



國立臺北科技大學

光電工程系

專題報告

簡易型表面電將共振感測器

組員：賴天珩 100650319 四光三

盧奕翔 100650319 四光三

郭子豪 100650319 四光三

指導教授：任貽均

中華民國 103 年 6 月

目錄

目錄

研究動機與目的

第一章 實驗原理

- 1.1 表面電漿共振原理
- 1.2 電磁波與色散關係
- 1.3 激發表面電漿波方法

第二章 實驗架構及評估

- 2.1 光源
- 2.2 kretschmann 組態(稜鏡部分)評估
- 2.3 kretschmann 組態(腔體部分)設計與評估
- 2.3 入射、反射與折射分析

第三章 實驗說明

- 3.1 鍍膜系統架構
- 3.2 簡易型表面電漿共振感測器操作

第四章 實驗結果與討論

- 4.1 實驗結果
- 4.2 討論

研究動機與目的

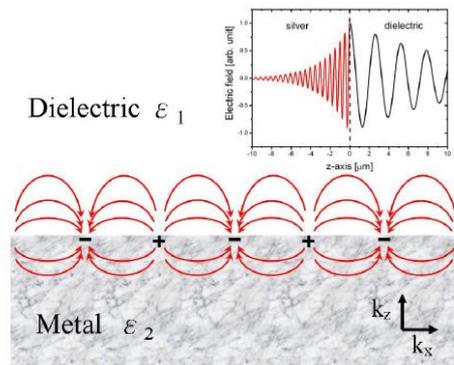
利用表面電漿波原理，當待測空間中介質(煙霧)改變，造成在接收端光感測器接收的光強度增加或衰減，進而分析待測空間中的介質特性。利用以上原理可以將一欲量測介質(煙霧)注入一空間中，再量測空間中介質的特性。

第一章 實驗原理

1.1 表面電漿共振原理

表面電漿子振盪(surface plasmon oscillations)是電磁波與介質之間的交互作用，並且激發金屬表面上之自由電子所產生的一種同調性(coherent)表面電荷擾動現象。而且TM波於垂直於界面方向之電場分量在表面達到最大值，並隨著離開表面的距離而呈現指數函數的衰減。而這個現象便說

明了為何表面電漿波強化之電場對介質表面特性非常靈敏之原因。藉由推導電磁波入射至兩不同介質之界面處的色散關係式，將有助於我們進一步的了解表面電漿波的激發條件。



1.2 電磁波與色散關係

我們假設 $z=0$ 為兩不同介質之界面處， $z<0$ 表示為介電常數為 ϵ_1 之介質1； $z>0$ 表示為介電常數為 ϵ_2 之介質2。並且定義電場與磁場的方向如圖2-1 所示，並且假設表面電荷密度(charge density, $\rho=0$)與電流密度(current density, $J^*=0$)為零且介質均為非導磁材料(permeability, $\mu=1$)

因此可以將Maxwell Eqs寫成

$$\bar{\nabla} \times \bar{E}_i = -\frac{1}{c} \frac{\partial \bar{H}_i}{\partial t} \quad (2-1)$$

$$\bar{\nabla} \times \bar{H}_i = \varepsilon_i \frac{1}{c} \frac{\partial \bar{E}_i}{\partial t} \quad (2-2)$$

$$\bar{\nabla} \cdot \bar{D}_i = 0 \quad (2-3)$$

$$\bar{\nabla} \cdot \bar{B}_i = 0 \quad (2-4)$$

E_i 為電磁波進入介質 i 中的電場 (electric field) ;

H_i 為磁場 (magnetic intensity) ;

B_i 為感應磁場 (magnetic field) ;

D_i 為電位移 (electric displacement) ;

ε_i 為介電常數 (dielectric constant) 。

1. 入射光以TE波入射

當TE波存在於兩介質內部時，其電磁場的方程式可寫成

$$\begin{cases} E_1^+ = (0, E_{y1}^+, 0) \exp[i(k_{x1}x + k_{z1}z - \omega \cdot t)] \\ H_1^+ = (-H_{x1}^+, 0, H_{z1}^+) \exp[i(k_{x1}x + k_{z1}z - \omega \cdot t)] \end{cases} \quad (2-5)$$

$$\begin{cases} E_1^- = (0, E_{y1}^-, 0) \exp[i(k_{x1}x - k_{z1}z - \omega \cdot t)] \\ H_1^- = (H_{x1}^-, 0, H_{z1}^-) \exp[i(k_{x1}x - k_{z1}z - \omega \cdot t)] \end{cases} \quad (2-6)$$

$$\begin{cases} E_2^+ = (0, E_{y2}^+, 0) \exp[i(k_{x2}x + k_{z2}z - \omega \cdot t)] \\ H_2^+ = (-H_{x2}^+, 0, H_{z2}^+) \exp[i(k_{x2}x + k_{z2}z - \omega \cdot t)] \end{cases} \quad (2-7)$$

其中， k_{xi} 為光在介質 i 中的水平波向量， k_{zi} 為光在介質 i 中的波向量之垂直分向， ω 為入射光的頻率。

分別將(2-5)~(2-7)代入方程式(2-1)中，分解 z 分量與 x 分量可解得

$$k_{xi} E_{yi}^\pm = \frac{\omega}{c} H_{zi}^\pm \quad i = 1, 2 \quad (2-8)$$

$$k_{zi} E_{yi}^\pm = \frac{\omega}{c} H_{xi}^\pm \quad i = 1, 2 \quad (2-9)$$

將(2-8)與(2-9)相除即可解出 z 方向磁場與 x 方向磁場之間的關係

$$H_{zi}^{\pm} = \frac{k_{xi}}{k_{zi}} H_{xi}^{\pm} \quad i=1,2 \quad (2-10)$$

再一次分別將(2-5)~(2-7)代入方程式(2-2)中即可解得

$$k_{zi} H_{xi}^{\pm} + k_{xi} H_{zi}^{\pm} = \epsilon_i \frac{\omega}{c} E_{yi}^{\pm} \quad i=1,2 \quad (2-11)$$

將(2-10)代入(2-11)式中，即可解出 y 方向電場與 x 方向磁場之間的關係

$$E_{yi}^{\pm} = \frac{1}{k_{zi}} \frac{\omega}{c} H_{xi}^{\pm} \quad i=1,2 \quad (2-12)$$

由於需滿足 $k_{z1} > 0$ 且 $k_{z2} > 0$ ，故方程式(2-13)式無法滿足共振所需之條件，這也說明了TE波永遠無法於界面處產生表面電漿共振的現象。

2. 入射光以TM波入射

當 TM 波存在於兩介質內部時其電磁場的方程式可寫成

$$\begin{cases} E_1^+ = (E_{x1}^+, 0, -E_{z1}^+) \exp[i(k_{x1}x + k_{z1}z - \omega \cdot t)] \\ H_1^+ = (0, H_{y1}^+, 0) \exp[i(k_{x1}x + k_{z1}z - \omega \cdot t)] \end{cases} \quad (2-14)$$

$$\begin{cases} E_1^- = (-E_{x1}^-, 0, -E_{z1}^-) \exp[i(k_{x1}x - k_{z1}z - \omega \cdot t)] \\ H_1^- = (0, H_{y1}^-, 0) \exp[i(k_{x1}x - k_{z1}z - \omega \cdot t)] \end{cases} \quad (2-15)$$

$$\begin{cases} E_2^+ = (E_{x2}^+, 0, -E_{z2}^+) \exp[i(k_{x2}x + k_{z2}z - \omega \cdot t)] \\ H_2^+ = (0, H_{y2}^+, 0) \exp[i(k_{x2}x + k_{z2}z - \omega \cdot t)] \end{cases} \quad (2-16)$$

將(2-14)~(2-16)分別代入(2-1)及(2-2)式中反覆聯立求解後可得

$$E_{zi}^{\pm} = \frac{k_{xi}}{k_{zi}} E_{xi}^{\pm} \quad i=1,2 \quad (2-17)$$

$$H_{yi}^{\pm} = \frac{\epsilon_i}{k_{zi}} \frac{\omega}{c} E_{xi}^{\pm} \quad i=1,2 \quad (2-18)$$

為求 TM波之共振條件，令入射電場為零($E_{x1}^+ = 0$)，由(2-18)式搭配邊界連續之條件 $E_{x1}^+ + E_{x1}^- = E_{x2}^+$ 與 $H_{y1}^+ + H_{y1}^- = H_{y2}^+$ ，即可求得TM 波於界面處產生共振時所需之色散關係式

$$\frac{k_{z1}}{\epsilon_1} + \frac{k_{z2}}{\epsilon_2} = 0 \quad (2-19)$$

由於 k_{z1} 、 k_{z2} 均大於零，故於兩介電常數 ε_i 皆大於零之材料界面上之TM波並不能產生共振。相反地，當其中一種材料之介電常數小於零而另一種材料之介電常數大於零時(即 $\varepsilon_1 \cdot \varepsilon_2 < 0$)，方程式(2-19)式之共振條件便有機會能夠被滿足，此時TM波將會於此界面處產生共振的現象。然而，金屬的介電常數於紫外光至遠紅外光的波長範圍內皆能夠滿足 $\varepsilon' < 0$ 此一條件，故表面電漿波可於金屬層與介電層的接觸面上被TM波所激發。

$$k_x^2 + k_{zi}^2 = \varepsilon_i \left(\frac{\omega}{c} \right)^2, \quad i=1,2 \quad (2-20)$$

將(2-20)式代入(2-19)式中即可得表面電漿共振發生於兩半無窮長空間中的色散關係式可改寫成為

$$k_x = \frac{\omega}{c} \left(\frac{\varepsilon_1 \varepsilon_2}{\varepsilon_1 + \varepsilon_2} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2-21)$$

令金屬層的介電常數為 $\varepsilon_1 = \varepsilon_1' + i\varepsilon_1''$ ，相鄰介電層的介電常數為 $\varepsilon_2 > 0$ 代入方程式(2-21)式中，假若 $\varepsilon_1'' < |\varepsilon_1'|$ 時，經由泰勒級數展開取前二項可得 $k_x = k_x' + ik_x''$ ，其中

$$k_x' = \frac{\omega}{c} \left(\frac{\varepsilon_1' \cdot \varepsilon_2}{\varepsilon_1' + \varepsilon_2} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2-22)$$

$$k_x'' = \frac{\omega}{c} \left(\frac{\varepsilon_1' \cdot \varepsilon_2}{\varepsilon_1' + \varepsilon_2} \right)^{\frac{3}{2}} \cdot \left(\frac{\varepsilon_1''}{2(\varepsilon_1')^2} \right) \quad (2-23)$$

k_x' 表電磁波在空間中傳遞的水平波向量，而 k_x'' 則為電磁波沿著x方向電場的消散係數。若要使表面電漿波能夠傳播於此界面處則(2-22)式必須為一實數，因此，必需滿足 $\varepsilon_1' < 0$ 與 $|\varepsilon_1'| > \varepsilon_2$ 這兩式，才能使表面電漿波在界面上傳播。

假設金屬表面為自由電子系統則金屬層介電常數之實部根據Drude's 模態可寫成

$$\varepsilon_1' = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2} \quad (2-24)$$

其中 $\omega_p = \sqrt{\frac{4\pi Ne^2}{m}}$ 為電漿頻率(plasma frequency)， N 為自由電子體積密度， e 為自由電子電量(4.803×10^{-10} esu)， m 為電子質量(9.11×10^{-28} g)。將(2-24)式代入(2-22)式中可得

$$k_x^2 = \left(\frac{\omega}{c}\right)^2 \left(\frac{\left(1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2}\right) \cdot \epsilon_2}{\left(1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2}\right) + \epsilon_2} \right) \quad (2-25)$$

解(2-25)式可求得兩個根如圖2-2所示，正根所解出之解為Brewster mode，負根所解出之解為Fano mode。Brewster mode 為一輻射模(radiative mode)不需靠稜鏡耦合亦能夠自行激發；而Fano mode 則為一非輻射模(nonradiative mode)，因此必須靠稜鏡耦合的方式提升其入射光的水平波向量方能有機會被激發。

為了達到激發表面電漿波的目的，因此必須藉由提升入射光的波向量大小，例如：稜鏡或光柵耦合等方式。以稜鏡耦合的方式為例，

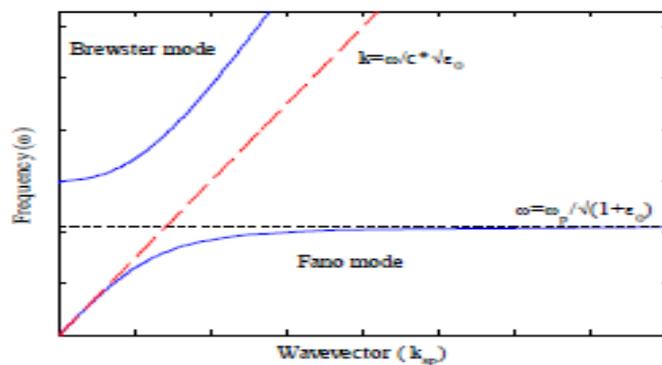


圖 2-2 單一界面的色散曲線。

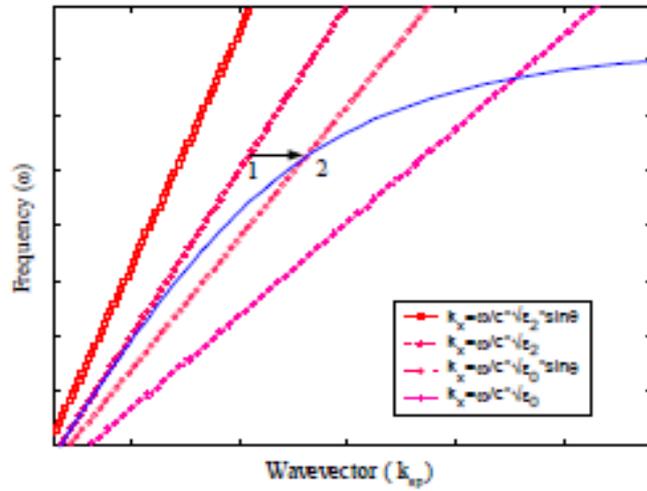


圖 2-3 利用稜鏡耦合激發表面電漿共振時的色散關係圖。

入射光於稜鏡中傳播的水平波向量為 $k_x = \frac{\omega}{c} \sqrt{\epsilon_0} \sin \theta$ ，其中 $\sqrt{\epsilon_0}$ 為稜鏡的折射率， θ 為入射角度，為了使入射光於色散曲線圖中的曲線能夠與 Fano mode 相交，故稜鏡的折射率必須要大於介電層的折射率 $\sqrt{\epsilon_2}$ 。

如圖 2-3 所示，當入射角度達到某一特定角度時，入射光的曲線與表面電漿波的色散曲線關係將可由 1 移至 2 並於該波長下產生表面電漿共振的現象。

1.3 激發表面電漿波方法

由於單純入射的光波至金屬表面上並不一定能激發表面電漿波，而在實驗上，激發表面電漿波最常見有以下兩種方法：

(一)光柵耦合法(Grating coupling)

(二)衰逝全反射耦合法(ATR coupling)

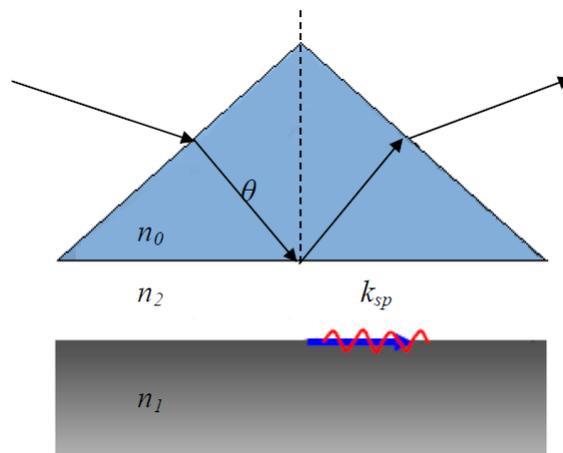
而衰逝全反射耦合法又依照稜鏡、金屬薄膜、待測物相對位置的不同可以分為兩種組態：

1. Otto 組態

2. Kretschmann 組態

1. Otto 組態

將金屬薄膜鍍在平面玻璃上，並在其上置放一塊稜鏡，調整稜鏡與平面玻璃間的空氣間隙，使得間隙大小約一個波長的距離，如下圖所示，其中 θ 為入射角，為表面電漿共振之波向量， n_0 、 n_1 、 n_2 分別為稜鏡、金屬薄膜、空氣的折射率。Otto 組態的缺點為必須精準地控制稜鏡與金屬薄膜介面之間的空氣間隙，當空氣間隙太寬或太窄時，都無法激發出表面電漿波，因此控制空氣間隙的寬窄將會成為使用此組態的主要難題。

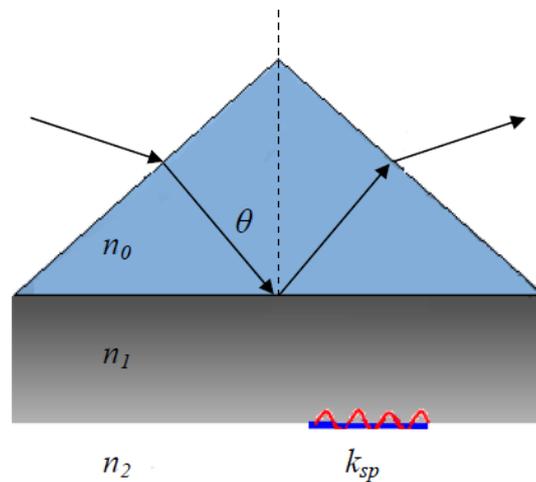


Otto 組態架構圖

Kretschmann 組態：

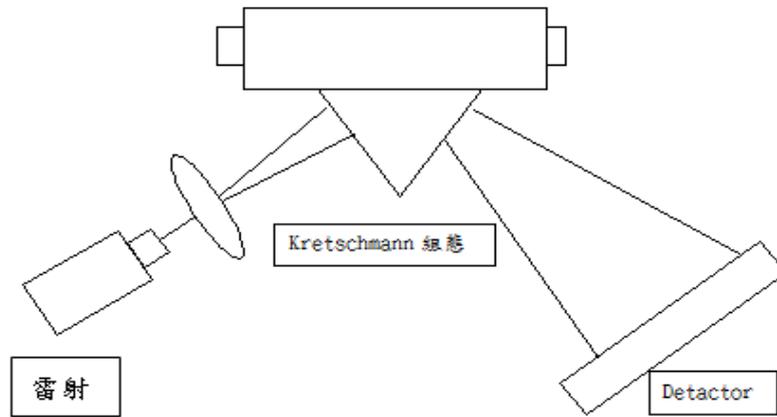
Kretschmann 架構為稜鏡、金屬薄膜、待測物三層疊合的架構，如下圖所示，其中 θ 為入射角， k_{sp} 為表面電漿共振之波向量， n_0 、 n_1 、 n_2 分別為稜鏡、金屬薄膜、空氣的折射率。入射光發生全反射後的消逝波在遠離稜鏡的另一端金屬與空氣的介面上激發出表面電漿波，表面電漿波沿著待測物與金屬薄膜的下緣介面而傳遞。

在一般實驗室中，大多將金屬膜鍍在一載玻片上，再使用與稜鏡相同折射率的耦合液，使得稜鏡與載玻片成一 Kretschmann 組態，其架構簡單、對光容易。



Kretschmann 組態架構圖

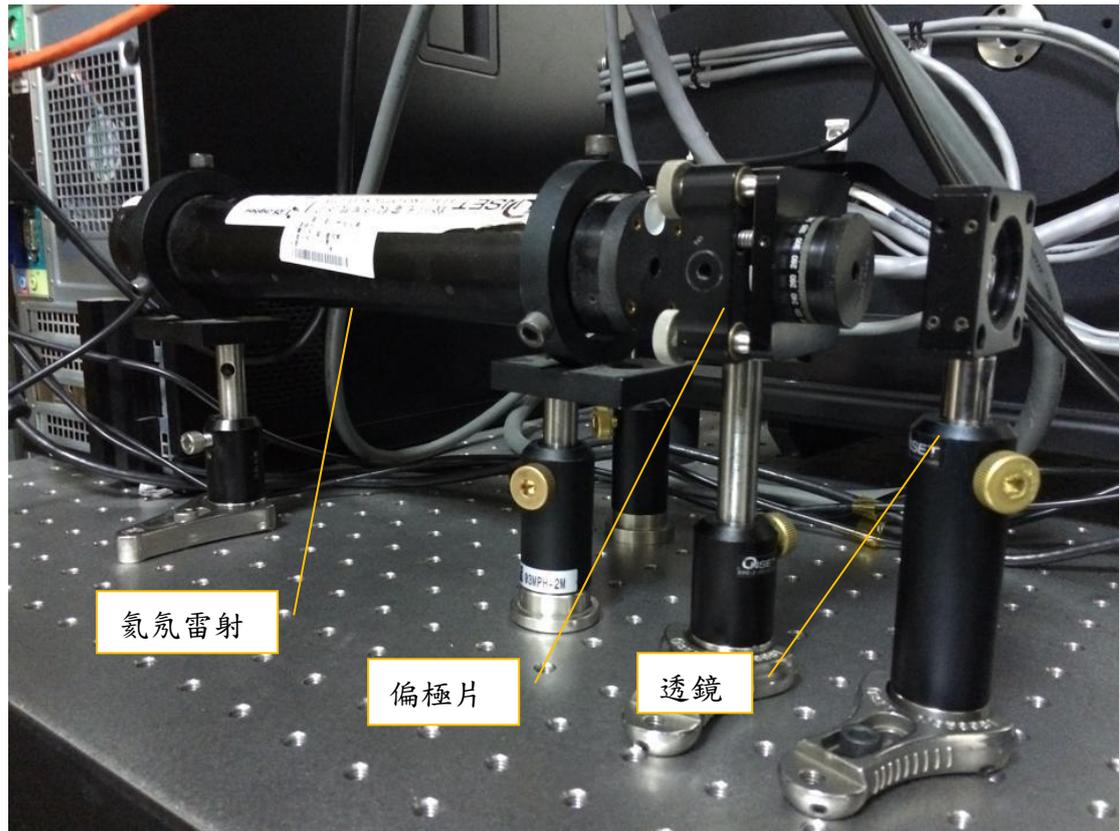
第二章 實驗架構及評估



本架構主要分成三個部分：光源(雷射+透鏡組)、kretschmann 組態(稜鏡+腔體)、Detector/屏幕。使用雷射加上透鏡組來產生一個範圍的入射光，當這一個範圍的入射光的角度為大於全反射角度，打入 Kretschmann 組態後，此時我們將可以在 Detector/屏幕上觀察到一個較暗的光線，此光線所對應到的角度為發生表面電漿共振的角度。

2.1 光源(雷射+透鏡組)

在光源的部分，我們為了要得到一個有範圍角度的入射光，所以我們使用氬氬雷射，並且在根據前面所述的表面電漿共振原理，我們可以得知表面電漿共振只有發生在 TM 波的時候，所以我們在氬氬雷射後加了一片偏極片，使我們可以得到 TM 波的入射，再來為了要得到一個擴束的光，於是我們在偏極片後面加了一面透鏡，結構如下圖。



2.2 kretschmann 組態(稜鏡部分)評估

稜鏡的部分是以BK7為材質，並且在上面鍍上_ _的均向銀。在分析薄厚的厚度上我們使用Macleod薄膜模擬軟體，針對不同厚度來做評估

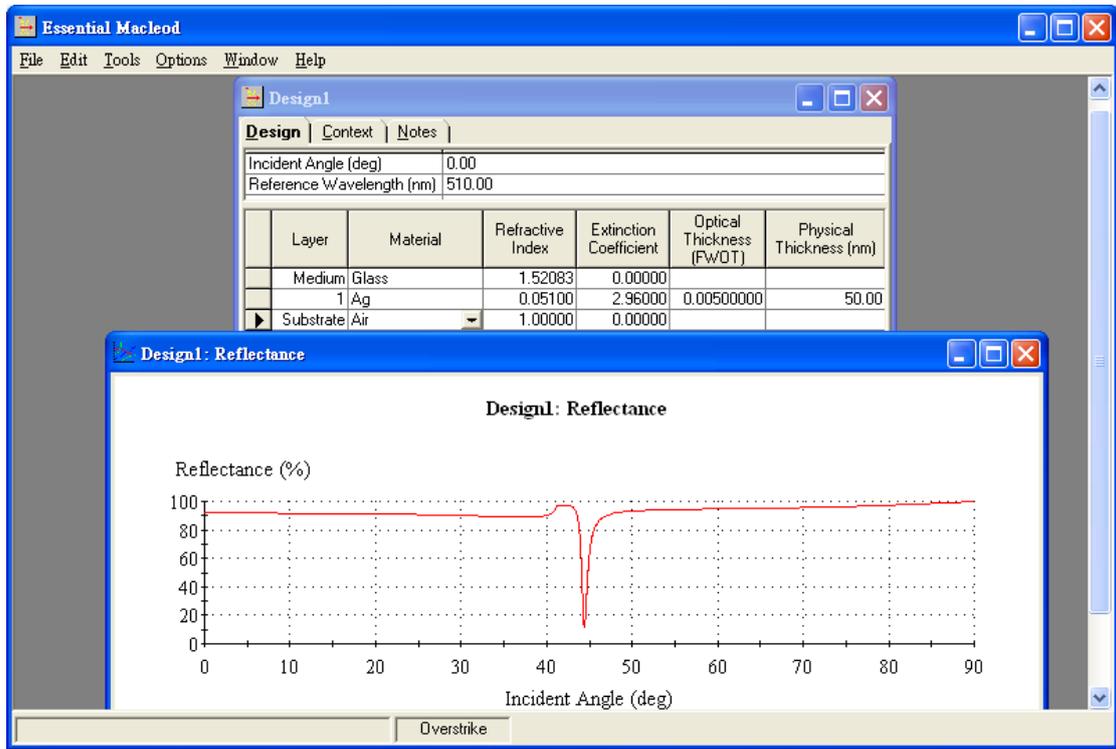
1. Macleod 薄膜模擬軟體介紹

Macleod 是一款光學薄膜設計和分析軟體，可以用來分析均向薄膜的各種特性參數，不但包括反射率(reflectance)、透射率(transmittance)和相位(phase)，還包括顏色(color)，橢圓偏振量(ellipsometric)等。能方便的創建或編輯各種不同折射率的材料，並擁有各種薄膜材料和基底材料的資料庫，讓你有許多材料來模擬出你所想要的薄膜。

在這次實驗中，我們使用 Macleod 薄膜軟體，來模擬這次實驗中所用到 kretschmann 組態稜鏡部分，我們進行模擬的厚度範圍為 40nm~100nm，透過 Macleod 薄膜軟體我們可以看出反射率最低的角度為多少與最低反射率為多

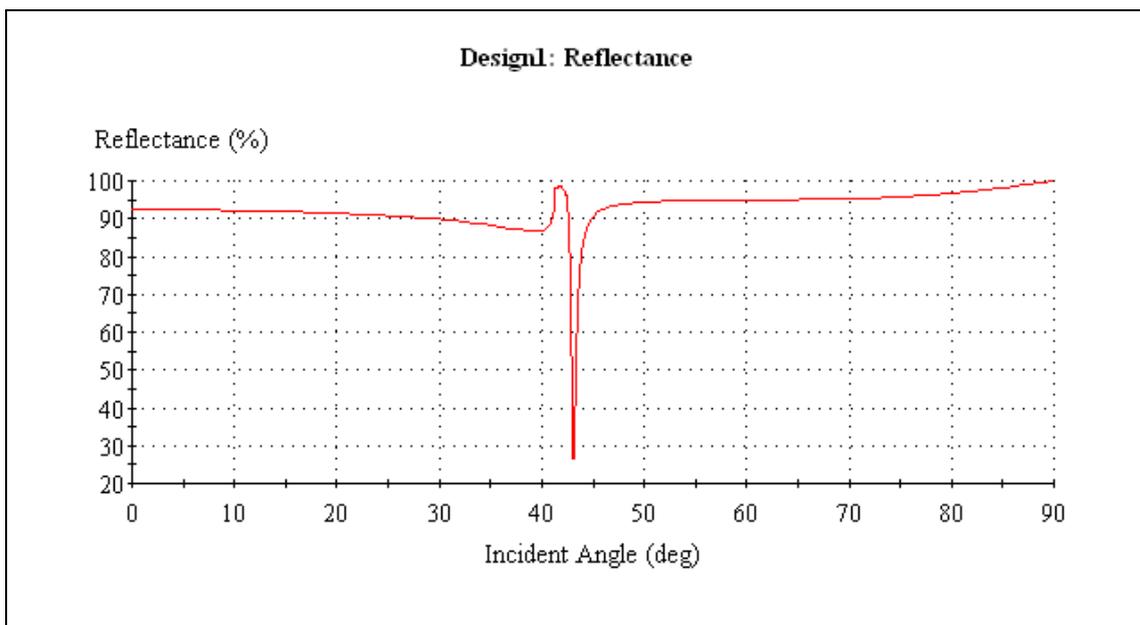
少。

步驟:首先設定好材料(Glass→Ag→Air)，入射光的波長為 632.8nm，並根據所要厚度一一輸入到軟體中，然後在設定所要輸出的圖型，這裡我們注重的是波長與反射率/角度的作圖，圖為 Macleod 薄膜模擬軟體的操作界面。



2. 薄膜厚度評估

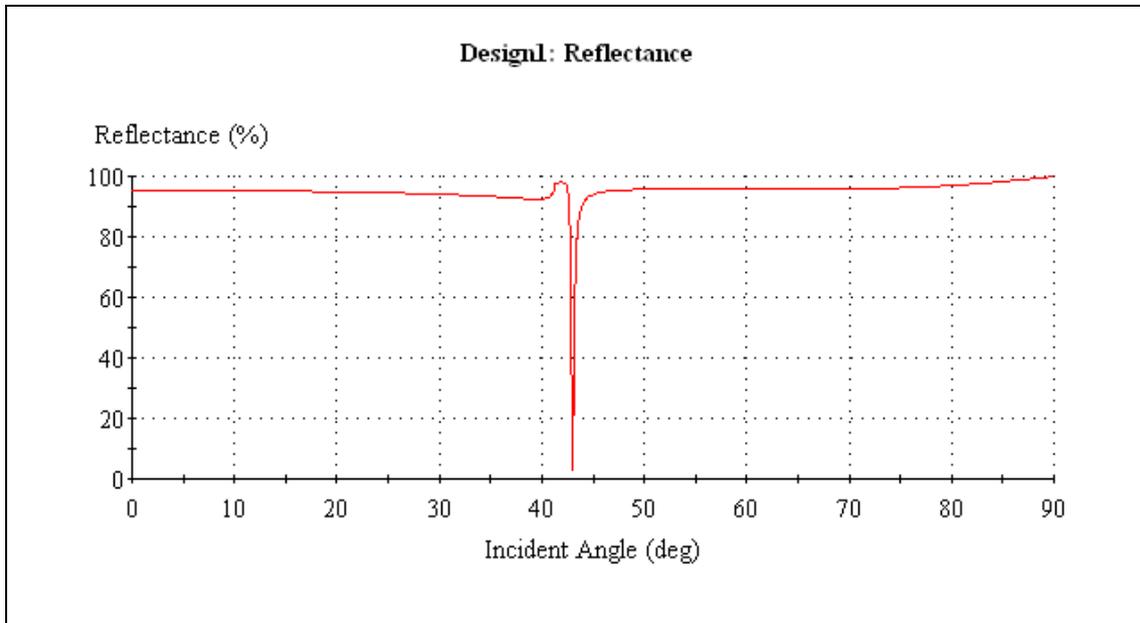
(1)厚度為 40nm



a. 反射率最低的點出現在 43 度

b. 反射率為 27.16%

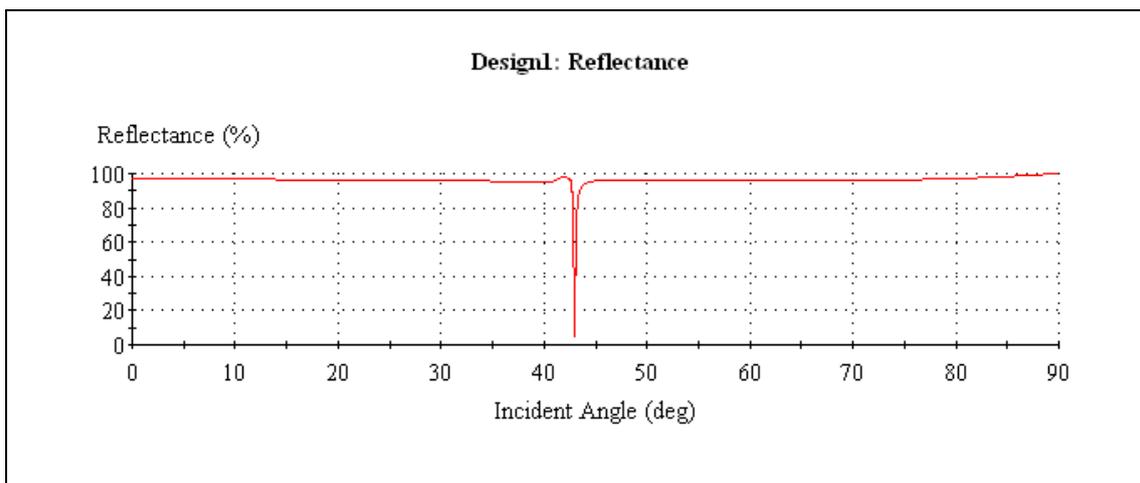
(2) 厚度為 50nm



a. 反射率最低的點出現在 43 度

b. 反射率為 3.04%

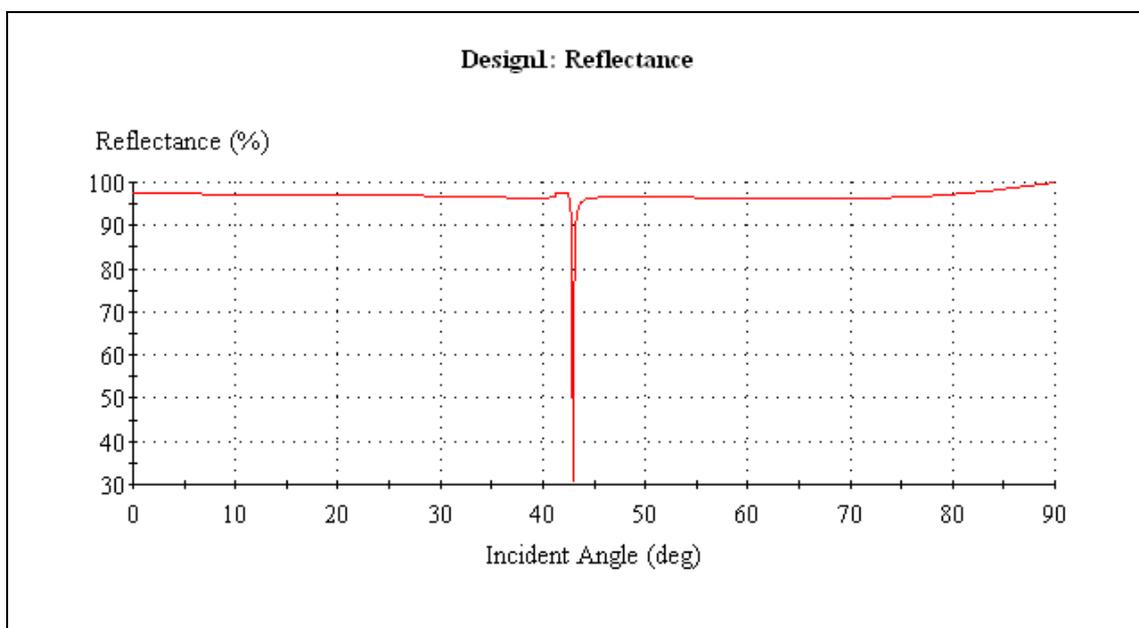
(3) 厚度為 60nm



a. 反射率最低的點出現在 42.965 度

b. 反射率為 4.834%

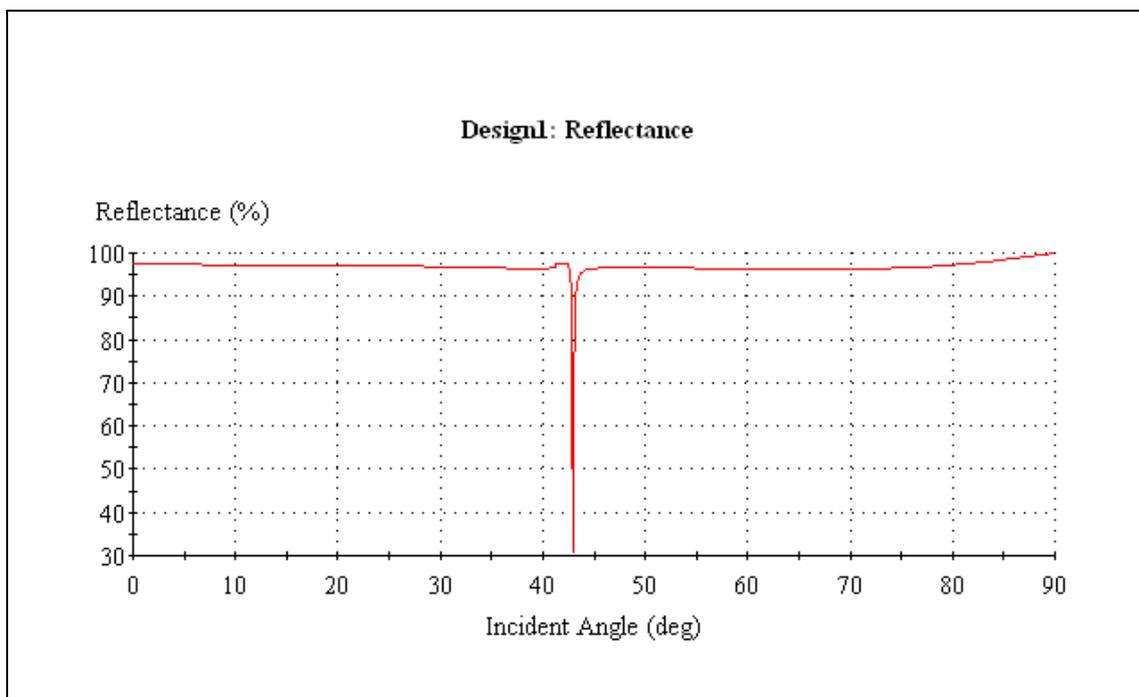
(4)厚度為 70nm



a. 反射率最低的點出現在 43 度

b. 反射率為 30.66%

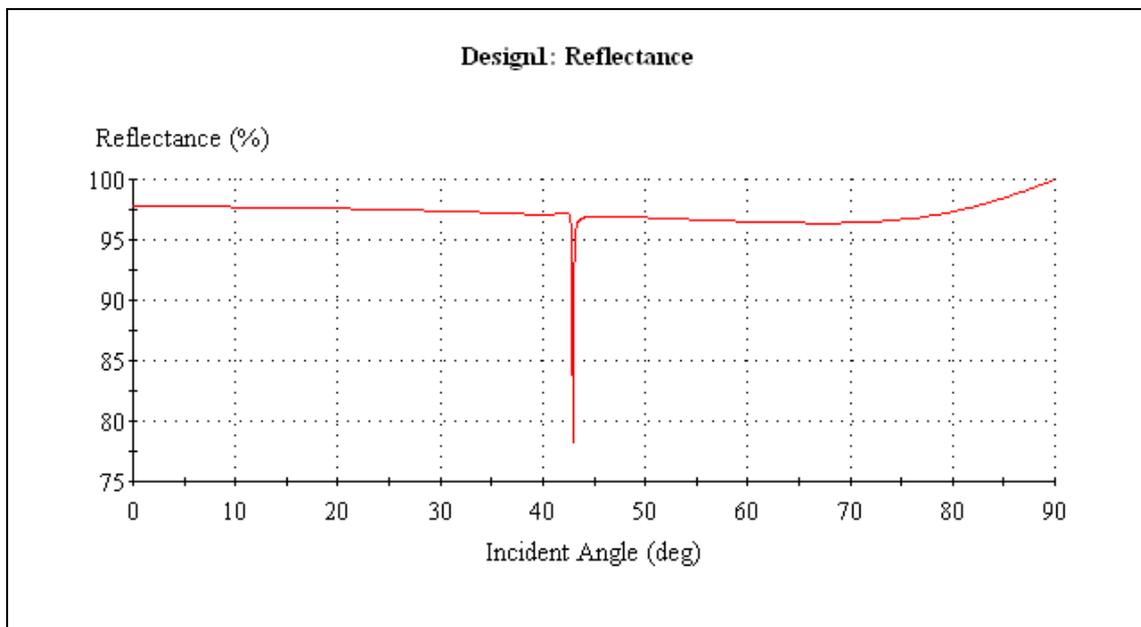
(5)厚度為 80nm



a. 反射率最低的點出現在 43 度

b. 反射率為 59.19%

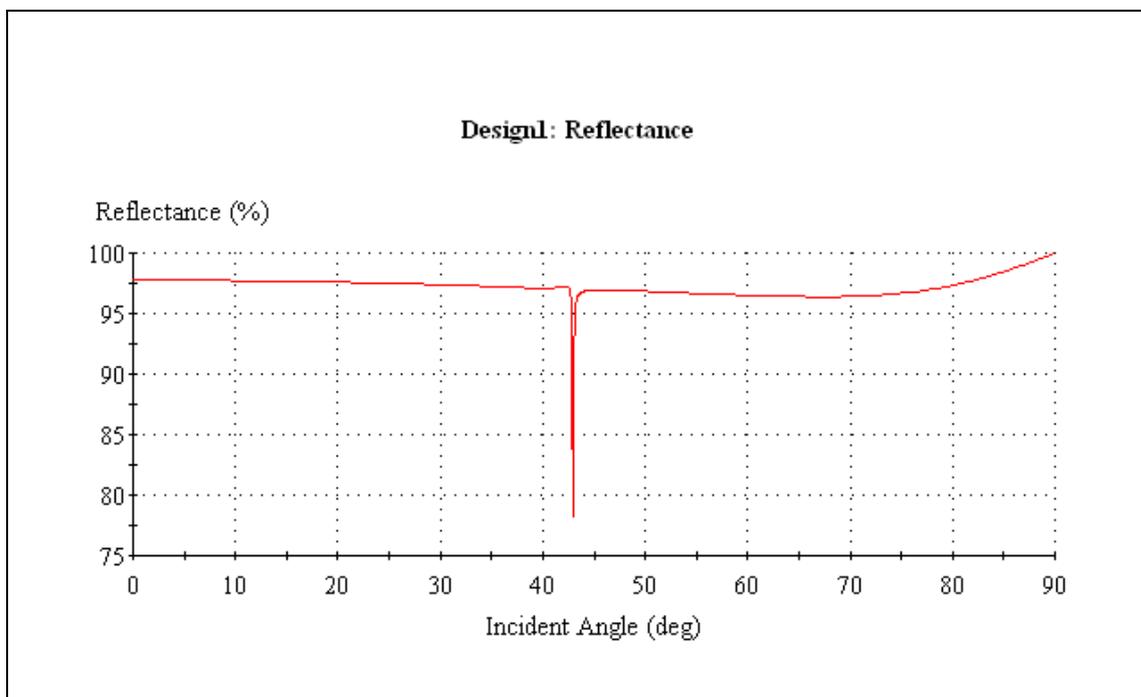
(6) 厚度為 90nm



a. 反射率最低的點出現在 43 度

b. 反射率為 78.28%

(7) 厚度為 100nm



a. 反射率最低的點出現在 43 度

b. 反射率為 78.28%

2.3 kretschmann 組態(腔體部分)製作與評估

腔體製作:

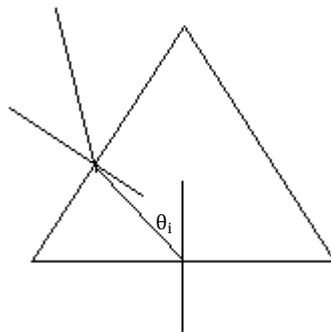
腔體評估:

2.3 入射、反射與折射分析

在這部分的分析主要是要看光在稜鏡中是如何行進的，我們把入射光的角度設定為大於全反射的臨界角，全反射為一個光學的現象，當一束光線通過介質的邊界時，與法線間的角度大於臨界角就會發生全反射，而全反射的臨界角則是利用司乃耳定律 $n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$ 所求出的。

分析步驟:

(1) 畫出一個正三角型做為稜鏡，我們定義入射角為稜鏡裡的光線與法線的夾角 θ_i



(2) 接著利用司乃耳定律反推出光打在稜鏡上的角度。

(3) 接著畫出光線軌跡圖。

第三章 實驗說明

3.1 鍍膜過程

薄膜系統架構

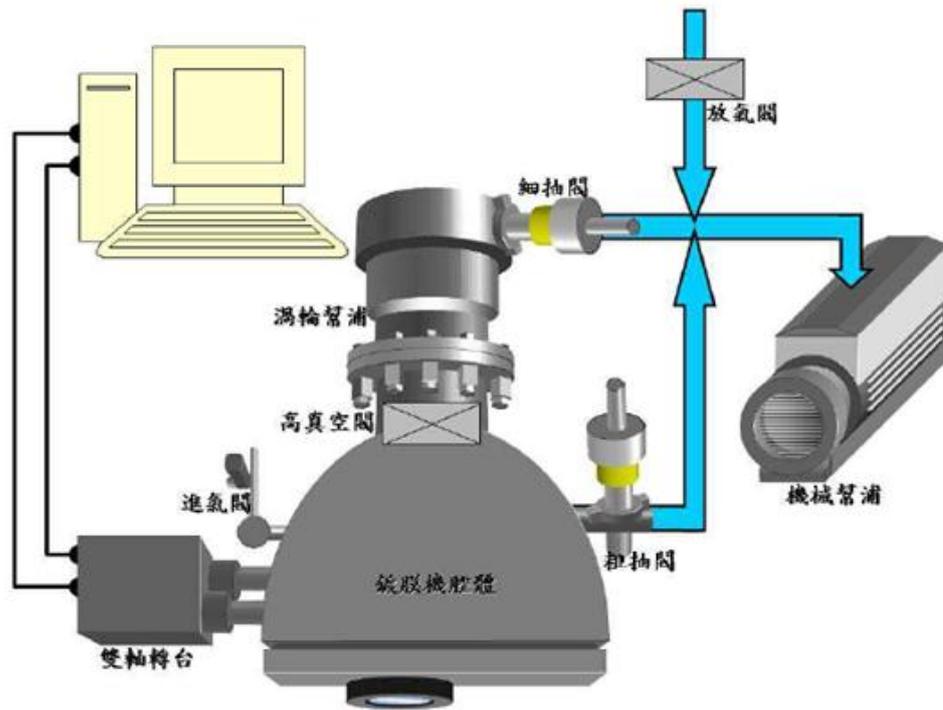
鍍膜機 (coator) 的系統架構主要有(1)真空抽氣系統(2)基板旋轉系統(3)鍍膜系統(4)薄膜厚度監控器，描述如下：

(1)真空抽氣系統，包含機械幫浦 (Mechanical Pump)、渦輪幫浦 (Turbo Pump)，而抽氣流程主要是先利用機械幫浦將腔體內部抽到粗略的真空 (10^{-2} 等級)，再利用渦輪幫浦對腔體抽至高真空 (最高 10^{-7} 等級)，此步驟是為了避免鍍膜時，材料分子與空氣中的分子碰撞過當影響到鍍膜的品質。

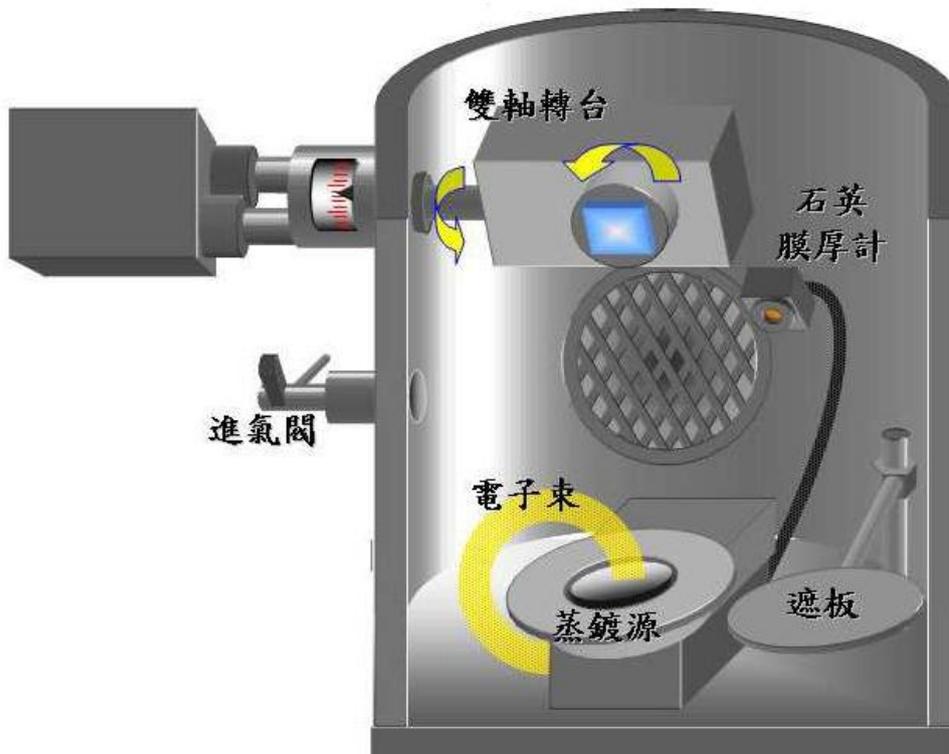
(2)基板旋轉系統，是由兩組步進馬達所構成的雙軸轉台，而兩組馬達可分別控制兩個軸向，其一為斜向製鍍的角度 $\pm \theta$ ，另一個為沿基板法線自轉的軸向，並可由電腦程式控制其轉台的轉速與周期性旋轉，即可製鍍出多種不同結構的非均向薄膜。

(3)鍍膜系統，為電子束蒸鍍法 (Electron Beam Evaporation)，主要是以電子束的高能量直接轟擊材料，當材料蒸發為氣體後，氣態材料的 flux 向上附著於基板的製鍍方式。

(4)薄膜厚度監控器，主要是利用石英振盪晶片的振盪頻率不同，監控薄膜沈積厚度與蒸鍍速率，稱為石英晶體振盪器監控法。



鍍膜系統架構圖



鍍膜機腔體內部構造圖

(1)基板的清潔

基板的清潔度，會影響製鍍出來的薄膜品質，所以清洗基板在實驗中顯得格外的重要。實驗室以BK7 的玻璃基板為主，玻璃基板如果曝露在空氣中過久會被水與潮氣還有灰塵所影響而發霉，所以基板表面上的清潔度是老師特別要求的，清潔基板可先以氣槍將表面的大顆粒吹走，再以脫脂棉花加上清潔劑並用大量清水對玻璃基板反覆刷洗，以確保玻璃基板上沒有顆粒附著在基板上，最後再以去離子水沖洗，並以氮氣吹乾玻璃基板，最後在到強光下檢查玻璃基板的清潔度是否達到要求。

(2)前置作業

將蒸鍍機的載台拆下，使用不要的基板做出一個U字型的凹槽，讓放置基板時比較好放，也比較不會有誤差，接著將載台固定於垂直坩鍋的正上方，將乾淨的玻璃拿出放在載台上，用耐熱膠帶將玻璃基板固定好，並確定玻璃基板各邊的高度都等高，這樣在蒸鍍時才不會因為遮蔽效應而影響到實驗結果。接著將腔體內部黏上鋁箔紙，以方便清潔腔體內部。接著校正三維薄膜雕刻轉台，使基板平面法線與坩鍋蒸鍍法線夾角為 0° ，即為沈積傾角在於零度角($\theta_v=0^\circ$)，再以程式控制所要旋轉的沈積傾角。

在本次實驗上使用所使用的材料為Ag，Ag放置約七分滿即可，最後確認薄膜厚度監控器中的石英晶片使用率是否良好，以及遮板是否有確實遮住基板。

(3)抽真空

開啟電子鎗需要在高真空環境下，所以要先對腔體進行抽氣，首先使用機械泵浦對腔體粗抽至 5×10^{-2} Torr 以下，再使用渦輪泵浦精抽到 8×10^{-6} Torr，則可達到高真空狀態，就可以開始進行薄膜的製鍍。

(4)均向薄膜的製鍍

首先控制儀器選擇欲要鍍的材料，並查表將欲鍍材料的film-number(Ag的film-number為3)輸入，調整電子鎗的電流，並將所要打料的範圍選擇為網狀，將Ag預熱25分鐘，在電流約為30mA時，將打的範圍改成點狀，並開始繞料，使材料均勻受熱，在電流約為50mA時Ag會開始汽化，此時微調電子鎗的電流，使蒸發速率為0.5nm/s。預熱過程中注意腔體內的壓力，壓力太大會影響薄膜品質，所以要將壓力控制在 7×10^{-6} Torr以下。由於這次所要鍍的是均向膜，所以用電腦控制，使載台旋轉，等待蒸鍍速率穩定後，開啟擋板進行製鍍，並觀察石英振盪器所偵測到的厚度，厚度到達欲製鍍的厚度時立刻用擋板遮住基板，並將電子鎗的電流歸零，這樣就完成了Ag的均向膜製鍍。

(6)破真空

由於鍍膜時腔體內的溫度相當高，所以先散熱約15分鐘，散熱後要確定周遭環境的溫度，如有冷氣就要關閉，避免腔體內和室溫溫差太大影響到膜的品質，接著關閉主閥，稍微打開進氣閥讓空氣進入腔體內，等到腔體內的壓力約為 1×10^{-0} Torr時，即可將進氣閥打開約60%，破真空的速度越慢越不會破壞的膜的結構，當腔體內壓力和大氣壓力相等時即可打開腔門，取下玻璃基板，放置到防塵箱中，避免水氣去影響到成品。

3.2 簡易型表面電漿共振感測器操作

- (1)將架構架設好後，先觀察腔體內部沒有輸入任何待測物時候屏幕上的圖案，並且記錄表面電漿波所產生的地方，做為基準點。
- (2)將已經存放在50CC的針筒裡的待測氣體插入腔體的孔洞裡，將待測氣體輸入到腔體內。
- (3)氣體輸入後，觀察屏幕上所產生的圖案，並且記錄並且記錄表面電漿波所產生的地方。

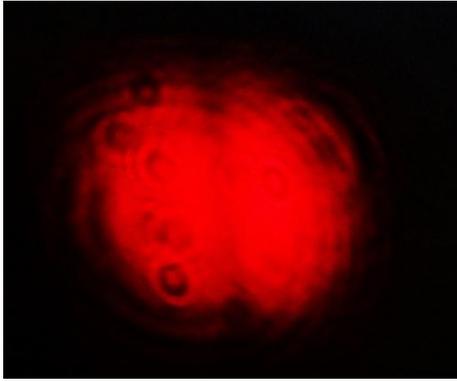
(4)清理腔體內部，還原成最初的腔體環境。

(5)重複 2~4 的步驟，記錄出不同的表面電漿波所產生的地方，可以觀察不同的待測物可以找到不一樣的表面電漿波所產生的地方，然後根據這個現象可以與我們預先量測好的資料做比較，即可得知待測物為什麼氣體。

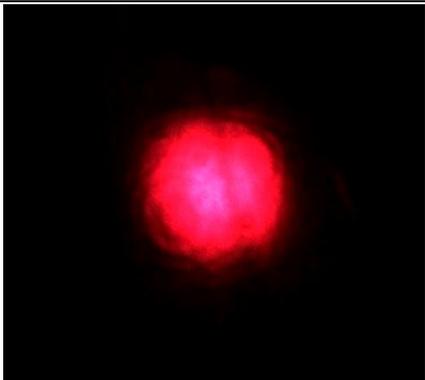
第四章 實驗結果與討論

1. 實驗結果：

腔體內為空氣



腔體內唯待測物



2. 討論：

我們可以觀察到當腔體內部的介質改變，表面電漿共振所產生的最低反射率的光強在屏幕上表面的暗紋位置會改變，未來可以將這個應用在生醫感測方面，藉由反射率光強的改變，可以即時監控待測物的變化。