

臺灣二〇〇七年國際科學展覽會

科 別：物理學

作 品 名 稱：製作簡易 STM

得 獎 獎 項：第三名

學校 / 作者：國立臺中第一高級中學
國立臺中第一高級中學

王彥凱
謝曜聰

作者簡介



我是王彥凱，目前就讀台中一中二年級，從小就立定志向要朝理工方面發展，在老師的鼓勵之下，高一時就參與專題研究，並從中學習獨立思考的能力，在過程中也時常遇到挫折，使我非常沮喪，但排除困難之後的喜悅卻又彌補先前失落的心情，總之，能親自動手參與科展的製作確實使我更親近科學了。

作者簡介



我是謝曜聰，來自南投水里，目前是高二。在國中就發現自己對物理有較多的興趣，也很喜歡實際動手組裝機械或是操作儀器，平時會閱讀有關於物理的科普書或是雜誌。在升上高中後也因為興趣而加入了物理研討社且擔任教學的工作，平時會和志同道合的朋友一起思考生活週遭的物理現象。在高一時以物理方面的問題作為專題研究的方向，也因為喜歡「動手做」所以選擇了這個製作儀器的題目。

Abstract

The major purpose of our project is to assemble a simple scanning tunneling microscopy with cheap and available materials for ordinary senior high school students. For example, we use springs for damping instead of electromotive force device. We weld all the electronic circuit boards for ourselves in order to not only lower the cost but also inspect the inner structure more clearly and precisely. After the microscopy is assembled, we will use it as an appliance to observe the samples of nano-particles. We must repeat this procedure several times so as to make sure that the images we've gained is true, not just some disturbances produced by the environment. Finally, the microscopy can be applied to research fields as well as academic courses.

目錄

目錄	2
摘要	3
研究動機	3
研究目的	3
研究原理	3
研究器材	6
研究過程及方法	7
研究結果	10
討論	13
結論	14
參考資料	14

壹、 摘要

掃描式穿隧顯微鏡(Scanning Tunneling Microscope)，是在奈米尺度下觀察物體表面的一大利器。但一台精密的 STM，造價動輒數百萬元新台幣，本研究嘗試利用簡單、便宜的材料，製作一台簡易的掃描式穿隧顯微鏡。眾所皆知：掃描式穿隧顯微鏡的關鍵，就是量子力學中的穿隧效應原理，及壓電材料的應用，所以這些主題都是本實驗涉及的內容。除此之外，我們也運用簡單的物理原理，取代價格高昂的儀器，例如：利用彈簧代替昂貴的避震系統等。此研究利用穿隧效應的原理，並進而利用電腦得知樣品表面的結構，以達顯微鏡觀察分析物體之功用。

貳、 研究動機

在基礎物理課本上，由原子排列而成的「原子」字樣，引發了我們對微觀尺度下原子操縱技術的好奇心，也對近年來興起的奈米科技萌發興趣，想要更深入的瞭解。經過一段時間的摸索與學習，得知掃描式穿隧電子顯微鏡（STM）有原子操縱的功能，但對於高中生而言，動輒數十萬的商用掃描式穿隧電子顯微鏡，實在不易接觸到、價格太過昂貴、操作流程也十分繁複。考慮到這些因素後，我們希望能自製一臺簡易的掃描式穿隧電子顯微鏡，運用廉價易取得的材料，例如：以簡便的彈簧代替氮氣避震系統，來自製一臺簡易的掃描式穿隧電子顯微鏡。如此，非但在製作的過程中，我們可以透徹瞭解其工作原理，也可以從中獲得莫大的成就感，就是這個動機促成了我們的研究。

參、 研究目的

- 一、了解掃描式穿隧電子顯微鏡，從而製造一台簡易的 STM。
- 二、以自製掃描式穿隧電子顯微鏡，觀測標準樣品及石墨之表面奈米結構。

肆、 研究原理

一、各式電子顯微鏡之比較

- （一）掃描電子顯微鏡（Scanning electron microscope，SEM）是一種電子顯微鏡，它能產生樣本表面的高解析度圖像。由於圖像三維的特點，掃描電子顯微鏡，能被用來鑒定樣本的表面結構。掃描電子顯微鏡中的電子束，盡量聚焦在樣本的一小塊地方，然後一行一行地掃描樣本。入射的電子，導致樣本表面散發出電子，顯微鏡觀察的，是這些由每個點散射出來的電子。由於這樣的顯微鏡中電子，不必透射樣本，因此其電子加速的電壓不必非常高。場發射掃描電子顯微鏡，是一種比較簡單的電子顯微鏡，它觀察樣本上，因強電場導致的場發射，所散發出來的電子[1]。
- （二）透射電子顯微鏡（Transmission Electron Microscope TEM，穿透式電子顯微鏡）是把經加速和聚集的電子束，投射到非常薄的樣品上，電子與樣品中的原子碰撞而改變方向，從而產生立體角散射。散射角的大小與樣

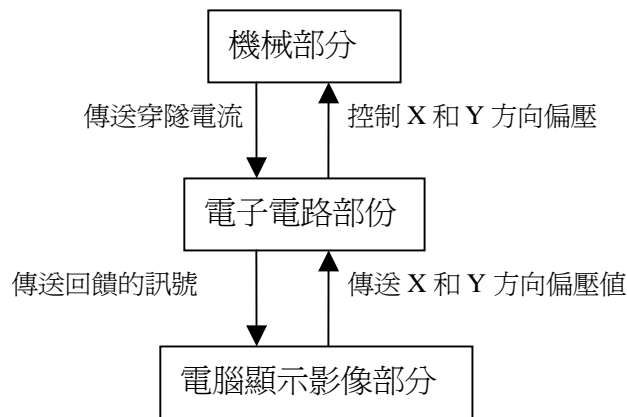
品的密度、厚度相關，因此可以形成明暗不同的影像。通常，透射電子顯微鏡的解析度為 0.1~0.2nm，放大倍數為幾萬~百萬倍，用於觀察超微結構，即小於 0.2 μ m、光學顯微鏡下無法看清的結構，又稱「亞顯微結構」。

利用透射電子顯微鏡，可以直接獲得一個樣本的投影。在這種顯微鏡中，電子穿過樣本，因此樣本必須非常薄。組成樣本的原子的原子量、加速電子的電壓和所希望獲得的解析度決定樣本的厚度。樣本的厚度可以從數奈米到數微米不等。原子量越高、電壓越低，樣本就必須越薄。通過改變物鏡的透鏡系統，人們可以直接放大物鏡的焦點的像。由此人們可以獲得電子繞射像。使用這個像可以分析樣本的晶體結構[2]。

(三) 在能量過濾透過式電子顯微鏡 (Energy Filtered Transmission Electron Microscope, EFTEM) 中，人們可測量電子通過樣本時的速度改變。由此可以推測出樣本的化學組成，比如化學元素在樣本內的分佈[3]。

二、自製電子顯微鏡的工作原理

簡易 STM 大致分成三個主要部份，分別是機械設計硬體系統、電子控制系統和電腦影像系統。其作業流程的連結，略如下圖所示：



接著，我們分別敘述如下：

(一) 硬體機械系統的力學原理

1. 槓桿及螺旋

我們利用三根螺柱，支撐連接探針部份的銅板，利用靠近探針的兩根螺柱作為粗調節，將針尖降到接近物體表面，再利用遠端螺柱作為細調節，螺絲旋轉 1 圈可升降 3.2×10^{-4} m，利用粗調節將探針接近樣品，在探針快撞針時，固定粗調節的高度，轉而調整細調節，我們設定探針到粗調節連線的垂直距離，與細調節到粗調節連線的垂直距離的比例為 1:100，也就是細調節旋轉一圈，可使探針升降 3.2×10^{-4} m / 100 = 3.2×10^{-6} m，但是操作時並不會快速的旋轉 1 圈，假設

每次旋轉 1/10 圈，即可使探針升降的高度降至 $3.2 \times 10^{-7} \text{m} = 320 \text{奈米}$ ，事實上旋轉 1/10 圈是可以再縮小的，縮小的範圍視情況而定，假設已經量測到穿隧電流，就必須使用比 1/10 圈更小的旋轉圈數。

2. 壓電材料

壓電材料在給予電壓時會產生形變，可利用控制電壓的方式來控制壓電材料的形變量，但是形變量極小，所以適合做為控制微小距離的材料。

3. 震盪隔絕(參考文獻二)

對於處在原子尺度工作環境下的 STM 來說，震盪之隔絕為一關鍵性因素。典型樣本的振幅起伏約在 0.1 埃左右，因此來自外界的震盪，必須降至 0.01 埃以下。來自空氣及地板的震動，經由外部骨架傳至 STM，我們首要解決的問題，便是如何適當的增加載重，使傳來的震動幅度減至最低。最基本的做法，是將重物透過彈簧與骨架連接，達到阻尼的目的，如此，作用在 STM 主體上的恢復力 f 可表為

$$f = -k(x - X)$$

k 為彈力常數， X 為 STM 骨架的位移， x 為重物的位移。或

$$f = -c(v - V)$$

c 為阻尼常數， V 為 STM 骨架的速度， v 為重物的速度。

而系統的自然振動頻率

$$f_0 = 2\pi \sqrt{\frac{g}{\Delta L}} \approx \frac{5.0}{\sqrt{\Delta L(\text{cm})}}$$

若欲使其頻率為 1 赫茲，則取適當重物使彈簧伸長 25 公分即可。

(二) 電子控制系統的原理

掃描的原理，是由電腦程式發出訊號至控制盒內的 XYZ Positioning 電路，經處理後，再分別傳至壓電材料，使之進行掃描的動作。至於掃描所需的穿隧電流，是電腦提供的偏壓，經由控制盒傳至樣品，使之和探針產生穿隧電流，讀取訊號並經過放大器，



電子控制盒 (圖 1)

再由回饋機制控制壓電材料。而此訊號經類比轉為數位傳進電腦，再由程式判斷並繪製成圖像。

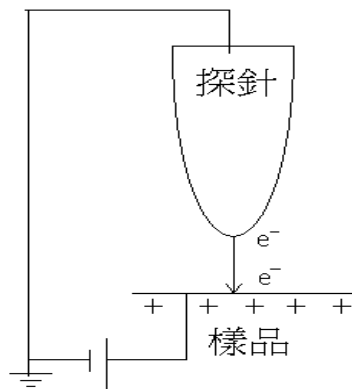
(三) 探針的種類

STM 探針的材質有很多種，常用的有金(Au)、鎢(Wu)、鉑銱合金(Pt-Ir)等。金的優點為延展性佳，且由於原子間作用力小，若我們瞬間加高電壓，則金原子將被激發成游離態，而隨著穿隧電流打在樣品上，因此可用來製作樣品表面的奈米顆粒，或其他的表面加工。至於鎢，其原子間作用力大，即使加至很高的電壓，鎢原子也不易游離，因此有較高比例的電子打在樣品上，掃描結果的準確度相對較高。鉑銱合金對溫度的敏感度低，不易因熱脹冷縮使得探針長度有所改變，也可以提升準確度。

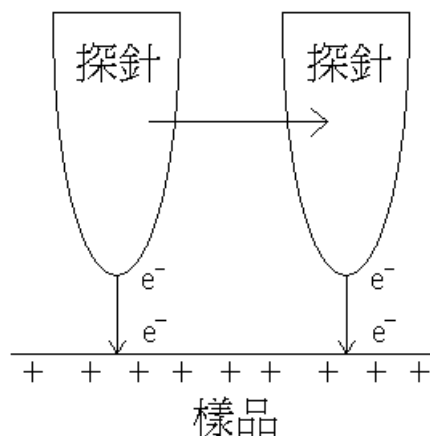
(四) 取像法

簡易 STM 使用的取像方法，是定電流取像法。藉由電路控制，使探針沿物體表面做掃描的動作，並保持一定的穿隧電流。若電流過大，則減少電壓使探針縮回；過小則加大電壓使探針伸長，如此探針就會隨著物體表面起伏(如下圖所示)。再經由電腦做影像處理，便可得到物體表面的圖片。

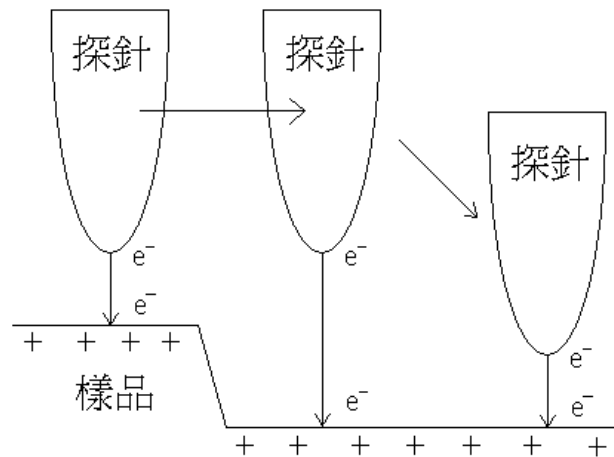
1. 第一步: 產生穿隧電流



2. 利用控制壓電材料 XY 方向電壓，使探針開始掃描。



3. 假設表面凹陷，則所量到的穿隧電流變小，經由回饋系統，控制 z 方向的電壓，使探針接近樣品以恢復到參考的穿隧電流值，反之亦然。



伍、 研究器材

- 一、 自製電子電路板
- 二、 壓電材料
- 三、 自製探針
- 四、 自製機架
- 五、 電腦及掃描程式
- 六、 熱蒸鍍機組
- 七、 化學儀器（燒杯、U 形管…等）
- 八、 化學藥劑（氫氧化鉀、氯化氫水溶液）
- 九、 鉚槍

陸、 研究過程及方法

一、顯微鏡製作

（一）硬體設備

1. 彈簧

使用彈簧是爲了製作便宜的避震系統，可以避免震動對儀器的影響。然而彈簧也必須垂直於儀器，以避免產生與探針方向垂直的震動。

2. 絕緣材料

爲了使探針與樣品之間產生穿隧電流，必須在樣品上給予一個正偏壓，爲了避免外界雜訊的影響，所以我們會使用絕緣材料使樣品與外界絕緣。

3. 銅板

在研究原理中已經提過，爲了達到理想的避震效果，彈簧必須

至少伸長 25 cm(詳見 P.5)。由於銅板的密度較大，在同樣體積下有較大的質量，可以使彈簧伸長較長的距離。

4.鋁板

為了避免外界的電磁雜訊影響，在探針和樣品周圍以鋁板隔絕，以降低外界的雜訊干擾。

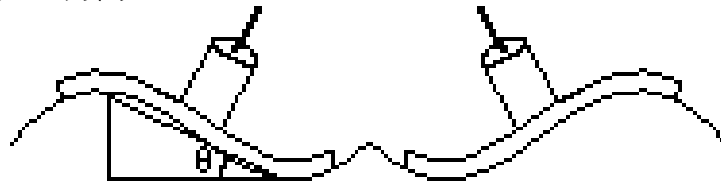
(二) 顯微部份

壓電材料：我們使用高硬度的鎢筆將壓電材料直角切割成四等分(如圖)使之間不互相導通。將壓電材料底部的銅片接地，若供與四個電極(+X.-X.+Y.-Y)不同的電壓就會產生不同的形變量，如此就可以使針頭在 XY 方向做掃描的動作。所以我們將四個電極以具導電性的銀膠黏接出四條電線，以方便連接 XYZ Position 電子電路裝置。如下圖(1)所示，(參考文獻五)假設+X 及-X 電極各給予 $\pm 1V$ ，形變後兩端的高低差為 $1.6 \times 10^{-7} m$ ，最高點與最低點的水平距離相差 $10^{-2} m$ ，則因為 θ 很小，所以 $\theta \approx \tan\theta \approx 1.6 \times 10^{-5}$ ，則探針的位移就是探針尖端到壓電材料的距離乘上 θ ，假設探針尖端到壓電材料的距離為 $2.2 \times 10^{-2} m$ ，則位移為 $3.5 \times 10^{-8} m = 35$ 奈米。

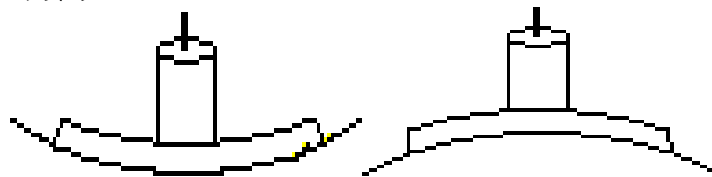


圖(2)

1.控制 XY 方向



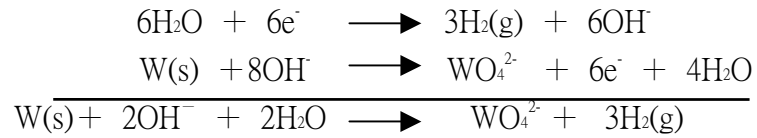
2.控制 Z 方向



(三) 探針(參考文獻三)

- 1.我們製作探針的方法，是利用 KOH 將金屬溶出，使金屬線變細。因為毛細現象，液面在與金屬線接觸的地方會凸起，稍高於其他處之液面。溶出的金屬離子比重較大，會往下沉，造成 KOH 溶液向下流動，並在液面與金屬線的交會處形成渦流，造成此處的金屬溶出速率較快，而較其他部分纖細。細至某一程度後，下端金屬線段的重量會將金屬線從最細處拉斷，形成針尖，此時必須立即切斷直流電，避免探針繼續被腐蝕。以鎢為例，製作探針時，將直流電正極接上待製的探針，負極接上金針，置於 KOH 溶液中。

其反應式如下：

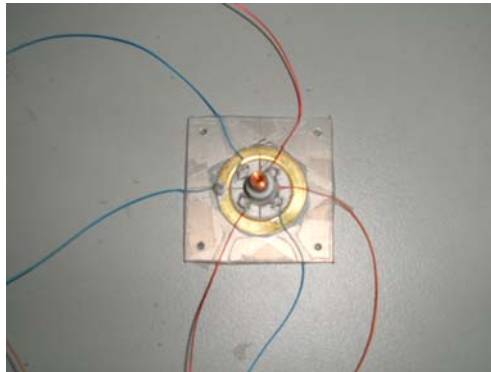


在這個過程中有許多變因要注意：電壓的大小、KOH 的濃度、盛裝容器的形狀及電極板的形狀。

2. 做好的探針將其放入一含有凹槽的銅柱之中，並且可以用螺絲將其固定住，以確保探針不會中途掉落。

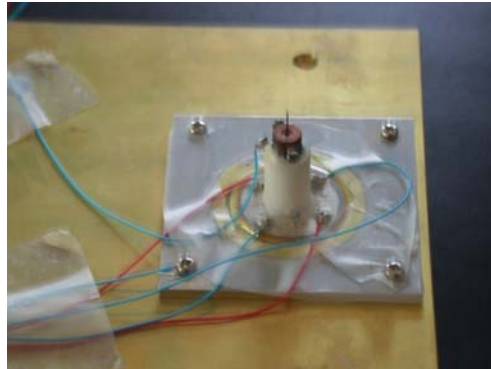
(四) 製作過程

(1) 準備一片壓電材料並用鎊刀畫分四塊，再個別黏上電線和裝置探針的 Cu 柱。



圖(3)

(2) 將黏好的壓電材料黏到 Cu 板上。



圖(4)

(3) 在 Al 板上鑽孔，以螺絲鎖上絕緣材料和樣品台及支撐銅板的螺柱



圖(5)

(4) 將黏有壓電材料的 Cu 板放到螺柱上。



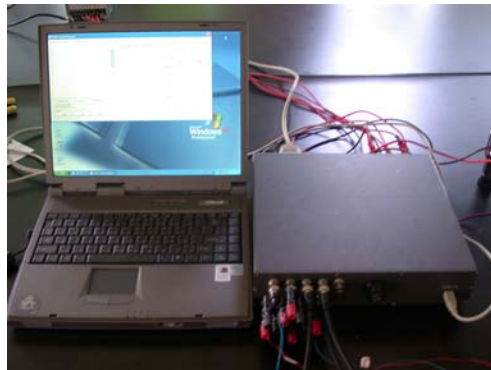
圖(6)

(5) 將阻擋電磁波的 Al 板以螺絲鎖上。



圖(7)

(6) 將電線連到電子控制盒最後再連接電腦。



圖(8)

三、操作方法

- (一) 換針
- (二) 利用粗調節螺柱進針：同時轉動兩根螺柱，將針尖降至樣品之上，但必須確認針尖及樣品之間仍有縫隙。
- (三) 闔上側板：隔絕外界的電磁雜訊。
- (四) 利用細調節螺柱進針：慢慢轉動螺柱並注意示波器，一旦出現穿隧電流即停止，以免針尖接觸到樣品而損壞。
- (五) 利用程式調整參數(掃描範圍、掃描速度、解析度)
- (六) 進行掃描

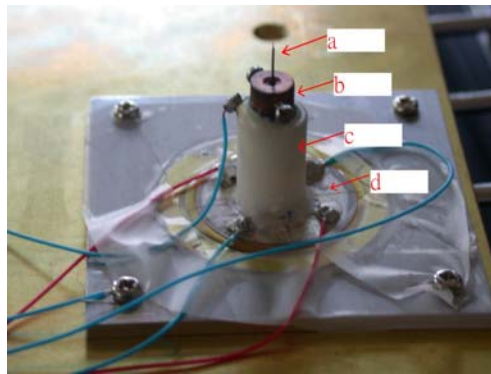
四、樣品製作

- (一) 將現成之金薄膜樣品置入石英管中，再置入加熱器中
- (二) 將樣品加熱至 100°C 兩個小時
- (三) 取出樣品待其冷卻至室溫即可進行掃描
- (四) 重複相同步驟加熱樣品至 200°C、300°C、400°及 500°C

柒、 研究結果

一、顯微鏡各主要部份之成品圖片

- (一) 針座，由下而上分別是 (a)探針、(b)銅柱、(c)絕緣材料、(d)壓電材料



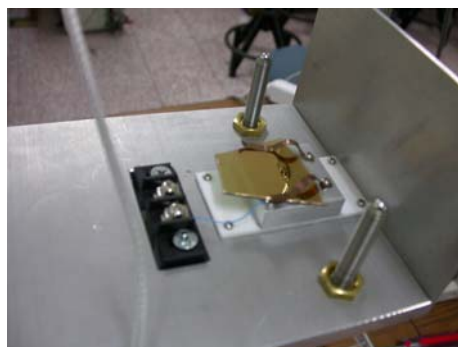
圖(9)

- (二) 作為槓桿的銅板，已黏上針座及電線。



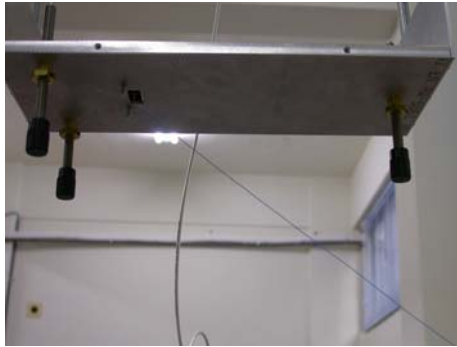
圖(10)

- (三) 樣品載台，其上有兩片銅片以夾住樣品及與樣品表面通電用，而兩側是作為粗調節的螺柱。



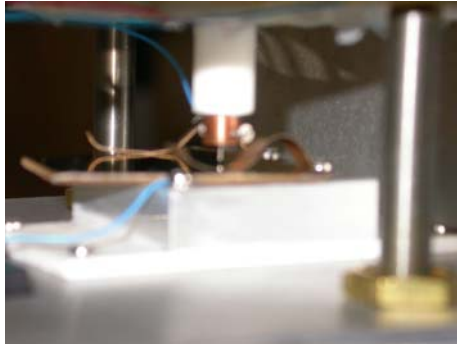
圖(11)

(四) 儀器下方的仰視圖，可以看到粗調節及細調節的相對位置



圖(12)

(五) 探針及樣品的相對位置



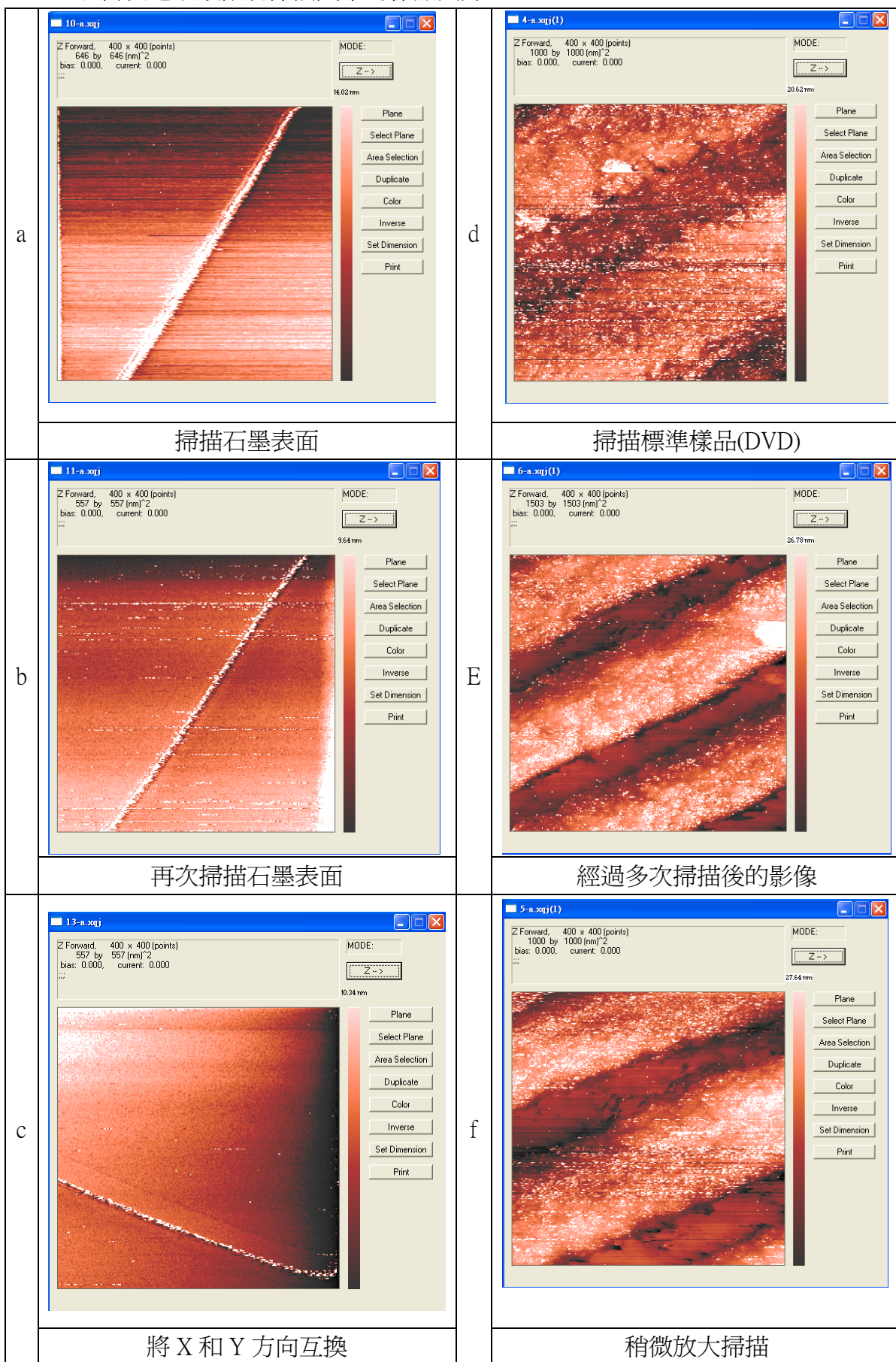
圖(13)

(六) 由左而右是電子控制盒、儀器、示波器、電腦



圖(14)

二、以自製電子顯微鏡掃描出來的樣品圖片



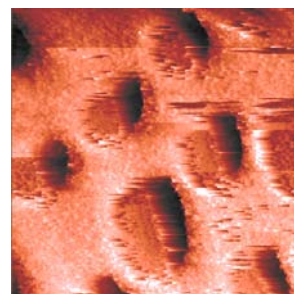
捌、 討論

一、 製作過程

- (一) 探針(鎢針)：理論上，電壓越大，反應速率越大。但經實際操作後發現：電壓過大，可能造成針尖形狀的畸異。探究其原因，可能是因為金屬溶出速率過快，使得液面處的渦流效果不彰，金屬線平均的變細，所以，斷裂處不一定在液面交接處，形成的針尖形狀，也就並非我們原先所期望的。我們要求的容器及電極板的形狀，主要用來消弭因距離所造成的反應速率不均等，進而使探針形狀不對稱。最原始的想法是以燒杯為容器，以金線為電極。但無論如何放置，金線與探針間總有相對的遠端和近端，近端的侵蝕速率快致使針尖向遠端偏移，使得其形狀不對稱。之後，我們嘗試用 U 型管代替燒杯，稍微削減遠端和近端相對差異的比例，但是結果仍不盡理想。(參考文獻四)最後發現點對稱的環狀電極，可徹底解決此疑慮，這也是我們目前找到最近理想的作法。當然，在製作探針的過程中，切斷電流的時間仍是最重要的參數。時間點抓得越精準，針尖越理想。根據數值顯示(參考文獻四)：若把針斷落及切斷電源的時差控制在 600 奈秒，則做出的針平均半徑為 32 奈米；時差若在 140 毫秒，平均半徑為 58 奈米；若是 640 毫秒，平均半徑約是 100 奈米。由這個數據可知道，時差越小越理想。
- (二) 底座：一開始我們使用 AB 膠將壓電材料黏到銅板上，可是這樣做後竟然掃不出圖！可能因為壓電材料被固定之後，就無法產生形變來移動探針，所以後來我們就只以膠帶將壓電材料黏貼到銅板上。
- (三) 側版：原有的設計並沒有兩側的鋁板，但實際操作後，發現背景的电磁雜訊有穿隧電流的十分之一強，足以影響掃描的品質，所以，我們在兩側，加上隔絕電磁波的鋁板，也把連接探針及放大器的訊號線，換成品質更好的 BNC 線，以盡量降低外界的電磁干擾。

二、 樣品

因為壓電材料能伸縮的範圍，只有幾微米而已，而且掃描的範圍很小(最大至幾十微米)。所以，STM 的樣品，必須非常平滑，且具有連續的結構，以利於判斷。由於石墨具有導電性，以及平整的表面，所以，我們一開始就使用石墨作為樣品以測試儀器的性能。在掃出石墨的表面(如前頁圖 a~圖 c)之後，我們繼續使用 DVD 作為測試材料，進而發現 DVD 具有重複的結構(如右圖)。



三、操作方法

我們發現探針的品質決定影像的好壞，如前頁掃描出來的圖片中圖 4 是一張有撞過樣品的探針所得到的影像，圖 5・圖 6 是撞針過後，經過多次掃描得到較清楚的影像。可以明顯看到：兩者的品質有極大的差異！所以，絕對不能撞針，要是不小心撞針，則要多掃幾次，試試看能不能恢復較好的品質。我們原本進針的方式是用粗調節儘可能讓探針接近樣品，以至於在利用細調節時，可能一不小心就發生撞針的情況，後來便利用現在方法，用細調節慢慢下降探針直到出現穿隧電流。我們接下來可能掃描金或是鉻的鍍膜，並尋找適合做為標準樣品的物體表面。

四、外在環境

掃描圖的過程中，必須做到使探針和樣品能夠和外界系統隔離，不論是利用彈簧作為避震，或者是利用鋁板隔絕電磁雜訊，也都是為了達到此目的，但是這台 S T M 卻很難隔絕因為溫差所造成的熱傳遞，造成探針或是樣品台產生熱膨冷縮的效應。相較於壓電效應，熱膨冷縮的效應就更為明顯，可能掃圖的過程中，探針就因為熱膨脹而撞針，或者遇冷收縮，使得穿隧電流過小而無法量測，所以必須在溫差小的地方掃圖才可。

玖、結論

- 一、雖然自製的掃描穿隧式顯微鏡，狀況還不是很穩定，但只要細心的慢慢調還是可以掃出與商用 STM 品質相當的圖片。亦即用數萬元材料，即可做出媲美百萬等級的儀器。
- 二、此儀器使我們真正見識到微觀世界的美。

拾、未來展望

- 一、接下來可能可能掃描金，或是鉻的鍍膜，並尋找適合作為標準樣品的物體表面。
- 一、將來配合程式可以對不同的樣品進行分析
- 二、之後可以就機械的部份進行改良，例如使用步進系統取代手動進針。

拾壹、參考資料

- 一、林明瑞 高中基礎物理，南一書局 2006
- 二、C. Julian Chen Introduction to Scanning Tunneling Microscope 1993 P237~p242
- 三、C. Julian Chen Introduction to Scanning Tunneling Microscope 1993 P281~p285
- 四、C. Julian Chen Introduction to Scanning Tunneling Microscope 1993 P284 Fig13.2.
- 五、http://www.geocities.com/spm_stm/index.html

評語

以高中生能實際製作出簡易的 STM，並得到掃描的圖像實屬不易。學生的動手能力令人印象深刻，值得鼓勵持續在科學研究上發展。