

第三章 實驗儀器與原理

3.1 超高真空系統 (Ultra-high Vacuum UHV)

實驗室所裝置的超高真空設備如圖 3-1 所示。

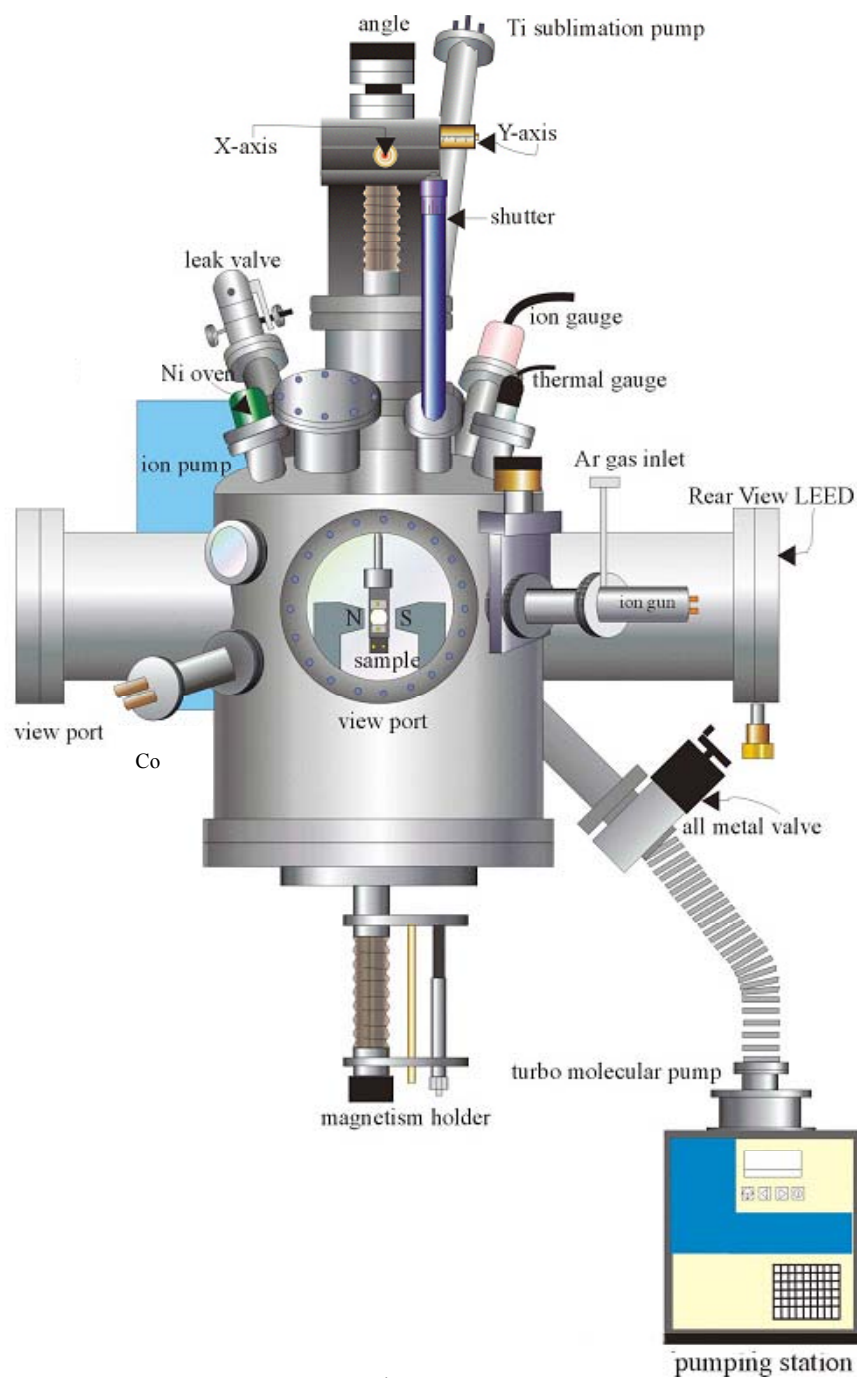


圖 3-1 超高真空設備圖

3.1.1 為何需要超高真空

在表面實驗中，我們對樣品的清潔度要求很高，有好的樣品才會有好的實驗結果，所以對壓力的要求就相當的嚴格。即使壓力在 10^{-6} torr 以下，一個乾淨的樣品也會在幾秒鐘內就覆蓋上一層雜質，而表面分析的儀器（低能量電子繞射儀、歐傑電子能譜分析儀等等..）對表面的敏感度很高，這些儀器探測從表面射回的電子，而這些射回的電子在選用的能量下其平均自由徑（Mean Free Path）大約皆是數層原子而已，若表面覆蓋的雜質太厚，就不能正確的接收由樣品傳回的電子訊號，這將對表面的探測造成很大的影響，所以好的真空度對表面探測的影響實在是很大。

首先，我們將估算壓力大小對樣品表面雜質覆蓋的影響^[18,19]，並以實際數據說明超高真空環境對表面實驗的重要性。

氣體分子在真空腔中會相互碰撞，定義分子兩次碰撞間的平均距離稱為平均自由徑（Mean Free Path），通常以符號 λ 表示之。而碰撞頻率（Collision frequency）則是單位時間內平均的碰撞次數，以符號 f 表示。

$$\text{而 } f = \frac{(\pi d^2 \cdot v_{rel} \cdot \Delta t) N_g}{\Delta t} = \pi d^2 \cdot v_{rel} \cdot N_g \quad (3.1.1)$$

其中 d 為氣體分子直徑（Diameter of an molecular）

N_g 單位體積的分子莫耳數 $\left(\frac{\text{mole}}{\text{cm}^3}\right)$

v_{rel} 為兩分子相對速度（relative velocity）

$$\vec{v}_{rel} = \vec{v}_1 - \vec{v}_2, \text{ 假設 } v_1 = v_2 = v, \text{ 則 } v_{rel} = 2v \cdot \sin \frac{\theta}{2}。$$

計算 v_{rel} 的方均根值（Root mean square；RMS）可得

$$|v_{rel}|_{rms} = \sqrt{2\bar{v}} \quad (\bar{v} \text{ 為平均速度})。$$

$$\therefore f = \sqrt{2\pi} d^2 \bar{v} N_g \quad \circ \text{ 故 } \lambda = \frac{\bar{v}}{f} = \frac{1}{\sqrt{2} N_g \pi d^2} \quad (3.1.2)$$

再定義單位時間內分子碰撞單位表面面積的數目為撞擊速率 (Impact rate)，以符號 F 表示。

$$v_{eff} = \int v \cdot \cos\theta \cdot f(\bar{v}) \cdot d^3v = \iiint v \cdot \cos\theta \cdot f(\bar{v}) \cdot v^2 \sin\theta \cdot dv d\theta d\Phi = \frac{1}{4} \bar{v}$$

$$\text{其中 } f(v) = \left(\frac{m}{2\pi k_B T} \right)^{\frac{3}{2}} N \cdot e^{-\frac{mv^2}{2kT}}$$

$$\bar{v} = \int_0^{\infty} v f(v) 4\pi v^2 dv = \sqrt{\frac{8k_B T}{m\pi}} = \sqrt{\frac{8RT}{M\pi}} \quad (3.1.3)$$

$$\therefore F = \frac{P}{\sqrt{2\pi k_B T m}} \left(\frac{\text{撞擊次數}}{\text{cm}^2 \text{ sec}} \right) = \frac{P}{\sqrt{2\pi k_B T} \frac{M}{N_o}} = 3.51 \times 10^{26} \frac{P}{\sqrt{MT}} \left(\frac{\text{molecular}}{\text{m}^2 \text{ sec}} \right) \quad (3.1.4)$$

此處 P 單位為 Torr。 M 代表分子量。 T 為溫度，單位取 K。

接著定義覆蓋率 (Coverage)：以符號 θ 表示之。定義 $\theta = \frac{n_a}{n_o}$

其中 n_a 代表單位表面面積吸附的分子 sites 數。 $n_a = F \cdot t \cdot S$

S 為黏著率 (sticking coefficient)， $0 < S < 1$ 。

t 為時間，單位使用 sec。

n_o 為樣品表面 sites 數，一般 $n_o \cong 10^{15}$ (sites/cm²)。

接下來我們便可來計算覆蓋率 θ ：(以氮 N₂ 而言)

$$\Rightarrow \theta = \frac{FtS}{n_o} = \frac{3.51 \times 10^{22} \times P}{\sqrt{MT}} tS \times \frac{1}{10^{15}} \quad (3.1.5)$$

以覆蓋一層來計算 $\theta=1$ ， S 代最大值 1，溫度取室溫約 300K，壓力取

10^{-6} torr。則：

$$1 = \frac{3.51 \times 10^{22} \times 10^{-6} \times t \times 1}{\sqrt{28 \times 300 \times 10^{15}}}$$

得 $t \cong 2.6$ (sec)

由表 3.1，可知道壓力好壞對污染樣品與否有絕對的關係。

壓力 P (torr)	鋪覆一層時間 (sec)	鋪覆一層時間 (hour)
10^{-6}	2.6	0.000722
10^{-7}	26	0.00722
10^{-8}	260	0.0722
10^{-9}	2600	0.722
10^{-10}	26000	7.22
10^{-11}	260000	72.2
10^{-12}	2600000	722

表 3-1

3.1.2 超高真空腔與抽氣系統

1. 超高真空腔：

為美國 MDC 公司所製，型號 SSAC-12D。

2. 抽氣系統：

本實驗室的抽氣系統包含以下四部份，目前壓力最好可至 2×10^{-10} torr。

(1) 拖曳幫浦 (Diaphragm Vacuum Pump)：

台灣漢疆公司代理，廠牌為 PFEIFFER，型號為 MVP 055-3。

(2) 渦輪分子幫浦 (Turbo Molecular Pump) :

台灣漢疆公司代理，廠牌為 PFEIFFER，型號為 TMU 521P。

(3) 離子幫浦 (Ion Pump) :

美國 Varian 廠製 VacIon Plus 150 Diode，型號 919-0404。標準抽氣速率為 150 l/s ，使用壽命為在 $1 \times 10^{-6} \text{ mbar}$ 的壓力下可連續使用 50000 小時，工作電壓為 $+7000 \text{ Vdc} \pm 10\%$ ，最好可抽至壓力低於 10^{-11} mbar 。

(4) 鈦昇華幫浦 (Titanium Sublimation Pump) :

英國 ITL 廠製，型號 TSP4C。共有三根鈦金屬棒，工作電流 50A。

3.1.3 樣品清潔與升降溫

1. 樣品清潔

我們採用離子濺射的方式來清潔樣品表面。利用微調氣閥將氬氣 (99.99%) 由小鋼瓶中引進離子槍 (英國 VG Microtech 廠製造，型號為 EX03) 之內，使其壓力達 $7 \times 10^{-6} \sim 8 \times 10^{-6} \text{ torr}$ ，此時離子槍再將其激發為氬離子，並以電場加速之，使其離子動能以 $1.5 \text{ KeV} \sim 2 \text{ KeV}$ 撞向樣品表面，將樣品表面的原子打掉，並藉由抽氣系統捕捉，以達到清潔樣品表面的目的。

2. 樣品升降溫系統

經離子濺射後的樣品，其表面原子被打亂呈現凹凸不平的狀態，我們採用退火效應 (annealing effect)，將樣品加熱，利用原子受熱獲得動能，便能移動，進而達到重排的效果以得到平坦的單晶面以供實驗。圖 3-2 所示，即為我們的升降溫系統圖。

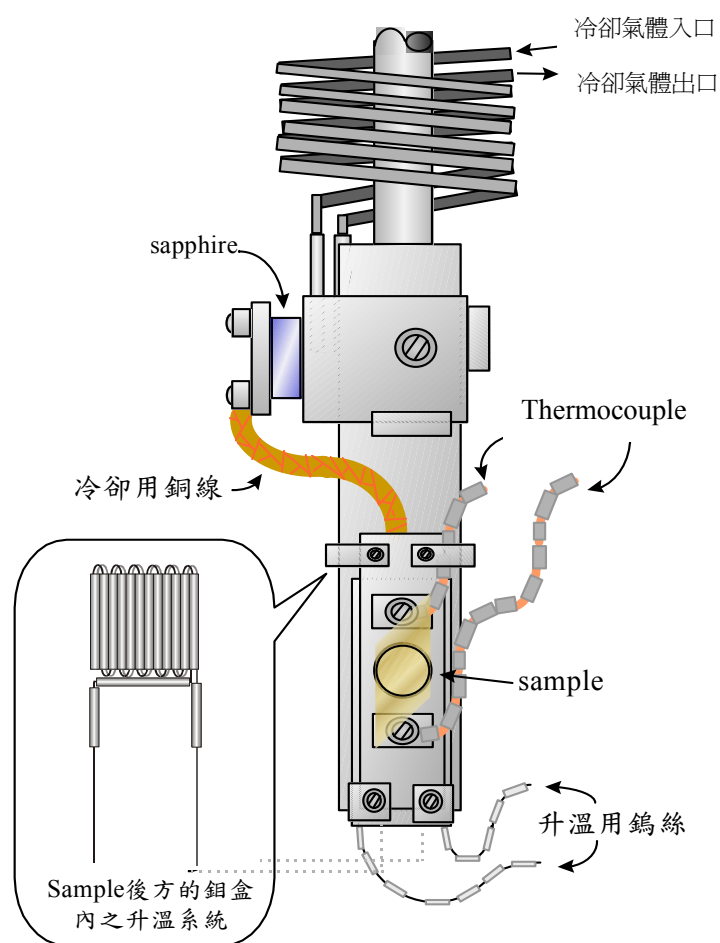


圖 3-2 樣品升降溫系統裝置圖

加熱系統是用長 70 cm，直徑 0.25 mm 的鎢絲穿過 17 根內徑 0.3 mm、外徑 1.2 mm 且長為 2 cm 的雙孔陶磁（材質為 99.7% Al_2O_3 ），將之作柵狀排列，置於樣品後方鉬盒內。加熱時，通電流使鎢絲發熱再傳至樣品，再藉由 K-type 的熱電偶來量測樣品的溫度。

降溫系統是以蛇管通入經由液態氮降溫之 N_2 氣體冷卻 sapphire，藉由 sapphire 導熱不導電的特性導走樣品熱量，達到降溫效果。此外，本系統採

用陵勝公司所製造的控溫系統(型號 818)，藉由控制鎢絲電流與通入冷卻氣體的強弱，可使溫度控制在 $-110^{\circ}\text{C} \sim 1200^{\circ}\text{C}$ 的範圍內。

3.1.4 蒸鍍系統

我們採用熱蒸鍍的方式鍍膜，隨鍍源金屬特性不同而採不同的架設方式，分述如下：

1. Co 鍍源：由於鈷受熱後可直接昇華，故採用直熱式的設計。

我們將 Co 絲 (99.995%) 直接固定於 feedthrough 上轉接頭 (adapter)，如圖 3-3 所示。蒸鍍時，由 feedthrough 上通以電流 4.67A (功率約 19.8 W)，即可使 Co 絲生熱而釋放出 Co 原子。

2. Ni 鍍源：鎳受熱後與 Co 相同可以直接昇華，所以也是採用直熱式設計。

將 Ni 絲 (99.995 %) 固定在 feedthrough 上，圖與 Co 鍍源相同，只是通以 feedthrough 5.3 A 電流(功率 19.1 W)，即可使 Ni 絲生熱而釋放出 Ni 原子

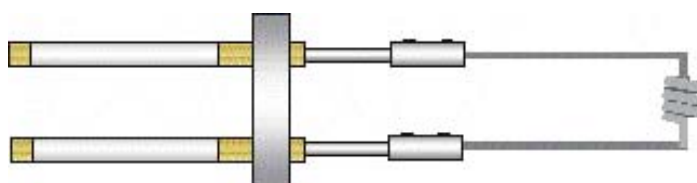


圖 3-3 Co 鍍源與 Ni 鍍源

3.1.5 壓力測量系統

美國 MDC 廠製，型號 PGC3-2T。量測粗真空壓力($\sim 10^{-4}$ mbar)的 thermal gauge 及量測超高真空壓力(10^{-4} mbar~)的 ion gauge。

3.2 歐傑電子能譜術 (Auger Electron Spectroscopy)

用於提供最表面數個原子層成分元素的種類分析。

3.2.1 歐傑效應

歐傑電子是由歐傑效應 (Auger Effect)^[20] 而來的。圖 3-4 就是 $KL_1L_{2,3}$ 的歐傑電子產生的過程：

- 原子的初始狀態， E_f 是費米能階。
- 以光或能量 E_i 的電子（數 keV）入射式樣原子而游離其 K 層電子，在 K 層形成電洞，使原子成為激發的不穩定態。
- L_1 層的電子降落至 K 層，而釋放出能量 $E_K - E_{L_1}$ 。
- 此能量 $E_K - E_{L_1}$ 可能會以光的形式釋放；但也可能把這個能量用來游離更上層 $L_{2,3}$ 的電子，此即歐傑效應。而這些由 $L_{2,3}$ 出來的電子，即稱為 $KL_1L_{2,3}$ 的歐傑電子。而它的能量 E_A 為：

$$E_A = E_K - E_{L_1} - E_{L_{2,3}} \quad (3.2.1)$$

明顯地與入射電子能量 E_i 無關，只與原子內各軌域間之能量差有關，所以 AES 具有元素的鑑別率。

一種原子通常會放出數種歐傑電子，常見的有 KLL、LMM...等。而且，原子產生光或產生歐傑電子的機率與原子序有很大的關係，如圖 3-5

所示。

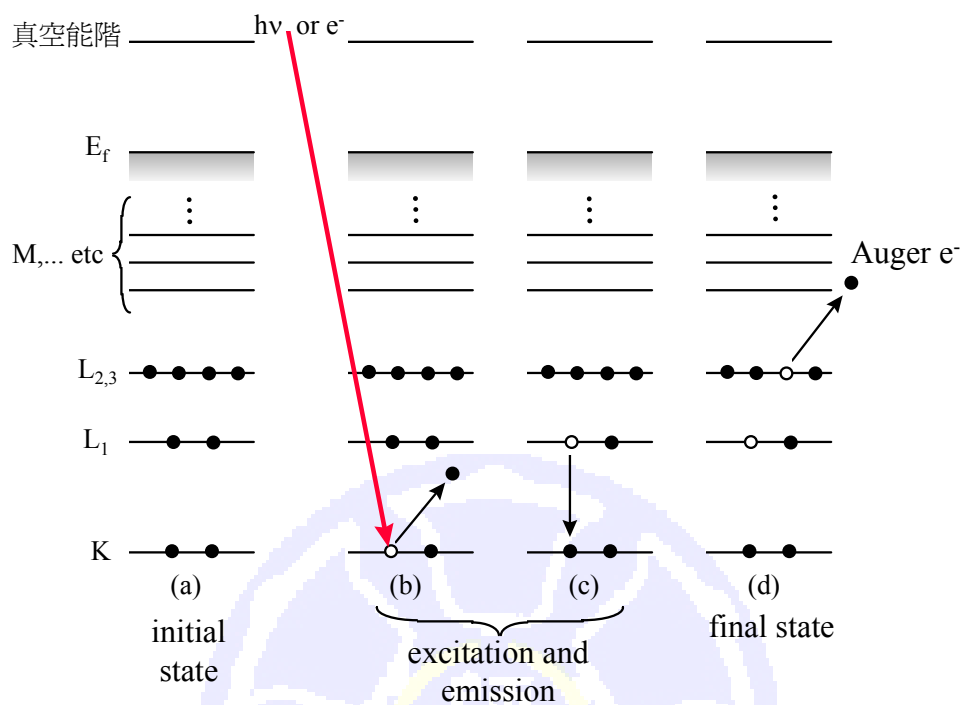


圖 3-4 歐傑效應

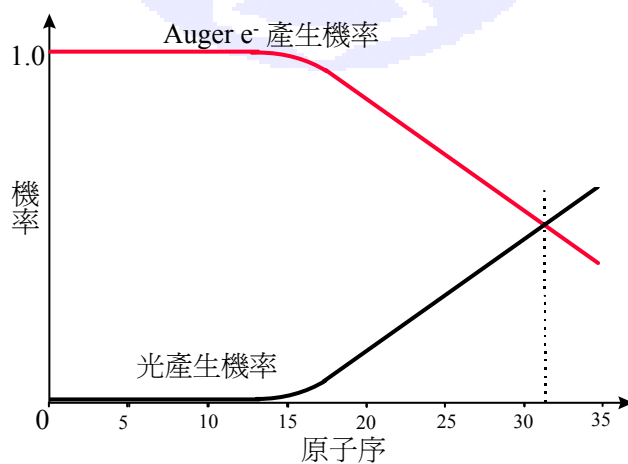


圖 3-5 Auger 電子與 X-ray 產生機率與原子序的關係圖

3.2.2 歐傑電子能譜

將一束能量為數千電子伏特的電子打向樣品，再收集由樣品上反射回來的電子，分析這些電子的能量分佈圖形，即是電子能譜^[21]，如圖 3-6。譜中可發現除了低能量處有一個很大的背景峰外尚有許多小峰值，其位置是隨樣品種類而異的，這些小峰值所代表的電子，就是歐傑電子。

要計算出不同能量的歐傑電子個數，由峰值下的面積積分可得，但因背景值甚大，歐傑電子的小峰值並不容易觀察。為解決這樣的問題，便以高斯分佈函數來近似峰值，由計算可推知電子個數會正比於微分譜上極大與極小值的高度差，且微分能譜的高度差遠較原始峰值明顯易讀取，如圖 3-7 所示。而 AES 手冊上所負的索引圖也均是微分能譜，因此作 AES 時，一般先由儀器偵測電子能譜，再經電腦計算或其他方式得到微分能譜。

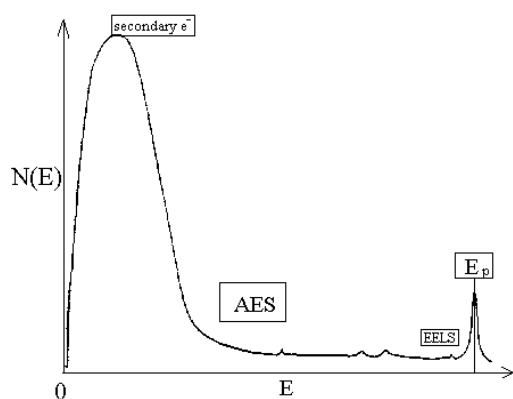


圖 3-6 電子能譜圖

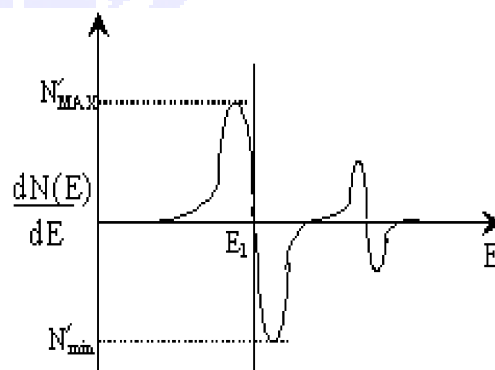


圖 3-7 微分電子能譜

3.2.3 阻滯電場分析儀 (Retarding Field Analyzer-Auger Electron Spectroscopy, 簡稱 RFA-AES)

1. 基本構造 ^[21]

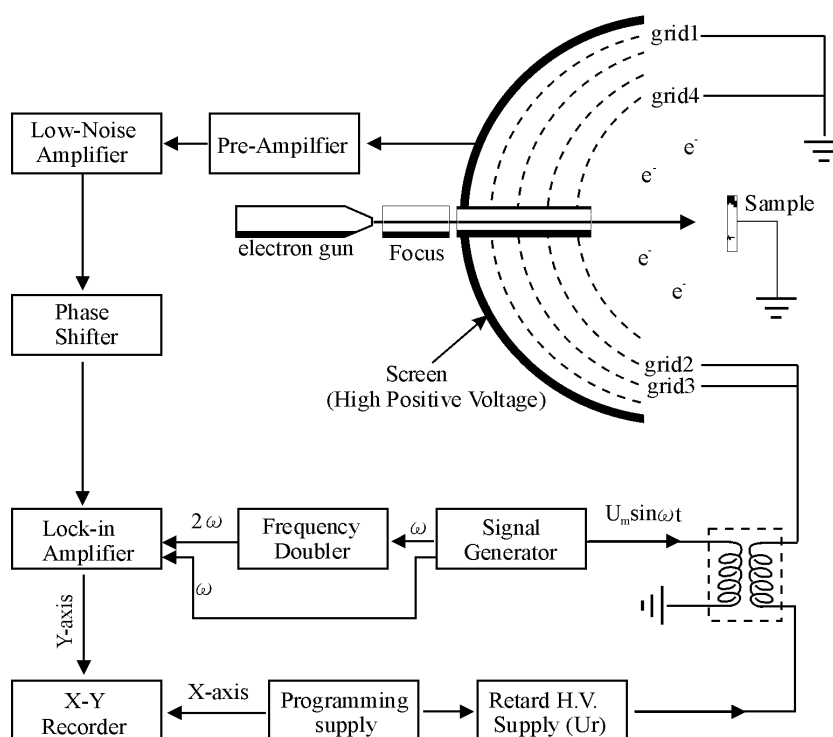


圖 3-8 RFA-AES 構造圖

- (1) 如圖 3-8 所示，grid2 與 grid3 之間加上 U_r 及一很小的正弦電壓 $U_m \sin \omega t$ (由 Signal Generator 產生)，此電壓之正負是為了為阻止電子由 grid2 向 grid3 運動；因此當電子槍以 3keV 的電子動能將電子射向樣品，樣品因電子的撞擊散射出各種能量的電子時，只有能量大於 $(U_r + U_m \sin \omega t)$ 的電子能夠通過 grid2 到達 grid3。
- (2) grid1 與 grid4 接地的作用則是防止 Collector 與 grid3 或樣品與 grid2 之間產生電容效應，影響偵測。

- (3) Collector 上通常會加上數百伏特的正電壓，使通過 grid3 的電子加速撞向 Collector，形成可偵測的電流，並經由 Pre-Amplifier 放大後，傳到 Lock-in Amplifier 分析。
- (4) 進入 Lock-in Amplifier 的訊號有三個，其中兩個為 Signal Generator 與 Frequency Doubler 所提供的 ω 與 2ω 的訊號，另一個則為經 Lock-in Amplifier 放大的偵測電流。藉由選擇分析 ω 或 2ω 與電流訊號大小，再傳至 X-Y Recorder 作為 Y 軸電壓，同時以 U_r 作為 X 軸電壓，進而繪出電子能譜(選擇 ω)或微分電子能譜(選擇 2ω)。

2. 分析原理^[21]

$$I(U_r) \propto \int_{eU_r}^{\infty} N(E) dE \quad (3.2.2)$$

其中 $I(U_r)$: 阻滯電壓為 U_r 時的電流

$N(E)$: 能量為 E 的電子數目

將 (3.2.2) 式對 U_r 微分，可得

$$N(E) \propto \frac{d I(U_r)}{d U_r} \quad (3.2.3)$$

由 modulation 電壓，所以 I 可寫成

$$I(U_r + U_m \sin \omega t)$$

經泰勒展開式

$$I(U_r + U_m \sin \omega t) = I(U_r) + I'(U_r) \cdot U_m \sin \omega t + \frac{I''(U_r)}{2!} \cdot U_m^2 \sin^2 \omega t + \dots$$

並將之整理成 ω 的函數

$$I(U_r + U_m \sin \omega t) = A(0) + A(\omega) + A(2\omega) + \dots \quad (3.2.4)$$

$$\text{其中, } A(\omega) = U_m \cdot I'(U_r) + \frac{U_m^3}{8} \cdot I'''(U_r) + \dots$$

$$A(2\omega) = \frac{U_m^2}{4} \cdot I''(U_r) + \frac{U_m^4}{48} \cdot I^{(4)}(U_r) + \dots$$

因為 $U_m \ll U_r$ ，忽略其高次項，可得

$$A(\omega) = U_m \cdot N(E)$$

$$A(2\omega) = \frac{U_m^2}{4} \cdot \frac{dN(E)}{dE}$$

故取 ω 訊號對電子能量作圖，可得電子能譜，取 2ω 訊號對電子能量作圖，可得電子微分能譜。

3.2.4 歐傑電子能譜術的應用

1. 探測表面成分

歐傑電子之能量和入射粒子動能無關，只與歐傑電子來源的元素能階有關，因此透過分析歐傑電子能譜的 peak 訊號位置，可得樣品的元素成分，表 3-2 即為各種原子產生歐傑訊號之能量值^[22]：

C	272	Co	53,656,673,716,775
N	360,379,348	Ni	61,102,716,783,848
O	468,483,503	Mo	28,120,148,161,186,221
Ar	180,200,215	Ag	266,304,351,356
Ti	27,387,418	Ta	26,35,166,171,179,342
Mn	40,442,510,589,636	Pt	43,64,158,150,168,237,251,357,390
Fe	47,550,562,598,651,703	Au	43,66,69,141,150,160,239,255

表 3-2

但同樣元素所產生的歐傑電子，會因為參與歐傑效應的電子軌道不同，產生歐傑電子的能量也不同。電子能量與其平均自由徑的關係如圖 3-9 所示，當電子能量小於 10 或大於 1000eV 時，其平均自由徑大，即穿透原子層的能力較高。當我們偵測到這種能量的歐傑電子時，其訊號來源的深度範圍較大，也就是表面敏感度較差。至於介於 10~1000eV 的歐傑電子，因擁有較小的平均自由徑，穿透原子層的能力較低，所以偵測到這種能量的歐傑電子時，表示其訊號的來源可能在表面幾個原子層範圍內，也就是具有較高的表面敏感度。

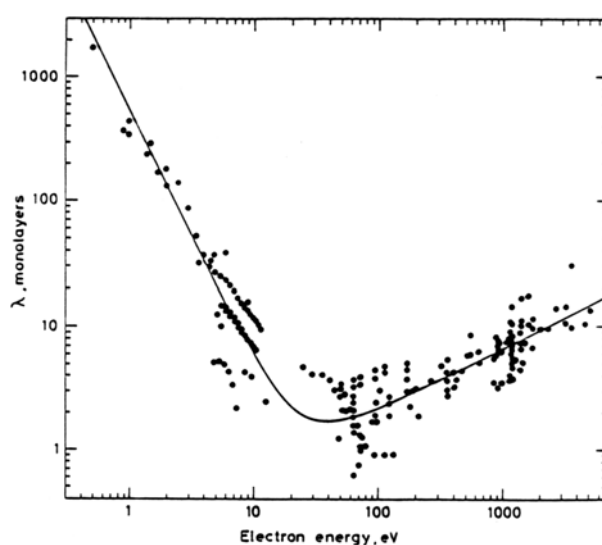


圖 3-9 平均自由徑與電子能量之關係圖

2. 探測表面成長模式

將歐傑訊號對蒸鍍時間作圖，分析其斜率的變化，可得薄膜成長的模式，如圖 3-10；薄膜呈現二維方向成長時，歐傑訊號正比於吸附原子數，故訊號對蒸鍍時間的關係圖為直線；當薄膜長滿一層後，再吸附上的原子層

會阻擋下層原子之歐傑訊號，故關係圖雖仍為一直線，但直線斜率變小，使得恰一層處產生一轉折點。

若薄膜呈現三維島狀成長時，訊號隨吸附原子數增加而增加，但因上層原子阻擋下層原子訊號，故關係圖從三維成長開始，就呈現斜率漸小的曲線。

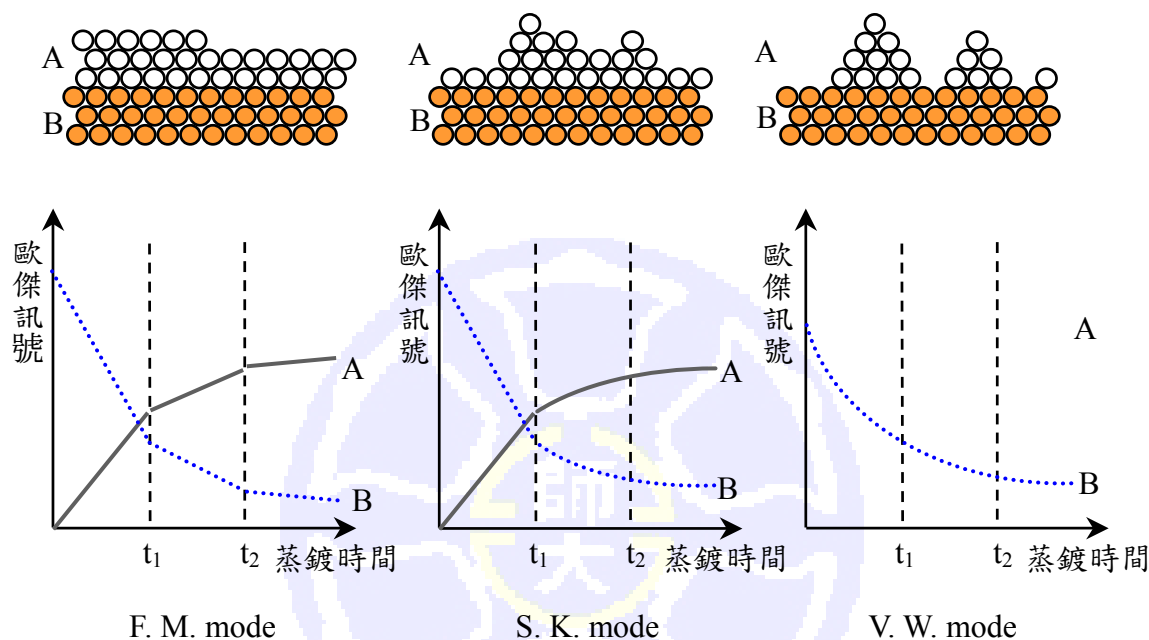


圖 3-10 歐傑訊號與成長模式之關係圖

3. 薄膜厚度的計算^[23,24,25]

圖 3-11 為薄膜鋪覆在樣品表面上的示意圖，藉由歐傑電子微分能譜中，薄膜與基底的訊號比值，可計算出成長於基底表面上的薄膜厚度，我們將列出計算公式：

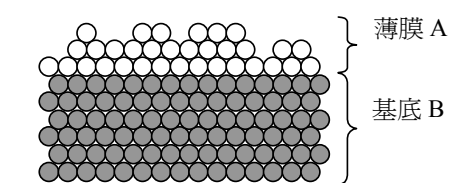


圖 3-11 薄膜 A 與基底 B 示意圖

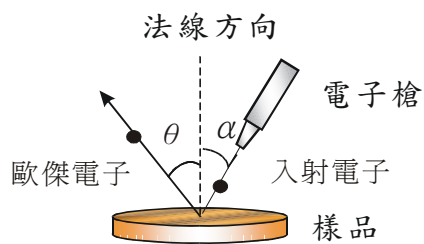


圖 3-12 入射電子、歐傑電子與樣品的方向關係

$$R = \frac{I_A}{I_B} = \frac{I_A^o}{I_B^o} \left[\frac{1 + r_B(E_A)}{1 + r_A(E_A)} \right] \frac{1 - e^{-\frac{d_A}{\lambda_A(E_A)\cos\theta}}}{e^{-\frac{d_A}{\lambda_A(E_B)\cos\theta}}} \quad (3.2.5)$$

- 其中：
- I_A^o ：薄膜 A 為塊材時的歐傑訊號強度
 - I_B^o ：基底 B 為塊材時的歐傑訊號強度
 - I_A ：實驗中所得薄膜的歐傑訊號強度
 - I_B ：實驗中所得基底的歐傑訊號強度
 - d_A ：為薄膜的厚度，單位(nm)
 - E_A 、 E_B ：分別為薄膜元素與基底元素的歐傑電子能量
 - θ ：為樣品法線方向與射出歐傑電子方向的夾角
 - λ_A ：為歐傑電子在薄膜中的平均自由徑(IMFP)
 - r_A 、 r_B ：分別為薄膜元素與基底元素之 back-scattering term

根據 Tanuma's mode^[26]， $\lambda_{Ni(848\text{ eV})}$ 與 $\lambda_{Pt(237\text{ eV})}$ 分別為 1.37 nm 與 0.59，而 γ_{Pt} 與 γ_{Ni} 分別為 1.254 與 0.794，我們實驗儀器之 $\theta = 0^\circ$ ，所以經由實驗得到的 R 值，帶入 (3.2.5) 式，即可估算出薄膜厚度。

3.3 低能量電子繞射儀 (Low Energy Electron Diffractometer, LEED)

3.3.1 LEED 的基本原理

如圖 3-13，晶體中層與層的距離為 d ，波長為 λ 的光波照射晶體反射，若反射光的光程差為波長的整數倍時，則會形成建設性干涉，產生亮點，此即布拉格定律：

$$2d\sin\theta = n\lambda \quad (3.3.1)$$

以電子束入射晶格表面得到繞射圖形，電子的物質波長為：

$$\lambda_e = \frac{h}{p} = \frac{h}{\sqrt{2m_e E}} = \sqrt{\frac{150.4}{E}} \text{ (\AA)} \quad (3.3.2)$$

通常我們選用低能量電子，動能約在 50~1000eV，而繞射圖形所傳遞的並非表面實際晶格的排列，是樣品的反商晶格，以數學式表示如下：

$\vec{G} = h\vec{a}^* + k\vec{b}^* + \ell\vec{c}^*$ ，其中 h 、 k 、 ℓ 為整數，且與實際晶格間的轉換如為：

$$\vec{a}^* = 2\pi \frac{\vec{b} \times \vec{c}}{|\vec{a} \cdot \vec{b} \times \vec{c}|} \quad \vec{b}^* = 2\pi \frac{\vec{c} \times \vec{a}}{|\vec{a} \cdot \vec{b} \times \vec{c}|} \quad \vec{c}^* = 2\pi \frac{\vec{a} \times \vec{c}}{|\vec{a} \cdot \vec{b} \times \vec{c}|} \quad (3.3.3)$$

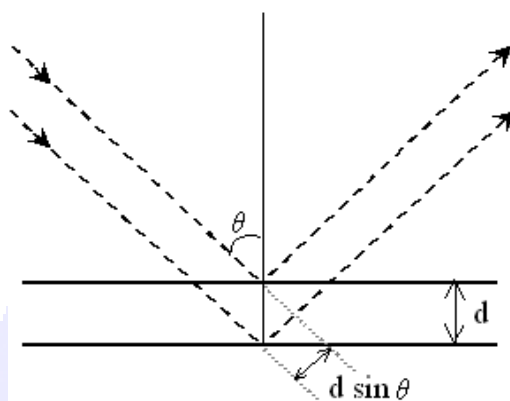


圖 3-13 晶體繞射示意圖

若薄膜為二維，則 $\vec{G}_{hk} = \Delta\vec{k} = h\vec{a}^* + k\vec{b}^*$ ，當入射波與反射波的波數差 $\Delta\vec{k}$ 等於反商晶格向量時，會產生繞射亮點，出現樣品的反商晶格繞射圖形。只要再藉由傅利葉轉換，即可得實際晶格的模型。

3.3.2 RFA-LEED 工作原理

如圖 3-14 所示：

1. 電子槍的燈絲加熱至電子可游離，以數十電子伏特的動能 E 將電子射向樣品，電子撞擊樣品後會散射回來，而被 RFA 收集起來。
2. grid2、grid3 及 grid4 共同接地，使樣品和 RFA 之間沒有雜訊電場折射電

- 子，使電子可以安全通過三個柵極。
3. 樣品所散射的電子，其能量分佈的範圍很廣，由 0 到 E 的能量皆有，LEED 所要的是能量未損失的彈性散射電子。因此在 grid1 上加上一個能量恰為 E 的反向偏壓，使能量低於 E 的非彈性散射電子折回，藉以收集到 LEED 所要的電子。
 4. 當彈性散射電子通過 grid1 後，其動能已經降為零，此時便在螢光幕上加一偏壓吸引電子撞擊螢光幕，使幕上的螢光粉發光，而形成亮點，此即低能量電能繞射圖形。
 5. 螢光幕與所有的柵極都呈半球形，而樣品位於半球形的球心時，可確保所有由樣品散射出的電子均勻分散的到達 RFA。

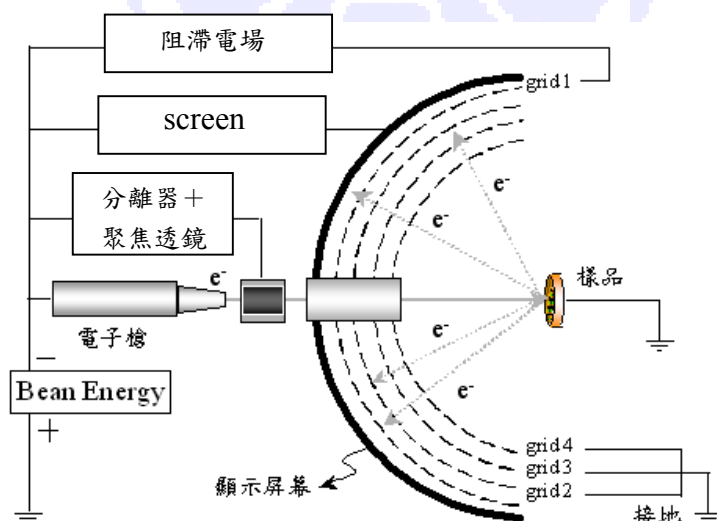


圖 3-14 RFA-LEED 結構圖

3.4 表面磁光柯爾效應 (Surface Magneto-Optical Kerr Effect, SMOKE)

3.4.1 MOKE 理論

線偏振光經鐵磁性物質反射後變為橢圓偏振光，這一現象名為磁光柯爾效應^[27]。磁光柯爾效應的原理，可將線偏振光視為左旋偏振和右旋偏振光的組合，當外加磁場作用或鐵磁材料自發性的磁化使得磁性物質的介電常數產生非對角線元素，左旋和右旋的折射率不再相等，因此這兩種偏振光在樣品中會有不同的吸收係數與反射係數，造成反射光振幅與傳播速率的不同，故經樣品反射後就形成了橢圓偏振。此橢圓偏振光的長軸與原線偏振光的夾角 θ_k ，稱為柯爾旋轉角，而橢圓偏振光的橢圓率 ε_k ，稱為柯爾橢圓率。

θ_k 與 ε_k 皆很小 ($\ll 1^\circ$)，且均與磁性物質的磁化大小 M 成正比，因此量測 θ_k 或 ε_k 隨外加磁場改變的情形，便可反應出磁性物質的磁滯曲線。

按物質的磁化強度 \vec{M} 、樣品表面法線 n 及入射面 Σ 的關係，MOKE 有三種不同的組合，如圖 3-15 所示：

1. 垂直柯爾磁光效應

(Polar Magneto-Optical Kerr Effect, PMOKE)：

\vec{M} 之方向同時與樣品表面法線 n 及入射面 Σ 平行。

2. 縱向柯爾磁光效應

(Longitudinal Magneto-Optical Kerr Effect, LMOKE)：

\vec{M} 之方向與樣品表面法線 n 垂直，與入射面 Σ 平行。

3. 橫向柯爾磁光效應

(Transverse Magneto-Optical Kerr Effect, TMOKE)：

\vec{M} 之方向同時與樣品表面法線 n 和入射面 Σ 垂直。

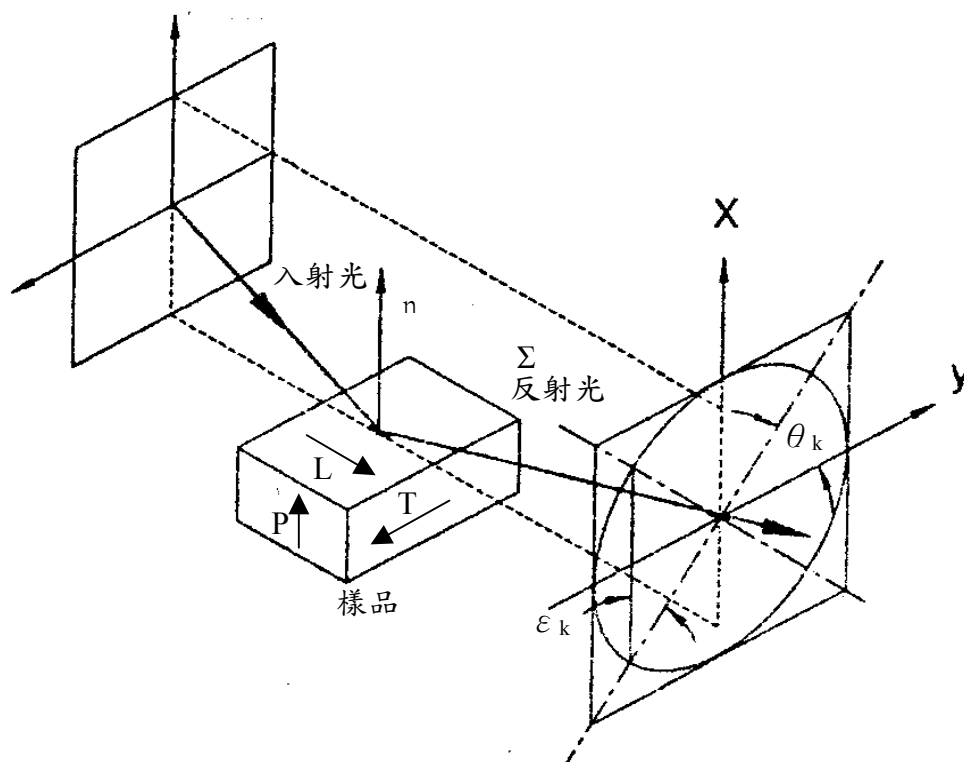


圖 3-15 MOKE 效應的三種方式

3.4.2 MOKE 測量原理

表面磁光柯爾效應 SMOKE 是指當 MOKE 效應靈敏到可以測量薄膜厚度約為一原子層(2 埃)時，柯爾旋轉角約有 10^{-3} 度的變化。



圖 3-16 (A) S 波 (B) P 波示意圖

如圖 3-16 所示，為兩種不同的線偏振光模式。我們選擇以 P 波雷射光為入射光，讀取反射光之 S 波訊號作為量測磁光柯爾效應的方式。由理論可知柯爾旋轉角 θ_k 及柯爾橢圓率 ε_k 正比於樣品的磁化強度 \bar{M} ，且反射光 P 波及 S 波電場分量與 θ_k 、 ε_k 有下列關係^[28]：

$$\frac{E_S}{E_P} = \theta_k + i\varepsilon_k \quad (3.4.1)$$

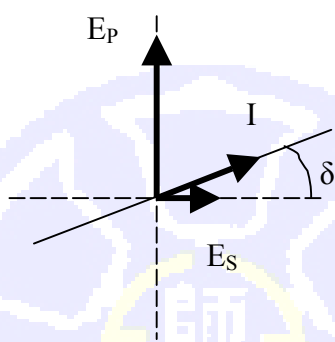


圖 3-17 檢偏器與反射光關係圖

測量時，將檢偏器由平行 S 波的方向調整一小角度 δ ($\delta \approx 0^\circ$)，如圖 3-17 所示，則反射光通過檢偏器後的強度 I 可以表示為：

$$I = |E_P \sin \delta + E_S \cos \delta|^2 \quad (3.4.2)$$

將(3.4.1)式代入(3.4.2)式，且 $\sin \delta \approx \delta$ 、 $\cos \delta \approx 1$ 、忽略 θ_k 、 ε_k 的高次項得：

$$I \approx E_P^2 |\delta + \theta_k + i\varepsilon_k|^2 \approx |E_P|^2 (\delta^2 + 2\delta\theta_k) \quad (3.4.3)$$

因柯爾旋轉角 θ_k 極小，故 $E_S \ll E_P$ ；且原入射光為 P 波，因此在未外加

磁場時原入射光經樣品反射後，通過檢偏器後的強度 I_0 可近似為：

$$I_0 \approx E_p^2 \sin^2 \delta = E_p^2 \delta^2 \quad (3.4.4)$$

則式(3.4.3)可改寫為：

$$I = I_0 \left(1 + \frac{2\theta_k}{\delta}\right) \quad (3.4.5)$$

$$\Delta I = I - I_0 = I_0 \left(\frac{2\theta_k}{\delta}\right) \quad (3.4.6)$$

$$\text{最後得 } \theta_k = \left(\frac{\delta}{2}\right) \left(\frac{\Delta I}{I_0}\right) \quad (3.4.7)$$

由(3.4.7)式可知，柯爾旋轉角 θ_k 與反射光通過檢偏器後的強度變化 ΔI 成正比，而 θ_k 又與樣品磁化強度 \bar{M} 成正比，因此只要對 ΔI 及外加磁場強度 H 作圖即可得磁滯曲線。

3.4.3 MOKE 儀器裝置

如圖 3-18 所示

1. 入射光源：綠光雷射波長 532 nm、功率 5 mW、線偏振度 500:1 及強度

穩定度在 $\frac{2\%}{\text{hour}}$ 之綠光雷射，且調整為 P 波入射樣品表面。

2. 聚焦透鏡：焦距 50 cm，使雷射光能聚焦在樣品表面。

3. 偏振器：方解石所製成的高精密度偏振晶體 (Glan-Thompson)，消光比

(extinction ratio) 為 1×10^{-6} ，穿透率 90% 以上。其中起偏器與

P 波方向平行，用以提高入射光的偏振度。檢偏器則與 S 波平行

方向夾一小角度。

4. 可調式光圈：過濾雷射光束通過光學元件時所產生的散射光，以減少雜訊，並控制光點的直徑在 1 mm 左右。
5. 光偵測器：利用光電效應將雷射光訊號轉換成光電流值，內附放大器將光電流值放大後輸出，其有效感光面積為 20 mm²。
6. 可程式數位電表：接收光偵測器所輸入的光電流訊號，並將之轉換成光電壓值輸出，透過 IEEE488 標準介面與電腦連線。
7. IEEE488 標準電腦介面卡：以 quickbasic 程式語言撰寫的控制程式，經由 IEEE488 標準介面卡控制電源供應器、數位電表及電流切換裝置。
8. 矽鋼電磁鐵：線圈匝數約為 1000 匝，最大通入電流為 6 A，中心最大磁場為 950 Oe。此外磁場可在 X-Y 平面上作 360° 的旋轉，使得我們可以進行 P-MOKE 與 L-MOKE 的量測。
9. 電源供應器：最大輸出電流 5A、電壓 18V，可透過 IEEE488 介面與電腦連線。
10. 電流切換裝置：經電腦介面卡控制，可切換進入電磁鐵的電流方向，藉以切換磁場方向。

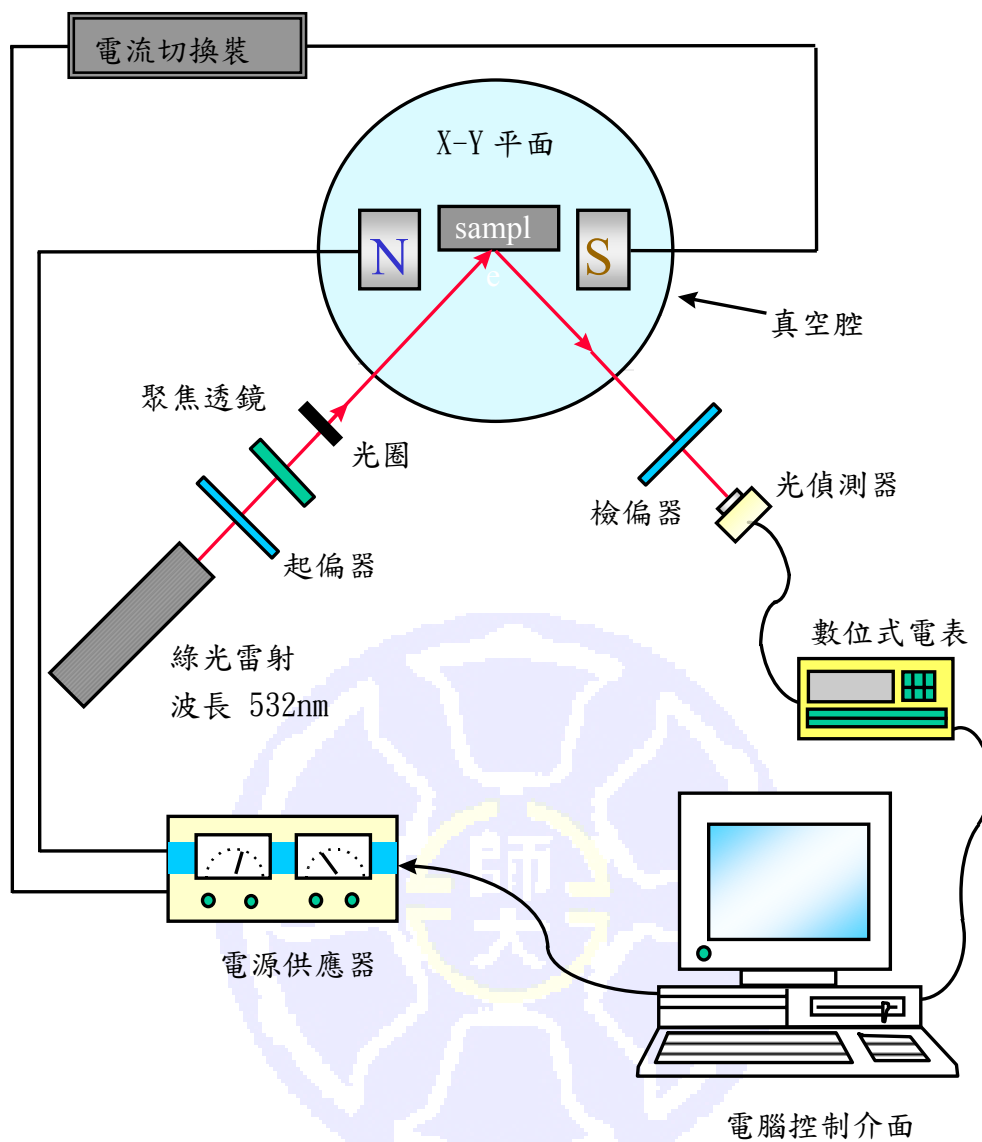


圖 3-18 MOKE 儀器裝置圖