

儀器總覽 Introduction to Instrumentation

表面分析儀器 Surface Analysis Instrument

序言

工業革命以來，儀器技術伴隨科技發展、學術研究及產業需求而蓬勃發展，為人類生活帶來重大變革；近年來政府開始積極推動儀器產業發展，列為重點產業及重要關鍵技術之一，每兩年專案規劃儀器產業技術發展策略，以期帶動本土儀器產業技術發展。本中心進行精密儀器研究發展與技術服務廿餘年，深感國內儀器資訊之重要，陸續編輯出版『科儀新知』、『科儀叢書』等專業刊物及建立『全國科學儀器網路查詢系統』供各界使用。近年來科技發展一日千里，新穎設備不斷問世，系統愈形繁雜，新名詞、新術語層出不窮，本中心乃編纂兼顧廣度與普及性的儀器百科全書，有系統且廣泛地介紹各種科學儀器，『儀器總覽』便是此一構思下之產物，透由國內專家、學者參與，藉深入淺出的解說一方面為廣大青年學子與社會人士解讀各種科學儀器，另一方面亦作為相關技術人員補充專業領域之儀器知識的參考工具。

鑑於儀器係結合光、機、電、真空、控制等物理、化學及生命技術之整合系統，種類繁多，各國分類標準及涵蓋範圍亦隨該國產業現況而異，而我國在工業生產統計分類上尚無精密儀器產業類，「儀器總覽」則依儀器用途概分為八大類組，涵括基本物理量量測儀器、光學量測儀器、化學分析儀器、材料分析儀器、表面分析儀器、電子測試儀器、醫療儀器、環境及安全衛生檢測儀器等，從基本簡易的量測儀器到尖端複雜的分析儀器，盡皆包羅其中。每項儀器的內容儘可能以淺顯易懂的文字表達，避免太過專業的術語與公式，並著重基本原理的說明與實際的應用介紹。

本總覽自 84 年 11 月開始規劃，從架構的研擬，儀器項目的分類，到實際內容的撰寫與審核，共邀集了約二百位儀器相關領域的學者專家共同參與，其中包括大專院校教授、研究機構研究人員、醫學中心的醫生及技術人員等，本總覽承蒙專家學者於百忙之中鼎力協助，方能順利付梓，對所有參與撰稿、審稿及編輯的單位與人員，特致謝忱。本總覽內容如有疏漏之處，冀望各界先進不吝指正，俾供未來修訂增補時之參考。

黃文雄

謹誌

中華民國八十七年九月一日

編審委員

總召集人

黃文雄 國科會精密儀器發展中心主任

副總召集人

陳建人 國科會精密儀器發展中心副主任

分組召集人

張良知 國科會精密儀器發展中心顧問

委員

梁振民 中山科學研究院材料研發中心研究員

陳振文 中山科學研究院材料研發中心研究員

陸懋宏 國立交通大學光電工程系教授

賀方涓 工業技術研究院光電工業研究所研究員

薛新國 工業技術研究院光電工業研究所顧問

(按姓名筆畫序)

編輯說明

一、編輯目的

儀器在科學研究與工業生產上是極為重要的工具，且與日常生活的關係，如食品檢驗、環境偵測、醫療診斷等，亦日趨密切。環視國內現有之儀器書刊，或為龐大深入之專書，或為尖端之技術性論文，欠缺對儀器廣泛而完整的介紹。精密儀器發展中心彙編本「儀器總覽」，即希望由全面性的角度出發，以較為淺易卻不失完整的方式，向讀者介紹各種儀器。

因為內容較為淺易，故適合大專院校學生與從事儀器相關工作人員，甚或一般社會大眾，建立對儀器基本的認識與瞭解。因為涵蓋了各種領域的儀器，故也適合對某類儀器相當熟悉之研究人員或儀器廠商參考使用。

二、範圍與分類

本總覽收錄之儀器項目以商業化產品為原則。功能過於簡單之工具，因不具備完整的量測或分析功能，不在收錄範圍。所收錄之儀器，依其應用領域，概分為八個類組：

- 基本物理量量測儀器
- 光學量測儀器
- 化學分析儀器
- 材料分析儀器
- 表面分析儀器
- 電子測試儀器
- 醫療儀器
- 環境及安全衛生檢測儀器

各類組依其所含儀器之功能、性質，再細分為不同次項目。

三、基本格式

每項儀器原則上以二至四頁之版面介紹，其內容由以下項目所構成：

1. 名稱：儀器的中、英文名稱
2. 關鍵字：列出該儀器內文中重要的關鍵字與關鍵詞，中、英文並列。
3. 基本原理：說明儀器運作的基本原理與概念。
4. 結構示意圖：利用平面結構圖標明儀器的各項元件，或以方塊圖說明儀器各部分的功能。

5. 規格與特徵：說明一般商業化產品的規格及其優、缺點。
6. 應用與用途：說明儀器主要的應用及其操作技巧。
7. 參考文獻：列出相關的書籍及文獻資料，以供讀者更深入探討之參考。

極少部分的儀器，因其特殊性或解說上的需要，未完全遵循上述原則，例如部分醫療儀器，因涉及人體安全，增列儀器使用安全事項。有些儀器則因其較為簡單或較為複雜，篇幅略有增減。這些都不會影響讀者之閱讀。

四、出版形式

為便於讀者閱讀與使用，本總覽依八個類組分冊編印，每一冊除有該類組收錄儀器之中、英文目錄外，並將該冊全部關鍵字，分別依中文及英文排序方式整理為索引，以利讀者查閱。全書並編印總目錄一冊，將八個類組的儀器目錄及索引彙整，除方便查閱，亦有助於不同類組間的參照。

在「基本物理量量測儀器」類組中，因收錄之儀器多與度量衡的標準檢測有關，特附錄經濟部公告之「度量衡單位及其所用之倍數、分數之名稱、定義及代號」，供讀者參考。

部分類組所涵蓋的儀器領域較廣，儀器種類與項目非常多，部分儀器項目於本輯中未能收錄，加上新產品陸續推出，本中心將持續增補出版。

目錄



電子儀

- 1 歐傑電子能譜儀
Auger Electron Spectrometer (AES)
- 5 X 光光電子能譜儀
X-ray Photoelectron Spectrometer (XPS)
- 7 角析真空紫外光電子能譜儀
Angle Resolved Ultraviolet Photoelectron Spectrometer (ARUPS)
- 10 高解析電子能量損失頻譜儀
High Resolution Electron Energy Loss Spectrometer (HREELS)

離子儀

- 13 離子散射譜儀
Ion Scattering Spectrometer (ISS)
- 16 二次離子質譜儀
Secondary Ion Mass Spectrometer (SIMS)
- 20 聚焦離子束微分析儀
Focused Ion Beam Microanalyzer

顯微術

- 23 掃描穿透電子顯微鏡
Scanning Transmission Electron Microscope (STEM)
- 26 掃描穿隧顯微鏡
Scanning Tunneling Microscope (STM)
- 29 原子力顯微鏡
Atomic Force Microscope (AFM)
- 32 場離子顯微鏡
Field Ion Microscope (FIM)

表面晶格分析

- 36 氦原子表面散射
Helium Atom Scattering from Surface
- 39 低能電子繞射儀
Low Energy Electron Diffractometer (LEED)
- 42 高能量電子繞射儀
Reflection High Energy Electron Diffractometer (RHEED)



-
- 45 掠角 X 光繞射儀
Grazing Incidence X-ray Diffractometer

其他

- 47 金屬表面電漿及二次諧波
Metal Surface Plasmon and Second Harmonic Generation
- 50 表面磁光柯爾效應測量儀
Surface Magneto-Optical Kerr Effect (SMOKE)
-
- 53 中文關鍵字索引
- 55 英文關鍵字索引

歐傑電子能譜儀

Auger Electron Spectrometer (AES)

關鍵字： 歐傑電子、縱深成分分佈分析、筒鏡分析器、球扇分析器

Keywords： Auger electron, depth profiling, cylindrical mirror analyzer, spherical sector analyzer

一、基本原理

歐傑電子的發生現象最先為法國人皮爾歐傑 (Pierre Auger) 於 1924 年左右所發現⁽¹⁾，故以歐傑電子名之；歐傑電子的產生機構可以圖 1 表示，當一原子之內層電子軌域 (X) 內有電子受到外力激發而游離，X 軌域即產生一個電洞，為了降低這處於游離激態的原子系統能量，較高能階的電子 (Y) 將會填補此一電洞，當自高能階移轉至低能階時，Y 軌域電子會釋放出能量，釋出的能量為 X 與 Y 軌域的位能差 ($E_y - E_x$)，這能量可以轉換成 X 光的形式釋出，亦可藉由與同能階或上層軌域電子 (Z) 之間的庫倫靜電交互作用方式，將能量轉移給 Z 電子，當這移轉能量大於 Z 電子的束縛能 (E_z) 時，該電子即可脫離原子核的束縛，進入自由態，這自由態電子即為歐傑電子，其動能 (E_{xyz}) 可以下式表示：

$$E_{xyz} = E_y - E_x - E_z$$

下標 xyz 分別代表被游離電子、填補電洞的電子及成為歐傑電子之電子軌域代號；由於必須有三個電子參與歐傑電子的生成機構，所以氫與氦兩種原子序小於三的元素無法產生歐傑電子。相異的元素會有不同的 E_{xyz} ，所以檢測歐傑電子的動能可以鑑定試品的元素種類；如果發射歐傑電子的原子位於固態表面，歐傑電子脫離試片表面必須克服該固體的功函數 (work function, w)，於是 $E_{xyz} = E_y - E_x - E_z - w$ ，各能階一般以該固體的費米能階 (Fermi level) 為參考能位。歐傑電子能譜儀一般常被運用的分析方法有能譜掃描、歐傑電子成像與縱深成分分佈分析三種。

1. 掃描能譜 (survey scan)

歐傑電子儀最基本的分析功能即是試片表面元

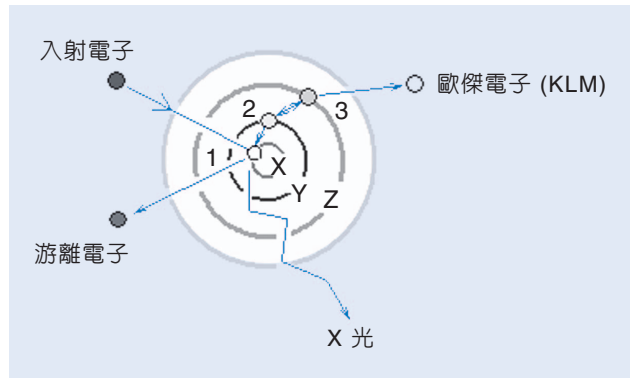


圖 1. 歐傑電子產生機構原理示意圖。

素的鑑定，因此掃描大範圍的歐傑電子動能以檢測表面全部的元素是一般歐傑分析的基本工作，而後再選擇重要的表面元素譜峰進行化態或定量分析、平面分佈成像或是縱深成分分佈分析；微弱的歐傑電子訊號峰疊坐在因背向散射電子訊號所形成的背景線上，以積分譜線方式不易清楚觀察到歐傑電子訊號峰的微細結構，當將所有檢測到的電子訊號對電子動能微分，則歐傑電子訊號可被明顯地識別出來；歐傑電子儀發展初期，數據的擷取與處理多以類比微分方式進行，因此微分能譜成為一般歐傑電子能譜的表示方法，由於定量分析應用上較為精確可靠，積分譜線的使用近來亦漸趨普遍。

2. 歐傑電子成像 (mapping)

當電子束在試片表面進行二維空間掃描的同時，分析者擷取表面元素的歐傑電子訊號，比對利用二次電子檢測器得到的二次電子影像圖，便可得到元素在試片表面上的分佈情形，這種歐傑電子影像的分析方法與能量分散 X 光光譜儀 (EDX) 的工作原理相似，不過歐傑電子影像的訊息縱深為小於 10 nm 的表面層，而 EDX 影像的訊息縱深一般在 1 μm 以上。

3. 縱深成分分佈分析 (depth profiling)

歐傑電子分析技術可用以分析由試片表面至內部之組成元素的原子濃度縱深分佈情形，這種分析方法稱為縱深成分分佈分析 (depth profiling)。分析者一邊以電子束激發歐傑電子，一邊利用離子束濺蝕試片，以便產生新的試片表面，每一新表面所測得的歐傑電子能譜便可反應出試片內部不同深度之元素組成。當以試片縱深 (或濺蝕時間) 為橫軸，對各元素原子濃度作關係圖，分析者便可瞭解試片表面至內層的元素組成分佈情形。常用於薄膜材料的成分擴散研究，這種縱深成分分析法是一種破壞性的分析方法，換言之，試片一經縱深分佈分析，便會永遠失去試片原始表面的特性。

二、結構示意圖

歐傑電子儀的儀器結構可以圖 2 簡單表示，能量為 2–20 keV 的電子束照射在試品表面上，歐傑電子會自試片表面發散出來，吾人可利用電子能量分析器分析歐傑電子的動能，並在能量分析器出口閘縫後方以電子檢測器來計測通過的電子數量，利用個人微電腦系統分析處理包括歐傑電子在內之各種發散自試片表面的電子訊號與電子能量之數據，從而研判試片表面的元素種類與濃度；整個歐傑電子的激發、分析及檢測過程都必須在超高真空系統 ($\leq 10^{-9}$ torr) 中進行，以避免外來污染物的干擾。

三、儀器規格與特徵

如結構示意圖所示，歐傑電子能譜儀必須裝置在超高真空環境內，主要的儀器組件為激發試片原子的電子槍與電子能量分析器，前者主要與分析平面解析度有關，後者則與能譜之能量解析度有關。

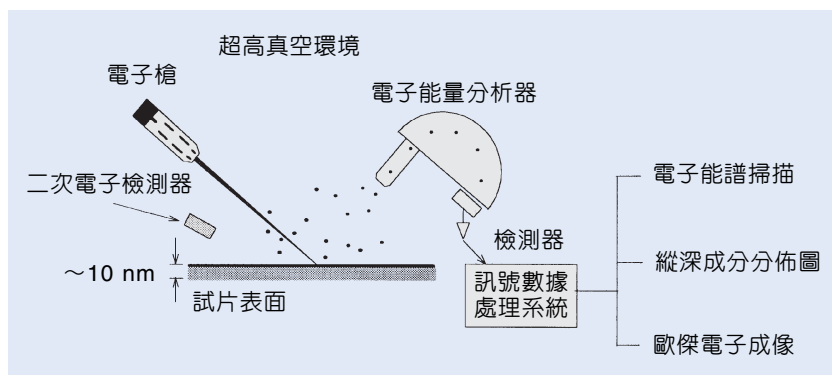


圖 2. 歐傑電子儀儀器結構示意圖。

此外，電子檢測器一般使用通道倍增器 (channeltron) 或多管電子倍增板 (multichannel plate)，而數據分析處理系統除了微電腦與必要之界面電路系統外，主要軟體應該包括訊號鑑定、背景訊號處理、譜線配湊及定量處理，以下為電子槍與電子能量分析器的規格與特徵說明。

1. 電子槍

一般歐傑電子能譜儀所用的電子槍，與掃描式電子顯微鏡之電子槍大致相同，若是僅用以檢測試片的表面元素成分，歐傑電子儀的電子槍可以不必具備掃描功能，電子束聚焦能力亦不重要，如此可簡化電子槍的結構，降低歐傑電子儀的設置成本；電子源一般有熱游離 (thermionic emission) 電子源或是場發射 (field emission) 電子源，由於後者亮度高，可調製較小的束徑，適合做為微區分析用歐傑電子顯微鏡的電子源，一般商業化系統的電子束束徑可達 15 nm。

2. 電子能量分析器

電子能量分析器是整個歐傑分析系統的關鍵部分，電子能量分析器的性能往往決定了歐傑電子能譜數據的品質，電子能量分析器的兩項重要特性：一為能量解析度 (energy resolution)，一為傳送率 (transmission)。常見的歐傑電子能量分析器有三種：球扇電子能量分析器 (spherical sector analyzer, SSA)、筒鏡能量分析器 (cylindrical mirror analyzer, CMA) 及阻滯電場能量分析器 (retarding field analyzer, RFA)。SSA 及 CMA 皆屬於電場偏折擴散形 (dispersion) 的電子能量分析器，RFA 由於能量解析度不佳，並不被用於一般的歐傑電子儀。電場

擴散式能量分析器的能量解析度一般有兩種表示方法，其一為絕對能量解析度 (ΔE) 係量測歐傑電子訊號峰的半高寬 (full width at half-maximum, FWHM)，單位為 eV；另外一種能量解析度為相對能量解析度 ($\Delta E/E_0$)， E_0 為歐傑訊號峰的峰頂位置， $\Delta E/E_0$ 為一常數，相對能量解析度通常以百分比表示，即 $R = (\Delta E/E_0) \times 100\%$ 。

(1) 筒鏡能量分析器

圖 3 為筒鏡能量分析器 (CMA) 的結構示意圖，CMA 的主體由半徑分別為 r_1 及 r_2 的兩同軸心的柱狀圓筒構成，通常外筒附加 $-V$ 的電位，而內筒接地，當電子通過了覆有金屬網的環狀進口夾縫，進入圓筒間的電位場後，不同動能的電子會有不同的偏折半徑，適當地調整 V 值，可使帶特定動能的電子到達圓筒末端出口夾縫，並進入檢測器內。當電子進入 CMA 的角度 (α) 固定在 $42^\circ 18'$ ，可使 CMA 有最大的接收立體角， $\Delta\alpha$ 可達 $\pm 6^\circ$ ，因此 CMA 的傳送率很高，這是 CMA 常被強調的優點。一般 CMA 的相對能量解析度少有低於 0.25% 者；CMA 與試片之間相對位置的變化會影響歐傑電子訊號峰能譜位置及能量解析度的再現性，這是利用 CMA 進行歐傑電子分析者 (或是光電子分析) 所應該注意的。由於 CMA 緊密的結構及試片與 CMA 之間嚴苛的距離限制，激發試片用的照射源，如電子槍、離子槍或 X 光源，都必須設法在一個窄小的空間內，安裝於適當的位置與角度。一般用於歐傑分析的電子槍都裝設在 CMA 分析器內的軸線上，如圖 3 所示，如此可減少試片位

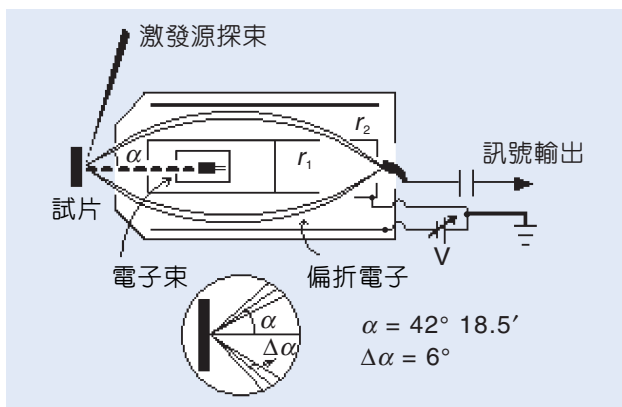


圖 3. 筒鏡電子能量分析器結構示意圖。

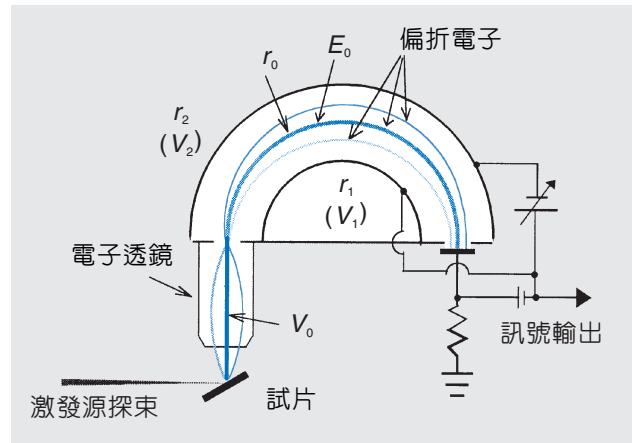


圖 4. 球扇電子能量分析器結構示意圖。

置校正的困擾，並增加其他儀器附件的安裝空間。

(2) 球扇能量分析器 (SSA)

球扇電子能量分析器與 CMA 一樣，都是屬於電場擴散形的電子能量分析器，SSA 分析器的原理顯示於圖 4，兩個球心相同，半徑分別為 r_1 及 r_2 的半球面，分別附加 $-V_1$ 及 $-V_2$ 的偏壓，在 r_1 及 r_2 中間，半徑為 r_0 的區域會有一等電位面，具適當動能 (E_0) 的電子由 SSA 進口夾縫進入半徑為 r_0 的擴散面上，便可由出口夾縫離開 SSA，並進入電子檢測器內；在相同的能量解析度情形下，SSA 的穿透率比 CMA 小，不過藉由適當的電子透鏡設計可大幅提升 SSA 的傳送率；SSA 的高能量解析度對於歐傑能譜訊號能量細微變化的觀察有很大的幫助，這是 CMA 所不及的。

四、應用

歐傑電子能譜儀或顯微鏡的分析縱深小於 100 Å 左右，適合進行表面元素成分分析，許多與表面化學相關的研究課題均可利用 AES 來進行，例如催化劑反應研究、金屬氧化與腐蝕。此外，歐傑電子訊號形狀與動能會因試片化學態的改變而發生變化，因此除了可以鑑定表面元素成分外，亦可鑑定試品表面的化學態，例如區別非晶質碳、石墨及鑽石三種固形碳。而在冶金研發工作上，AES 可被用以研究合金晶界或微粒-基質 (particle/matrix) 界面特性，施加應力於低溫冷凍的合金試片細窄處，極易造成晶粒間斷裂，原來埋藏於晶界的晶粒表面

便可暴露出來，於是便可以在超高真空環境內分析不受污染的晶粒表面。

因為 AES 以電子束為探束，可檢測次微米的小尺寸結構，例如微電子元件多為薄膜材料，材質表面與界面的特性影響元件電性功能頗大，許多關鍵的圖物形貌亦多在深次微米 ($< 0.5 \mu\text{m}$) 的範圍內，具備長景深及表面微區分析功能的歐傑電子顯微鏡，便成為薄膜成分分析與故障構因分析的利器。此外，歐傑電子儀亦可用來估量小於 10 nm 的薄膜厚度；由於以電子束作為激發源，因此在電絕緣物的歐傑分析上會發生電荷蓄積現象，這是所有以帶電粒子做為探束的分析儀器所共有的分析瓶頸。

參考文獻

1. D. Chattarji, *The Theory of Auger Transitions*, London: Academic Press (1976).
2. M. Thommpson, M. D. Baker, A. Christie, and J. F. Tyson, *Auger Electron Spectroscopy*, New York: John Wiley & Sons (1985).
3. D. Briggs and M. P. Seah, *Practical Surface Analysis*, 2nd ed., John Wiley & Sons Ltd. (1990).
4. M. P. Seah, *Methods of Surface Analysis*, Chapter 3, Cambridge: Cambridge University Press (1989).

作者：潘扶民先生為美國加州大學 Irvine 分校化學博士，現職國科會國家毫微米元件實驗室研究員。

X 光光電子能譜儀

X-ray Photoelectron Spectrometer (XPS)

關鍵字：電子能譜化學分析儀、X 光光電子能譜儀、化學位移、逃逸深度

Keywords：electron spectroscopy for chemical analyzer, X-ray photoelectron spectrometer, chemical shift, escape depth

一、基本原理

X 光光電子能譜儀是藉著量測 X 光光電子能譜來分析材料表面各種元素的化學狀態。「X 光光電子能譜儀」因其化學分析的功能，也稱為「電子能譜化學分析儀 (electron spectroscopy for chemical analyzer, ESCA)」。

當 X 光由材料表面入射進入材料內部時，X 光會將原子內的核心電子 (core electron) 或鍵結電子 (valence electron) 激發至高能態 (excited state)，靠近材料表面的高能態電子，有機會逃逸出材料表面進入真空，這些逃逸出材料表面的電子稱為 X 光光電子。X 光光電子能譜包括各種核心電子、鍵結電子、歐傑電子 (Auger electron)，以及非彈性碰撞電子 (inelastic electron)。其中核心電子、鍵結電子、歐傑電子的能量，都會因化學元素不同而不同，也會因化學元素的鍵結狀態不同而不同。此三種電子常被用來分析材料表面元素的化學狀態，但因核心電子在 X 光波段的訊號最強，能量解析度最佳，X 光光電子能譜儀都採用核心電子能譜來鑑定材料表面原子的化學狀態。

核心 X 光光電子的訊號是由材料表面附近的數層原子表面貢獻的，核心 X 光光電子的表面靈敏度 (surface sensitivity) 是由核心 X 光光電子的動能大小決定。傳統的 X 光光源有鋁 K_{α} 或鎂 K_{α} X 光，其能量分別為 1486.6 及 1253.6 電子伏特 (eV)，鎂 K_{α} 的光子通量 (photon flux) 較鋁 K_{α} 高，習慣以鎂 K_{α} 當光源來取數據。核心 X 光光電子的動能大小，等於鎂 K_{α} X 光光子能量減去該核心電子的束縛能 (binding energy) 再減去能譜分析器的工作函數 (work function)，其動能值約在 20–1200 電子伏特之間。根據通用曲線 (universal curve)，不同動能的光電子，有不同的逃逸深度 (escape depth)。當電子的動能在 50–100 電子伏特間時，其逃逸深

度最小，約 5 Å，相當於 2 層原子。當電子的動能小於 50 或大於 100 電子伏特時，逃逸深度變大，但 20–1200 電子伏特的電子的逃逸深度仍小於 20 Å。這是為什麼 X 光光電子能譜儀是表面分析利器的主因。

X 光光電子能譜常用來鑑定材料表面的化學反應是否發生，以及反應生成物的種類。當有化學變化時，原子間的鍵結電荷密度 (valence charge density) 會重新分佈，促使原子內的各個核心電子的能量產生位移，此能量位移現象稱為化學位移 (chemical shift)。各個核心電子的化學位移可由 X 光光電子能譜直接測出，藉此可判斷反應生成物的種類。

二、結構示意圖

X 光光電子能譜儀的裝置見圖 1 所示，共有真空系統、光源、試片操縱裝置、電子能量分析器，以及數據擷取等五大項。其中真空系統是由渦輪幫

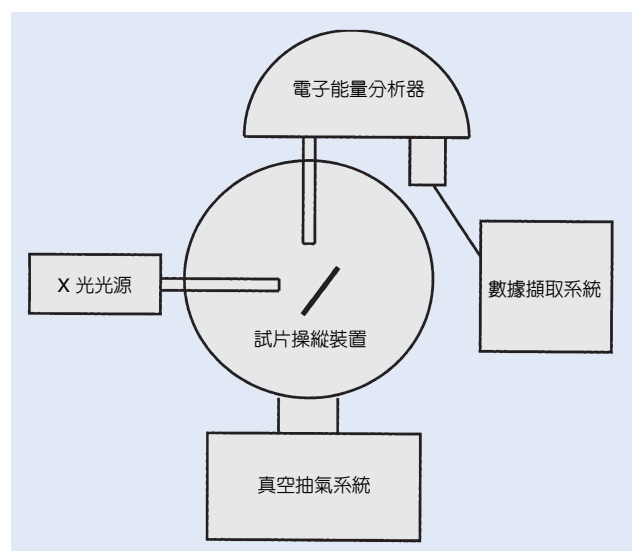


圖 1. X 光光電子能譜儀的裝置圖。

浦 (turbo pump) 和離子幫浦組成，利用超高真空技術將系統抽至 1×10^{-10} torr；X 光光源是由雙陽極 X 光產生器 (dual anode X-ray source) 提供鋁 K_{α} 以及鎂 K_{α} X 光；試片操縱裝置包括傳送，以及 XYZ 定位；較常用的電子能量分析器是半球型電子能量分析器 (hemi-spherical electron energy analyzer)，因其能量解析度好；X 光光電子能譜是由能譜擷取軟體取得，並與資料庫的數據比較，確定所測物的化學態。

三、儀器規格與特徵

X 光光電子能譜儀的規格包括濃度靈敏度 (concentration sensitivity)、空間解析度 (spatial resolution)、能量解析度 (energy resolution)。X 光光電子能譜儀可大致分為大面積 (large area) 型、小面積 (small area) 型，以及單頻 X 光 (monochromated) 型三種型式。不同型式的 X 光光電子能譜儀，其濃度靈敏度、空間解析度、能量解析度差異很大。一般的 X 光光電子能譜儀具有 0.3–1.0 % 的濃度靈敏度、200 微米 (μm) 的空間解析度，以及 0.8–1.0 電子伏特的能量解析度。若要研究化學位移，單頻 X 光光電子能譜儀是較好的選擇，因其能量解析度較佳，約 0.5 電子伏特。若有較佳的空間

解析度，須選擇小面積 X 光光電子能譜儀，其空間解析度可好到 $5 \mu\text{m}$ 。

四、應用與用途

X 光光電子能譜儀的特色是可同時鑑定材料表面上各種元素的化學狀態，適合分析材料表面的化學性質。X 光光電子能譜儀也可分析材料界面的化學性質時，但須有濺鍍鎗協助將試片打薄。X 光光電子能譜儀應用的領域包括高分子碳鍵結的鑑定、陶磁材料的成分分析、半導體材料的成分分析、各種材料斷裂面成分分析。在使用 X 光光電子能譜儀時，有三個注意事項：(1) 磁性材料得去磁，(2) 導電度差的材料須在有泛電子鎗 (flood gun) 配件的 X 光光電子能譜儀才能分析，(3) 蒸氣壓高的材料會破壞真空，應預先處理。

參考文獻

1. D. Briggs and M. P. Seah, *Practical Surface Analysis*, Volume 1, John Wiley & Sons (1990).
2. T. L. Barr, *Modern ESCA*, CRC Press (1994).
3. G. Ertl and J. Kupers, *Low Energy Electrons and Surface Chemistry*, VCH (1985).

作者：黃振昌先生為美國史丹佛大學材料科學工程博士，現任清華大學材料科學工程系教授。

角析真空紫外光電子能譜儀

Angle Resolved Ultraviolet Photoelectron Spectrometer (ARUPS)

關鍵字：真空紫外光光電子能譜學、半球分析器

Keywords：ultraviolet photoelectron spectroscopy (UPS), hemispherical analyzer

一、基本原理

電子能量分析儀是利用電子在靜電場中，因動能差異而運動軌跡不同，進而得到電子能譜。使用在真空紫外光電子能譜方面，絕大多數研究人員使用半球型態的分析器 (hemispherical analyzer)。如圖 1 所示，半球分析器的主體為兩個同心半球，半徑分別為 R_{in} 及 R_{out} ，電位分別為 V_{in} 及 V_{out} 。因 $V_{in} > V_{out}$ ，電子在內外二半球間運動受一向心力。當 $V_{out} - V_{in} = (E_p/e)(R_{out}/R_{in} - R_{in}/R_{out})$ 時，動能為 E_p 的電子由入口狹縫 (entrance slit) 進入，沿半徑為 $R_0 = (R_{in} + R_{out})/2$ 的主要路徑到達出口狹縫 (exit slit) 位置；此處 e 為電子電荷。若假設入口狹縫、出口狹縫及主要路徑上的電位為 E_p/e ，則半球電位可分別表示為 $V_{out} = (E_p/e)(3 - 2R_0/R_{out})$ 以及 $V_{in} = (E_p/e)(3 - 2R_0/R_{in})$ 。電子動能 E_p 習慣上稱為穿越能量 (pass energy)。可明顯看出動能稍大於 E_p 的電子將打在出口狹縫的外側，而動能稍小於 E_p 的電子將打在出口狹縫的內緣。半球分析儀的能量解析度為 $\Delta E_{FWHM} = E_p[(S_1 + S_2)/4R_0 + \alpha^2/4]$ ；此處 S_1 及 S_2 分別為入口狹縫及出口狹縫的寬度， α 為電子進入入口

狹縫張角的一半。通常所用的能量解析度為 0.1 到 0.2 eV，高解析度時可下到 40 meV 或更低。電子從入口狹縫到出口狹縫的偏折角一般為 180° ，也有小到 150° 的。

半球分析器除主體外一般在入口狹縫前裝有一呈圓柱狀對稱的電鏡系統，將樣品發射出來的電子聚焦到入口狹縫的位置；並將所選擇能量的電子加速或減速使與穿越能量相同。電子發射動能與穿越能量的比值稱做減速比，與放大率同為電鏡的重要參數。通常樣品接地，即絕對電位為零；電鏡系統的第一個元件也接地，最後一元件電位與入口狹縫電位相同，亦即穿越能量與電子離開樣品時的動能差。如此定義則內外二半球對地電位 V_{in} 及 V_{out} 為前述值扣除入口狹縫電位，加上電鏡前後電子動能差。實驗時固定穿越能量，改變入(出)口狹縫電位，即得一電子能量分佈譜 (energy distribution curve, EDC)。穿過出口狹縫的電子由一通道倍增器 (channeltron) 量測；為提高效率，可裝多個通道倍增器。電鏡系統第一個元件的開口大小可決定角解析度，通常為 ± 1 度。當樣品不動，光電子發射的角分布可藉由轉動能量分析儀來量測。轉動角度由二軸旋轉器 (two-axis goniometer) 來達成。

電子能譜儀需有光源來配合使用。實驗室所用傳統光源為氣體放電管 (gas discharge lamp)。其原理為 He、Ne、Ar 等惰性氣體的高壓放電而放出頻寬極窄的真空紫外光。這是真空紫外光光電子能譜學 (ultraviolet photoelectron spectroscopy, UPS) 名稱的來源。表 1 列出光源能量和衛星譜線位置及強度；解釋光電子能譜時要注意衛星譜線產生的能譜是疊加上去的。現代更好的光源是同步輻射：具有高強度、高準直性、連續可調，及具偏振性等多方優點。

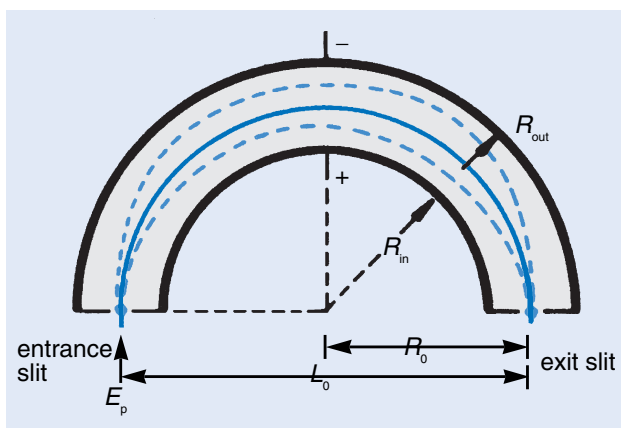


圖 1. 半球型態的真空紫外光電子能譜分析儀。

二、結構示意圖

圖 2 表示一半球分析器的剖面圖，此分析器平均半徑只有 29 mm，算是比較小的，半球偏折角為 180°，偵測電子用多微通道板 (microchannel plate)，電鏡為三元。

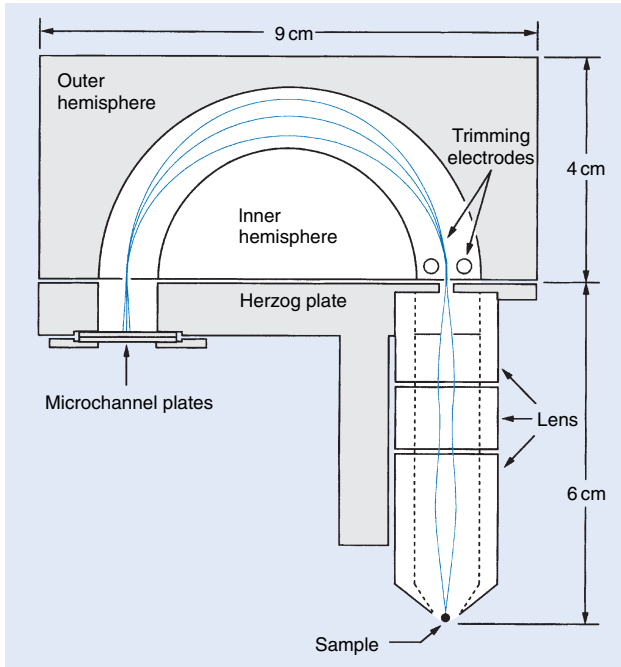


圖 2. 半球型分析器的剖面圖。

三、儀器規格與特徵

一個完整的角析電子能譜儀包括一半球分析

表 1. 真空紫外光光電子能譜學較常使用之由氣體放電管產生的光源。

光源	能量 (eV)	相對強度
He I	21.22	100
satellite	23.09	2
He II	40.82	20*
Ne I	16.85 & 16.87	100
Ne II	26.9	20*
	27.8	10*
Ar I	11.83	100
	11.62	80
Ar II	13.48	16*
	13.30	10*

注(*)者相對強度與放電條件有關，為約略估計值。

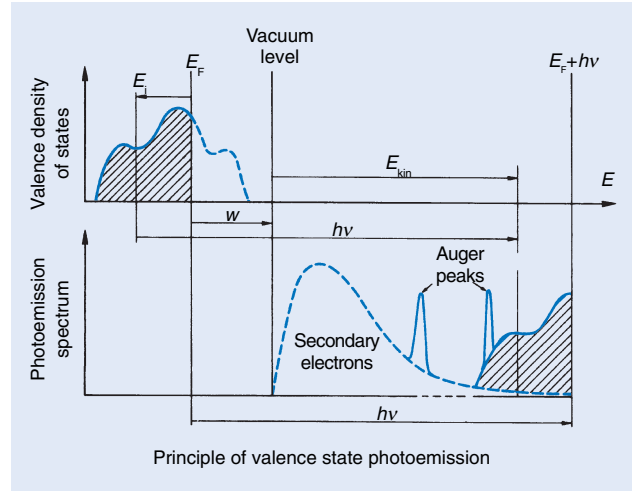


圖 3. 一光電子能量分佈譜的示意圖。

儀，裝在一二軸旋轉器上；此一二軸旋轉器再架設在一個大型真空法蘭 (flange) 上；此法蘭為一真空腔的底座。其主要規格如下：

平均半徑：29—65 mm。

半球偏折角：150°—180°。

電鏡單元數：3—4，亦有無電鏡者。

電鏡放大率：×1，×3，×5。

穿越能量：1，2，5，10，20，50 eV。

工作減速比：0.1—50。

電子動能範圍：0—200 或 2000 eV。

角解析度：±1°，±2°。

最大信號率：10⁶ counts/sec

配合真空腔：14 或 16 英寸直徑。

四、應用與用途

角析真空紫外光光電子能譜學主要在量測晶體填滿軌域部分之價電子結構。晶體之價電子結構具色散 (dispersion) 特性，即價電子能量與晶體動量 (crystal momentum) 間有一定關係，或稱作能帶理論。配合同步輻射可將金屬、合金、半導體或晶體化合物的能帶一一量出。因真空紫外光電子平均自由路徑短小，主要來自表面數層原子，故非常適合量測與表面直接相關的電子態或幾何關係；例如金屬或半導體晶體的表面態 (surface state)，吸附原子或分子與表面鍵結狀態，磊晶成長的量子井效應等均可經由光電子能譜加以了解；若裝有可量測電子自旋的偵測器，則可研究鐵磁性塊材或多層膜材料

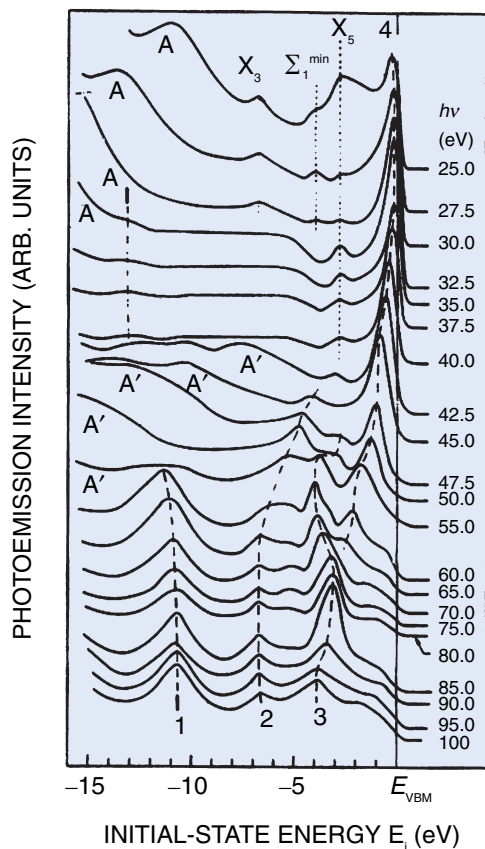


圖4. GaAs (110) 單晶的光電子能量分佈譜，電子發射的方向垂直於表面⁽⁴⁾。

的物理機制。

圖3表示一光電子能量分佈譜的示意圖。量度光電子動能 (E_k)，利用能量守恆定律及已知光子能量 ($h\nu$)，即可得知電子在晶體內的束縛能 (E_b)；能譜形狀反應費米能階 (E_f) 以下價電子能階密度 (density of states)。圖4為利用同步輻射改變入射光能量來量度 GaAs (110) 單晶的光電子能量分佈譜，電子發射的方向垂直於表面⁽⁴⁾。從各個峰相對於價電子能帶最大值 E_{VBM} 的能量變化可得 GaAs 塊材的能帶色散關係。圖5則是固定光子能量，將能量分析儀轉到相對於晶體表面法線方向各個角度量得的一系列光電子能譜；所量的是 Cu (111) 單晶表面態的色散關係⁽⁵⁾。圖中兩個峰是因為所用 ArI 光源有兩條譜線的緣故，細節可參考文獻1至3。

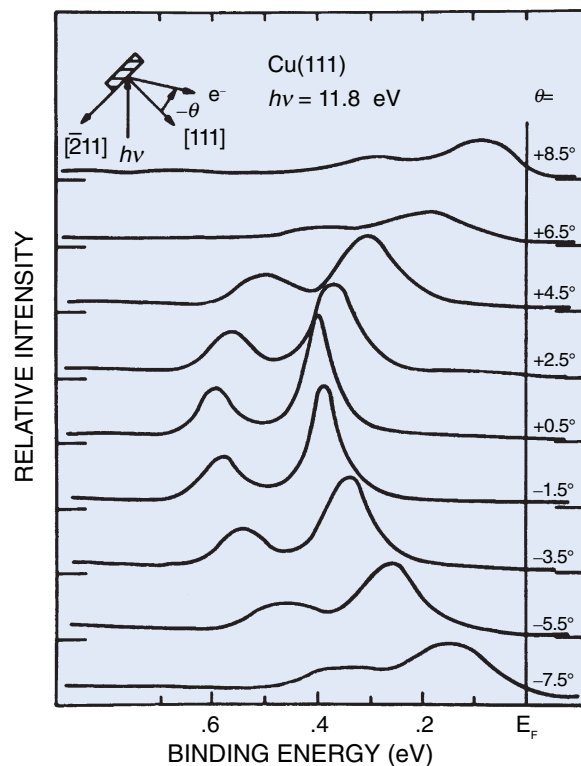


圖5. 固定光子能量，Cu (111) 單晶表面態的色散關係⁽⁵⁾。

短小的光電子平均自由路徑嚴格限制光電子能譜的量測環境；為避免因大氣分子吸附而改變表面物理性質，必須在超高真空環境下操作 (10^{-10} torr)。同樣的，晶體樣品表面必須在真空內處理，清除表面雜質。此外樣品需為金屬或半導體，絕緣體因會產生荷電效應 (charging)，量測非常困難。

參考文獻

1. S. Hufner, *Photoelectron Spectroscopy*, BeHin, Heidelberg: Springer-Verlag (1995).
2. S. D. Kevan, *Angle-Resolved Photoemission*, Amsterdam: Elsevier (1992).
3. H. Luth, *Surfaces and Interfaces of Solids*, 2nd ed., Berlin: Springer-Verlag (1993).
4. Chiang et al., *Phys. Rev.*, **B21**, 3513 (1980).
5. Kevan, *Phys. Rev. Lett.*, **50**, 526 (1983).

作者：崔古鼎先生為美國 Pennsylvania 大學物理博士，現任同步輻射中心副研究員。

高解析電子能量損失頻譜儀

High Resolution Electron Energy Loss Spectrometer (HREELS)

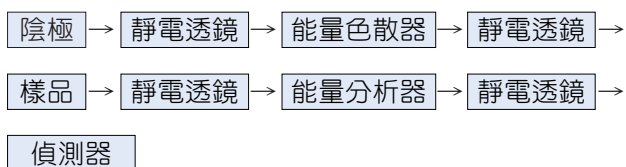
關鍵字：電子能量損失頻譜儀、聲子色散、分子振動、表面化學分析

Keywords：electron energy loss spectrometer, phonon scattering, molecular vibration, surface chemical analysis

一、基本原理

表面晶格和吸附分子的振動能譜，頻寬從十幾個電子毫伏 (meV) 到幾百個電子毫伏，而線寬只在幾個電子毫伏的範圍內。因此以電子為探針的電子能量損失頻譜儀，其解析度和動能必須接受嚴苛的要求。近年來高解析電子能量損失頻譜儀的入射電子束，其能量色散值在 1 meV 至 3 meV 內，能量分析器亦達到同樣的範圍，電子束的動能可由 0 eV (電子伏特) 到 250 eV。

高解析電子能量損失儀 (high resolution electron energy loss spectrometer, HREELS) 的基本工作原理大致上可以如下流程方塊圖來說明。



陰極整體是負責產生色散小的電子源，其內部裝置有一低功函數 (low work function) 的毛髮狀燈絲，專責熱發射電子。燈絲整體被封裝在一個以 μ 金屬材料所作成的壓抑陽極腔 (repeller anode) 內。 μ 金屬材料的選用是考慮它可以屏蔽由燈絲電流所生成的磁場。熱發射出來的電子只能從壓抑陽極上一狹長細縫進入第一組靜電透鏡組。電子經過第一組電子透鏡匯聚，進入如圖 1 所示的能量色散器。色散器是由兩塊半徑為 r_1 和 r_2 的同軸圓柱金屬面所構成。它的詳細工作原理可從附錄參考文獻 1、2 找到說明。當圓柱 r_1 、 r_2 接上電位 ΔV 時，在兩圓柱間產生一電場，從狹縫 S_1 進入的電子，其動能 E_0 主要符合 $E_0 = 1/2e\Delta V/\ln(r_1/r_2)$ 條件即可通過 S_2 。式中 e 是電子電荷量， ΔV 是圓柱體間電位

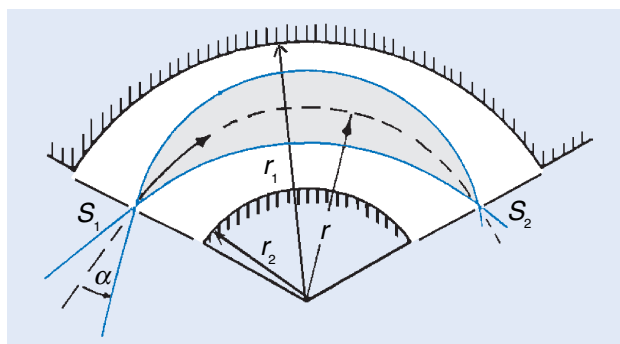


圖 1. 能量色散器結構圖。

差， r_1 是外圓柱體的半徑， r_2 是內圓柱體的半徑。而在一階近似法下，其色散率可以下式表示：

$$\frac{\Delta E}{E_0} = \frac{2S}{r} + \frac{4}{3}\alpha^2$$

式中 S 是狹縫的寬度， r 是中央路徑之半徑，且為 r_1 和 r_2 的平均值， α 是電子與中央路徑所成的夾角。

這種偏轉器最佳化的偏轉角度是 127° ，所以以這種設計的能量篩選器又名為 127° 圓柱偏轉分析器 (127° cylindrical deflector analyzer, 127° CDA)。

經過單色器出來的電子其色散度約只有幾個 meV，電子束隨即進入第二透鏡，在此接受加速並匯聚投射到樣品上。電子束在很靠近樣品時，會遭遇到偶極散射 (dipole scattering)、衝擊散射 (impact scattering)、離子共振散射 (ion resonance scattering) 等機制而被散射出來。在散射的交互作用過程中，部分電子因激發聲子或吸附分子的振動能階而損失能量，散射的電子束不再是單一能量，而是一能量分布甚寬的電子束。電子束再經靜電透鏡進入能量分析器中，經過能量篩選後的電子再進入具有通道

倍增器 (channeltron) 的偵測器，並測量其強度。這時如果保持各電極電位不變，只改變樣品與能量分析器間的電位 V ，如此不同能量的散射電子便可以篩選出來。如果連續進行有序的改變電位 (即掃描)，同時記錄偵測器訊號強度，這樣一張具有能量分布的電子能量損失圖譜便可產生。

二、結構示意圖

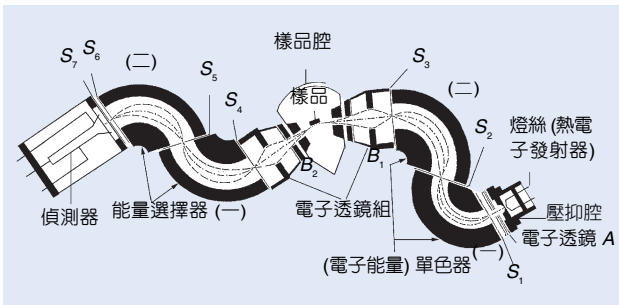


圖 2.HREELS 本體的平面結構示意圖。



圖 3.HREELS 的實體側視圖。

圖 2 是 HREELS 本體的平面結構示意圖，實體側視圖如圖 3 所示。電子源是由位在圖右的燈絲發射，再經由一壓抑陽極才進入第一組電子聚焦透鏡 A，此後電子的路徑均以虛線表示。透鏡組 A 是兩維匯聚透鏡，其主要作用是控制電子束作左右上下聚焦，好讓電子束能準確的進入 S_1 狹縫。 S_1 、 S_2 、 S_3 、 S_4 、 S_5 、 S_6 上均有細小狹縫 (約 0.1 mm)，其上加入適當電位以讓 E_0 能量的電子通過。圖 2 的能量單色器和能量分析器分別由兩組 127° CDA 構成；為了減低金屬表面功函數高低不一對通過的電子造成影響，金屬圓柱表面均敷上功函數均勻的

石墨。經過兩級的能量過濾，一束能量寬度只有一個到幾個 meV，而強度約在幾十個 nA 的電子束就在 S_3 出口處形成。從 S_3 出來的電子經 B_1 電子透鏡組匯聚並加速打在樣品上。為了避免游離電場和磁場干擾低能電子的散射，現代的 HREELS 都有建立以 μ 金屬為材料的樣品腔，以確保儀器能正常的工作。由散射進來而帶有激發能階訊息的電子束，經過兩組 127° CDA 能量分析器篩選才通過 S_6 、 S_7 進入偵測器，再接至訊號處理儀器，即完成量測工作。 S_7 在此除可做聚焦外同時兼負控制進入偵測器的電子電流。

三、儀器規格與特徵

在國際市場上，製造 HREELS 的廠商不多，因此僅以筆者所採用的 VSW IB2000 為例以作說明。

- (1) 整體尺寸：長約 43 公分，寬約 10 公分，高約 6 公分。
 - (2) 單色器 (monochromator) 和能量分析器 (analyzer)：均由兩節 127° 的圓柱偏轉分析器所組成。
 - (3) 磁場屏蔽模式：以圓筒狀 μ 金屬作整體外部磁場遮蔽。
 - (4) 可轉動部件：由電子槍和單色器產生的入射電子束可繞著樣品架中心軸順時針轉動。可以改變不同的入射及反射角，但最小的入射角有所限制。
 - (5) 不可動部件：能量分析器及偵測器呈固定。
 - (6) 電子束形狀：成細長型而非點狀。
 - (7) 電子束能量 (E_p)：入射電子束能量 (動能) 可由 0 改變到 250 電子伏特 (eV)。
 - (8) 電子束強度：在 nA 範圍。
 - (9) 解析度： ≥ 1 meV
 - (10) 訊號強度：彈性波峰 (elastic peak) 可達 1×10^6 counts。
 - (11) 訊噪比：良好。
 - (12) 控制形式：所有控制均透過數位電腦進行操控。
- 優點：因只對樣品極表面的振動採樣及收集訊息，所以是一項表面靈敏度極高的頻譜偵測儀器。

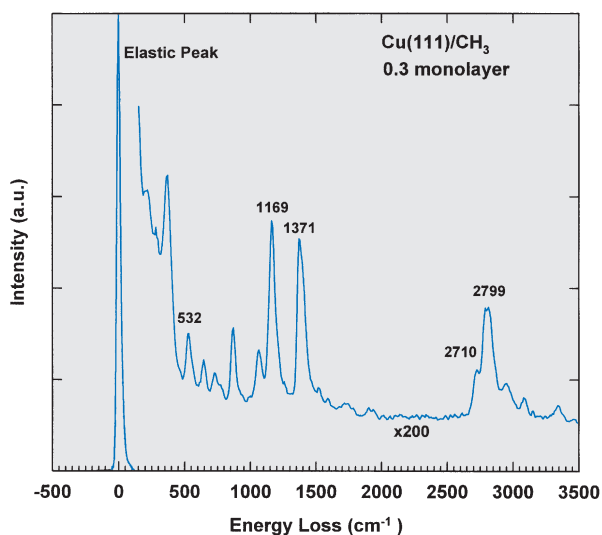


圖 4. 用 HREELS 頻譜儀獲得之甲基 (CH_3) 吸附在銅 Cu (111) 表面上的振動能譜。

缺點：(1) 因 HREELS 必須在超高真空內工作，更換測試樣品需耗時等候真空條件恢復，及樣品清潔處理工作。

(2) 樣品必須是金屬或半導體材料。絕緣體會產生荷電效應，不能採用為測試樣品。

四、應用及用途

光子、中子所屬之儀器雖是研究晶體振動的優良工具，但由於光子、中子穿透力深達樣品體內原子，因此屬於表面振動特性的訊號，往往被來自晶體內深層原子的訊息所覆蓋或疊加在一起，來自表面晶格振動的資訊就難以擷取。HREELS 因低能電子平均自由路徑短小 (約幾個單層原子厚度)，當它們離開或接近晶格表面時，就與晶格產生交互作用，反射回來的非彈性碰撞電子，具有豐富的晶格振動訊息。適當改變入射電子能量及入射角度，可產生不同的波向量 (wave vector)，再根據表面能量、動量不滅定律，晶格表面的聲子色散圖譜即可適當地求出。因而 HREELS 在表面晶格振動研究上可以彌補光子、中子的不足。

在另一方面，如果 HREELS 測量的是吸附氣

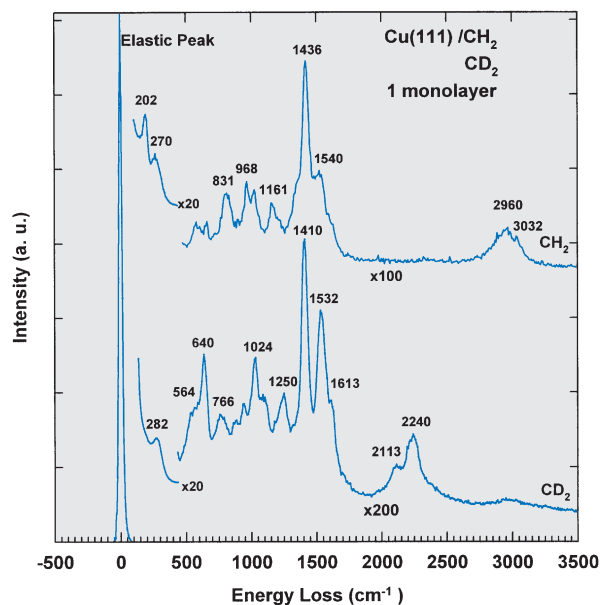


圖 5. 用 HREELS 頻譜儀獲得之次甲基 (CH_2) 吸附在銅 Cu(111) 表面上的振動能譜。

體分子，電子損失的能量反應出分子由基態激發到另一較高能階上，在理論上此種損失能譜可以用來推算出分子間及吸附原子與金屬間的化學鍵距與角度。用 HREELS 配合其他表面分析儀器，我們可以研究表面化學反應的過程與機制。因此 HREELS 在化學、化工及材料科學研究上，可以協助吾人分析原子與分子鍵結、合成、分解及催化的行為。圖 4 與圖 5 是最近在本實驗室內用 HREELS 頻譜儀獲得之甲基 (CH_3) 與次甲基 (CH_2) 吸附在銅 Cu(111) 表面上的振動能譜，以供參考。

參考文獻

1. H. Ibach and D. L. Mills, *Electron Energy loss Spectroscopy and Surface Vibrations*, New York: Academic Press (1982).
2. H. Ibach, *Electron Energy Loss Spectrometers*, Berlin: Springer-Verlag (1991).

作者：陳悅來先生現任中央研究院原子與分子科學研究所博士後研究員。

莊東榮先生現任中央研究院原子與分子科學研究所研究員及國立中央大學化學系教授兼系主任。

離子散射譜儀

Ion Scattering Spectrometer (ISS)

關鍵字：離子散射、能譜分析、表面分析、組成分析、結構分析

Keywords：ion scattering, energy spectrum analysis, surface analysis, compositional analysis, structural analysis

一、基本原理

使用低能量(如：0.2 至 2 keV)的鈍氣離子(如 He^+ 、 Ne^+)以一定之入射角度撞擊固體表面，入射離子可穿入固體內部靜止在其中或失去部分能量後再被反彈散射出，逸失能量會經由彈性或非彈性碰撞傳遞給固體中的組成原子。若入射離子之質量為 M_1 ，所帶能量遠低於 M_1 keV，且大於組成原子之晶格結合能時，撞擊表面後，所發生的碰撞主要為彈性碰撞，會將所有逸失的動能傳遞給固體之組成原子，產生具有可以 (1) 式表示能量之散射離子：

$$\frac{E_1}{E_0} = \frac{M_1^2}{(M_2 + M_1)^2} \left\{ \cos \theta + \left[\left(\frac{M_2}{M_1} \right)^2 - \sin^2 \theta \right]^{\frac{1}{2}} \right\}^2 \quad (1)$$

式中之 E_1 為散射離子的能量， E_0 為入射離子的能量， M_1 為入射離子的質量， M_2 為固體樣品之組成原子的質量， θ 為散射角。當 θ 為 90° 時，上式可簡化為：

$$\frac{E_1}{E_0} = \frac{M_2 - M_1}{M_2 + M_1} \quad (2)$$

利用上式，已知 E_0 和 M_1 ，測得 E_1 值後，可以計算求得 M_2 ，鑑定固體樣品表面的組成元素，進行半定量分析；亦可系統性的改變入射角度和散射角度，以判定表面的化學結構。圖 1 為史密斯 (Smith) 於 1971 年所測得的 CdS 單晶樣品的離子散射譜圖，入射離子為 2.0 keV 之 He^+ ，散射角度為 90° 。虛線為 $(\bar{1}\bar{1}\bar{1})$ 面的離子散射譜圖，主要組成元素為 S；實線為 (111) 面的離子散射譜圖，主要組成元素為 Cd。S 有質量數 32、33、34、36 等四種同位素，原子量為 32.064，整數值為 32，從上式中可計算求得相對應的 E_1 值為 1555。Cd 有質量數 106、108、110、111、112、113、114、116 等八種

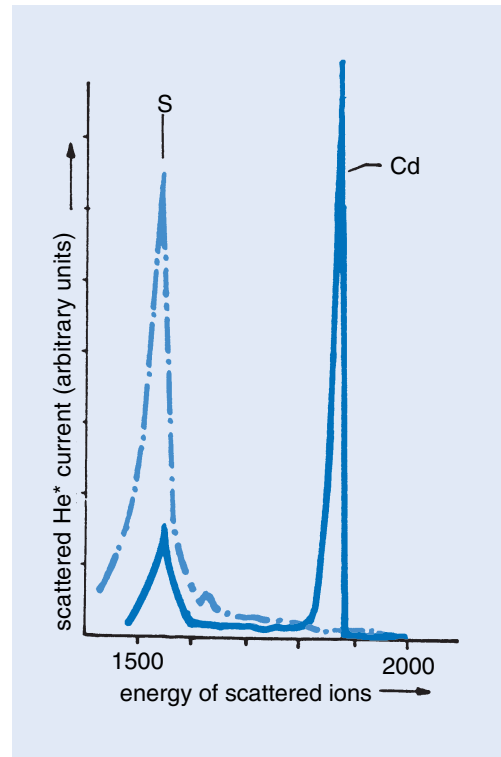


圖 1. 以 2.0 keV 之 He^+ ，入射角度為 90° 撞擊 CdS 單晶樣品之離子散射譜圖⁽¹⁾。

同位素，原子量為 112.41，整數值為 112，從上式中可計算求得相對應的 E_1 值為 1862，和圖 1 中實驗結果值相當吻合。

二、結構示意圖

圖 2 所示為典型的離子散射譜儀的結構示意圖，包括高真空系統、離子源、樣品架、能量分析器和偵測器。

高真空系統需能提供整個系統至少 1×10^{-7} Pa 的真空度，以確保離子散射信號確實來自樣品的最表層，而非來自不良真空度而沉積在樣品表層的污染物；離子散射基本上是分析散射離子的能量，以求得樣品的組成和結構訊息，因此入射離子的種

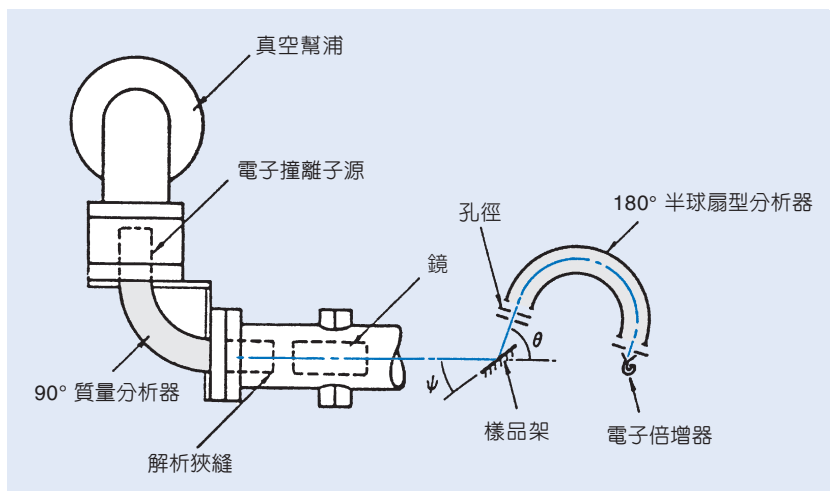


圖 2. 典型的離子散射譜儀的結構示意圖⁽³⁾。

類、純度 (包括質量和能量)、角度和尺寸都會影響到能量分辨率，一般而言，入射離子的質量愈輕，撞擊樣品後，其動能的改變愈大，因此常選用 He 離子做為入射離子；分析重元素，則選用 Ne 或 Ar 離子，以減少儀器的能量分辨率不足之困擾，離子源和樣品架之間則常加一質量分析器，以確保入射離子具有單一質量／電荷比；入射角度則視分析目的而有所不同，組成分析通常使用固定角度之樣品架，結構分析則使用可調角度之樣品架。典型的入射離子參數為：He 離子， E_0 介於 0.2 至 2.0 keV， ΔE_0 約為幾個 eV，角分散度小於 $\pm 1^\circ$ ，離子束直徑為 0.1–1 mm，離子電流強度介於 μA 至 nA。散射離子的強度與入射角 (ϕ)、散射角 (θ) 有關，入射角愈小，散射峰強度愈強。當入射角為 45° 時，表層原子會屏蔽內層原子，控制入射角度，可改變入射離子與內層原子發生碰撞的機率，雖然如此會造成定量分析之困擾，但可利用此屏蔽效應，減少背景原子散射峰的干擾，擴大散射離子提供表面結構資訊的能力，如在吸附研究時判定吸附態。理想的可調角度樣品架為可調圖 2 中之入射角 (ϕ)、散射角 (θ) 及方位角 (ψ) 的五維可調樣品架。

通常使用靜電型能量分析器 (electrostatic energy analyzer) 分析散射離子的能量，如圖 3 中之 180° (有時為 127°) 半球扇型 (hemispherical sector) 能量分析器，其優點為使用彈性廣、可選用各種離子源、易外加質量分析器、易調整入射角以改變散射角而得到結構資訊，散射離子的能量可以 (3) 式表示；亦可使用如圖 4 所示之筒鏡型分析器

(cylindrical mirror analyzer, CMA)，其優點為接收散射離子之立體角大，較半球扇型所能偵測的離子數目可高出兩個幕次級，可用小型離子源並放置在 CMA 內，散射離子的能量可以 (4) 式表示。一般而言，半球扇型適合結構分析，筒鏡型較適合組成分析。偵測器一般多使用電子穿隧倍增器 (channel electron multiplier, CEM)。

$$V_0 = \frac{1}{\left[\left(\frac{R_2}{R_1} \right) - \left(\frac{R_1}{R_2} \right) \right]} (V_2 - V_1) \quad (3)$$

$$V_0 = \frac{K_0 e}{\ln \left(\frac{r_2}{r_1} \right)} V \quad (4)$$

三、儀器規格與特徵

散射離子譜儀的儀器結構組成和較常用的 ESCA、AES 和 SIMS 有許多共通處，因此市售的散射離子譜儀多為多功能表面分析儀 (如美國 PHI

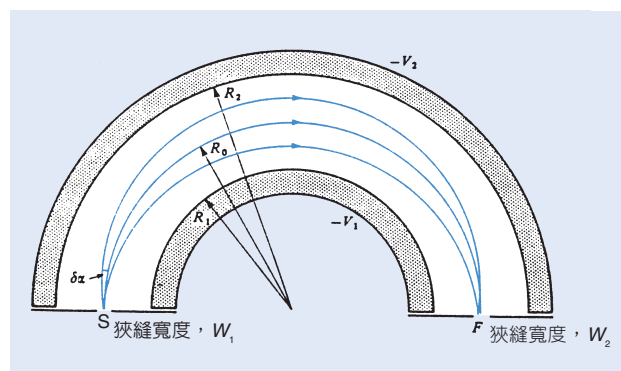


圖 3. 半球扇型能量分析器結構示意圖⁽³⁾。

表 1. 散射離子譜儀的操作模式⁽³⁾。

應用與用途	離子源			樣品器		偵測器
	種類	能量 (keV)	數量 (cm ⁻²)	入射角	方位角	散射角
組成分析						
低質量原子	He ⁺ , Li ⁺	0.2–2	< 10 ¹⁵	固定, 45–90°	固定	固定, 90–180°
高質量原子	Ne ⁺ , Ar ⁺ , K ⁺	1–2	≅ 10 ¹³	固定 < θ_{\max}	固定	固定, 受限於原子質量和 θ_{\max}
結構分析						
單次離子散射	He ⁺ , Li ⁺	0.2–2	< 10 ¹⁵	可調式, 20–90°	可調式, ± 180°	固定, 90–180°
撞擊離子散射 ¹	He ⁺ , Li ⁺ , Na ⁺	1–2	< 10 ¹⁵	可調式, 0–90°	可調式, ± 180°	固定, ≅ 180°
多重離子散射 ²	Ne ⁺ , Ar ⁺ , K ⁺	2–6	低	可調式, 10–45°	可調式, ± 180°	可調式, 20–90°

¹impact collision ; ²multiple

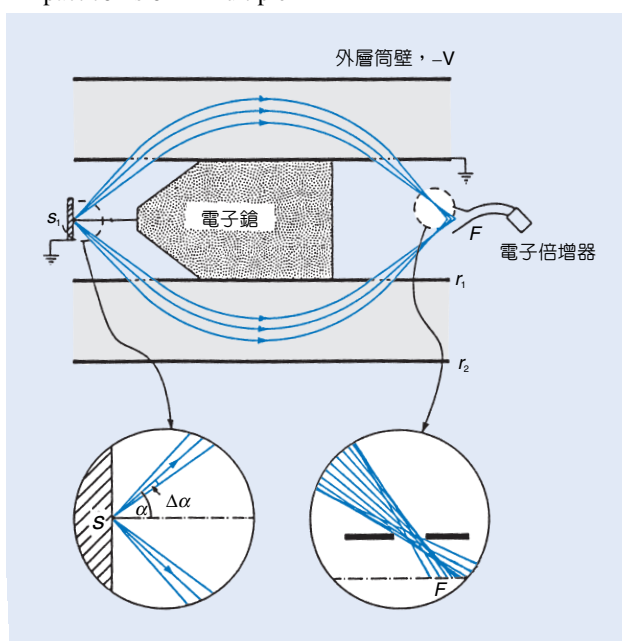


圖 4. 筒鏡型能量分析器結構示意圖⁽³⁾。

公司之 ISS/ESCA/AES，美國 ION WERKS 公司之 MSRI/SIMS) 的一部分，使用者可參考表 1 的應用與用途欄，選購適合的儀器規格。

四、應用與用途

離子散射儀可用於定量表面的化學組成和推測表面的化學結構，為表面科學研究的最佳利器之一。常用於定量表面組成和研究吸附、脫附、催化和發射等表面現象。使用低能離子進行分析，不易損傷樣品表面，且較少有電荷累積之困擾，因此可廣泛適用於金屬、合金、半導體、絕緣體和高分子聚合物等各種材質的分析研究，在表面科技的應用非常廣泛。

參考文獻

1. D. P. Smith, *Surf. Sci.*, **25**, 375 (1971).
2. J. P. Thomas and A. Cachard, *Material Characterization Using Ion Beams*, New York: Plenum Press (1976).
3. J. M. Walls, *Methods of Surface Analysis*, Cambridge: Cambridge University Press (1989).
4. 陳家和, 陳長彥等編著, 表面分析技術, 北京: 電子工業出版社 (1987).

作者：凌永健先生為美國佛羅里達州立大學化學博士，現任國立清華大學化學系教授。

二次離子質譜儀

Secondary Ion Mass Spectrometer (SIMS)

關鍵字：二次離子、縱深成分分佈分析、表面分析、質量分析器、雙電漿離子槍、表面游離離子槍、液態金屬離子槍

Keywords：secondary ion, depth profiling analysis, surface analysis, mass analyzer, duoplasmatron ion gun, surface ionization ion gun, liquid metal ion gun

一、基本原理

以低於 30 keV 能量的離子束撞擊固態試片表面，入射離子的動量與能量會轉移到試片內的原子，造成原子的移動，移動原子會繼續與其他原子發生碰撞，在原子間擠壓碰撞過程中，部分表面原子獲得了足夠的能量，便可脫離試片表面，這種濺蝕過程包含了一連串複雜的碰撞步驟，包括連續的角度改變及原子間的能量移轉。被濺離試片表面的粒子或粒子團中，有少於 1% 呈離子形態，為了區別入射離子束之一次離子 (primary ions)，這些源自試片表面的離子被稱之為二次離子 (secondary ions)，可用質量分析器區別二次離子的質量-電荷比值 (m/z)，從而判斷試片表面元素組成和化學狀態，此即為二次離子質譜儀，簡稱 SIMS，由於利用高靈敏度的質量分析器檢測二次離子，SIMS 可檢測所有元素及同位素，檢測極限可達 ppm—ppb 範圍內，極為適合分析固態材料表面的微量元素成分和化學狀態。

一般 SIMS 系統有三種分析功能：(1) 質譜掃描、(2) 二次離子分佈成像與 (3) 縱深成分分佈分析 (depth profiling)；由於離子束的電流密度及能量會顯著影響試片的濺蝕速率，分析試片表面層的元素組成時，為了避免激烈的濺蝕反應，必須使用低能量及低電流密度的入射離子束，當只有少於 1% 的第一原子層在 SIMS 分析時被濺離試片表面，則此 SIMS 分析稱為靜態 SIMS 分析 (static SIMS)，當提升離子束能量及電流，濺射速度因而增加，在短時間內，SIMS 可快速分析自試片表面至一、二微米或更深之元素組成分佈情形，此為動態 SIMS 分析 (dynamic SIMS)，一般用於縱深和影像分析。

二、結構示意圖

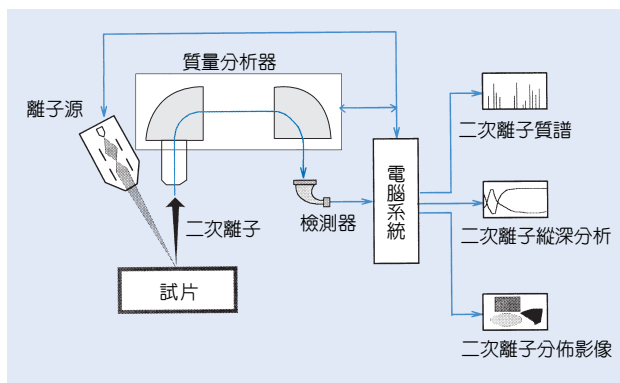


圖 1. 二次離子質譜儀的結構示意圖。

二次離子質譜儀的儀器基本構造可概括為為四個部分：離子源、離子質量分析器、離子偵測器及數據擷取處理系統，圖 1 為二次離子質譜儀的結構示意圖，離子源用以產生一次入射離子束，質量分析器則分析自試片發散出來的二次離子質荷比，為了避免所謂的坑緣效應 (crater edge effect)，離子束在試片上掃描濺蝕出一方形坑穴，而質量分析器僅擷取底部中間區域的二次離子訊號，用離子偵測器以偵測二次離子訊號的大小，一般在高離子電流時，使用法拉第杯 (Faraday cup)，低離子電流時，利用電子倍增管 (electron multiplier tube)，數據擷取處理系統則利用電腦界接各軟硬體單元，控制分析工作的進行與數據的處理，所有的分析工作均在超高真空 (10^{-9} torr) 環境中進行。

三、儀器規格與特徵

在二次離子質譜儀的基本構造中，離子源及離子質量分析器為二次離子質譜儀最主要的單元，它們會顯著地影響二次離子質譜儀的分析結果。

1. 離子源

二次離子質譜儀所用的一次離子束的化性、純度與電流密度會嚴重影響二次離子分析結果，因此 SIMS 系統往往配置著不同的離子源，常用於 SIMS 分析的三種離子源為雙電漿子離子槍 (duoplasmatron ion gun)、液態金屬離子槍 (liquid metal ion gun) 及表面游離離子槍 (surface ionization ion gun)。

(1) 雙電漿子離子槍

雙電漿子離子槍是一種可產生高電流的離子源，所謂雙電漿子即是以兩階段放電的方法產生離子源，第一階段的放電發生在具較高氣壓 ($\sim 10^{-2}$ torr) 的陰極及中間陽極 (intermediate anode) 區域內，電漿的產生可以用熱燈絲游離鈍氣或以冷陰極放電法產生化性活潑的氣體離子，產生的電漿經磁場導引，進入第二放電區 (氣壓為 $\sim 10^{-3}$ torr)，在陽極及中間陽極區域內發生第二階段放電；雙電漿子離子源具有很高的離子亮度 ($110-200 \text{ A/cm}^2 \text{ sr}$)，並有較小的離子能量分佈寬度，適合執行需要較快濺射速率的二次離子縱深分析，由於是經冷陰極輝光放電方式所產生，因此可以產生活性氣體的離子束，氧分子是雙電漿子離子源最常使用的氣體，產生的 O_2^+ 離子束用以激發正二次離子；雙電漿子離子源內部因為受到高電流密度的電漿撞擊濺蝕，易造成離子源內部組件的碳化污染，特別是孔洞部分，因此必須定期清理。

(2) 液態金屬離子槍

一根針尖直徑在 $1-10 \mu\text{m}$ 左右的細針固定於金屬熔槽內，熔槽一般由鎢金屬製作而成，槽內置放有做為離子源的純金屬，離子源金屬經加熱液化後，液態金屬會因毛細作用沿細針表面移動，潤溼細針表面，當在細針前端的抽引電極加上 $4-10 \text{ kV}$ 的偏壓時，針尖上的液態金屬受到這偏壓極化，形成圓錐狀，圓錐體尖端上的金屬原子感受到周圍強大的局部電場，造成了金屬原子的場蒸發與游離，正離子並由電極抽引而出，產生了 $1-100 \mu\text{A}$ 的離子電流，離子亮度高達 $1 \times 10^6 \text{ A/cm}^2 \cdot \text{sr}$ ，由於離子能量分佈範圍很小，液態金屬離子源經過

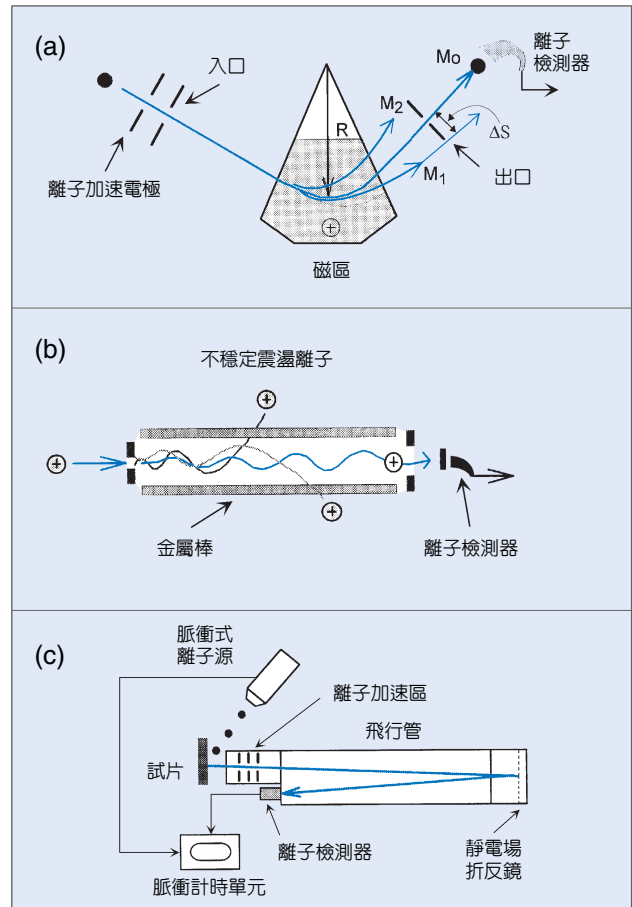


圖 2. (a) 磁偏式質量分析器，(b) 四極式質量分析器，(c) 飛行時間式質量分析器。

離子透鏡的聚斂後，可以形成束徑小 ($< 500 \text{ nm}$)，電流密度高 ($1-10 \text{ A/cm}^2$) 的離子束，適合進行微區、高濺蝕率的 SIMS 分析；用做離子源的金屬必須具備有低熔點、低蒸氣壓的特性，鎘 (Ga)、銫 (Cs) 及銦 (In) 均為適當的金屬，其中鎘的熔點為 $29.6 \text{ }^\circ\text{C}$ ，在該溫度時，其蒸氣壓小於 10^{-10} torr ，所以鎘為液態金屬離子源常用的金屬。

(3) 表面游離離子槍

吸附於金屬表面之原子在高溫時，其價電子能帶會與金屬導電能帶發生電子交換現象，吸附原子在失去電子或奪得電子後，可以離子態的形式脫離金屬表面，一般將鹼金屬固態材料置放於儲存槽加熱，固材溶解後，鹼金屬原子會移動至離子源前端的高溫 ($> 1400 \text{ K}$) 游離金屬板上，金屬板一般為鎢金屬，其熱能足以蒸發游離板表面上的鹼金屬原

子，並促使部分鹼金屬原子失去價電子而形成正離子態，此時游離板前面的抽引電極將正離子抽引進入離子光學透鏡區做進一步離子束的調制；因為銫元素的低游離能可增加負二次離子的產率，銫離子源被普遍運用於負二次離子分析。表面游離離子源產生之離子束亮度可達到 $1 \times 10^3 \text{ A/cm}^2 \cdot \text{sr}$ ，由於離子游離的過程為熱能激發現象，離子化性純淨，離子動能分佈範圍亦很小 ($< 1 \text{ eV}$)，其離子束束徑介於液態金屬離子源與以放電方式產生電漿的離子源之間。

2. 質量分析器

質量分析器是用來分析帶電荷粒子的質量／電荷比值 (m/z)；質量分析器的分析能力一般取決於分析器的穿透率 (transmission) 及質量解析能力，依照美國真空協會的定義，質譜的質量解析度 (mass resolution) 為 $m/z = M$ 質譜峰十分之一峰高處的峰寬 (ΔM)，由於質量分析器的 ΔM 隨 M 值大小成比例增減，並不很合適用做質量分析器解析能力的指標，而在一質譜中，各質譜峰的 ($M/\Delta M$) 卻是一個常數，所以便被用以界定在特定分析條件下，質量分析器的質量解析能力，於是 ($M/\Delta M$) 被定義為質量解析力 (mass resolving power)；普遍用於 SIMS 系統的質量分析器有磁偏式 (magnetic sector) 質量分析器與四極式 (quadrupole) 質量分析器，近年來飛行時間式 (time-of-flight, TOF) 質量分析器的應用亦漸增加。

(1) 磁偏式質量分析器

當帶電荷粒子在磁場中運動時，受到磁力的作用，其運動方向將受到羅倫茲 (Lorentz) 公式的約束而產生偏折，磁偏式質量分析器便是利用這原理來分離不同質量－電荷比值 (m/z) 的離子，當一電荷為 z 、速度為 v 的離子感受到一個磁場引發的向心力 (B_{c}) 時，離子的離心力 (mv^2/R) 必須與之平衡，才可使運動軌跡保持在磁區中線，如圖 2(a) 所示；磁偏式質量分析器分析的質量範圍可大於 10000 amu，而穿透率則高於 10%，其質量解析力可達 2×10^4 ，這些特點極適合用於半導體材料、礦物及生化試樣的 SIMS 分析，例如分析負型矽晶中

的摻雜磷元素 (^{31}P) 時，如果質量分析器的 $M/\Delta M < 4,500$ ，則將無法有效分離 $^{31}\text{P}^+$ 、 $^{29}\text{SiH}_2^+$ 與 $^{30}\text{SiH}^+$ 的訊號峰；由於磁偏式質量分析器的磁塊會有磁滯現象，磁場掃描速度受到限制。

(2) 四極式質量分析器

利用振盪電場過濾帶電粒子是四極質量分析器的基本原理，圖 2(b) 為四極式質量分析器的原理示意圖，動能約為 10 eV 上下的離子在穿越一振盪電場時，適當 m/z 值的離子可穩定地通過電場，而其他 m/z 值的離子則會發生劇烈振盪而脫離電極棒環繞的區域，如此達到分離不同 m/z 值離子的效果；振盪電場由一無線電頻率 (MHz) 的交流電場附加在一直流電場上所形成，直流電場大小約為交流電場峰高的六分之一，電極為四根鉬金屬圓棒，當一組電極棒附加之直流電場為正偏壓時，另一組電極棒則為負偏壓；四極式質量分析器的質量解析力並不很理想，一般在 300 左右，而其質量分析範圍一般不大於 300 amu，欲提升質量解析力除了提高直流電位與交流電位比值外，亦可增加電極棒的體積、長度，但是如此便會使原本很小的穿透率 (1%) 更行惡化，因此四極質量分析器的質量解析力少有超過 1000 者。

(3) 飛行時間式質量分析器

具相同動能的兩運動粒子，質量越大者，其運動速度就越小，因此當運動的方向、距離相同，質量輕者可在較短的時間內到達終點，飛行時間式 (TOF) 質量分析器即是利用此一原理來分離不同質量的粒子，當我們用高偏壓加速瞬間發散自試片表面的二次離子，並量測不同 m/z 比值之離子到達檢測器的時間，便可以分析出二次離子的質量，圖 2(c) 為 TOF 質量分析器的原理示意圖，由於全部的離子必須被調制成相同的動能，並同時出現在飛行管起點，所以一次離子源為脈衝式，離子束脈衝應小於 10 ns，當二次離子進入離子透鏡系統，抽引電極會加速二次離子至 5 keV 左右，一般的飛行長度在兩公尺以下，而離子偵測器的飛行時間量測準確度宜小於 1 ns。TOF 質量分析器的離子穿透率可達 100%，理論上，TOF 質量分析器可分析任何

質量的離子，不過質量越重的粒子所需的飛行時間就越長，會因此大量減緩分析速率，通常分析的質量以 10000 amu 為上限，TOF 質量分析器的質量解析度與入射離子脈波長度及離子偵測系統的訊號擷取速率有關，一般 TOF 質量分析器的質量解析力均大於 1000。

四、應用

由於 SIMS 分析靈敏度極高，一般多用來檢測微量元素成分，而以半導體領域的應用最為廣泛，其中半導體摻雜元素的擴散分析及晶圓表面金屬微污染物分析為主要的工作項目；高分子聚合物薄膜的表面經過物理或化學處理後，表面特性會發生改變，靜態 SIMS，特別是 TOF-SIMS，可用以分析表面化學結構；而在地質學研究方面，SIMS 被應用來分析礦物的組成成分；利用 SIMS 影像法可以觀察催化劑反應前後過渡金屬在觸媒表面的分佈情形；SIMS 亦被用來進行生物學研究，例如細胞核的成分分析，為了避免試片脫水造成生化組織原始

組成的改變，生化組織 SIMS 分析之試片前處理方法開發是一個工作重點；除此之外，許多薄膜、固材的表面化學組成均可利用 SIMS 來了解，例如超導體、金屬腐蝕劣化、放射性物質等。

參考文獻

1. A. Benninghoven, F. G. Rüdenauer, and H. W. Werner, *Secondary Ion Mass Spectrometry, Basic Concepts, Instrumental Aspects, Applications and Trends*, New York: John-Wiley & Sons (1987).
2. J. C. Vickerman, A. Brown, and N. M. Reed, *Secondary Ion Mass Spectrometry, Principles and Applications*, Oxford: Oxford University Press (1989).
3. R. G. Wilson, F. A. Stevie, and C. W. Magee, *Secondary Ion Mass Spectrometry, A Practical Handbook for Depth Profiling and Bulk Impurity Analysis*, New York: John Wiley & Sons (1989).
4. D. Briggs and M. P. Seah, *Practical Surface Analysis*, 2nd ed., New York: John Wiley & Sons Ltd (1990).

作者：潘扶民先生為美國加州大學 Irvine 分校化學博士，現任國科會國家毫微米元件實驗室研究員。

聚焦離子束微分析儀

Focused Ion Beam Microanalyzer

關鍵字：聚焦離子束、二次離子質譜分析、空間分辨率、微分析、質譜儀

Keywords：focused ion beam, secondary ion mass spectrometry, spatial resolution, microanalysis, mass spectrometer

一、基本原理

當一個高速的離子與樣品表面碰撞時，有一些表面原子會被濺射到空中，其中有些是以離子的狀態飛出。為了與入射離子 (primary ion) 有所區分，我們稱這些離子為二次離子 (secondary ion)。利用質譜儀 (mass spectrometer) 來分析這些二次離子的電荷與質量比，就可以了解樣品的原子組成。這套分析方法稱為二次離子質譜分析 (secondary ion mass spectrometry, SIMS)。如果把入射離子都聚焦在一個很小的區域內，那麼所有的二次離子都是從這區域發射出來的，這就是所謂的聚焦離子束 (focused ion beam, FIB) 微分析。

SIMS 是一種破壞性的分析方法，樣品表面的原子被離子束一一地撞擊出來。每入射一個離子所濺射出的平均原子數量稱為濺射率 (sputtering yield, S)。 S 雖然隨著樣品的成分、入射離子的能量 (通常約數萬電子伏特) 與元素而改變，但是 S 為 1—10 在大多數的情形都是可靠的估計。由於被撞擊出來的原子通常只有一小部分會被離子化，而質譜儀收集到的離子訊號又只是當中的一部分而已，所以二次離子的信號強度 (I_x , 個/秒) 可以表示成：

$$I_x = \eta_x \cdot \alpha_x \cdot C_x \cdot S \cdot I_p \quad (1)$$

I_p ：入射離子強度

S ：樣品濺射率

C_x ：樣品中 x 元素的濃度

α_x ： x 原子的游離機率

η_x ： x 離子穿過二次離子接收系統與質譜儀的機率

如果以分析均勻材料的角度來看，(1) 式中的

未知數是 C_x ， I_p 是已知數， I_x 則是測量到的訊號。理論上，只要量得 S 、 α_x 與 η_x ，就可以算出 C_x 。 S 可以從樣品被濺射後留下來的凹洞之深度測得， η_x 雖然是因系統而異的參數，原則上也可以經由實驗方法測量得到。最困難的問題在於如何決定 α_x ，它可能是由 1 到 10^{-6} 之間的任意數，且會隨著樣品表面的吸附分子種類與鍵結情形而改變達幾個數量級。因此目前測量 C_x 最可靠的方法是利用一系列的已知 C_x 組成的標準樣品來校正相對應的 I_x ，然後用內插法來決定未知樣品的 C_x 。

聚焦離子束微分析所適用的分析對象當然不是均勻的材料，否則就失去微分析的意義了。特別是當我們希望有很高的空間分辨率 (spatial resolution) 時，濃度的觀念就漸漸失去意義。舉例來說，由於一般固體表面的原子密度大約是 10^{15} (1/cm²)，如果我們想知道的是一個 100 nm² 的區域中某 x 元素的濃度，那麼測量的靈敏度最多約只有 1/1600 (這代表的是整個區域裡只有一顆 x 原子)。以目前 FIB 的科技，10 nm 左右的空間分辨率是可能的，在這麼小的區域中來談雜質之平均濃度的觀念並不恰當。聚焦離子束微分析術特別有用的情形為樣品表面上有一些由少數幾種元素聚集而成的小顆粒 (< 1 μm)，而我們想知道的是它的組成元素，以便推測這些顆粒的來源，而不是測量 C_x 這種描述均勻材料的統計數量。

二、結構示意圖

聚焦離子束微分析儀的空間分辨率主要取決於 FIB 的直徑，所以我們將利用比較多的篇幅來介紹 FIB 的形成原理 (見參考文獻 1、2)。至於 SIMS 的部分，請見參考文獻 3。一套聚焦離子束微分析系統大致上可以分成四大部分 (如圖 1 所示)。

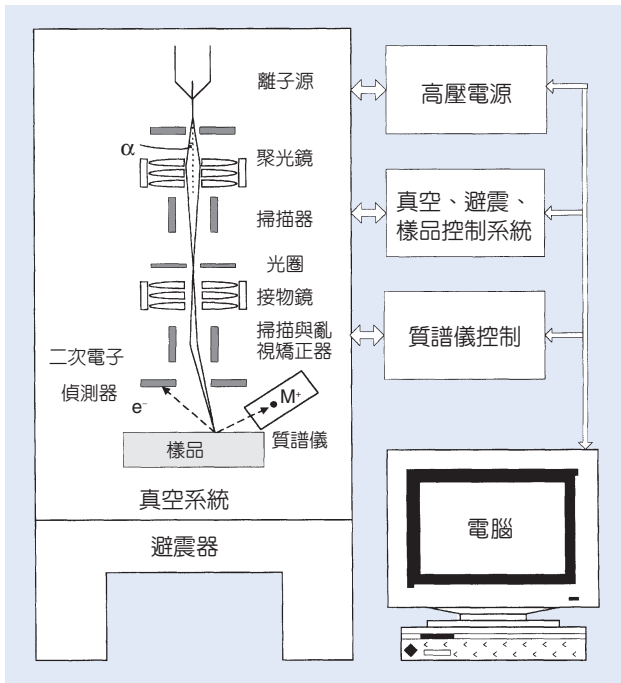


圖 1. 聚焦離子束微分析系統。

1. 離子聚焦與掃描系統

離子從一個點狀離子源被吸出後，首先通過的是聚光鏡 (condenser)，以及第一個八極體掃描器 (octupole scanner)。接著，有一大部分的離子被光圈 (beam defining aperture) 所阻擋，只有少數通過軸心的離子繼續前進到接物鏡 (objective lens)，在那兒被聚焦後穿過另一個八極體掃描與亂視矯正器 (stigmator) 才降落在樣品的表面。這套離子光學系統對光軸上的離子束半徑 (d) 的影響可以用下列的方程式來表示：

$$d^2 = (Md_0)^2 + (C_c \frac{\Delta V}{V} \alpha)^2 + (C_s \alpha^3)^2 \quad (2)$$

其中 M 是放大倍率， d_0 是離子源的虛擬直徑 (virtual source diameter)， C_c 是色差 (chromatic aberration) 係數， ΔV 是離子源的能量分佈寬度， V 是離子的能量， C_s 是球面像差 (spherical aberration)，而 α 則是整個離子光學系統的接收半角 (見圖 1)。從 (2) 式可以看出，縮小離子束半徑的方法之一是減少 α ，只選用與光軸幾乎平行的離子束。但是每一個離子源都有它亮度的極限，太小的 α 會導致離子束電流過小，整個系統就變的不

實用了。因此一個高亮度的離子源是建造 FIB 的重要基礎之一。如使用的離子源與 α 皆相同，則離子光學系統的好壞就取決於 C_c 與 C_s 的大小了。

2. 二次電子偵測器與質譜儀

離子與表面碰撞除了產生二次離子，也產生二次電子 (secondary electron)。為了實用上的方便，聚焦離子系統中都會利用二次電子的訊號來成像，其成像原理與掃描式電子顯微鏡 (SEM) 非常類似。利用二次電子所提供的影像，我們比較容易找到樣品表面上特定的區域來作微分析。一旦找到目標區，就只要一點一點的掃描樣品，記錄下每一小點所發出的二次離子質譜。原則上，我們可以從樣品上的每一點 (pixel) 分別得到一個質譜，再從這些大量的質譜中分類出我們的需求。例如，我們可以在一幅照片上呈現某一個特定元素的分佈情形，這就是所謂的元素分佈圖 (elemental map)。

3. 真空與避震系統

由於離子源、電透鏡、偵測器與質譜儀等元件都必須在真空中才能運作，因此一個良好的真空系統是聚焦離子系統的必備設備。有此系統為了增加離子源的穩定性與壽命，減少質譜的背景雜訊，也可能採用超真空系統。為了達到 100 nm 以下的空間分辨率，良好系統的避震也是必備的設備。

三、儀器規格與特徵

- (1) 離子源種類：鎵、銦、金與其他合金。
- (2) 離子束能量：20–50 keV。
- (3) 離子束直徑： < 100 nm。
- (4) 離子束電流密度： ≥ 1 A/cm²。
- (5) 質譜儀種類：四極質譜儀、飛行時間質譜儀、磁場質譜儀；質量解析度 ($\frac{m}{\Delta m} > 200$)。
- (6) 真空度： $< 10^{-6}$ torr。
- (7) 避震系統：震幅遠小於 FIB 的直徑。
- (8) 電腦操控與影像處理系統。

四、應用

聚焦離子束微分析儀應用的範圍很廣泛，大致上可以分成下列幾個方向：

- (1) 基礎物理與化學現象的觀察，例如金屬的氧化以及粒子凝聚成碎形的過程。
- (2) 材料科學，如合金中的元素分離現象。
- (3) 半導體製程檢測以及微顆粒分析。
- (4) 生物科學研究，如外來毒素在細胞中的聚集。

參考文獻

1. Y. L. Wang and Z. Shao, *Design Principles of an Optimized Focused Ion Beam System, a chapter in Advances in Electronics and Electron Physics*, **81**, 177, Boston: Academic Press (1991).

2. R. Levi-Setti, J. M. Chabala, Y. L. Wang, P. Hallegot, and C. Girod-Hallegot, *Analytical Imaging with a Scanning Ion Microprobe a chapter in Images of Materials*, 94-113, Oxford: Oxford University Press (1991).
3. A. Benninghoven, F. G. Rudennauer, and H. W. Werner, *Secondary Ion Mass Spectrometry*, New York: John Wiley & Sons (1987).

作者：王玉麟先生為美國芝加哥大學物理博士，現任中央研究院原子分子科學研究所副研究員與國立台灣大學物理系副教授。

掃描穿透電子顯微鏡

Scanning Transmission Electron Microscope (STEM)

關鍵字：電子顯微鏡、穿透電子顯微鏡、掃描穿透電子顯微鏡、高分辨電子顯微鏡、側面像、反射電子顯微鏡
Keywords： electron microscope, transmission electron microscope, scanning transmission electron microscope, high resolution electron microscope, profile imaging, reflection electron microscope

一、基本原理

將高能電子照射在固體樣品上，會產生穿透電子、反射電子、二次電子、X 射線等信號。這些信號可以通過儀器處理，以得到樣品的結構與成分。如果處理信號的儀器能分辨樣品上不同位置所發出信號的差別，就能形成樣品的放大像。這種能產生高能電子，使其與樣品作用，再用樣品發出的信號形成放大像的儀器，通稱為電子顯微鏡。

電子顯微鏡大致上可以分為穿透電子顯微鏡 (簡稱穿透電鏡，TEM) 和掃描電子顯微鏡 (簡稱掃描電鏡，SEM) 兩類。前者使電子穿透過薄樣品，主要採取穿透的電子成像，它的原理和傳統的光學顯微鏡幾乎完全相同。後者則將電子聚焦成微探針，在樣品表面掃描，然後取二次電子，通過同步掃描的陰極射線管成像，原理和電視相似。較晚近的穿透電鏡，往往附帶有掃描的功能，於是稱為掃描穿透電子顯微鏡 (STEM)。

二、結構與功能

一台 STEM 可以分成鏡筒、高電壓系統、真空系統、冷卻系統、電子系統等幾個大部件，另外還可能有附件。高電壓系統產生 100 keV 到 1 MeV 的電壓，送入鏡筒上端的電子槍，將燈絲發出的電子加速，經過會聚鏡到達樣品室。在這裡穿透過樣品，再通過物鏡、中間鏡和投影鏡等一共三級放大，到達相機或其他攝影系統。真空系統保持鏡筒內電子束通路的真空，冷卻系統疏散鏡頭電流產生的熱。而電子系統則聯繫整個儀器，使操作員能在面板上控制儀器的各部分。許多 STEM 帶有電腦、分析儀器等附件。

STEM 的鏡筒中有六個到八個透鏡。每個透鏡都是由線圈繞著鐵心產生強磁場，能將通過的電子

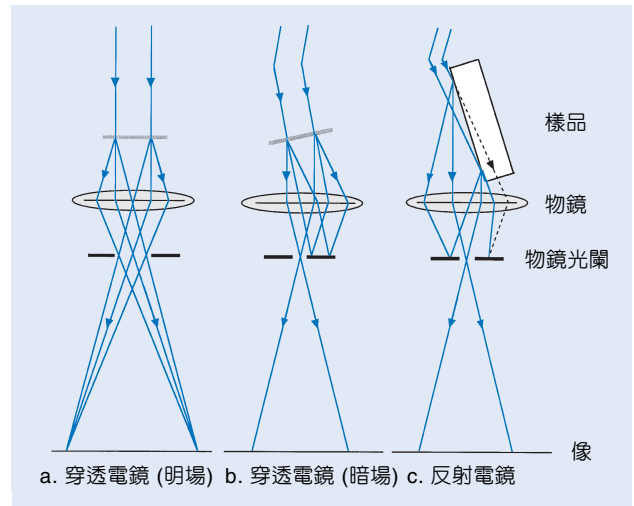


圖 1. 三個電子路徑圖比較電子顯微鏡的三種不同操作法，(a) 明視野像：物鏡光闌選取穿透束。如果用大光闌選取多束，則能形成高分辨像。(b) 暗視野像：物鏡光闌選取一束反射的電子成像。(c) 反射像：電子從小角度入射晶體表面，物鏡光闌選取一個強繞射點，形成反射像。

聚焦，有如玻璃透鏡將光線聚焦。圖 1 只用一個鏡頭來代表 STEM 中多個電磁透鏡組成的成像系統。這幾個光路圖說明 STEM 的明場像 (bright field, BF)、暗場像 (dark field, DF)，以及反射電鏡像 (reflection electron microscopy, REM) 等不同的操作方法。改變透鏡電流，能改變像的放大倍數，也可以使後焦面上的電子繞射 (transmission electron diffraction (TED) 或 reflection high energy electron diffraction (RHEED)) 花樣聚焦到屏幕上。

三、儀器規格與特徵

(1) 加速電壓

STEM 的高壓通常是 100 kV 到 400 kV。電子波長大約 0.0037 nm 到 0.0018 nm。

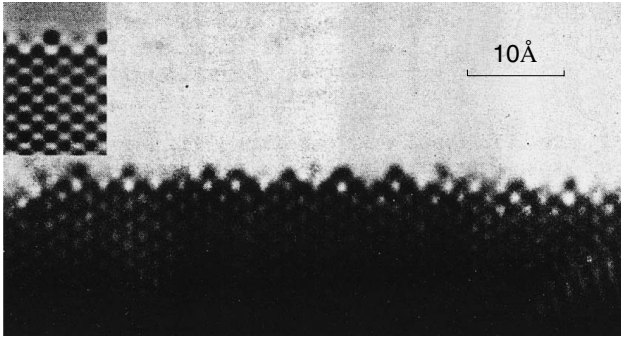


圖 2. Au (110) (2 × 1) 的側面像，可見表面原子缺排。左上角是模擬像。

(2) 分辨率

STEM 的空間分辨率取決於兩個主要的因素，電子的波長和透鏡的缺陷。在不同的應用下，使用的不同波長和刻意造成不同的鏡頭缺陷。因此 STEM 的空間分辨率也因個別應用技術而有不同。最高的分辨率可以達到 0.15 nm，能清晰分辨晶體中的原子結構。

(3) 靈敏度 (探測率)

電子顯微像和電子繞射花樣可以顯示晶體的完美原子結構以及缺陷。由於電子和樣品中原子的交互作用強，電子顯微鏡能探測到單一原子。能用來決定 nm 大小區域的結構和成分。

(4) 真空

通常 STEM 的鏡筒中要抽到 10^{-6} torr 的真空，以維持發射電子的燈絲壽命，也使電子的平均自由行程相當於鏡筒的長度。為了保持樣品表面的潔淨，樣品室的真空往往要高達 10^{-10} torr。

四、應用

電子顯微鏡的樣品，最薄的也有幾百層原子的厚度。而上下兩層表面，各不過兩、三層原子。因此穿透電子所帶的表面結構信息很弱，在一般的電子顯微工作中往往被忽略。要研究表面結構時，就要有特別的方法來抽取這些表面信息⁽¹⁾。

50 年代表面科學興起之後，有用暗場像觀察晶體表面的原子台階⁽²⁾。那是利用樣品的厚度相差一層原子時產生的繞射點強度差，來顯示樣品上原

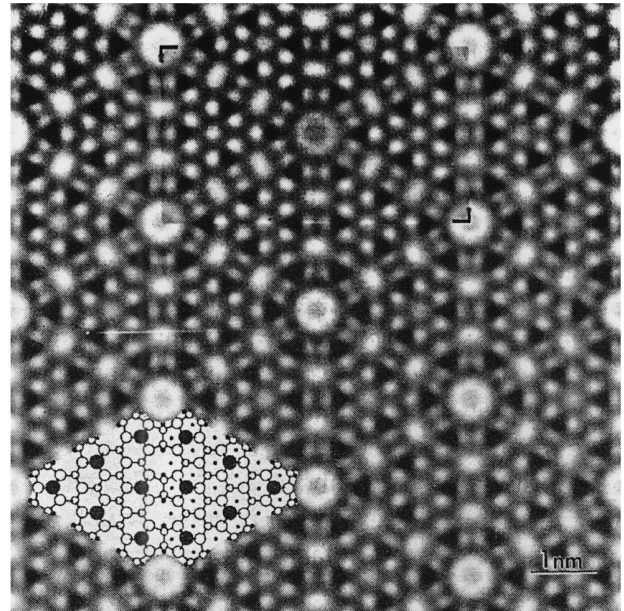


圖 3. Si (111) (7 × 7) 重構的高分辨穿透電子顯微像。黑框內是計算的模擬像，左下角是原子結構圖。

子台階的分布。

用高分辨電子顯微鏡 (HREM) 技術觀察晶體結構時，在晶體邊緣自然看到晶體表面的投影，也就是晶體表面的側視像⁽³⁾。如果晶體的厚度在幾十 nm 左右，而且沒有污染，則側視像能充分表現表面的原子結構。表面原子的重構、鬆弛等等，都可以直接從側視像中看到 (圖 2)。

最近從平面的高分辨穿透電子顯微像中，也通過計算取得了表面結構的像 (圖 3)⁽⁴⁾。Si 晶體的上下兩個 (111) 面，各有三層重構的原子，而樣品的厚度是 20 到 30 nm。用計算的方法取得表面結構的繞射點，再經過分離 (上下面)、平均等處理，得到 Si (111) (7 × 7) 的結構像。

由圖 1(c) 可見，反射電鏡的原理同穿透電鏡的暗視野像是一樣的，取一束強繞射束成像，入射角和反射角不超過 5° 。反射電鏡像是樣品表面在小仰角方向的投影，因此在順電子束的方向要縮扁 (foreshorten) 20 倍以上 (圖 1(c) 中 α 角的正弦的倒數)。圖 4 是 Pt (111) 的反射電鏡像⁽⁵⁾。

一般的 STEM 都可以做反射電子顯微像，不必加裝特殊的設備。不過，小光闌形成的暗場像，不可能有太高的分辨率。因此不要用短物鏡焦距的

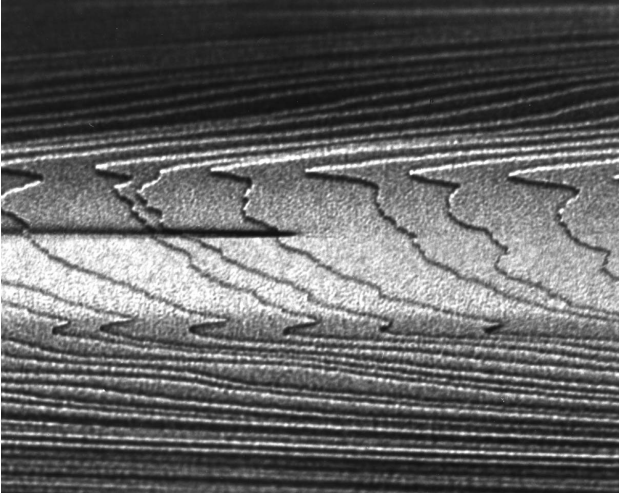


圖 4. 從 Pt (111) 的反射像，其中可以很清楚地看到 0.23 nm 高的單原子台階。中間的黑橫線顯示晶格缺陷造成的晶格畸變。

電鏡，以免物鏡間距太小容不下樣品，又不容許大角度傾轉。利用掃描的性能，STEM 也能產生二次電子像，其中能顯示晶體的表面原子台階⁶⁾。

用來做表面研究的 STEM 要有超高真空，要能臨場處理樣品。例如：熱處理以得到原子平滑的區域，控溫以得到某種表面重構；控溫、蒸鍍以觀察原子的吸附和脫附。

電子顯微鏡的一大優點，在於有完整的繞射與成像理論。因此電子顯微像中不單單能看到原子，提供直覺的證據，而且可以通過對電子顯微像和電子繞射圖形的計算分析，得到理論上可靠的結論。以 Si (111) (7×7) 重構為例，爭論了五十年，現在廣為流傳的是掃描穿隧顯微鏡 (STM) 的漂亮的圖像，但是 STM 其實只能顯示最上層的原子。而 Si (111) (7×7) 全部的原子結構，則是用電子顯微鏡解出來的⁷⁾。

參考文獻

1. D. J. Smith, *High-resolution Electron Microscopy in Surface Science*, in: *Chemistry and Physics of Solid Surfaces*, VI, Berlin: Springer-Verlag, 413 (1986).
2. D. Cherns, *Philo. Mag.*, **30**, 549 (1974).
3. L. D. Marks, *Phys. Rev. Lett.*, **51**, 1000 (1983).
4. E. Bengu, R. Plass, L. D. Marks, T. Ichihashi, P. M. Ajayan, and S. Iijima, *Phys. Rev. Lett.*, **77**, 4226 (1996).
5. 徐統, 反射電子顯微術, 科儀新知, **15** (4), 78 (1994).
6. J. Liu and J. M. Cowley, *Ultramicroscopy*, **37**, 50 (1991).
7. K. Takayanagi, Y. Tanishiro, M. Takahashi, and S. Takahashi, *J. Vac. Sci. Technol.*, **A3**, 1502 (1985).

作者：徐統先生為美國 Arizona 州立大學博士，現任國立清華大學材料科學中心研究員。

掃描穿隧顯微鏡

Scanning Tunneling Microscope (STM)

關鍵字：掃描穿隧顯微鏡、穿隧電流、局部電子密度、壓電材料

Keywords： scanning tunneling microscope, tunneling current, local density of states, piezoelectric materials

一、基本原理

電子穿隧 (tunneling) 現象乃量子物理的重要內涵之一。當兩個電極相距在幾個埃 (angstrom, Å) 的範圍時 (一個原子的大小約為 2–3 Å)，電子已能從一極穿隧到另一極。穿隧的機率是和兩極的間距成指數反比的關係。對一般金屬而言 (功函數約 4–5 eV)，1 Å 的間距差可導致穿隧電流 10 倍的增減。所以，藉偵測穿隧電流，可很容易地得知兩電極間距的變化達 0.1 Å 的程度。

掃描穿隧顯微術即利用這種電子穿隧特性而發展出來的。如果上述兩電極中的一極為金屬探針，另一極為導電樣品，當它們相距很近，並在其間加上微小電壓，則探針所在的位置便有穿隧電流產生。藉探針在樣品表面上掃描，便能構成一幅二維圖像。該圖像之解析度取決於探針結構，如果探針尖端只含幾顆原子，則表面原子排列情形便能獲知。因此，掃描穿隧顯微鏡是研究導電樣品表面原子性質的有利工具。

掃描穿隧顯微鏡的取像方式，一般可分為下列三種。

1. 定電流取像法 (constant current mode)

該法乃是以設定的穿隧電流 (~ 1 nA) 為回饋訊號。由於探針與樣品表面的間距和穿隧電流有十分靈敏的關係，設定穿隧電流值即鎖定探針和樣品表面之間距。當探針在樣品表面掃描時，探針必須隨表面之起伏調整其高度；因此，以探針的高度變化來呈像，就反映出樣品表面的形貌。該法的好處是可容忍較大的表面高低變化；缺點是由於必須以回饋信號來調制，掃描速度較慢，容易受低頻雜訊的干擾。

2. 定高度取像法 (constant height mode)

該法乃是直接以穿隧電流值來呈像。當探針以

設定的高度掃描樣品表面時，由於表面的高低變化，導致探針和樣品表面的間距時大時小，穿隧電流值也隨之改變。該法的好處是可做快速掃描以捕捉一些表面動態；缺點是掃描範圍內的樣品表面起伏不能太大，否則極容易損壞探針。

嚴格說來，掃描穿隧顯微鏡取得的像，除了反應樣品表面的幾何形貌，也包含表面的局部電子特性。這是因為穿隧電流的大小除了和探針及樣品的間距有關，也和探針所在位置的表面電子密度有關。為探討表面電子的空間分布，首先必須排除電流信號中的幾何因子，然後再就信號做能量解析，如此便能得到某一能級的表面電子的空間密度分布 (local density of state, LDOS)。以下即就目前在電子密度呈像上最常用的方法做簡單介紹。

3. 電流密度取像法 (current imaging tunneling spectroscopy, CITS)

該法乃結合了上述兩種方法，並在其中引進偏壓調變為取像變數，作法是以定電流模式為架構，讓探針在回饋系統的控制下，在掃描過程中保持一定的探針／樣品間距。然後在每一點，瞬時切斷回饋作用，並利用這段期間，將偏壓在預定的範圍內調變，同時記錄不同偏壓所產生之穿隧電流。一般偏壓的調變均已數位化，將某一偏壓在掃描範圍內各點的電流組合起來，即構成一幅二維電流密度分布圖。以此法取像，因回饋系統必須不斷地開關，比較費時 (約需幾分鐘)，且做一次，其實等於儲存了上百個影像的資訊，記憶容量需求很大，不過以現代的電腦容量，這已不是問題。

二、結構示意圖

掃描穿隧顯微鏡的主要組成包括：掃描頭、探針、樣品台、步進器、避震裝置、電子及控制系

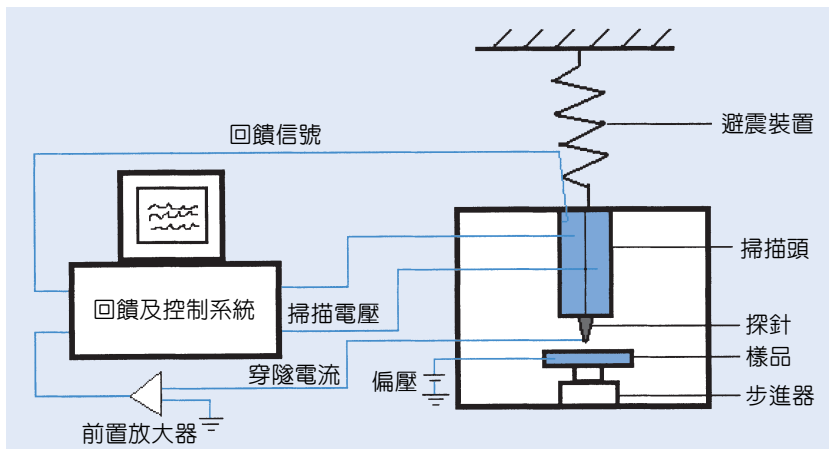


圖 1. 掃描穿隧顯微鏡主要組成。

統，分別簡述如下。

1. 掃描頭 (scanner)

壓電材料 (piezoelectric materials) 不僅結構堅硬，用普通電壓源即可提供小於 1 \AA 的精確度，所以幾乎所有的掃描頭均以此材料製成。經過這些年的發展，目前最普遍的模式是以壓電陶瓷管鍍上金屬，然後在外壁均分為四極做平行於樣品表面 (x 和 y 方向) 的掃描；內壁相對於外壁做探針及樣品間距 (z 方向) 的調變。掃描的範圍是由陶瓷管的長度、管壁的厚度、管徑及所加電壓的大小來決定，一般都可達幾個 μm 。掃描頭前端可接探針或樣品。

2. 探針 (tip)

一般都是用 0.5 mm 的鎢 (W) 絲，以電化學的方法，在 KOH 或 NaOH 溶液中腐蝕；或將 0.25 mm 的鉑銱合金 (PtIr) 絲拉剪而成，針尖的直徑大都在幾百個埃的範圍。具高解析度的探針常可在掃描過程中以瞬時強電場來促使針尖結構的改變而獲得。

3. 樣品台 (sample stage)

由於樣品經常更換，並且尺寸不一致。因此，樣品台的設計必須考慮到牢靠、方便及對樣品的包容性。

4. 步進器 (stepper)

由於穿隧電流是在原子尺寸的間距下才能發

生，欲將探針和樣品帶到這樣的距離必須具有步距約在 1000 \AA 的功能，並且步進頻率必須能夠調節到 1 kHz ，以免太耗時。依驅動的方式可分為齒輪式、尺蠖 (inchworm) 式及滑動 (slip-stick) 式等。

5. 避震裝置 (vibration isolation)

為了維持穩定的電子穿隧間距，不同頻率的震動都必須盡量屏蔽。常用的避震材料為金屬彈簧或橡皮墊 (viton)，並配合阻滯裝置來使用。週全的設計可使系統的共振頻率降至 $2-3 \text{ Hz}$ ，已可屏蔽大部分的環境震動干擾。對於低頻的震動，唯有靠探針及樣品堅固的結構組合來克服。

6. 電子及控制系統 (electronics and controller)

該部分含前置放大器、回饋電路及電腦介面。由於做為回饋信號之穿隧電流很小 (約 1 nA)，必須先將其放大。一個簡單的低雜訊操作型放大器 (operational amplifier) 加上精準電阻便能擔負這部分的工作。回饋電路的主要目的是以差分放大器 (differential amplifier) 來驅動接在掃描頭上之 z 軸電壓源，用來調節在掃描過程中的電子穿隧間距。電腦介面主要是控制操作的流程，以多個數位/類比 (D/A) 及類比/數位 (A/D) 轉換器達成此目的。目前，因為電腦功能的增強，控制系統有愈趨數位化的傾向，使儀器的操作更簡單，後續的影像儲存及處理更方便。

三、儀器規格與特徵

自 1982 年掃描穿隧顯微鏡發明後，已衍生出

許多類似的掃描探針顯微鏡 (scanning probe microscope, SPM)，如原子力顯微鏡 (atomic force microscope, AFM) 及近場光學顯微鏡 (near-field scanning optical microscope, NSOM) 等。商用儀器規格目前已區分為研究用或工業用，為涵蓋多方面的功能，規格常因買者要求而略有不同。主體的規格倒是大同小異，掃描頭及回饋系統乃該類儀器的特徵。目前，一部研究型的掃描穿隧顯微鏡的機械部分尺寸約為 15 cm × 15 cm × 20 cm，電子控制部分則以個人電腦為主。掃描穿隧顯微鏡的優點是能提供原子尺寸的解析度，能適應不同的環境，如超高真空、大氣或液體中。由於結構簡單，造價不貴，提供研究者許多設計及改裝的空間。缺點是不適用於絕緣樣品；取像方式因屬掃描式，速度較慢，且對環境溫度變化十分敏感，造成動態研究上的困難。

四、應用與用途

掃描穿隧顯微鏡可應用於研究的領域十分廣

泛，包括金屬及半導體的表面物理現象如表面結構及相變，表面電子態分布等；動態現象如原子或分子擴散、吸附、磊晶成長等；表面化學現象如腐蝕、沉積、光激發等；甚至生物樣品如 DNA 或細胞之結構分析等。由於其極高的解析能力，也可以應用於奈米尺寸結構 (nanostructure) 的研究。除此之外，其探針可作為操縱表面原子或分子的工具，提供寬廣的研究及想像空間。

參考文獻

1. G. Binnig, H. Rohrer, C. Gerber, and E. Weibel, *Appl. Phys. Lett.*, **40**, 178 (1982).
2. J. Tersoff and D. R. Hamann, *Phys. Rev.*, **B31**, 805 (1985).
3. S. I. Park and C. F. Quate, *Rev. Sci. Instrum.*, **58**, 2004 (1987).
4. C. J. Chen, *Introduction to Scanning Tunneling Microscopy*, Oxford: University Press (1993).

作者：張嘉升先生為美國亞利桑那州立大學物理博士，現任中央研究院物理研究所副研究員。

原子力顯微鏡

Atomic Force Microscope (AFM)

關鍵字：原子力顯微鏡、掃描探針顯微術、接觸式、輕敲式

Keywords：atomic force microscope, scanning probe microscopy, contact mode, tapping mode

一、基本原理

原子力顯微鏡 (atomic force microscope, AFM) 是由 Binnig、Quate 及 Gerber 於 1986 年所發明的，具有原子級解像能力，可應用於多種材料表面檢測，並能在真空、氣體或液體環境中操作，屬於掃描探針顯微術 (scanning probe microscopy, SPM) 的一支，此類顯微術都是利用特製的微小探針，來偵測探針與樣品表面之間的某種交互作用，如穿隧電流、原子力、磁力、近場電磁波等等，然後使用一個具有三軸位移的壓電陶瓷掃描器，使探針在樣品表面做左右前後掃描 (或樣品做掃描)，並利用此掃描器的垂直微調能力及迴饋電路，讓探針與樣品間的交互作用在掃描過程中維持固定，此時兩者距離在數至數百 Å (10^{-10} m) 之間，而只要記錄掃描面上每點的垂直微調距離，我們便能得到樣品表面的等交互作用圖像，這些資料便可用來推導出樣品表面特性。

AFM 的探針是由針尖附在懸臂樑 (cantilever) 前端所組成，當探針尖端與樣品表面接觸時，由於懸臂樑的彈性係數與原子間的作用力常數相當，因此針尖原子與樣品表面原子的作用力便會使探針在垂直方向移動，簡單的說就是樣品表面的高低起伏使探針作上下偏移，而藉著調整探針與樣品距離，便可在掃描過程中維持固定的原子力，此垂直微調距離，或簡稱為高度，便可當成二維函數儲存起來，也就是掃描區域的等原子力圖像，這通常對應於樣品的表面地形 (surface topography)，一般稱為高度影像 (height image)。AFM 的操作模式可大略分為以下三種。

1. 接觸式 (contact mode)

在接觸式操作下，探針與樣品間的作用力是原子間的排斥力 (repulsive force)，這是最早被發展出

來的，由於排斥力對距離非常敏感，所以接觸式 AFM 較容易得到原子解析度，而其他兩種則頗為困難，尤其在空氣中，樣品表面都存有一層水薄膜，由於毛細現象 (capillary effect) 的作用，探針與樣品間存有很強的黏滯力，因此增加了高解析度影像取得的困難度。在一般的接觸式量測中，探針與樣品間的作用力很小，約為 10^{-6} 至 10^{-10} N (Newton)，但由於接觸面積極小，因此過大的作用力仍會損壞樣品，尤其是對軟性材質；不過較大的的作用力通常會得到較佳的解析度，所以選擇適當的作用力便十分重要，而要得到作用力的大小，必須取得力對距離曲線 (force-distance curve)，詳情可參閱文獻 4。

2. 非接觸式 (non-contact mode)

為了解決接觸式 AFM 可能損壞樣品的缺點，便有非接觸式 AFM 發展出來，這是利用原子間的長距離吸引力—凡德瓦爾力 (Van der Waals force) 來運作，由於探針與樣品沒有接觸，因此樣品沒有被損傷的顧慮，不過凡德瓦爾力對距離的變化非常小，因此必須使用調變技術來增強訊號對雜訊比，其基本構想是讓探針與一陶瓷振盪片接觸，再加入弦波電壓至振盪片，使探針在其共振頻率作小振盪，然後偵測其振幅或相位，當探針與樣品靠近時，由於凡德瓦爾力的作用，振幅便會變小，而相位也會改變，因此只要將振幅或相位送至迴饋電路，便能得到等作用力圖像，這也就是樣品的高度影像。由於在空氣中樣品表面水薄膜的影響，非接觸式 AFM 一般只有約 50 nm (10^{-9} m) 的解析度，不過原子解析度卻可在真空中得到。

3. 輕敲式 (tapping mode or intermittent contact mode)

第三種輕敲式 AFM 則是將非接觸式加以改

良，其原理就是將探針與樣品距離加近，然後增大振幅，使探針在振盪至波谷時接觸樣品，由於樣品的表面高低起伏，使得振幅改變，再利用類似非接觸式的迴饋控制方式，便能取得高度影像。與非接觸式比較，由於輕敲式 AFM 直接接觸樣品表面，因此解析度提高為 5 至 10 nm，而與接觸式比較，雖然解析度較差，但破壞樣品的機率卻大為降低，同時也較不受摩擦力的干擾。不過由於高頻率敲擊的影響，對很硬的樣品而言，探針針尖可能受損，而對很軟的樣品，尤其是生物活體，則樣品仍可能遭到破壞。

以上接觸式也可稱為 DC 模式，而非接觸式及輕敲式則屬於 AC 模式。除了以作用力來區分 AFM，在實際操作上，又可依讀取的數據種類來區分，最常見的稱為等力模式 (constant force mode)，這是在前面已經敘述過了，所得到的結果是高度影像，在此模式下，取得影像所需時間一般為二、三分鐘。第二種稱為等高模式 (constant height mode)，在此模式中，迴饋電路在掃描過程中不作用，而探針偏移量或其振幅被記錄下來，當然這也是對應於表面地形圖像，由於不需作迴饋，所以掃描速度可提高數倍至數十倍，不過缺點是作用力大小在掃描過程中隨時改變，因此樣品很容易受到損壞。第三種稱為誤差訊號模式 (error signal mode)，所讀取數據也是偏移量或振幅，不過迴饋電路在掃描中仍然發生作用，因此所得影像其實是高度影像的一次微分，這對於表面上的小起伏，具有最佳分辨力。

二、結構示意圖

AFM 的主要結構可分為探針、偏移量偵測器、掃描器、迴饋電路及電腦控制系統，對接觸式而言，最常見的機構如圖 1 所示，其中光由二極體

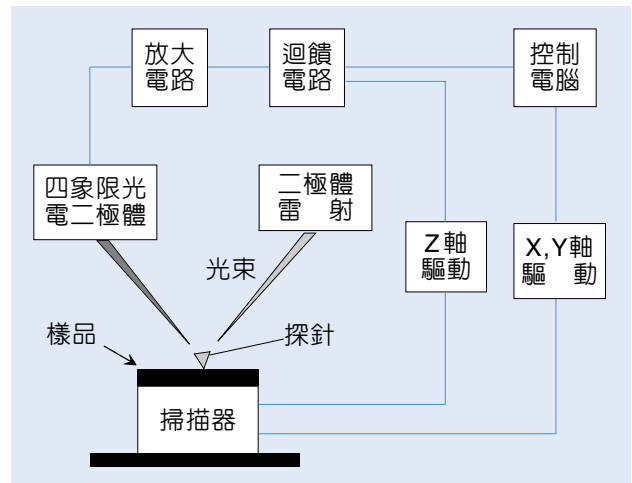


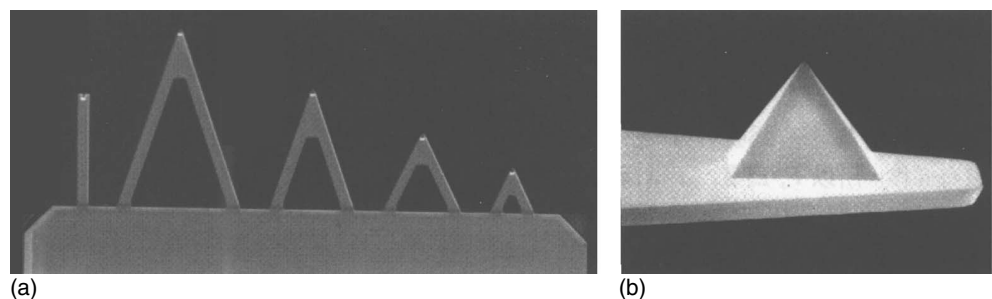
圖 1. 接觸式 AFM 結構示意圖。

雷射出來後，聚焦在鍍有金屬薄膜的探針尖端背面，然後光束被反射至四象限光電二極體，在經過放大電路轉成電壓訊號後，垂直部分的兩個電壓訊號相減得到差分訊號，當電腦控制 x、y 軸驅動器使樣品掃描時，探針會上下偏移，差分訊號也跟著改變，因此迴饋電路便控制 z 軸驅動器調整探針與樣品距離，此距離微調或其他訊號送入電腦中，記錄成為 x、y 的函數，便是 AFM 影像。由於使用四象限光電二極體，因此也可得到水平差分訊號，這相對於探針左右偏移量，與表面摩擦力有關，所以接觸式 AFM 可同時得到摩擦力影像。對非接觸式或輕敲式，則必須再加上振盪裝置及調變電路。

三、儀器規格與特徵

AFM 探針是利用微電子技術直接在矽晶片上所製成，有不同規格以供選擇，在圖 2 的照片中，我們可看到接觸式常用的氮化矽 (Si_3N_4) 探針及針尖放大圖，其長度為 85 至 320 μm (10^{-6} m)，彈性係數在 0.01 至 0.5 N/m 間，尖端曲率半徑約為 50 nm；非接觸式或輕敲式探針大多由矽製成，針尖

圖 2. 接觸式 AFM 常用的 (a) 氮化矽探針及 (b) 針尖放大圖。(Park Scientific Instruments 提供)。



曲率半徑約為 10 nm，共振頻率都在數百 kHz。掃描器由於壓電材料的非線性特性，因此大範圍掃描器製作困難，價格昂貴，使用者可依用途選擇適當掃描器，一般依掃描範圍約略分三種：1 μm 、10 μm 及 100 μm ，精確度約在 2 %；另外也分樣品掃描或探針掃描，前者適用於小樣品，後者適用於大樣品，如晶片檢測。在電腦軟體及控制系統方面，一般提供 128 × 128、256 × 256 及 512 × 512 三種解析度，可顯示高度、偏移量、振幅、頻率及相位等多種訊號影像，並有基本影像處理功能，另外有額外類比至數位轉換器 (ADC)，可同時顯像利用其他儀器所得電壓訊號，而除了基本掃描模式外，不同廠牌有提供特殊掃描模式，以量測表面力學特性。

四、應用與用途

由於 AFM 具有原子級的解析度，是各種薄膜粗糙度檢測，及微觀表面結構研究的重要工具，並

且也很適合與掃描電子顯微鏡相搭配成為從 mm 至 Å 尺度的表面分析儀器；而在液體中操作的能力，更可用來觀測材料表面在化學反應過程中的變化，以及生物活體的動態行為；另外就是奈米結構製作，目前已有多種可行方法，應用於超高密度記憶裝置及次微米電子元件製作。

參考文獻

1. G. Binnig, C. F. Quate, and C. Gerber, *Phys. Rev. Lett.*, **56**, 930 (1986).
2. D. Rugar and P. K. Hansma, *Physics Today*, **43**, 23 (October 1990).
3. D. Sarid, *Scanning Force Microscopy*, New York: Oxford University Press (1991).
4. 林鶴南, 李龍正, 劉克迅, 科儀新知, **17**(3), 29 (1995).

作者：林鶴南先生為美國布朗大學物理博士，現任國科會精密儀器發展中心工程師。

場離子顯微鏡

Field Ion Microscope (FIM)

關鍵字：場離子顯微鏡、原子探針場離子顯微鏡、原子鑑別率、單一原子靈敏度

Keywords：field ion microscope, atom-probe field ion microscope, atomic resolution, single-atom sensitivity

一、基本原理

在金屬或半導體表面加上相當之負電場，表面會有場電子發射 (field electron emission)，若為正電場時，則會有場離子發射 (field ion emission)。此種場電子或場離子發射主要原理是量子力學中隧道效應 (tunneling effect)，電子穿透表面位障 (surface barrier potential) 而逃離 (對場電子發射而言) 或到達 (場離子發射而言) 固態表面。當發射出來的電子或離子撞擊螢幕，會映出表面結構圖像，此種裝置即場電子顯微鏡 (field electron microscope, FEM) 或場離子顯微鏡 (FIM)。此兩種型式之顯微鏡均先後由 E. W. Müller 所發明；FIM 具有原子鑑別能力，性能遠優於 FEM，故實用上以 FIM 為主。FIM 操作原理牽涉到下列機制：

1. 場游離及場蒸發

金屬表面加一足夠電場時，一般為 $1-5 \text{ V/\AA}$ ，則金屬表面周圍的氣體原子或分子被游離，此即場游離，發生游離區域主要集中在距表面 $Z_c \cong [I - \phi] \div eF$ 之臨界距離處，其中 I 為氣體原子或分子游離能， ϕ 為金屬工作函數， F 為外加電場， e 為電荷數，亦即大約距表面若干 \AA 處。上述外加電場可降低金屬表面原子蒸發之束縛能，於是即使表面在超低溫度 (如低至 10 K) 下，適當的外加電場力仍會使表面原子鬆脫，並經由場游離，而形成帶正電荷之離子而逃逸表面。若脫離的原子為金屬表面本身之原子則稱場蒸發 (field evaporation)，若為外來吸附之原子則為場離附。

2. 場離子成像

欲產生場游離或場蒸發所需之正電場相當高，因此必須將固態金屬材料製成針尖狀，尖點半徑約 $0.01-0.1 \mu\text{m}$ ，此時僅需加數百至數千伏之電壓即

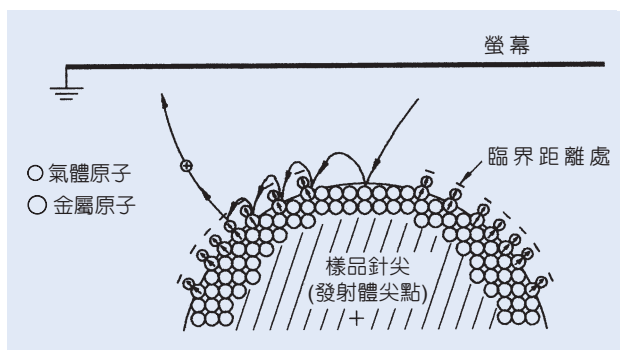


圖 1. 發射體表面凸出原子因高電場被極化，促使靠近之氣體原子亦被極化，並在表面來回跳躍損失能量，終於在臨界距離處被離化而推向螢幕。

可 ($F \sim \frac{V}{r}$)， V 為施加電壓， r 為尖點半徑。

FIM 成像運作，首先將樣品以電解拋光或化學浸蝕法製成針尖狀，此即成發射體。此發射體暴露於 $10^{-5}-10^{-6} \text{ torr}$ 的成像氣體 (一般採用惰性氣體)，氣體原子在高電場發射體表面來回跳躍 (hopping)，即有一定的概率被游離，如圖 1 所示。一旦游離後，離子受到正電場排斥力，沿著加速方向撞向螢幕，每秒中大約有 10^3-10^4 個離子從表面原子正上方發射出來，於是對應表面原子的場離子成像即顯現。成像空間鑑別力 $\approx \sqrt{6 \times 10^6 T r / F}$ ， T 為發射體表面溫度。亦即溫度愈低、半徑愈小、電場愈高，則鑑別率愈佳。

3. 原子探針飛行時式質譜術

FIM 成像僅顯現材料表面真實之原子結構圖像，但無法辨識原子核種，必須藉助質譜術，其中飛行時式質譜術可同時偵測所有核種，而與 FIM 搭配成原子探針場電子顯微鏡 (atom-probe field ion microscope, APFIM)，依照飛行時間起始觸發的方式分為兩種型式。

(1) 高壓脈衝式

FIM 發射體上加一適當正 DC 電位 V_0 ，則螢幕顯出該發射體表面穩定場離子成像，若再外加一高壓脈衝 V_p 重疊於 V_0 上時，則表面部分原子被場蒸發形成帶 ne 電荷的正離子，在靠近表面非常短的距離內受到加速即獲得完全能量，即

$$neV_e = ne(V_0 + V_p)$$

n 為電荷數，加速完成後則以等速 v 飛行， m 為離子質量。

$$v = (2neV_e/m)^{1/2}$$

若飛行距離為 L ，截取高壓脈衝時間為起始時間，偵檢器測得的時間為終點時間，於是飛行時間 t 和質量電荷比 m/n 滿足下列關係式

$$m/n = 2eV_e t^2/L^2 = CV_e t^2$$

C 為常數。FIM 一般正常操作時成像正電位介於 5 至 20 kV 間，高壓脈衝電位於 1 至 6 kV，而 APFIM 飛行距離大約為 65 cm 至 250 cm，於是對應之飛行時間為 1 至 20 μsec 。

(2) 雷射脈衝式

聚焦良好的雷射脈束，照射表面帶有相當正電位的發射體時，可使表面溫度瞬間升高至幾百度 K，促使表面原子先熱蒸發或熱離附，此脫離表面的原子經過場游離區時即有某種概率被場游離，而後以離子形式發射出來。同樣場離子在距離表面極短距離內即獲得完全能量，之後則以等速飛行。飛行時間 t 與 m/n 關係為

$$m/n = CV_e t^2 \quad (C \text{ 為常數})$$

飛行時式質譜儀質量鑑別率主要與飛行距離 (L)、飛行路程差 (ΔL)、離子能量 eV 、離子能量寬度 ($e\Delta V$) 及飛行時間 (t) 相關。高壓脈衝式產生較寬之離子能量寬度，一般再以能量聚焦裝置來消除 $e\Delta V$ 效應。而雷射脈衝 $e\Delta V$ 可忽略，且又可降低蒸發電位至 50%，相對增加飛行時間，而提升鑑別率。

二、結構示意圖

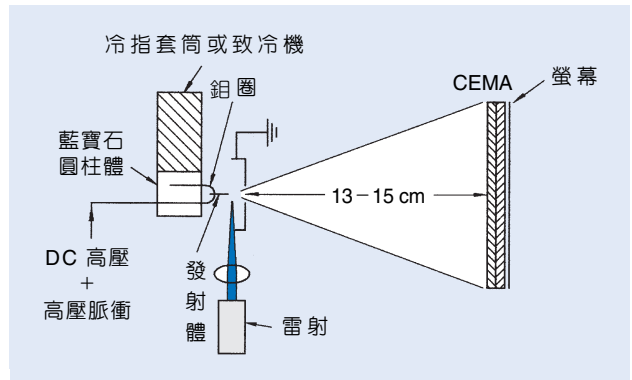


圖 2. FIM 基本構造示意圖：加 DC 高壓可觀測 FIM 成像，加高壓脈衝再配合時間一閉門偵測裝置，則構成短距離成像式 APFIM，可觀測特定核種分佈成像。

FIM 主要在超高真空環境中，利用成像氣體來呈現針尖樣品表面原子結構，APFIM 則再加上飛行時式質譜系統。

1. 超高真空及供氣系統

觀察表面原子結構，需原子級乾淨之表面， $10^{-10} - 10^{-11}$ torr 之超高真空環境是必備的。因此 FIM 腔即為一超高真空系統另搭配電子級供氣系統。觀測 FIM 成像式，必須封閉超高真空系統，僅以內抽吸式之鈦昇華幫浦 (titanium sublimation pump) 長時間維持最佳超高真空狀態，高純度惰性氣體充至 $10^{-5} - 10^{-6}$ torr，即達成前置條件。

2. 場離子發射體及成像系統 (見圖 2)

任何試樣被製成針尖狀即成為發射體，發射體被點焊在一個可以加熱的鉬 (Mo) 圈上。鉬圈嵌入柱狀藍寶石 (sapphire) 內 (藍寶石為極佳電絕緣體，但又為極佳之熱導體)，柱狀藍寶石底部與雙層冷指套筒 (cold finger) 緊密接合。當套筒內注滿液態氦時，則藉著藍寶石熱傳導可使發射體溫度降至 80 K 左右，如此可減少場離子從表面或其附近發射時的橫向 (與表面平行) 速度，而提升成像鑑別率。冷指套筒可以封閉循環式液態氦致冷機 (closed cycle liquid helium refrigerator) 取代，溫度範圍從 10 K 至室溫連續可調。

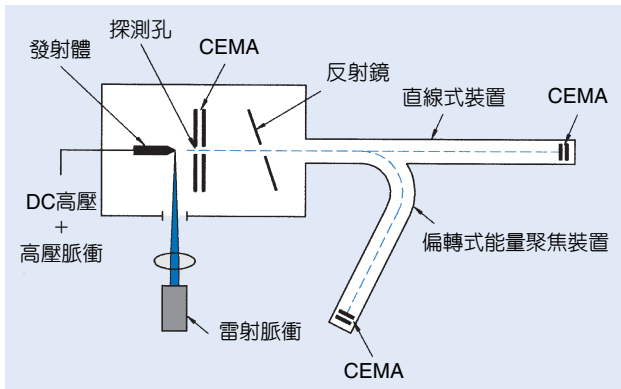


圖 3. FIM 加上長距離飛行時式質譜偵測裝置所構成之 APFIM 分為兩種，一為高壓脈衝搭配彎曲之能量聚焦裝置組成高壓脈衝 APFIM；另一為雷射脈衝搭配直線飛行裝置組成雷射脈衝 APFIM。

當發射體表面有足夠正電場時，充入 FIM 腔內之成像氣體原子被場游離後投射至螢幕。螢幕前之電子倍增微通道陣列板 (channel electron multiplier array, CEMA)，電子放大倍率 $10^5 - 10^6$ ，因此螢幕成像清晰。成像中所顯示表面結構放大率為 $M \approx R/\beta r$ ，其中 R 為發射體至 CEMA 距離， β 為壓縮因子 (compression factor) ≈ 1.5 。若發射體尖端半徑 $r = 1000 \text{ \AA}$ ，且 $R = 15 \text{ cm}$ ，則放大倍率達百萬倍。

3. 原子探針質譜系統 (見圖 3)

FIM 發射體成像電場尚未達到蒸發電場時，補

表 1. APFIM 主要性能。

規格 \ 型態	成像式 APFIM	高壓脈衝式 APFIM	雷射脈衝式 APFIM
FIM 成像鑑別力	原子級	原子級	原子級
核種偵測範圍	成像區域	探測孔區域	探測孔區域
空間核種偵測靈敏度	100–1000Å 內	單一原子	單一原子
適用材質	導體 半導體	導體 —	導體 半導體
飛行距離	13–15 cm	~200 cm	200–800 cm
質量鑑別率 $m/\Delta m$	≥ 200	≥ 1000 (需搭配能量聚焦裝置)	≥ 2000
元素鑑別力	僅能鑑別核種	可分辨同位素	可分辨同位素
縱層成分剖析 (單原子及單原子層)	—	可	可
空間成分分佈	可	—	—
薄膜界面層探測	—	可	可

充加上高壓脈衝或雷射脈衝，引發場蒸發作為蒸發離子飛行之啟始時間，利用 CEMA 作為偵測器，測得離子訊號之時間作為終點時間，於是由時間一訊號處理裝置記錄飛行時譜。核種因質量不同，故飛行時間 (t) 亦不同，利用時間一閘門技術，使特定飛行時間之離子 (對應特定核種) 抵達 CEMA，再瞬間同步活化 CEMA，即可呈現該核種分佈之圖像，此即成像式 APFIM，幾何裝置與 FIM 裝置相同，僅加裝時間一閘門偵測裝置；因飛行距離短，時譜所對應之質譜鑑別率差。欲提升鑑別率則加長飛行距離至 2 米不等，構成高鑑別率 APFIM，具有單一原子偵測及辨識的能力。此裝置在 FIM 螢幕中間開一小探測孔 (probe hole)，針尖樣品支架可調整。當場離子顯微鏡成像後，調整針尖樣品方位，使螢幕中間的小探測孔對準欲辨識原子成像位置，當外加高壓脈衝或雷射脈衝於針尖上，促使該原子以離子形式蒸發，穿過探測孔而進入質譜儀內被偵測到，因而確認核種。

三、儀器規格與特徵

FIM 主要功能是直接觀測原子級固態材料表面結構，尤其對於高熔點金屬材料如單晶鎢、鉬，在最佳操作條件下鑑別率均可達 $2-3 \text{ \AA}$ ，如圖 4 所示單晶鎢 (110) 面之成像，但 FIM 與飛行時式質譜

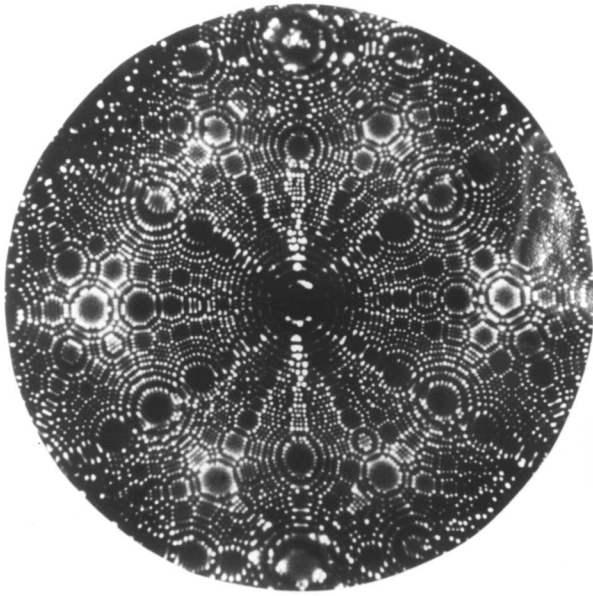


圖 4. 單晶鎢 (110) 面之場離子成像。

儀成 APFIM 則有三種規格，其性能如表 1 所示。雷射脈衝式 APFIM 典型之飛行質譜如圖 5 所示。

四、應用及用途

FIM 發展至今，在各種科學領域內貢獻很多，其中以表面科學最引人注目。因 FIM 在超低溫下操作，具有原子解像力，同時即使在此超低溫下，仍可以場蒸發法造成一個乾淨、完全平滑的平面，因此 FIM 成為觀察研究金屬表面結構及其晶格缺陷的理想儀器。一般表面分析若偵測 X 射線，則包含了上億個原子 (位置) 所發出訊號之平均值。在 LEED (low energy electron diffraction) 所觀察之原子結構圖像為倒格子圖案 (reciprocal lattice pattern)，FIM 成像直接提供真實的原子對原子位置的結構圖案。在靜態方面除了觀察固態表面原始原子結構外，其他如材料受外來參數影響如淬火、電場力等所產生的變形、缺陷及再結晶 (recrystallization)

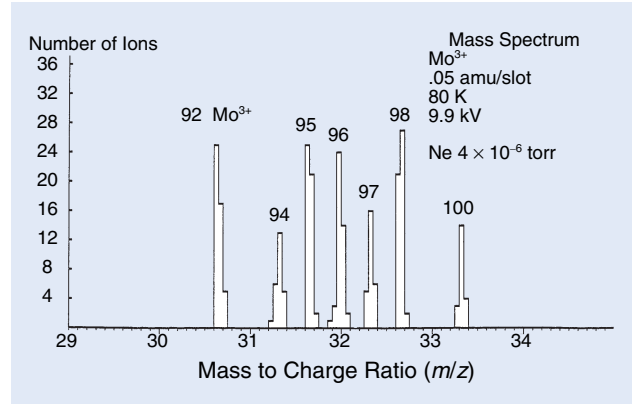


圖 5. 雷射脈衝式 APFIM 對鎢 (Mo) 發射體同位素飛行質譜。

等亦可直接觀察。動態方面可觀察單原子及小原子團 (cluster) 的運動，如氣態原子與固態表面原子之作用。

又由於原子探針場離子顯微術具有偵測單一原子的功能，故對於在場離子成像中所觀察到的特殊原子或原子團，如合金材料中之析出物 (precipitates)、異狀物 (inclusions) 以及外來附著原子的辨認，均可使用此技術作精確的分析。若配合場蒸發的技術，剝離表層原子，更可剖析內層原子的組成成分。

參考文獻

1. E. W. Müller and T. T. Tsong, *Field Ion Microscopy: Principles and Applications*, New York : Elsevier (1969).
2. T. T. Tsong, *Atom-Probe Field Ion Microscopy*, Cambridge: Cambridge University (1990).
3. M. K. Miller and G. D. W. Smith, *Atom Probe Microanalysis: Principles and Applications to Materials Problems*, Pittsburgh: Materials Research Society (1989).

作者：艾啟峰先生為美國賓州州立大學物理博士，現任原子能委員會核能研究所研究員。

氦原子表面散射

Helium Atom Scattering from Surface

關鍵字：氦原子繞射、散射、表面原子結構

Keywords：helium atom diffraction, scattering, surface atomic structure

一、基本原理

在過去二十餘年來，表面科學研究技術隨著超高真空技術的長足發展，也有著日新月異的演進。原子束表面散射實驗即是在此一背景下的產物，(在本文中原子束與分子束混用)。分子束的特性是在束流裡的分子速度分布範圍狹窄而且分子的行進方式一致。分子束技術在進入 80 年代之後大為普及，許多研究分子光譜及化學動力學的實驗室更是必備的實驗技術之一。

運用在表面科學研究上，分子束散射的技術有些非常獨特的地方，譬如：(1) 分子的特性波波長與晶格的週期相近都是在幾埃左右，因此適合做繞射用的工具以求了解晶格幾何結構。繞射現象發生時，分子的能量不變但分子的動量 (即行進方向) 改變，從動量差即可求出晶格沿著表面的週期。(2) 分子的動能與晶格原子的振動能量相近都是在幾十到幾百毫電子伏特；合適的動量與動能使得分子束與表面的能量交換極為顯著，運用能量與動量守恆定律，佐以分析散射後的分子束動能與動量，表層原子的振動 (即表面聲子 (surface phonon)) 能量與動量的關係即可求出。此二者的關係，一般稱為色散關係 (dispersion relation)。在實驗技術上，為了追求高品質的分子束 (狹窄的速度分布、高強度等) 毫無選擇的，非使用氦原子不可。(3) 從事繞射實驗所用的氦原子束動能低，而無法穿透表面。實際上氦原子在離表面幾埃距離處即已被散射回真空。因此觀察所得結果全部是來自表面原子的貢獻，此點與使用電子或離子來探測表面時無法完全摒棄表層下數層原子的貢獻有極大的不同。

二、結構示意圖

以原子束從事表面繞射或散射實驗的實驗裝置如圖 1 所示，圖上所示為主要的設備，其他如各節

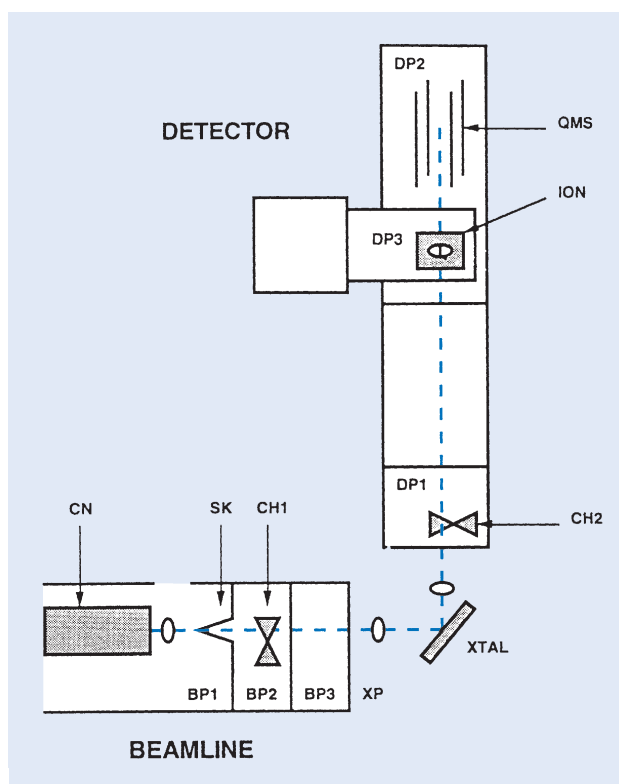


圖 1. 氦原子束散射裝置圖，顯示分子束源、超高真空樣品腔與可旋轉的檢測器。其中 CN：低溫冷卻噴嘴，SK：削減器，BP1-3：分子束源抽氣系統，CH1：前斷續器 (pre-collision chopper)，XP：樣品靶抽氣區，CH2：後斷續器 (post-collision chopper)，DP1-3：檢測器抽氣區，ION：電子撞擊游離區，QMS：四極質譜儀。

真空腔與超高真空腔內所裝置的各式其他表面分析裝置如：Auger 電子、低能量電子繞射儀 (low energy electron diffraction) 等則沒有顯示於其中。至於偵測氦原子的儀器部分，最常見的還是四極質譜儀。但它的安裝方式，因繞射或是散射實驗而有所不同。繞射實驗一般不必分析氦原子的動能，質譜儀可以安裝在離樣品靶近距離如十公分處，而仍維

持足夠的角解析度 (angular resolution) 所以整個質譜儀及其附屬的差比抽壓 (differential pumping) 可以容納在樣品靶真空腔裡，此真空腔自然規模也會相當可觀，譬如一公尺立方的不鏽鋼真空腔並非少見。如果從事散射實驗，需要分析氦原子的動能，一般是以氦原子的飛行時間術 (time of flight) 為之，動能解析度顯然是與飛行距離息息相關，將質譜儀裝置在距離樣品靶一公尺以上的距離，也是常見。在這種情形下，質譜儀及其相關的差比抽壓系統很自然的裝在主真空腔外面。示意圖所示的就是一部筆者在研究生時所建造的從事散射實驗的儀器。左側是分子束源，中間部分是主真空腔，右側則是旋轉平台上的質譜儀，其主要設計參數則列於表 1。

三、儀器規格與特徵

氦原子束的產生是將高達 100 大氣壓的氦氣經一小孔噴嘴 (nozzle)，以絕熱膨脹的方式 (adiabatic expansion)，傳送到真空腔裡，噴嘴大小約 0.01 mm，管壁則越薄越佳以減少與管壁上的碰撞，導致氦原子束速度分布變寬。氦原子束由於經過絕熱膨脹，它沿著原子束方向運動的動能可以增加

表 1. 氦原子束表面散射裝置重要設計參數。

氦原子源硬體	
噴嘴溫度 (K)	70–150 / 100–150
噴嘴直徑 (微米)	25/12.5
噴嘴壓力 (大氣壓)	27/54
斷續器—金屬靶距離 (公分)	54.9
斷續器狹縫開口 (公分)	0.05
氦原子束特性	
脈衝寬度 (微秒)	10 (FWHM)
脈衝分度 ($\Delta v / v$)	1–1.5 %
角發散度	0.31°
在靶上的分子束直徑 (公分)	0.36
靶與電子撞擊游離區距離 (公分)	55
氦氣在撞擊游離區的分壓 (托耳)	10^{-14}
游離區前置孔徑大小 (公分)	0.63
檢測器接收角度 (angular acceptance)	
從靶起算	0.67
從原子束束源起算	0.63

$2.5 kT$ ， k 是 Boltzmann 常數 1.38×10^{-16} erg/K， T 是以絕對溫度為單位的噴嘴溫度。為了改變氦原子束的動能，噴嘴溫度需要有所變化，常常是由 30 K 到 500 K，相對的動能則由 6.4 meV 變化到 10^8 meV。

噴嘴區的抽氣，一般是以大型油擴散幫浦 (oil diffusion pump) 為之。就某種意義來說噴嘴相當於一個大的漏氣孔，為了將此區域的壓力維持在 10^{-3} torr 左右，使用抽氣速率超過一萬公升／每秒的大型幫浦並不罕見。氦氣經過噴嘴以後以超音速膨脹 (supersonic expansion) 方式向外做功，在距離噴嘴直徑約數百倍的距離外，氦氣的速度降至次音速 (subsonic)，從超音速轉換成次音速的界面上，有震波 (shock wave) 產生，在震波上氣體的速度、密度、壓力等產生激烈的變化。如何在超音速的膨脹區，將氦原子引導出來形成一射束便是一大問題。現今都是以削減器 (skimmer) 為之。削減器的形狀類似一漏斗，自然它的張角、厚度與孔洞大小都有講究。削減器的洞口迎向噴嘴，喇叭開口面向下游處，洞口所在的位置在超音速膨脹區內，以便將氦原子束引導出來。同時此小洞 (約 0.5 釐米直徑) 亦被用來維持鄰近兩邊真空腔的壓力差。經過削減器後的真空腔壓力約維持在 10^{-6} torr 左右，氦氣的平均自由徑 (mean free path) 已經達到 150 公尺。此值遠大於真空腔的尺寸，因此原子束中原子的速度不會再有所改變。

氦原子束經過噴嘴與削減器二裝置後，所有的流體力學性質如：速率比 (speed ratio)、單位立體角的粒子強度等都已決定。至於裝置在氦原子束更下游的斷續器 (chopper) 及準直器 (collimator) 的功用分別是將連續式的原子束改變成為脈衝式 (pulsed) 及將隨飛行距離增加的而變大的原子束張角控制在一定範圍內，斷續器的基本結構是一直徑約十五公分的圓盤，以交流同步馬達穿過圓盤的圓心來帶動它以高速轉動。圓盤的邊緣有些區域被挖空以使原子束穿過，未挖空的部分則將原子束擋下來，挖空與未挖空的部分形成規則圖案，其相對應的原子束強度也就相應變化。一般常用的圖案有兩種，一種是挖空與不挖空交替進行因此原子束的強度對時間而言類似一方波，此種方波似的原子束常

用在繞射實驗上，以提高訊號對背景的比值。第二種斷續器是將連續式的氦原子束轉換成為短脈衝，脈衝的長度約在微秒之譜，以前述的 15 公分圓盤為例，挖空縫隙約為 0.5 釐米寬，圓盤轉速每分鐘為 200 轉時可以產生 1 微秒的脈衝。此種短脈衝是以飛行時間法 (time of flight) 來決定原子束的動能時所需要的技術。飛行時間法簡單言之即是測量在已知距離下原子束通過二定點所需之時間，起始時間即是原子束通過狹縫的瞬間，終點時間則為原子束到達質譜儀的游離區 (ionizer) 的時間。藉助與電腦連線的電子儀器這些複雜的訊號處理可以大幅簡化。

氦原子從目標靶表面散射後，其動能動量皆可以有所改變。如前所述，一般是以四極質譜結合飛行時間法來檢驗氦原子的動能改變。先求得氦原子在散射前與散射後的動能，再知道入射與散射的角度，即可簡單計算氦原子的動量及沿著表面方向的動量改變。但此類非彈性散射 (inelastic scattering) 訊號比起彈性散射 (即繞射)，低了至少千倍以上，加上氦原子本身所帶來的高背景訊號，使得真空技術與電子線路的要求特別嚴格。在四極質譜儀的電子撞擊游離區內，氦原子的分壓越低越好， 10^{-14} 托耳以下並非苛求。此點可以裝置大的抽氣幫浦及加裝數節的差比抽壓區於質譜儀前端以大幅減少從樣品靶真空腔擴散出來的氦氣。當原子束打進樣品真空腔時，許多原先具方向性的射束在經過與靶表面和真空腔內壁的碰撞後已經變成四處擴散的氦原子，造成很高的背景值。以質譜儀檢測氦原子的另一個問題是氫分子 ($m/z = 2$) 對氦 ($m/z = 4$) 的干擾：氫分子是烘烤完後的不鏽鋼超高真空腔的主要

背景氣體，訊號達到每秒百萬計數 (count) 以上，而欲追求的氦原子訊號可能每秒不到百分之一計數。如果質譜儀硬體不夠完美或調整不佳時，氫分子訊號可以拖拉到氦原子處，造成一大背景訊號疊加到微小訊號的情形，徒然增加取數據的時間及影響數據品質。這些細節不可不慎。

四、應用與用途

氦原子束表面繞射的現象可以用來解析最表層原子的幾何結構，在過去近二十年的研究課題包含金屬單晶、分子固體、離子固體表面等。由於此類實驗裝置投資大而且技術水準要求高，除了在某些特別的研究領域，在解決實際結構上已經不如低能量電子繞射 (low energy electron diffraction, LEED) 那麼受到歡迎。散射實驗的領域在探討表層原子間的集體運動 (collective motion) 及原子間的力場、自然表層原子的結構扮演了重要的角色。唯實際結果尚需要輔以理論計算，方能闡明固體原子的幾何結構。有興趣的讀者，可以參閱列舉的文獻，了解這方面的進展。

參考文獻

1. T. Engel and K. H. Rieder, *Structural Studies of Surfaces, Springer Tracts in Modern Physics*, Volume 91, Berlin: Springer-Verlag (1982).
2. E. Hulpke, *Helium Atom Scattering from Surfaces*, Springer Series in Surface Sciences, Volume 27, Berlin: Springer-Verlag (1992).

作者：楊耀文先生為美國芝加哥大學化學博士，現任同步輻射研究中心副研究員。

低能電子繞射儀

Low Energy Electron Diffractometer (LEED)

關鍵字：電子繞射、原子結構、超高真空

Keywords：electron diffraction, atomic structure, ultra-vacuum

一、基本原理

低能電子繞射儀 (low energy electron diffractometer, LEED) 淵源於 1920 年代末期，用電子的繞射現象證明電子有波動性的觀測，即電子和 X 光一樣會被晶體繞射，條件亦同，即電子波波長要和晶體的結晶格子的數量級大約一樣，再由物質波波長和動量的關係進一步推論得到，電子束產生繞射時其能量遠較 X 光的光子能量為低。由於低能量的電子和物質的交互作用很強，使得低能量電子在物質內的穿透長度很小 ($\sim 20 \text{ \AA}$)，所以電子的繞射圖案一定只有反射方向才能看。

照理說低能電子繞射現象可以立即和 X 光繞射現象一樣被利用來探測物體的原子結構，然而電子的穿透長度大小無法探測晶體內部原子的結構，而且對繞射圖案的解釋也由於電子和物質的交互作用太強而不像 X 光繞射那麼容易，即多重繞射的效應必須一併考慮。加上電子束只能在真空環境下才能產生，再加上低能電子只能穿透最外面 10 層左右的原子層，所以對表面的乾淨程度要求很高，在沒有達到超高真空 ($\sim 1 \times 10^{-9}$ torr) 時晶體表面很快就會因氣體分子的碰撞頻繁而被污染。在這些困難的阻礙下低能電子繞射一直無法有很好的發展，直到 1960 年初期，真空技術有了突破性發展，即超高真空環境可以維持很長的時間，再加上電腦的長足發展多重散射的問題得以處理，使得 LEED 在 1970 年中期有了長足的發展，至今一直成為決定表面原子結構的最佳及最後的利器。表面原子結構得以決定，直接地促進整個表面科學的發展，如同 X 光繞射對固態物理的貢獻一樣。

二、結構示意圖

最早的低能電子繞射實驗只用一電子鎗做為電子束的來源，電子束射到晶體樣品上，被反向繞射

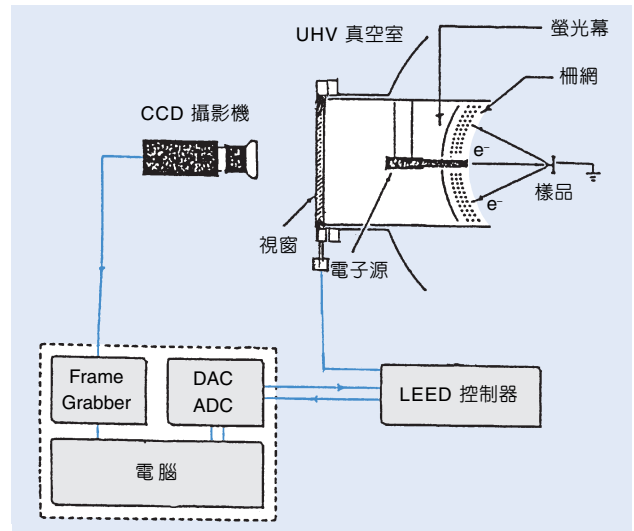


圖 1. LEED 裝置的示意圖。

的電子強度就用一法拉弟杯 (Faraday cup) 來偵測，這種方法必須在超高真空的環境中移動法拉弟杯來尋找繞射電子束，非常不方便且耗時。其後人們發展出顯像型 LEED 裝置 (如圖 1)，其基本構想為直接將繞射後的低能量電子束加速，使其有足夠的能量撞到一螢光板上產生光點，如此，我們用肉眼就能看到繞射圖案。但是加速電壓 (數千伏特) 會改變電子束行經的方向，這對日後的分析有很大妨害。LEED 的設計又被修正為在螢光幕前加一柵網 (grids)，這柵網是由很細的不鏽鋼線製成，呈球面形，正中間有孔可讓電子鎗通過，為求實驗方便起見，其立體角為 104° ，這第一個柵網的電壓保持在接地狀態 (和樣品晶體相同)，這樣在樣品和第一柵網間形成一大致沒有電場的空間，使得被繞射的電子束在這部分空間中保持其運動方向，而球面形的螢光幕如保持在正 5000 伏特的電壓，那麼被繞射的電子通過柵網後就被加速而後在螢光幕上形成光點，這樣仍有問題，即由於電子和物體的作用很強，所以電子束射在物體上會產生很多被非彈性散

射產生的更低能量 (較入射電子能量) 的電子, 如只有以上裝置則這些已有部分能量消耗的電子都被螢幕的電壓加速, 會在螢光幕上形成很強的背景亮光, 甚至掩蓋繞射光點。所以我們必須在第一柵網和螢光幕間再加一柵網 (稱為壓制器 (suppressor)) 以降低背景光強度, 做法為在壓制器加略低 (~5 至 10 伏特) 於電子束能量的負電壓, 使得只有能量高於壓制器所選的能量的電子才能通過壓制器, 其後再被加速至在螢光幕上形成光點, 這樣的裝置可以將背景光降低非常多, 使繞射光點更明顯。而這些球面形的柵網間距都只一、二毫米, 所以從螢幕上光點位置求得繞射角的誤差並不大。以上裝置在檢查表面原子是否為有序排列及其對稱性已經足夠了, 但要用 LEED 決定表面原子的位置則仍不足。

基於電子和物質交互作用很強的因素, 我們無法直接從單一的繞射圖案識得表面原子的位置, 我們必須測量繞射電子束 (繞射點) 的強度 (I) (正比於螢光幕上的光點亮度) 和電子束能量 (V) 的函數關係 (LEED- IV), 然後再和假設模型的多重散射的理論計算的 $I-V$ 的關係比較才能得到最佳化的表面原子結構。而各個繞射點的 $I-V$ 曲線可用電腦連接 CCD 攝影機取得, 和電腦連接使得 LEED- IV 的實驗可以在少於 20 分鐘的時間取得所有數據, 十分方便。

三、LEED 裝置的種類

1. 前視低能電子繞射儀 (front-view LEED)

一般來說, 前面提到的電子源、柵網及螢光幕都可直接固定在一 8 吋的不銹鋼法蘭 (flange) 上, 因此只能從前面 (即樣品及觀察者在螢光幕的同一側) 觀察 LEED 圖形, 這是較早期的設計, 它的缺點有二: 一是繞射圖形會被超高真空中夾持樣品的支架擋到, 而減少資訊的取得, 二是這樣的裝置必須使用超高真空室上的二個八吋 ports, 浪費真空室上可利用的空間。

2. 後視低能電子繞射儀 (rear-view LEED)

這種設計是用一視窗取代 8 吋法蘭, 電子源改為迷你型可以固定在不鏽鋼支架上, 整支電子源是在真空中的, 而所有的電訊的引入裝置都固定在法

蘭的側邊。這設計的好處是可以在後方 (指觀察者和樣品在螢光幕的不同側) 觀察 LEED 圖案, 圖案被擋掉較少, 又節省真空室的空間。在用 CCD 攝影機取數據時, 光學的安排也較簡單, 其他功能則和傳統的前視 LEED 相同。

另外, 視是否要用 LEED 設備來做歐傑電子能譜 (Auger electron spectroscopy), 可以選擇三層柵網 (3-grid) 或四層柵網 (4-grid) 的 LEED 設備, 通常要做歐傑能譜時選用四層柵網 LEED 做為電子分析器 (retarding field electron analyzer) 較適宜, 以減少雜訊。

最近也有人使用角度解析度非常高的 SPA-LEED (spot-profile analysis LEED), 可以精確地量出繞射點的寬度, 以取得表面粗糙度及觀察薄膜生長的初期過程。其設計完全和以上介紹的不同, 最主要的是用二組靜電偏折裝置把整個繞射圖案, 偏折通過一小孔, 小孔後面放一靈敏的通道倍增器 (channeltron), 以偵測很小的電子強度, 因而增加這儀器在測量繞射點寬度上的解析度。然而 SPA-LEED 的設計並不適合做傳統的 LEED- IV 實驗。

四、綜結

LEED 是幾乎所有表面研究系統上都有的設備, 使用上非常簡單, 控制器只提供電子源及各柵網上的電壓。然而有一點要特別提出的是, 由於 LEED 的電子束的能量很低 (50 eV-400 eV), 所以很容易受到地磁的影響而改變電子的行徑方向, 而 LEED 圖案的形狀及繞射點的相對強度很容易受電子束的入射的方向改變而影響, 所以通常 LEED 必須放在 μ -金屬所做的真空室內, 或者在不鏽鋼真空室外加裝二對 Helmholtz 線圈, 在線圈上通電流來抵銷地磁。

一般來說, LEED 可用來檢視一樣品表面的原子是否為規則排列及其對稱性。而如果要用 LEED 來決定表面原子結構則必須用測量到的各繞射點的 $I-V$ 曲線和理論上的模型計算結果比較以得到最佳的表面原子結構。最近我們實驗室利用後視 LEED 儀加上電腦控制的 CCD 攝影機發展出一種新的、直接測量表面原子位置的電子全像術, 我們稱之為菊池電子全像術 (Kikuchi electron

holography) 是 LEED 儀在原子結構的決定上的另一推廣應用。

參考文獻

1. M. A. Van Hove, W. H. Weinberg, and C. M. Chan, *Low-Energy Electron Diffraction*, Berlin: Springer-Verlag (1986).
2. M. A. Van Hove and S. Y. Tong, *Surface Crystallography by LEED*, Berlin: Springer-Verlag (1979).
3. U. Scheithauer, G. Meyer, and M. Henzler, *Surface Science*, **178**, 441 (1986).
4. C. M. Wei, I. H. Hong, and Y. C. Chou, *Surface Review and Letters*, **1**, 335 (1994).

作者：周亞謙先生為美國匹茲堡大學物理博士，現任國立清華大學物理系教授。

高能量電子繞射儀

Reflection High Energy Electron Diffractometer (RHEED)

關鍵字：高能量電子繞射儀

Keywords：reflection high energy electron diffractometer (RHEED)

一、簡介

高能量電子繞射 (reflection high energy electron diffraction, RHEED) 是使用約 10 keV–30 keV 高能量的電子對晶體作繞射，以觀察晶體表面結構的方法之一。電子穿入 (penetrate) 晶體內之深度與電子能量有關，約 100 eV 左右之電子最具表面之敏感度，因而低能量電子繞射 (LEED) 亦是最常見的一種表面分析方法。為了使高能量電子繞射 (RHEED) 亦具表面之敏感度，電子入射於表面之角度常限制在小於 2° 左右之掠角 (grazing angle)。如此垂直方向之動量大為減少，入射電子從表面掠過，而繞射之圖案與表面之結構相關。但由於高能量電子波長較短，動量差很大，掃出之繞射球 (Ewald sphere) 亦極大，通常觀察到之繞射現象受到限制，僅少數倒晶格空間 (reciprocal lattice space) 中的點可見，不如 LEED 得知消息完善。然而，正由於入射及出射之電子束在晶體表面的兩側，而空出晶體正前方的位置可以供其他用途使用。最常見的是不同方式的薄膜成長可由 RHEED 直接觀察，而因此對薄膜成長過程及成長的機制可有進一步的瞭解。現在 RHEED 是搭配磊晶成長如分子束磊晶 (molecular beam epitaxy, MBE) 最重要的工具之一。

二、基本原理

RHEED 的繞射原理與 X 光繞射類似^(1,2)。晶體內週期排列的原子層使得反射光有不同的波程差，當這些波程差等於波長的整數倍 (或半整數倍) 即形成建設 (抵毀) 的干涉，且原子層的數目極多，即形成明亮對比明顯的繞射。通常最方便描述繞射的條件是所謂布拉格條件 (Bragg condition) 即

$$\Delta k = G$$

其中 $k = 2\pi/\lambda$ (λ 為波長)，而 Δk 即反射與入射 k 向

量之差，另外 G 為倒晶格常數 ($G = 2\pi/a$ ，而 a 為晶格常數)。唯瞭解 RHEED 的繞射時，僅需考慮平行於晶面的分量 K ，如圖 1 所示。

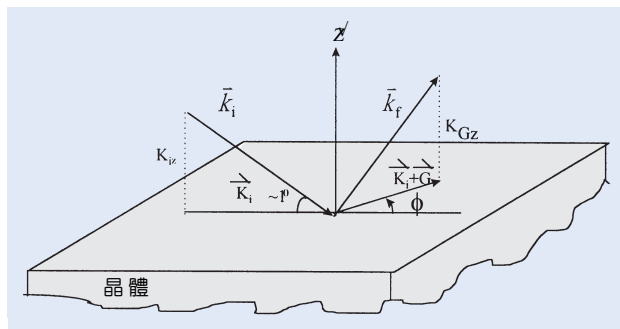


圖 1. 滿足 RHEED 繞射條件的幾何圖示。從電子能量可得電子的波長並定義 $k = 2\pi/\lambda$ ，以及繞射條件 $\Delta k = G$ ，則可從繞射圖形以及其他已知的尺度推算出表面晶格長度，注意此處僅需考慮平行於晶面的分量。

三、儀器裝置

RHEED 在真空系統中的裝置包括有：電子槍 (electron gun)、狹縫 (slit)、磁透鏡 (magnetic lens) 和螢幕 (screen) (見圖 2)。在電子槍和樣品，樣品和螢幕之間的問題大約在 50 公分左右 (是可改變的)。此時真空腔 (vacuum chamber) 內的壓力須小於 10^{-5} torr 才能開始操作電子槍，再將投射到螢幕上的條紋以攝影機把資料輸入電腦內以便隨後做處理。

從螢幕上得知繞射圖案通常是一條條的條紋，而非是很明亮的點，這反應了表面的情形：當表面是理想情況下的平坦時，入射的電子束產生的繞射圖形是相對於表面倒晶格 (reciprocal lattice) 的排列，其強度會集中在倒晶格空間中的一點；且此點在倒晶格內，而其他區域的強度為零。但實際上的表面並非是完美的，而是不平坦，有高低起伏，而晶體本身的結構若有缺陷也會使表面發生不平坦，

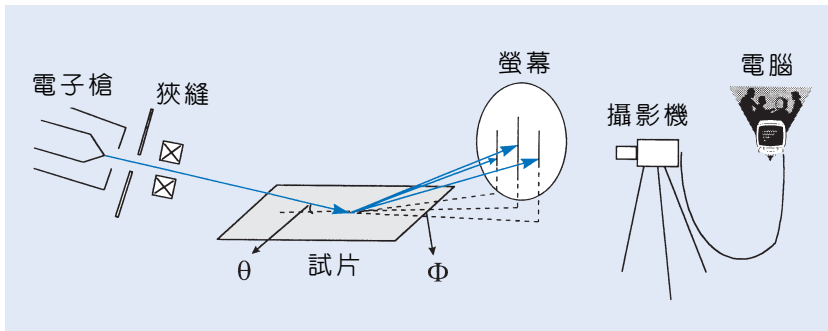


圖 2. RHEED 的儀器裝置。電子槍、狹縫、試片等均在真空腔內，圖中並無顯示出真空裝置。

這對繞射現象有決定性的影響，且繞射球和倒晶格也可能並非是剛好相吻合，由於受到熱震盪的影響而使倒晶格在一個範圍內散開，使得理想的路徑產生一些偏差，造成我們所看到的是條紋而不是點。但若有非常平坦、理想的表面，及在良好精密的儀器下，偶爾仍會看到非常明亮的繞射點。然而如果表面有類似小滴狀的結晶質生成，由於透射電子所生成的繞射我們仍可看到點狀的圖案。另一個影響繞射圖形的原因是入射角值：除了相互平行入射的角外，也可能有一些與角差一小角度的入射角入射到樣品上，這些也會生成繞射圖形而影響了理想的圖形。

四、應用

RHEED 重要的用途之一在於觀察薄膜的成長，無論在同類 (homo-) 或異類磊晶 (hetero-epitaxy) 從 RHEED 圖形的變化可定性的監視薄膜成長的情形，也可定量的獲得表面晶格受基板 (substrate)，或溫度等因素影響的資料。圖 3 是一組繞射圖形的範例。圖 3(a) 是氧化鎂 (MgO) (100) 基板在經過加熱 600 °C 後延著 [100] 的方向所拍攝到的影像，清晰的圖案顯示出高品質的單晶表面。

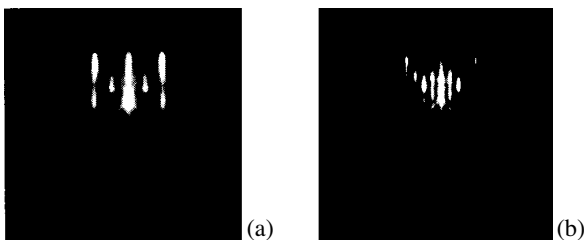


圖 3. (a) MgO (001) 基板及 (b) Fe_3O_4 薄膜沿著 [100] 方向的 RHEED 繞射圖案。

隨後即鍍上氧化鐵 (Fe_3O_4) 的薄膜，而 RHEED 的圖案立即變化成如圖 3(b)。其中條紋變的較密。相對氧化鎂基板，結果顯示在原有的條紋之間又都個別加入一新的線反映出氧化鐵 (Fe_3O_4) 的晶格常數是氧化鎂的兩倍，與預期的結果完全吻合。

而最有價值的資料之一是觀察繞射強度隨薄膜成長的函數圖形，在許多金屬、半導體、絕緣體磊晶成長的過程當之中，RHEED 強度常顯示出隨時間振盪的現象，這些振盪的現象通常解釋為磊晶過程是一層接一層 (layer-by-layer) 成長而非在不同區域同時一塊塊的堆積形成。而一個振盪的週期，即相對於一層 (原子層) 薄膜的完成。振盪現象經常與基板 (substrate) 溫度有密切關係。如此可經由適當模型獲得相關於磊晶成長機制的寶貴消息。圖 4 記錄在氧化鎂基板上分別成長氧化鎂、氧化鐵及氧化鎂／氧化鐵超晶格的繞射強度在蒸鍍過程變化的情形⁽³⁾。

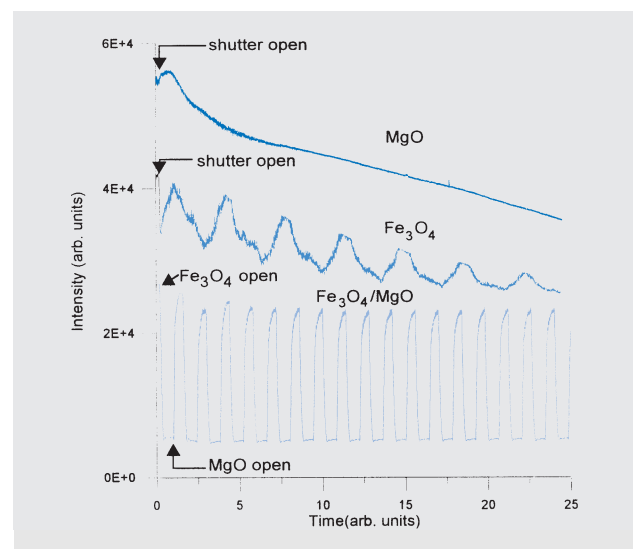


圖 4. RHEED 強度隨著薄膜成長而產生的變化情形。

五、優缺點比較

RHEED 的優缺點已如前面所述包括原理簡單、操作方便、理解容易，即使初學者 (具備高真空經驗) 亦很快可以使用。另外不佔據基板前方的位置，因此可與長膜裝置共用，而直接觀察薄膜成長的過程。缺點則包括，如電子能量高，因而波長短，相對能改變能量之比例小，而能觀察到的晶格點少，另外如同其他電子散射的裝置，對絕緣體材料可能有電荷累積的問題，此外電子多次散射 (multiple scattering) 亦無法避免，而嚴重的增加了分析及瞭解樣品表面電子結構的複雜性。

六、操作提示

1. 真空度最好低於 10^{-5} torr，樣品必須是清潔的單晶，表面平滑。
2. 適當調整電子槍至確定已有電子束發射，且打

擊到樣品 (可用對電子束敏感的樣品 ZnO、MgO 等)。

3. 微調電子束入射角度 (Z-deflection) 至螢光幕上可見微弱的反射電子強度。
4. 清理樣品表面，包括加熱等方式。
5. 旋轉樣品至高對稱方向 (調整 ϕ 角度，見圖 1)。
6. 重複 4、5 步驟直到出現繞射圖案。

參考文獻

1. C. Kittel, *Introduction to Solid State Physics*, 6th ed., New York: John Wiley & Sons, Inc. (1986).
2. D. P. Woodruff and T. A. Delchar, *Modern Techniques of Surface Science*, Cambridge: Cambridge University Press (1986).
3. Gung Chern and Yo Ren Chean, *Jpn. J. Appl. Phys.* **36**, 2813 (1997).

作者：陳恭先生為美國佛羅里達州立大學物理博士，現任國立中正大學物理系教授。

掠角 X 光繞射儀

Grazing Incidence X-ray Diffractometer

關鍵字：掠角 X 光繞射、多環繞射儀、X 光全反射

Keywords： grazing incidence X-ray diffraction, multi-circle diffractometer, X-ray total reflection

一、基本原理

X 光掠角繞射，顧名思義，涉及到入射角相當小的繞射。如圖 1 所示，X 光之入射光以掠角 χ 沿 \vec{k}_i 方向入射，遇晶體後，一則被晶體表面所反射（光學反射，或稱鏡面反射）而向 \vec{k}_s 方向射出，一則被某一組特定之 (hkl) 原子面繞射而沿 \vec{k}_f 方向進入晶體內，此一繞射光因受到晶體表面之鏡面反射所影響而沿 \vec{k}_r 方向反射，這一組原子面 (hkl) 通常垂直於晶體表面，因而又稱為平面反射 (in-plane reflection)。

X 光為一高頻率 ($\sim 10^{19}$ Hz) 之電磁波，其對物質的折射率 n 非常接近 1，但小於 1，可以以 $n = 1 - \delta$ 表示，這裡的 δ 為 10^{-5} 的數量級，其大小依物質之組成而異。就 X 光而言，臨界角 θ_c 通常約等於 $\sqrt{2\delta}$ ，約在 1° 左右。當 X 光之入射角小於 θ_c 時，會產生外界全反射 (total external reflection)。換言之，當 X 光之入射角 $\chi < \theta_c$ 時，折射光會沿著晶體表面而射出。此出射光如遇平面反射之 (hkl) 原子面，則吾人可由鏡面反射之繞射光強度及其發生之角度位置來了解晶體表面或介面的原子結構。

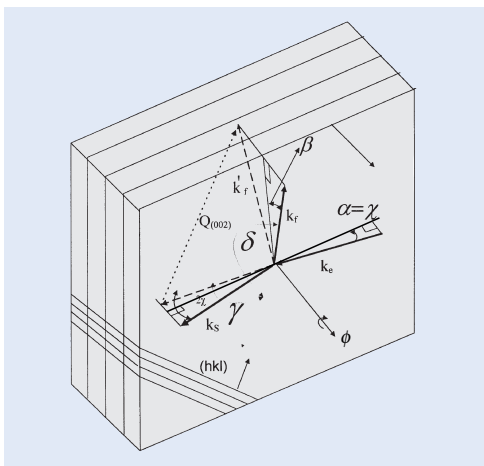


圖 1. X 光掠角繞射示意圖。

自然，在產生掠角繞射時，參與繞射之 (hkl) 原子面仍必須滿足布拉格繞射條件，即 $2d\sin\theta = \lambda$ ， d 為原子面之間距， θ 為布拉格角， λ 為 X 光波長。

掠角 X 光繞射儀即是根據以上原理設計而成的一種繞射儀。其主體需有四個轉動軸。其中兩個用來控制晶體，其一可用以旋轉晶體使達掠角入射的狀況，另一則用以調整晶體的位置與方向。另外兩個轉動軸是用來控制偵測器 (detector) 的，由於鏡面反射之繞射光有可能在水平面或垂直面上，因此偵測器也應具有兩個自由度 (degree of freedom)，以便能找到繞射光而加以量測。

通常掠角繞射儀除了可監控平面之反射外，亦應具有其他的掃描功能—如垂直於晶體表面或介面之垂直掃描 (或稱 rod scan)。因此偵測器及晶體之轉動具有較大的自由度是設計掠角繞射儀的要件。

二、結構示意圖

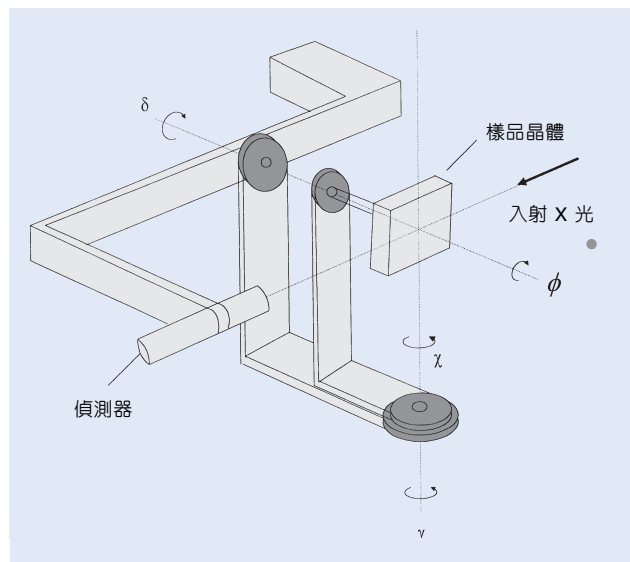


圖 2. 掠角 X 光繞射儀示意圖。

圖 2 為掠角 X 光繞射儀之結構示意圖。參考圖 1，入射之 X 光 \vec{k}_i 以 χ 角入射 (即入射光與樣品之夾角為 χ)，鏡面反射光則沿 \vec{k}_r 方向射出。為使某一組垂直於樣品表面之原子面 (hkl) 滿足布拉格繞射條件，我們必須以轉動 ϕ 軸來調整晶體位置以使產生繞射光。依圖 1 所示，繞射光是向著晶體內部 (\vec{k}_f)，不易測量。因此，利用繞射光之鏡面反射，即沿著 \vec{k}_r 方向，我們可測得繞射所造成之強度變化，所以偵測器必須放在沿 \vec{k}_r 之方向。換言之，我們必須轉動 δ 軸及 γ 軸以使得偵測器放置在鏡面繞射的位置。

基本上，掠角繞射儀只需四個軸 (環)，但是，在實際操作時，樣品表面必須調平才能執行掠角繞射，因此通常是將樣品固定在角向器頭 (goniometer head) 上，以利用角向器頭上的角度及位置調整機構來使樣品表面調平。

如需從事高解析之實驗，則可在偵測器位置放置一分析晶體 (analyzer)，然後再放上偵測器。此一裝置需在偵測器位置上再加兩軸 (環)。如晶體本身需繞著某一特定方向旋轉時，則可在晶體的水平方向再加一環，如此即為一多功能之八環繞射儀。

三、儀器規格及特徵

一般商用之繞射儀為四環繞射儀或二環繞射儀。經特殊幾何安排，雖可使它們達到掠角繞射的結果，但因晶體或偵測器之可旋轉自由度有限，並不十分適用。現有之 z 軸 (z -axis) 繞射儀為在四環繞射儀上加上一垂直於晶體表面 (z 方向) 且原點可沿 z 方向平移的轉軸，偵測器置於其上可從而量測到鏡面反射之繞射光。

另外較完整且多功能的掠角繞射儀為由國人自行設計而由德國 Huber 公司製造之八環繞射儀。其主要結構如圖 2 所示，即兩環用以控制偵測器，兩環用以控制晶體。(目前清華大學物理系及行政院同步輻射研究中心均有此儀器，可供實地了解。)

四、應用

掠角繞射儀之用途如下。

1. 反射率之量測

利用小角度 (0° 到 10° 之間) 的 $(\theta - 2\theta)$ 掃描 (即轉動 χ 環與 γ 環，且保持 $\chi : \gamma = 1 : 2$ 之速度)，可測得晶體或薄膜之表面粗糙度、薄膜厚度、密度、介面粗糙度，以及多層膜之結構。通常需要透過數值分析才能得到以上的結構參數。

2. 大角度的 $(\theta - 2\theta)$ 掃描

ϕ 可用來分析多晶 (polycrystal) 樣品及薄膜之大致結構。

3. ϕ 掃描

將偵測器對準某一特定反射，然後沿著 ϕ 軸旋轉晶體，作 360° 之 ϕ 掃描，可測得磊晶多層膜之晶格及晶向關係。

4. 平面徑向掃描

針對某一水平晶軸方向，同時轉動晶體及偵測器使沿此一晶軸方向掃描。換言之，此一晶軸上之反射面，如 (hkl) 、 $(2h\ 2k\ 2l)$ 、 $(3h\ 3k\ 3l)$ ，均可由此方式偵測出繞射峰之位置，從而更精確的決定磊晶薄膜之水平介面關係。

5. 垂直掃描

針對某一垂直於晶體表面之晶軸方向，固定入射角 χ ，或改變入射角使等於出射角，並同時轉動晶體及偵測器使沿著此一晶軸方向掃描，從而決定磊晶薄膜之垂直介面關係。

參考文獻

1. W. C. Marra, P. Eisenberger, and A. Y. Cho, *J. Appl. Phys.*, **50**, 6927 (1979).
2. I. K. Robinson and D. J. Tweet, *Rep. Prog. Phys.*, **55**, 599 (1992).
3. S. Dietrich and A. Haase, *Phys. Rep.*, **260**, 1 (1995).

作者：張石麟先生為美國紐約布魯克林理工學院物理博士，現任國立清華大學物理系教授。

金屬表面電漿波及二次諧波

Metal Surface Plasmon and Second Harmonic Generation

關鍵字：金屬表面電漿波、光學二次諧波

Keywords： metal surface plasmon, optical second harmonic

一、基本原理

表面電漿波^(1,2) 為一種存在於金屬與介質層的介面電磁波，其強度無論是在於金屬層或介質層內皆隨著與介面之垂直距離而指數遞減。此種電磁波可以利用帶電荷粒子或光波經過三稜鏡來耦合激發，此項表面電漿波較一般同一頻率 ω 之光波有較長之波向量 (k)，此係由電磁波對金屬表面電荷密度造成擾動所引起。利用二維或一維電荷密度集體 (collective) 擾動，亦可激發表面電漿，其頻率與波向之關係為 $\omega_p = (2\pi n_s e^2 k/m^*)^{1/2}$ ，隨著表面電子密度 n_s 之增加，其頻率亦增高。利用三稜鏡或光柵可將光線耦合至金屬表面，在產生表面電漿之入射角度，光線之反射率會變小，亦即金屬吸收光線以激發電漿波，此方法稱為全反射衰逝法 (attenuated total reflection) 如圖 1 所示。

表面電漿波僅存在於金屬與介電層間，原因為需滿足電磁波在邊界之連續性 (continuity) 及 Maxwell 之波方程式，祇有橫向磁波 (TM) 才有可能，且其中一介質之實數介電係數需為負數，此僅金屬具有此項特性。由於入射波與電漿波之波向量不相同，欲獲得動量守恆 (亦即相當匹配)，電波之

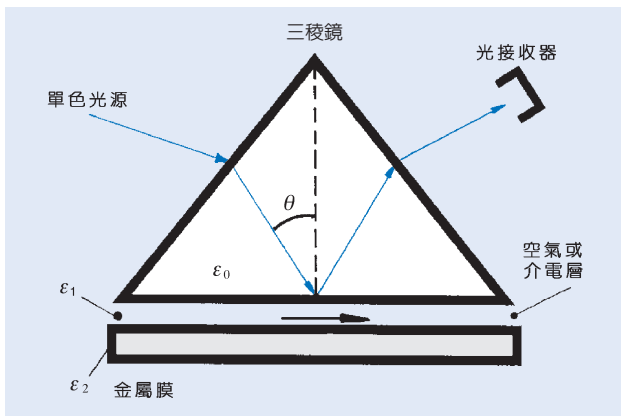


圖 1. Kretschmann 結構以激發金屬表面電漿波。

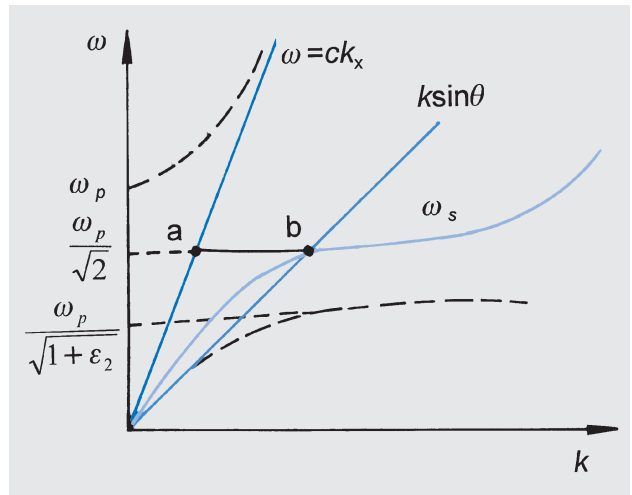


圖 2. 表面電漿波之頻散關係， ω_p 為體電漿頻率， ϵ_2 為介質層之介電常數， k_x 為入射光之波向量，藉稜鏡將入射光之動量由 a 點轉移至 b 點。

頻散關係必須如圖 2 所示。

金屬二次諧波產生之機制：當光照射在金屬表面時，電磁場在數百埃之穿透深度內造成電子之流動，此為體電流源，其對二次非線性諧波之貢獻主要源於上述電流與電磁波磁場之羅倫茲作用力 $\vec{J} \times \vec{B} = a\vec{E} \times \vec{B}$ 。另外在表皮數埃厚度內，由於極高之電荷密度，外來電磁波之擾動，在 Thomas-Fermi 極短之屏蔽長度內被平衡中和，此表皮區域 (selvedge region) 存在著甚大之電偶極梯度 (dipole gradient)，此為金屬二次諧波之主要貢獻；其又可分成垂直和平行於金屬表面之二分量，垂直分量電流源之大小與金屬表面對電磁波之屏蔽長度有關，而平行分量則與金屬粗糙度與純淨程度造成電子之散射有關。依自由電子之簡化模型，可以推導出金屬之二次諧波極化率為

$$P^{2\omega} = \frac{ie^3 n_0}{4m_e^2 \omega^3 C} E^\omega \times B^\omega + \frac{e}{8\pi m_e \omega^2} E^\omega (\nabla \cdot E^\omega)$$

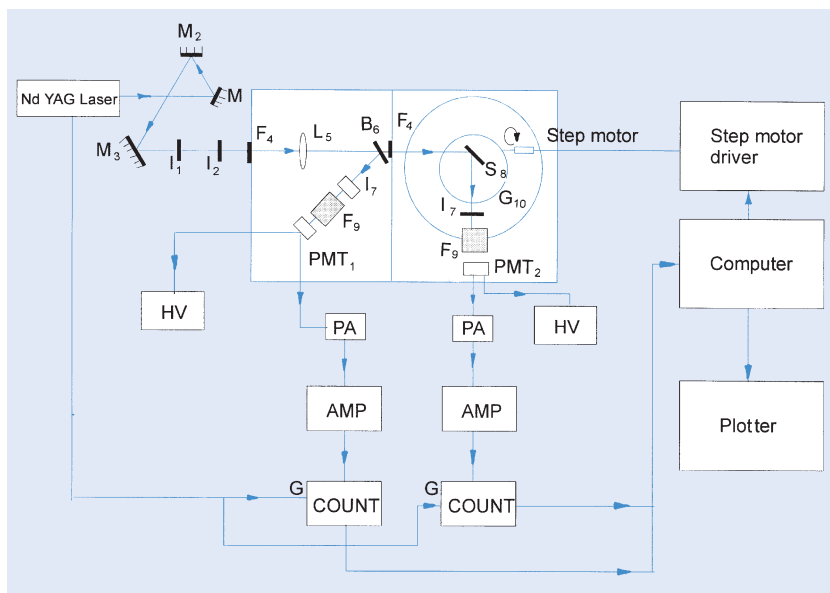


圖 3. 光學二次諧波量測裝置。

其中 n_0 為電子密度，此二項分別屬於磁偶極及電四極之貢獻。較精確之理論則可用電子流體動力理論 (hydrodynamical model)⁽³⁾，及時間相依密度方程式 (time-dependent density function)⁽⁴⁾ 去解基態電子結構而獲得。

二、結構示意圖^(5,6)

金屬之二次諧波反射率很小，值約在 10^{-19} cm^2/w ，而二次諧波之激發效率與入射光強度成正比，需用高能量脈衝雷射，為避免高能量雷射產生之黑體輻射光雜訊及金屬表面之受破壞，可以利用 Q 開關且鎖模之 Nd:YAG 雷射作光源，前者頻率在 500–1k Hz，後者為 180 MHz 平均直流功率約 2W，此時雷射脈衝寬約 10 ps，波峰為 5 MW。圖 3 為本實驗室之光學二次諧波之量測裝置。入射光經三個平面鏡之偏轉後由 S 波變成 P 波，先經過紅外的光通路濾光鏡 F_4 後進入黑箱，半反射鏡 B_6 之反射光照射一 AT-Cut 石英鏡片 I_7 ，產生供校準用參考光源，經多層濾色鏡組 (F_9) 如圖 4 後，到達光電管 (PMT_1)，入射樣品光再經濾光鏡 F_4 將可能之綠光濾除後，再照射到樣品 S_8 其貼附在一高精度之樣品準角儀 (G_{10})，由電腦控制此準角儀之入射角度，由樣品反射之二次諧波光，再經濾光鏡組 F_9 後到達暗計數 (dark count) 甚低之光電管 PMT_2 ，光子信號經前級放大器 PA 將電流放大，再經光譜放大器 (spectroscopy amplifier) 電壓放

大，經具閘極控制之計數器計數後，由電腦作數據處理。

三、應用

金屬表面電漿波及二次諧波偵測之主要應用，在探討物理學術上有關金屬導電子之動力機制、傳輸理論等，藉由諧波振盪強度及譜線形狀瞭解金屬薄膜之粗糙度與表面分子之吸附，由於其理論機制甚複雜尚未能普遍應用。較具應用性的為旋轉偵測器對樣品晶軸之角度，由所量得之二次諧波光強度

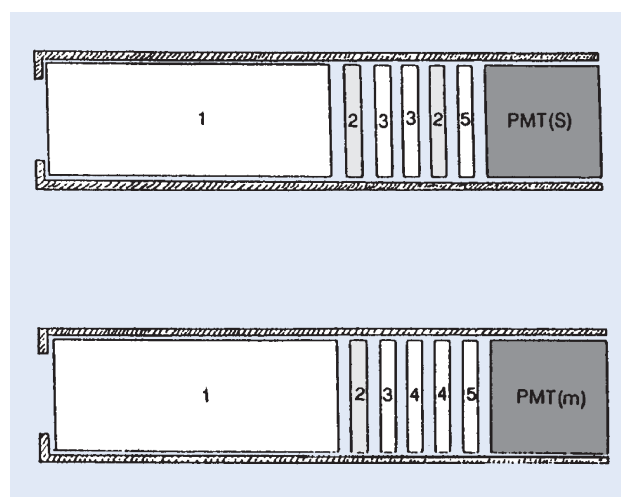


圖 4. 多層濾光鏡之組合構造，1 為 7 公分長之硫酸鎳飽和溶液，2 為綠色玻璃濾光鏡，3 為藍色濾光鏡，4 為紅外光衰減濾片，5 為窄通 $0.53 \mu\text{m}$ 之干涉濾光鏡。

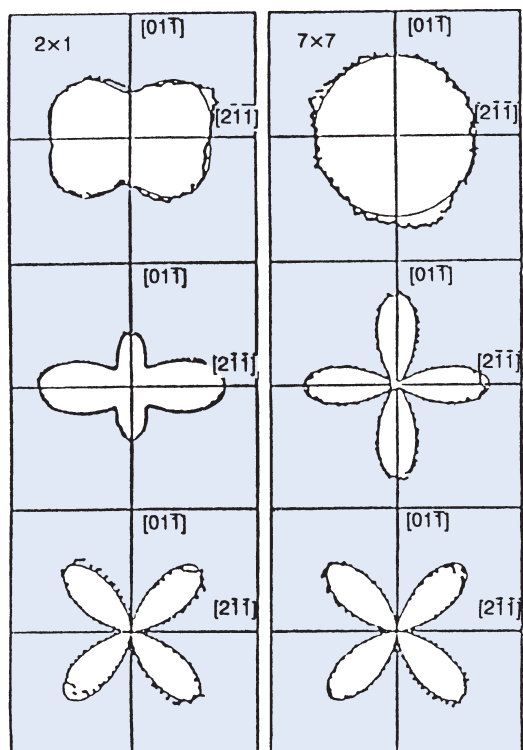


圖 5. 利用二次諧波探測矽 (111) 面之表面晶像結構。

變化 (如圖 5)，其結果頗能與在超高真空下操作之低能量電子繞射圖形相互對比。其他也可用來確定表面熔解、表面無序狀態、非晶與結晶之相轉移、表面雜質分子之離附，以及表面電子性質之改變等。至於表面電漿波之應用，為利用入射光耦合產生表面電漿波以激發薄膜之螢光強度，量測金屬膜之介電常數等。

參考文獻

1. C. H. Kao and J. T. Lue, *Appl. Phys.*, **A64**, 439 (1997).
2. H. Reather, *Surface Plasmons on Smooth and Rough Surface and on Gratings*, Berlin: Springer-Verlag (1988).
3. S. C. Wang, J. M. Chen, and J. R. Bower, *Optics Common*, **8**, 275 (1973).
4. A. Liebsch, *Phys. Rev. Lett.*, **61**, 1233 (1988).
5. K.Y. Lo and J. T. Lue, *Phys. Rev.*, **B51**, 2467 (1995).
6. C. S. Chany and J. T. Lue, *Surface Science*, in press (1997).

作者：呂助增先生為美國杜克大學物理博士，現任國立清華大學物理系教授。

表面磁光柯爾效應測量儀

Surface Magneto-Optical Kerr Effect (SMOKE)

關鍵字：表面磁光柯爾效應、橢圓偏光儀

Keywords： surface magneto-optical Kerr effect, ellipsometer

一、基本原理

線偏光被鐵磁性材料反射後變為橢圓偏振光，這一現象名為磁光柯爾效應 (magneto-optical Kerr effect, MOKE)。因外磁場作用或鐵磁材料的自發性磁化 (\mathbf{M} , spontaneous magnetization) 使得原有的左旋與右旋折射率不再相等 (磁雙折射, magnetic birefringence)，線偏振光可分解為右旋與左旋偏振光，當這偏振光被磁雙折射物質反射後，因相位也改變了所以形成橢圓偏振光。

在一階近似時柯爾轉角 ϑ_K 和柯爾橢圓率 ε_K 與 \mathbf{M} 成正比，外加磁場 \mathbf{H} 只是一個推動力 (driving force) 用來調變 \mathbf{M} ，因此測量 ϑ_K 或 ε_K 與 \mathbf{H} 的關係便可獲得磁滯曲線 (magnetic hysteresis loop)。按物質的磁化強度 (\mathbf{M}) 與入射面 Σ 的關係，MOKE 有三種組合 (見圖 1)。

- (1) 極向磁光柯爾效應 (polar magneto-optical Kerr effect, PMOKE)：磁化方向 \mathbf{M} 與面法線 \mathbf{n} 平行及躺在入射面 (Σ) 上。
- (2) 縱向磁光柯爾效應 (longitudinal magneto-optical Kerr effect, LMOKE)：磁化方向 \mathbf{M} 與法線 \mathbf{n} 垂直但躺在入射面 (Σ) 上。
- (3) 橫向磁光柯爾效應 (transverse magneto-optical Kerr effect, TMOKE)：磁化方向 \mathbf{M} 與法線 \mathbf{n} 及入射面 Σ 垂直⁽¹⁾。

可見光在一般金屬的穿透深度約數百埃，在這範圍內磁光效應與光的穿透深度成正比。一般的鐵磁金屬材料旋光度約為 $10^5 - 10^6$ 度/cm，如磁膜厚度為一原子層 (約 2 埃)，其旋光度為 $\sim 10^{-3}$ degree，如有測量這個數量級靈敏度之極光儀便可以探討磁性超薄膜 (< 10 原子層，約 20 埃)，這時 MOKE 便稱為表面磁光柯爾效應 (SMOKE)。

如磁性薄膜之厚度 t_m 符合下列條件：

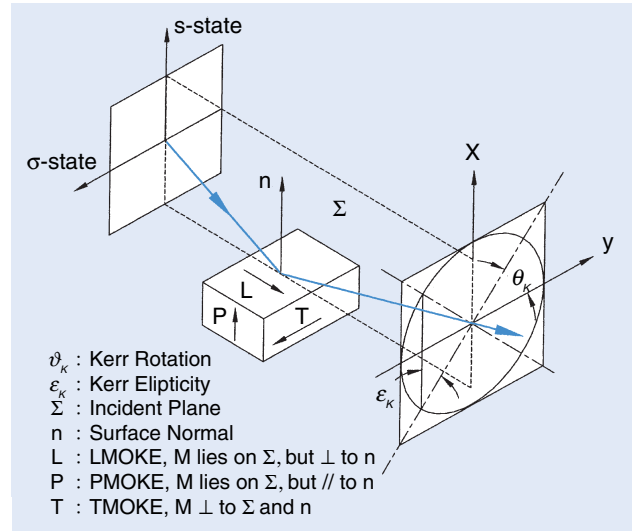


圖 1. 磁光柯爾效應的三種幾何組合及描述橢圓偏振光的四個參數。

$$\frac{2\pi}{\lambda} t_m |\tilde{n}_m| \ll 1 \quad (1)$$

ϑ_K 和 ε_K 與 \mathbf{M} 成正比，則有：

$$\tilde{\varphi}_K^P \equiv \vartheta_K^P + i\varepsilon_K^P \approx -\frac{4\pi}{\lambda} \frac{\tilde{n}_m}{1 - \tilde{n}_{sub}^2} \tilde{Q} t_m \quad (2)$$

$$\tilde{\varphi}_K^L \equiv \vartheta_K^L + i\varepsilon_K^L \approx -\frac{4\pi}{\lambda} \frac{\tilde{n}_{sub}}{1 - \tilde{n}_{sub}^2} \sin \vartheta_i \tilde{Q} t_m \quad (3)$$

上式 λ 是入射光的波長， \tilde{n}_m 與 \tilde{n}_{sub} 分別是磁膜和基板的複數折射率。 $\tilde{\varphi}_K^P$ 與 $\tilde{\varphi}_K^L$ 是磁性薄膜的 PMOKE 和 LMOKE 複數柯爾旋轉， ϑ_i 是光的入射角、 \tilde{Q} 是磁光參數 (magneto-optical parameter) 在一階近似時與 \mathbf{M} 成正比，若 \mathbf{M} 為零時 (非鐵磁性) \tilde{Q} 也是零。

若為多層膜，因為只有鐵磁層才有柯爾旋轉，疊加原理可成立，因此只要滿足下式：

$$\frac{2\pi}{\lambda} \sum_m t_m |\tilde{n}_m| \ll 1 \quad (4)$$

及把鐵磁層的磁光貢獻項疊加起來便可，因此得下列公式：

$$\tilde{\phi}_K^P = -\frac{4\pi}{\lambda} \sum_m \frac{\tilde{n}_m}{1 \pm \tilde{n}_n^2} \tilde{Q}_m t_m \quad (5)$$

$$\tilde{\phi}_K^I = \pm \frac{4\pi}{\lambda} \sum_m \frac{\tilde{n}_m}{1 - \tilde{n}_n^2} \sin \tilde{\vartheta}_i \tilde{Q}_m t \quad (6)$$

公式 (4) 至 (6) 的下標 m 和 n 分別表示鐵磁性及非鐵磁性，而 \sim 表示複數。

光的波長為數千埃，磁膜或多層膜總厚度一般小於數百埃，可見光之金屬穿透深度約伍百埃，因此上列條件一般都能成立。又從公式 (3) 與 (6) 得知，只要適當的選取基板和非鐵磁性材料縱向磁光柯爾效應可被增強。

二、測量原理、組件配置及儀器特徵

要描述空間的橢圓偏振光 (見圖 1)，雖要四個參數；長短軸之長度 (E_x 、 E_y)、橢圓率 (ϵ)、長軸與參考軸之夾角 (ϑ)、旋轉方向 (左旋或右旋光)。能測量這幾個特徵值的儀器稱為橢圓偏光儀 (ellipsometer)。傳統的測量方法是把光訊號調變和用鎖相法 (lock-in technique) 使得磁光訊號可用 Bessel 函數展開，有 ϑ_x 與 J_1 的 ω 項成正比和 ϵ_x 與 J_1 的 2ω 項成正比。這方法的優點是增加調變頻率 ω 時磁光訊號也隨之增高，但缺點是採樣頻率 (sampling frequency) 太低，當訊號太弱時，光源不穩及環境微小溫差等因素變得重要時這方法並不很適合。因此下面只討論更為簡單及直接的測量方法。

測量 MOKE 或 SMOKE 的裝置如圖 2 所示；光源可用波長為 6328 埃之氦氖雷射，當穿過線偏振板後，光的線偏振比為一百萬比一，經由鐵磁性樣品反射後通過檢偏器，再由單通濾波片 (band pass filter) 和光二極體所組成的光訊號偵測器接收轉換成類比電壓訊號輸出至數位電表 (DVM)，再利用 IEEE-488 介面卡連接電腦、DVM 及電磁鐵的電流供應源，經由電腦控制與處理分別得出柯爾訊號 (y 軸) 與磁場 (x 軸) 的關係—磁滯曲線。為了使光訊號更穩定，可同時把測到的磁光柯爾訊號作歸一化，方法如下：

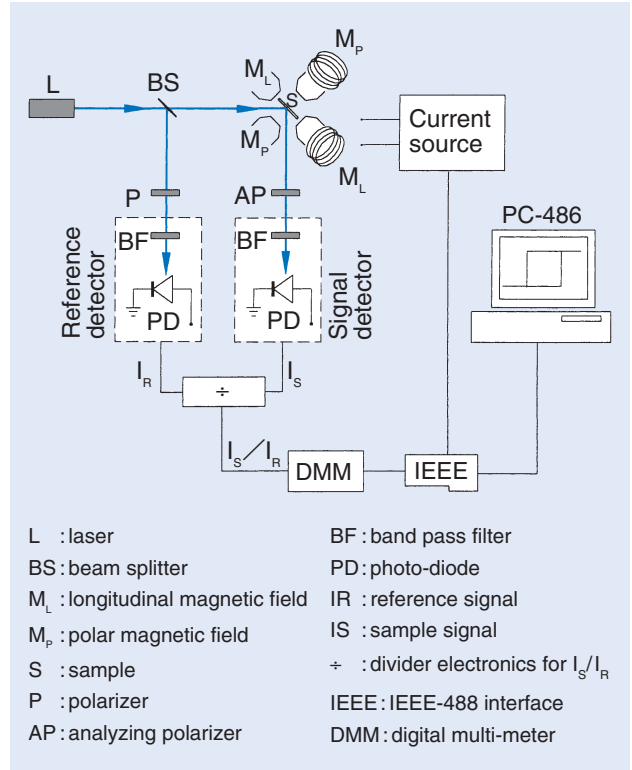


圖 2. 測量磁光柯爾效應的配置圖。

用一片半透鏡引出部分光源至另一組光訊號偵測器 (見圖 2)，再用這組的訊號除磁光柯爾訊號，這樣可減少由光源產生的不穩。

要提高訊噪比 (signal to noise ratio, SNR)，可把測到的柯爾訊號作平均法處理，這時 SNR 與 \sqrt{n} 成正比 (n 是測量次數)。若要測量柯爾橢圓率，只要在偵察器前加一個四分之一波長板 (quarter wave plate) 便可。這裝置用了波長為 6328 埃的單通濾波片過濾其他雜光，又在電子訊號處理只用了一個電源雜訊濾波器 (line reject filter)，因此採樣頻率可大為提高，如此可忽略光源本身及環境因素所產生的訊號漂移 (drift problem)。

目前商業化的 MOKE 與 SMOKE 測量儀並不多，筆者所知國外廠商能提供的 MOKE 不管在穩定性與靈敏度都不能達到探測磁性超薄膜範圍，只有自行制作的 SMOKE 系統 (如上節所述) 才具有探測磁性超薄膜的能力。

因柯爾轉角很小，所以 SMOKE 的最大困難是如何校準這角度，校正可參考以下方法：

(a) 利用以知旋光率的磁光法拉第材料做的圓棒置

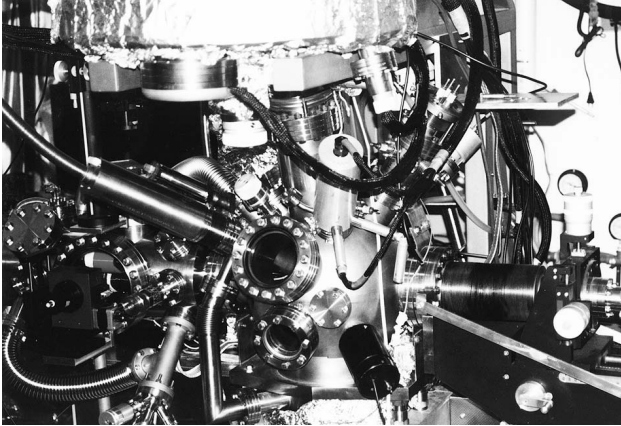


圖 3. 在中央研究院的 SMOKE 與 ESCA 系統整合；圖上方是能量分析儀 (energy analyser)，在中心的分析腔置有電子鎗 (Auger 電子譜)、X-ray (XPS，化學態測量) 和 LEED (低能電子繞射，表面結構的測量)。圖左方的腔體放置電子蒸鍍源和 SMOKE 測量儀，電磁鐵放在腔內並可旋轉作 PMOKE 與 LMOKE 測量。最右方是樣品放置、溫控與輸送設備。

於螺線管磁場中 (謂 Faraday 調變器，一般用 Scott Glass SF-6，旋光率為 $0.03^\circ/\text{Oe} \cdot \text{cm}$ ，或更高旋光率的材料)，又螺線管產生的磁場是已知及可調的，因此調變磁場與轉光度成正比。再把這個 Faraday 調變器放在檢偏器前，當螺線管的磁場被改變時，光穿過 Faraday 調變器後的偏振面也轉至某一固定值，這個改變可從光訊號檢測讀出。適當的利用 Faraday 調變器作校準其解析度可達 10^{-3} 度以上。

(b) 把檢偏器和光訊號檢測器一起放在步進馬達上並旋轉一微小角度，相對這一角度的改變而測到的光訊號變化便達到校正目的，但這方法受限於步進馬達的解析度，約為 10^{-2} 度。

在磁學觀點上只要得到磁滯曲線便可大略了解物質的磁化過程，測量 ϵ_k 或 ϑ_k 的絕對值比較不重要，因此可省去校準的麻煩，這樣使測量更簡單。

三、應用與用途

分別對三種組態的磁光柯爾效應作測量便可得到三組磁滯曲線，從而獲知磁異向性 (magnetic

anisotropy)；也就是 \mathbf{M} 的方向。

SMOKE 通常與傳統的表面分析儀器合用；如低能電子繞射、高能反射電子繞射、AES (Auger electron spectroscopy)、XPS (X-ray photoelectron spectroscopy) 等，這樣可找出磁性與表面結構、化學態、介面效應、層次變化及相變溫度等的相互關係。為配合超高真空環境，入射光源與磁光測量器材可放在腔外。

四、SMOKE 的優缺點

傳統磁性測量儀；如 VSM (vibrating sample magnetometer)，SQUID (superconducting quantum interface device)、TOM (torsion oscillation magnetometer) 等不容易或極度困難與超真空環境配合，但 SMOKE 沒有這個問題，只是真空腔內的電磁鐵不能產生很大的磁場 (如一公分的工作空間磁場約 $\leq 2\text{k Oe}$)，不過這也足夠使得磁性超薄膜在磁易軸方向飽和，當然只要設計好磁鐵也可以放在腔外。

靈敏度方面 SMOKE 可與 SQUID 相比，從測量時間考量後，需數小時以上才能得到磁滯曲線而 SMOKE 只要數分鐘。SMOKE 的另一缺點是不能對 \mathbf{M} 作定量的測量，這是由於 SMOKE 訊號強弱與光的入射角、儀器本身等有非線性的關係而不被固定和校正。

圖 3 是筆者在中央研究院把 SMOKE 與 ESCA 整合的系統。其靈敏度可達測量厚度為一原子層的鐵膜。

參考文獻

1. TMOKE 只有光度改變而沒有偏振態變化。
2. S. D. Bader, *J. Magn. Magn. Mat.*, **100**, 440 (1991).
3. A. V. Sokolov, *Optical Properties of Metals*, Blackie & Son (1967).
4. R. M. A. Azzam and N. M. Bashara, *Ellipsometry and Polarization of Light*, North-Holland (1977).
5. C. C. Robinson, *J. Opt. Soc. America*, **53**, 6, 681 (1963).

作者：盧志權先生為英國 Sussex 大學物理學博士，現任工業技術研究院光電工業研究所工程師。

中文關鍵字索引

X 光光電子能譜儀 X-ray photoelectron spectrometer (XPS)
5, 6, 52

X 光全反射 X-ray total reflection 45

二劃

二次離子 secondary ion 16-22

二次離子質譜分析 secondary ion mass spectrometry (SIMS)
16-19, 20

四劃

分子振動 molecular vibration 10

化學位移 chemical shift 5, 6

反射電子顯微鏡 reflection electron microscope 23

六劃

光學二次諧波 optical second harmonic 47, 48

多環繞射儀 multi-circle diffractometer 45

七劃

局部電子密度 local density of states 26

八劃

空間分辨率 spatial resolution 20, 21, 24

表面分析 surface analysis 4, 5, 12-16, 19, 31, 35, 36, 42, 52

表面化學分析 surface chemical analysis 10

表面原子結構 surface atomic structure 10, 33, 36, 39, 40

表面游離離子槍 surface ionization ion gun 16, 17

表面磁光柯爾效應 surface magneto-optical Kerr effect
(SMOKE) 50-52

金屬表面電漿波 metal surface plasmon 47, 48

九劃

穿透電子顯微鏡 transmission electron microscope (TEM)
23

穿隧電流 tunneling current 26, 27, 29

十劃

原子力顯微鏡 atomic force microscope (AFM) 28-30

原子探針場離子顯微鏡 atom-probe field ion microscope
(APFIM) 32-35

原子結構 atomic structure 24, 25, 36

原子鑑別率 atomic resolution 32

氦原子繞射 helium atom diffraction 36

能譜分析 energy spectrum analysis 5, 7, 13

逃逸深度 escape depth 5

高分辨電子顯微鏡 high resolution electron microscope 23, 24

高能量電子繞射儀 reflection high energy electron
diffractometer (RHEED) 23, 42-44

十一劃

側面像 profile imaging 23, 24

掠角 X 光繞射 grazing incidence X-ray diffraction 45, 46

接觸式 contact mode 29, 30

掃描穿透電子顯微鏡 scanning transmission electron
microscope (STEM) 23-25

掃描穿隧顯微鏡 scanning tunneling microscope (STM)
26-28

掃描探針顯微術 scanning probe microscopy (SPM) 29

液態金屬離子槍 liquid metal ion gun 16, 17

球扇分析器 spherical sector analyzer (SSA) 1-3

組成分析 compositional analysis 13-15

十二劃

單一原子靈敏度 single-atom sensitivity 32

場離子顯微鏡 field ion microscope (FIM) 32-35

散射 scattering 1, 10, 11, 13-15, 37, 38

筒鏡分析器 cylindrical mirror analyzer (CMA) 1-3, 14

結構分析 structural analysis 13-15, 28

超高真空 ultra-vacuum 2, 4, 6, 9, 12, 16, 25, 28, 33, 36, 38, 39, 40, 49, 52

十三劃

微分析 microanalysis 20, 21, 35

電子能量損失頻譜儀 electron energy loss spectrometer (EELS) 10

電子能譜化學分析儀 electron spectroscopy for chemical analyzer (ESCA) 5, 15, 52

電子繞射 electron diffraction 23-25, 36, 38, 39, 42, 49, 52

電子顯微鏡 electron microscope 2, 4, 21, 23-25, 31, 32

十四劃

聚焦離子束 focused ion beam (FIB) 20-22

輕敲式 tapping mode 29, 30

十五劃

歐傑電子 Auger electron 1-4, 5, 36, 40, 52

質量分析器 mass analyzer 14, 16, 18, 19

質譜儀 mass spectrometer 16, 20

十六劃

橢圓偏光儀 ellipsometer 50, 51

十七劃

壓電材料 piezoelectric materials 26, 31

縱深成分分佈分析 depth profiling analysis 1, 2, 16

聲子色散 phonon scattering 10, 12

十八劃

離子散射 ion scattering 13-15

雙電漿離子槍 duoplasmatron ion gun 16, 17

英文關鍵字索引

- A**
- atomic force microscope (AFM) 原子力顯微鏡 28-30
 - atomic resolution 原子鑑別率 32
 - atomic structure 原子結構 24, 25, 36
 - atom-probe field ion microscope (APFIM) 原子探針場離子顯微鏡 32-35
 - Auger electron 歐傑電子 1-4, 5, 36, 40, 52
- C**
- chemical shift 化學位移 5, 6
 - compositional analysis 組成分析 13-15
 - contact mode 接觸式 29, 30
 - cylindrical mirror analyzer (CMA) 筒鏡分析器 1-3, 14
- D**
- depth profiling analysis 縱深成分分佈分析 1, 2, 16
 - duoplasmatron ion gun 雙電漿離子槍 16, 17
- E**
- electron diffraction 電子繞射 23-25, 36, 38, 39, 42, 49, 52
 - electron energy loss spectrometer (EELS) 電子能量損失頻譜儀 10
 - electron microscope 電子顯微鏡 2, 4, 21, 23-25, 31, 32
 - electron spectroscopy for chemical analyzer (ESCA) 電子能譜化學分析儀 5, 15, 52
 - ellipsometer 橢圓偏光儀 50, 51
 - energy spectrum analysis 能譜分析 5, 7, 13
 - escape depth 逃逸深度 5
- F**
- field ion microscope (FIM) 場離子顯微鏡 32-35
 - focused ion beam (FIB) 聚焦離子束 20-22
- G**
- grazing incidence X-ray diffraction 掠角 X 光繞射 45, 46
- H**
- helium atom diffraction 氦原子繞射 36
 - high resolution electron microscope 高分辨電子顯微鏡 23, 24
- I**
- ion scattering 離子散射 13-15
- L**
- liquid metal ion gun 液態金屬離子槍 16, 17
 - local density of states 局部電子密度 26
- M**
- mass analyzer 質量分析器 14, 16, 18, 19
 - mass spectrometer 質譜儀 16, 20
 - metal surface plasmon 金屬表面電漿波 47, 48
 - microanalysis 微分析 20, 21, 35
 - molecular vibration 分子振動 10
 - multi-circle diffractometer 多環繞射儀 45
- O**
- optical second harmonic 光學二次諧波 47, 48
- P**
- phonon scattering 聲子色散 10, 12
 - piezoelectric materials 壓電材料 26, 31
 - profile imaging 側面像 23, 24
- R**
- reflection electron microscope 反射電子顯微鏡 23
 - reflection high energy electron diffractometer (RHEED) 高能電子繞射儀 23, 42-44

S

scanning probe microscopy (SPM) 掃描探針顯微術 29
scanning transmission electron microscope (STEM) 掃描穿透電子顯微鏡 23-25
scanning tunneling microscope (STM) 掃描穿隧顯微鏡 26-28
scattering 散射 1, 10, 11, 13-15, 37, 38
secondary ion mass spectrometry (SIMS) 二次離子質譜分析 16-19, 20
secondary ion 二次離子 16-22
single-atom sensitivity 單一原子靈敏度 32
spatial resolution 空間分辨率 20, 21, 24
spherical sector analyzer (SSA) 球扇分析器 1-3
structural analysis 結構分析 13-15, 28
surface analysis 表面分析 4, 5, 12-16, 19, 31, 35, 36, 42, 52
surface atomic structure 表面原子結構 10, 33, 36, 39, 40
surface chemical analysis 表面化學分析 10

surface ionization ion gun 表面游離離子槍 16, 17

surface magneto-optical Kerr effect (SMOKE) 表面磁光柯爾效應 50-52

T

tapping mode 輕敲式 29, 30

transmission electron microscope (TEM) 穿透電子顯微鏡 23

tunneling current 穿隧電流 26, 27, 29

U

ultra-vacuum 超高真空 2, 4, 6, 9, 12, 16, 25, 28, 33, 36, 38, 39, 40, 49, 52

X

X-ray photoelectron spectrometer (XPS) X 光光電子能譜儀 5, 6, 52

X-ray total reflection X 光全反射 45

儀器總覽—表面分析儀器

發行人／黃文雄

發行所／行政院國家科學委員會精密儀器發展中心

新竹市科學工業園區研發六路 20 號

電話：(03) 5779911 轉 303, 304

傳真：(03) 5773947

編輯／伍秀菁·汪若文·林美吟

美術編輯／吳振勇

初版／中華民國八十七年十月

初版三刷／中華民國一百零八年十月

行政院新聞局出版事業登記證局版臺業字第 2661 號

定價／單冊新台幣 200 元·全套新台幣 2200 元

郵撥戶號／0017343-1 國科會精密儀器發展中心

打字／志丞商業設計社 (03) 5617562

印刷／泰銘照像製版社有限公司 (06) 2910838

ISBN 957-02-2526-2 (套)

ISBN 957-02-2532-7

國家圖書館出版品預行編目資料

儀器總覽 = Introduction to instrumentation
/ 伍秀菁, 汪若文, 林美吟編輯. -- 初版. --
新竹市 : 國科會精儀中心, 民87
冊 ; 公分
含索引
ISBN 957-02-2526-2 (一套 : 平裝)

1. 精密機械工業 - 儀器 - 手冊, 便覽

471.026

87012756