整理得到：

$$C \frac{dT}{dt} + G_{eff} \Delta T = \varepsilon\Phi \quad (2.7)$$

且  $G_{eff} = G - \alpha G (T - T_0) \left( \frac{R_0}{R_d} \right) \left( \frac{R_L - R_d}{R_L + R_d} \right)$ ，我們同樣可解得溫度響應如下：

$$\Delta T = \Delta T_0 e^{-G_{eff}/C} + \frac{\varepsilon\Phi_0}{G_{eff} [1 + \omega^2\tau^2]^{1/2}} \quad (2.8)$$

因此當  $G_{eff}$  為負值時，感測元件便可能隨時間的增加，溫度過熱而燒壞，故溫度響應穩態解為：

$$\Delta T = \frac{\varepsilon\Phi_0}{G_{eff} [1 + \omega^2\tau^2]^{1/2}} \quad (2.9)$$

要求得感測元件的電壓響應  $S$  (voltage responsivity)，單位為  $[V/W]$ ，可從訊號讀取電路之電阻分壓概念：

$$dV = V_B R_L \left( \frac{1}{R_L + R_d} - \frac{1}{R_L + R_d + dR_d} \right) \cong \frac{V_B R_L}{(R_L + R_d)^2} dR_d \quad (2.10)$$

再根據(2.6)式

$$R_d = R_0 [1 + \alpha(T - T_0)] \Rightarrow dR_d = R_0 \alpha \Delta T = \frac{\alpha R_d \Delta T}{1 + \alpha(T - T_0)} \quad (2.11)$$

現在將(2.9)和(2.11)兩式代入(2.10)式，可得：

$$dV = \frac{V_B R_L R_d}{(R_L + R_d)^2} \frac{\alpha \varepsilon \Phi_0}{[1 + \alpha(T - T_0)] G_{eff} (1 + \omega^2\tau^2)^{1/2}} \quad (2.12)$$

$$S = \frac{dV}{\Phi_0} = \frac{V_B R_L R_d}{(R_L + R_d)^2} \frac{\alpha \varepsilon}{[1 + \alpha(T - T_0)] G_{eff} (1 + \omega^2\tau^2)^{1/2}} \quad (2.13)$$

又因為偏壓功率導致浮板上升溫差為： $T - T_0 = \left( \frac{V_B}{R_L + R_d} \right)^2 \frac{R_d}{G_{eff}}$

解  $V_B$  代入(2.13)式，得到元件電壓響應以溫差表示的數學表示式：

(其結果與參考文獻[24]略有差異)

$$S = \frac{R_L \alpha \varepsilon}{(R_L + R_d)} \left\{ \frac{R_d (T - T_0)}{G_{eff} (1 + \omega^2 \tau^2) [1 + \alpha (T - T_0)]^2} \right\}^{1/2} \quad (2.14)$$

由(2.14)式可知，當 $R_L$ 等於 $R_d$ 時，電壓響應會有最大值。另外，欲得到較大之電壓響應，元件結構則必須要有較低的熱導及熱容，和選用含有較高電阻溫度係數( $\alpha$ )的熱敏阻感測材料。不過，需要注意的地方是，元件在低頻操作時( $\omega \ll 1/\tau$ )，首要為降低熱導，而在高頻操作時( $\omega \gg 1/\tau$ )，主要是降低元件熱容，這個趨勢，和上一小節之熱分析結果是相同的。



### 2.3 雜訊等效功率和元件偵測度

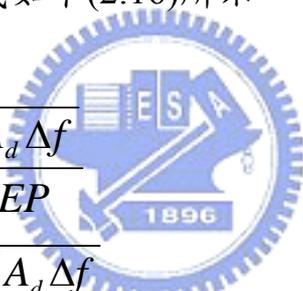
紅外線感測器之靈敏度與性能在實際量測中，就像任何有訊號傳輸或感測的系統，會被各種不同的雜訊所干擾，其最大效能更會受雜訊所限制，所以，充分地了解雜訊的來源與特性，對於紅外線感測器懸浮結構設計，有相當之必要性。

首先，為了要得知感測訊號和雜訊相對大小(signal to noise ratio, SNR)，於是雜訊等效功率(noise equivalent of power, NEP)被定義為：產生與雜訊電壓( $V_N$ )相等之訊號所需輸入的熱輻射功率( $S$ )，如下所

示：

$$NEP = \frac{V_N}{S} \quad (2.15)$$

雜訊等效功率可以顯示出感測器所能檢知的最小輻射功率，它是比較感測器優劣的一個重要依據。然而雜訊電壓常與量測系統儀表(或電路)之有效頻寬( $\Delta f$ )和感測器面積( $A_d$ )兩者平方根有關，所以在比較感測器優劣時，應將予以去除才有意義，故定義一歸化偵測度(normalized detectivity)作為比較指標，可用來判別不同元件材料於製作時之優值，數學式如下(2.16)所示：


$$D^* = \frac{\sqrt{A_d \Delta f}}{NEP} = \frac{S \sqrt{A_d \Delta f}}{V_N} \quad (\text{單位: cmHz}^{1/2}/\text{W}) \quad (2.16)$$

其次，我們將針對紅外線感測器之雜訊電壓中的三個主要雜訊源：熱導雜訊(thermal conductance noise)、強生雜訊(Johnson noise)以及低頻雜訊(low-frequency noise,  $1/f$  noise)[21]，分別就其產生原因和特性做詳細說明。

因為環境絕對溫度的變化，所以電子在導體中會自由運動，使跨接於此導體上的量測電壓跟著變動，即使此時量測的平均電流為零，此一現象即稱為熱導雜訊。而熱感測系統中，任何偵測元件或

感測結構溫度之變動，若不是因為輸入功率引起，以致造成不受預期的輸出電壓，也同樣會產生熱導雜訊。其數學式可以如(2.17)表示為：

$$V_{N,th} = S \sqrt{4kT^2 G \Delta f_{th}} \quad (2.17)$$

其中  $K$  為波茲曼常數， $\Delta f_{th}$  為熱雜訊頻寬，和熱時間常數互為反相關。

Johnson 雜訊(或 Nyquist 雜訊)則是在任何有阻值的材料內，帶電粒子或是自由載子因為做熱運動(thermal motion)而產生，不同於熱導雜訊之電壓擾動，它是屬於熱電流變化，其數學表示如(2.18)式：


$$V_{N,J} = \sqrt{4kTR_d \Delta f} \quad (2.18)$$

其中  $\Delta f$  為電路有效頻寬，和兩倍時間常數互為倒數。

低頻雜訊( $1/f$  noise)也稱為抖動雜訊(flicker noise)，它被廣泛定義為：兩個互相連接的材料間，因彼此介面存在之缺陷，所造成導電率的變動。舉例來說，在電晶體中，閘極氧化層和矽基板間，存在非常多的缺陷(dangling bonds)，於是電子(或電荷)就可能隨機地被這些缺陷態捕捉或釋放，形成汲極端的雜訊電流；此外，一般半導體只要是非單晶結構，於晶界處(grain boundary)均會造成電子遷

移率的改變，進而產生低頻雜訊。低頻雜訊和熱雜訊不同的地方是，熱雜訊大都發生於高頻，而低頻雜訊正如其名，當元件在低頻操作時才比較有顯著的影響。低頻雜訊數學表示式如下：

$$V_{N,1/f} = KV_b \sqrt{\frac{\rho}{WLtf}} \quad (2.19)$$

其中，常數  $K$  為材料參數， $V_b$  為施加於紅外線感測器的電壓大小， $W$ 、 $L$  與  $t$  則分別是懸浮薄板之寬度、長度和厚度。由(2.19)式可知，在懸浮薄板厚度相同情況下，若浮板所佔整體感測元件結構的面積越大，則會有較小的低頻雜訊，因此，設計懸浮結構時，除了把連接浮板與基板間的支腳盡量拉細、拉長外，對於主要用於吸收熱輻射之懸浮薄板面積，應盡量使其越大越好。

綜合以上，將熱導雜訊、強生雜訊以及低頻雜訊三者個別平方相加、並開根號後，即可得紅外線感測器的總雜訊電壓均方根值，如(2.20)式：

$$V_N = \sqrt{V_{th}^2 + V_J^2 + V_{1/f}^2} \quad (2.20)$$

在正常的狀況下，我們可以忽略熱導雜訊在總雜訊中所佔的影響比例，因此，雜訊來源將會由強生雜訊和低頻雜訊產生，而至於兩者其中那一個是雜訊源的主要成分，將由材料性質、偏壓以及電路有效頻寬所決定。把(2.20)式帶回(2.16)式並忽略熱導雜訊，可得

歸一化偵測度更詳細之數學表示式：

$$D^* = \frac{S\sqrt{A_d\Delta f}}{V_N} = S\sqrt{\frac{A_d\Delta f}{V_J^2 + V_{1/f}^2}} \quad (2.21)$$

其中， $S = \frac{R_L\alpha\varepsilon}{(R_L + R_d)} \left\{ \frac{R_d(T - T_0)}{G_{eff}(1 + \omega^2\tau^2)[1 + \alpha(T - T_0)]^2} \right\}^{1/2}$  為電壓響應大小。

然而，為了使(2.21)式簡潔易讀，所以並沒有把它的數值代入展開。

## 2.4 懸浮結構層之材質選擇方向

對於紅外線感測器而言，浮板結構層材料的選擇非常重要。由前面熱、電分析可知，除了選用固態熱導較低的材質，使吸收的熱輻射能盡量保持在浮板結構層外，對於浮板結構的鋼硬度也需要特別注意，因為，浮板結構層如果不夠鋼硬，便有很大的機會由於殘餘應力(residual stress)過大，或液體黏滯效應(sticking effect)使浮板塌陷，以致感測元件製作失敗。

使浮板結構變形之力稱為應力  $\sigma$  (stress)，而其所產生的形變量稱應變  $\varepsilon$  (strain)，兩者關係如下所示：

$$\sigma = E\varepsilon \quad (2.22)$$

其中  $E$  稱為楊氏係數(Young's modulus)，為材料本身的特性，當楊氏係數越大，代表材料剛性越強。而總應力又可寫為：

$$\sigma_S = \sigma_i + \sigma_e + \sigma_{Th} \quad (2.23)$$

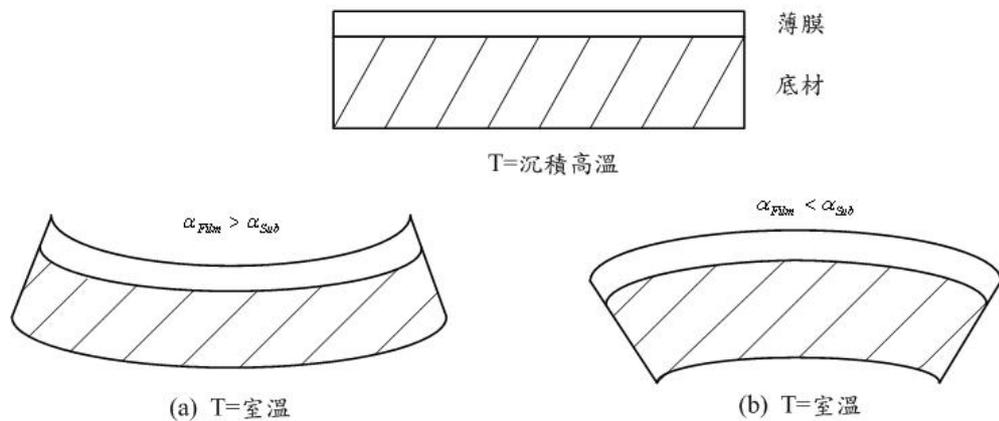
其中 $\sigma_i$ 是內應力，來源是外來的雜質及薄膜本身所具有各種缺陷； $\sigma_e$ 為外應力，大都來自薄膜與其他材質間的附著情形，如不相同的晶格參數(lattice parameter)在附著界面所造成應力；至於 $\sigma_{Th}$ 即熱應力(thermal stress)，是因為熱效應所產生的熱應力，主要的來源是不同物體間的熱膨脹係數(thermal expansion coefficient)差異所致，為多層結構中之主要應力，可表示成：

$$\sigma_{Th} = E_y \Delta T (\alpha_{Film} - \alpha_{Sub}) \quad (2.24)$$

$\alpha_{Film}$  和  $\alpha_{Sub}$  分別為薄膜與基板的熱膨脹係數(thermal expansion coefficient)。由此可知，除了選擇楊氏係數較大的材質外，以熱膨脹係數較接近之材質相互堆疊，可降低其熱應力，使浮板結構變形趨緩。

因為熱應力是積體電路薄膜最主要的應力來源，所以我們以圖(2.3)為例，對材質因熱應力所造成不同的形變差異做更進一步說明。如圖(2.3)為薄膜與底材因熱膨脹係數不同，在沉積反應結束後，發生彎曲變形的現象。如果薄膜在一個理想平坦的底材上進行沉積，並且是在一定之沉積溫度下進行，在此溫度時，薄膜與所沉積的底材間並不會產生任何附著應力，然而在沉積反應結束後，當底材與薄膜的溫度從高溫降至室溫，兩者因熱膨脹係數不同，在其界

面將產生熱應力。假如沉積薄膜的熱膨脹係數高於底材，則冷卻後的底材外觀將如同(2.3 a)所示，使薄膜承受張應力(tensile stress)；反之，如果薄膜熱膨脹係數低於底材，則冷卻後薄膜將承受壓應力(compressive stress)，整體外觀如圖(2.3 b)所示。



圖(2.3) 薄膜與底材因熱膨脹係數不同，在沉積反應結束後，發生兩種不同的彎曲現象