

# 開發節能型研究用之掃描式穿隧電流顯微鏡

學生：范戊靖

指導教授：簡紋濱 教授

國立交通大學電子物理學系碩士班

## 摘要

我們根據發展教學用掃描式穿隧電流顯微鏡的經驗，設計一台研究用的掃描式穿隧電流顯微鏡，希望能改善過去機台容易受外部振動雜訊與降低熱飄移對掃描的影響，並加入自動步進器使操作便利與可靠；而電路部分則欲將 Z 軸獨立來解決大範圍掃描時運算放大器飽和失真的問題，以及修改回饋電路 PI controller 提升 P Gain 的靈敏度。在機械結構部分，為解決教學版 STM 存在的震動雜訊和熱飄移現象，放棄舊有長方形的架構，改成圓形對稱的設計使各方向的熱膨脹現象均勻，降低環境溫度對機台影響。而在教學版 STM 因為影像不時會觀察到震動雜訊，為了加強避震系統對震動的抑制，研究型 STM 加入了磁鐵阻尼陣列，利用導體在磁場中運動會在導體內產生 Eddy current 抵抗磁通量變化來衰減 STM 系統對震動的響應改善掃圖的穩定性。以前使用傳統的手調步進，雖然機構簡單，但對使用者而言每次使用都須格外小心，否則很容易造成探針和樣品的碰撞，所以在機台設計上應設法避免此種情形。因此我們利用低電壓的壓電材料做出了機構簡單容易驅動的微型步進器，使研究型 STM 的操作部分得到簡化，而且拿掉許多手動步進的機構設計可以讓機構更對稱與增加剛性。

由於現有的掃描器最大掃描範圍約為  $4.2\mu\text{m} \times 4.2\mu\text{m}$ ，在部分樣品的掃描上稍有不足，首先我們利用三個低電壓 bimorph 壓電片組裝成大範圍的掃描器，成功將掃描範圍加至  $100\mu\text{m} \times 100\mu\text{m}$ ，有助於未來發展原子力顯微鏡所需的大範圍掃描器。另一方面我們也發展了鎢針蝕刻自動斷電系統，解決了傳統做針時因人工斷電容易使針尖品質參差不齊的問題，不僅節省時間也提高針尖的品質。

# **Design of green and research type scanning tunneling microscope**

Student : Wu-Jing Fan

Advisor : Prof. Wen-Bin Jian

Institute of Electrophysics

National Chiao Tung University

## **Abstract**

A new design of the green and research type scanning tunneling microscope (STM) is attempted in this thesis. To approach the green style, a low voltage, which reduces much energy consumption in comparison with that driven by a high voltage, is applied to drive the whole STM system, including the piezo scanner and the inertial movement of the step motor. In addition, the vibration isolation spring system is equipped with an eddy current damping system. With this damping system, even a considerable vibration fluctuation can be damped in couple seconds. More surprisingly, comparing with our educational STM, the new STM system has an ultra-low thermal drift probably owing to its symmetrical geometry centering around the tip-sample module. Finally, the design principles of integral and proportional gains, and the independent Z-axis scanner are discussed.

In the thesis, a large area scanner, driven by a low voltage, is developed as well. The scanning area achieves  $100\text{ }\mu\text{m}$  by  $100\text{ }\mu\text{m}$  which can be applied for applications in atomic force microscopy. In addition, an automatic tip maker which can make much sharper STM tips, is also mentioned.

## 致謝

兩年的碩士生涯一轉眼間就這樣結束了，現在回顧起來這兩年不僅學了不少東西，也受到大家很多的關照，能這樣順利的結束真的要歸功於大家的幫忙和自己微不足道的努力。

首先要先感謝我的指導教授簡紋濱老師，這兩年他給了我很彈性的發揮空間，在遇到困難時給予我指點與方向，在偏離軌道時能適時的把我抓回正軌，避免走許多冤枉路，因此才能在兩年準時完成我的碩士論文。

在這兩年內很感謝我的夥伴林光華幫我分擔很多工作以及和我一起思考問題到深夜，一起經過好幾次的實驗失敗與測試，才能最後一起完成學業，萬分感謝他的付出。實驗室的家長群彥甫、邱博、同輩的王博與楊博，碩二共同奮鬥的戰友加欣、雅琪、昶庭、包學長，碩一的學弟妹 明明、佩晴、凱迪、凱力，碩零的弈均與威佐，大家都幫我好多事情與袋給我很多歡樂，能拿到畢業證書還真的多虧了大家，因此我決定要好好一個個感謝你們。

也很感謝家中爸爸和媽媽的支持，感謝爸爸辛苦工作供應我學費與生活費，妹妹在平日在家陪伴母親邊準備重考，另外媽媽有好好養病讓身體漸漸好轉無非是希望能有機會看到我拿到碩士學位，這是很重要的動力之一，現在終於取得學位總算沒辜負你們的期望。

另外也很謝謝陪伴我兩年的女朋友王富蓁，因為有妳的陪伴鼓勵與支持，在遇到瓶頸很痛苦不想做的時候，也常常因為妳的鼓勵與建議讓我能很快的振作起來，不過常因為實驗進度與家裡媽媽的狀況把妳留在北部，很想對妳說這些日子妳也辛苦了~謝謝妳。

接下來以下獻給我最愛實驗室的夥伴：

感謝彥甫學長的教導與幫忙讓我們在操作不熟的機台能很快的上手，還有APP 後援讓我的桌面不再空虛。

感謝邱博的娃娃車在碩二的日子裡帶著我們避免風吹雨打去享受中餐與晚

餐，常常因為這樣暫時忘記實驗繁忙與難解的題目，能輕鬆的吃頓好飯。

感謝當了我室友六年的王聖聰，雖然後來還是沒有機會到你家釣隻鰻魚，但這六年可要謝謝你的陪伴阿，常常因為賤王和光華外宿咱們倆一起在寢室相依為命，後來兩年工作到很晚在實驗室也都是一起奮鬥，不過你剩下的兩年要自己加油囉，相信你可以很快取得你的博士學位。

感謝楊博碩二常常不在，讓我有個很好的測試環境後來才能順利完成我的研究型 STM，你的犧牲是何等的崇高，我永遠記得。

感謝當了兩年室友四年大學同學的昶庭哥，能和前無古人後為來者的你一起工作時在是萬分的榮幸，雖然實驗部分沒有交集，但在一同生活的日子裡還是十分的有趣，希望以後有緣還能一起去台 G 找光華在一起當同事。

感謝經營雅琪小鋪的李雅琪，常從妳這得到寶貴第一手的合購與網拍資訊，等未來雅琪小鋪順利開張的時候我一定會去捧場的，現在開始懷念與你一起念張加欣：你兇屁阿 的時光了。

感謝大聲公張加欣，雖然才認識短短兩年但我已經有聽力受損的徵兆了，不過你也算是實驗室的開心果，能和你在一起做實驗局得很開心，這雙耳朵真的不算什麼。

感謝凱迪與凱力，為什麼要把你們寫在一起呢？絕對不是因為頁數限制，是因為我怕記錯是誰幫我做過哪些事，感謝幫我拍探針的 SEM 影像圖和掃 AFM，以及簡單的跑腿和晚上常用吉他演奏一些輕快的音樂讓我繁忙煩躁的心立刻輕如止水。

感謝明明的修圖，讓我的獅子能更加生動，我口試能如此順利都靠那張圖了！一直還沒有機會騎到你的金旺覺得有些可惜，不過我還會再回來的。

感謝佩晴的幫忙，讓聰哥哥做實驗任勞任怨都不喊累，讓我們家的聰哥哥能安心的坐下來念 paper，你的付出我會叫聰哥哥記在心裡的。

最後謝謝你們碩一所安排的宜蘭遊~~真的很棒!!還有可憐的弈均與威佐辛苦啦!

# 目錄

第一章、緒論與動機 .....	1
第二章、掃描式穿隧電流顯微鏡介紹 .....	3
2.1 掃描式穿隧電流顯微鏡 .....	3
2.1.1 掃描穿隧式電流顯微鏡簡介 .....	3
2.1.2 STM 掃描模式 .....	5
2.2 壓電效應介紹與應用 .....	6
2.3 量子穿隧效應原理介紹 .....	9
2.4 避震系統.....	12
2.4.1 一維彈簧避震系統 .....	12
2.4.2 Edyy-current 阻尼器 .....	17
2.5 步進器的種類與介紹 .....	18
2.5.1 Inchworm stepper.....	18
2.5.2 Slider stepper.....	19
2.6 PID controller 原理介紹.....	20
2.6.1 PID controller 簡介.....	20
2.6.2 比例修正項(Proportional term).....	21
2.6.3 積分修正項(Integral term).....	22
2.6.4 微分修正項(Derivative term).....	22
第三章、實驗成果(一) 低電壓掃描式穿隧電流顯微鏡 .....	23
3.1 自製低電壓掃描式穿隧電流顯微鏡架構介紹 .....	23
3.2 機械結構.....	23
3.2.1 低電壓掃描器 .....	24
3.2.2 低電壓自動步進器 .....	25
3.2.3 避震系統.....	29

3.2.4 阻尼系統.....	30
3.3 穿隧電流顯微鏡電路設計 .....	31
3.3.1 電流放大器 .....	31
3.3.2 絕對值電路 .....	32
3.3.3 回饋電路 PI controller.....	32
3.3.4 掃描器 XY 控制電路 .....	36
3.4 掃描程式.....	37
3.5 結果與討論 .....	39
第四章、實驗成果(二) 大範圍掃描器與作針系統 .....	43
4.1 大範圍掃描器設計與成果 .....	43
4.2 自動製作探針系統 .....	47
第五章、結論 .....	51
參考文獻.....	53



## 圖目錄

圖 1.1 Nanovie STM EDUCA .....	1
圖 1.2 國立交通大學推廣 STM 普物實驗課程實況 .....	1
圖 2.1 STM 原理說明 .....	4
圖 2.2 定電流模式與定高度模式示意圖[1] .....	5
圖 2.3 正逆壓電效應示意圖 .....	6
圖 2.4 縱向致動器[3] .....	7
圖 2.5 橫向致動器[3] .....	7
圖 2.6 d33係數[3] .....	7
圖 2.7 d31係數[3] .....	7
圖 2.8 伸展致動器[3] .....	8
圖 2.9 彎曲致動器[3] .....	8
圖 2.10 推疊致動器[3] .....	8
圖 2.11 古典世界與量子世界的差異[4] .....	9
圖 2.12 樣品與探針間穿隧效應示意圖[5] .....	10
圖 2.13 將 STM 避震系統類比為一維彈簧避震系統示意圖[6] .....	12
圖 2.14 探討 STM 剛性的模型介紹 .....	15
圖 2.15 eddy current 分析模型示意圖[6] .....	17
圖 2.16 Inchworm stepper 移動拆解步驟說明[6] .....	19
圖 2.17 PID controller 示意圖[8] .....	20
圖 2.18 P gain 大小對輸出的影響示意圖[8] .....	21
圖 2.19 I gain 大小對輸出的影響[8] .....	22
圖 2.20 D gain 大小對輸出的影響[8] .....	22
圖 3.1 低電壓掃描式穿隧電流顯微鏡架構圖 .....	23
圖 3.2 彈簧懸吊臂位置與動作示意圖 .....	23
圖 3.3 調整使下方 STM 主體保持水平 .....	23
圖 3.4 研究型 STM 掃描器驅動方式 .....	24
圖 3.5 舊版使用的驅動方式 .....	24

圖 3.6	掃描器的組裝與固定方式.....	25
圖 3.7	藍寶石棒與蜂鳴片結合方式	26
圖 3.8	三角軌道步進元件.....	26
圖 3.9	長方形軌道步進元件.....	26
圖 3.10	步進器元件與藍寶石棒接觸位置示意圖.....	27
圖 3.11	螺絲調整彈簧調整正向力.....	27
圖 3.12	步進器往前步進示意圖.....	28
圖 3.13	步進器驅動電壓波型與動作對照圖.....	28
圖 3.14	彈簧懸吊系統位置與 STM 主體懸吊置於 eddy current 阻尼陣列中，平衡時磁鐵應在兩個鰭片之間。.....	29
圖 3.14	磁鐵等距排列於下板	30
圖 3.16	任兩磁鐵間均有相吸的磁場	30
圖 3.17	鰭片完全浸在磁場中，此時受磁場作用面積為最大.....	30
圖 3.18	穿隧電流放大器電路圖.....	31
圖 3.19	絕對值電路.....	32
圖 3.20	PI controller 回饋機制示意圖.....	33
圖 3.21	$error(t)$ 計算電路圖.....	33
圖 3.22	積分修正項電路圖.....	34
圖 3.23	比例修正項電路圖.....	35
圖 3.24	加法器 將比例修正項與積分修正項相加送給 Z 軸驅動電路.....	35
圖 3.25	X 軸驅動電路，透過兩個反向器得到+X 與-X 電壓 .....	36
圖 3.26	Y 軸驅動電路，透過兩個反向器得到+Y 與-Y 電壓 .....	36
圖 3.27	程式介面與功能簡介。.....	37
圖 3.28	步進器控制介面.....	38
圖 3.29	藉由機台的高對稱來改善熱飄移現象.....	39
圖 3.30	Z 軸未獨立可能造成最大範圍掃描時飽和失真現象 .....	40
圖 3.31	Z 軸獨立後，在最大範圍掃描時沒有飽和失真的現象 .....	40

圖 3.32 舊版回饋電路積分修正項與比例修正項為串聯設計.....	41
圖 3.33 舊版回饋電路流程方塊圖.....	41
圖 3.34 積分修正項與比例修正項並聯後，銳利度提升.....	42
圖 4.1 市售 bimroph 外觀壓電片外觀      圖 4.2 由 bimroph 組成的三軸掃描器	43
圖 4.3 重新訂做的 bimroph 壓電片 .....	44
圖 4.4 掃描器的組裝與成品示意圖.....	44
圖 4.5 掃描器固定模具爆炸圖與示意圖.....	44
圖 4.6 掃描器驅動電壓接法示意圖.....	45
圖 4.7 當驅動電壓範圍為-3V~3V 時，約可以少到 20 的週期，換算範圍約為 14um*14um .....	45
圖 4.8 約 4.5 週期的 DVD 溝槽，推算其範圍約為 3.15um*3.15um.....	46
圖 4.9 藍光 DVD.....	46
圖 4.10 鎢針蝕刻時電流隨時間變化關係圖.....	47
圖 4.11 測試蝕刻斷電的電路圖.....	48
圖 4.12 Labview 程式碼.....	48
圖 4.13 本自動斷電系統製作探針的 SEM 影像 .....	49
圖 4.14 程式執行介面.....	49
圖 4.15 自動做針概念版.....	50

# 第一章、緒論與動機

本實驗室自與奈維公司合作以來，便致力開發教學型掃描式穿隧電流顯微鏡，抱著推廣表面物理與奈米科技至大專院校、高級中學甚至到一般民眾都能對其有一定認知的理念，我們於 2009 發表第五代產品 STM EDUCA，其搭載了低電壓掃描器、奈米級手動步進器、小型電控盒與方便攜帶與展示的主體，如圖 1.1。

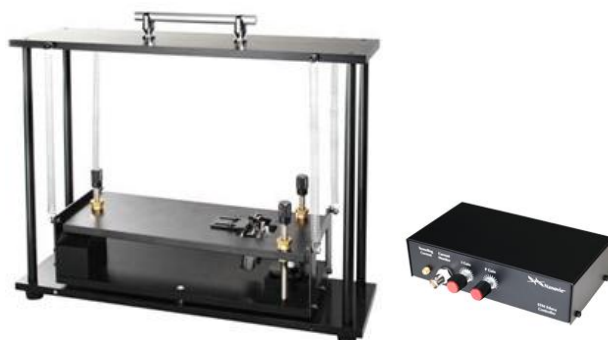


圖 1.1 Nanovie STM EDUCA

由於其輕巧且使用低電壓掃描器，使 STM EDUCA 具備方便移動及操作安全等優點，很快我們便陸續推廣到各大專院校成為普物實驗的教學器材，如淡江大學、成功大學、中興大學、東海大學、東華大學、高雄大學、交通大學、中山大學、文化大學、聯合大學、中原大學與台東大學等十二所大專院校，還有一台在高雄工藝館展示，讓社會大眾能有機會一窺表面物理的奧妙，甚至連日本的學校都有購買我們的產品，其中交通大學更成為我們的示範教學與合作的大學，圖 1.2 為交通大學推廣 STM 普物實驗課程實況。



圖 1.2 國立交通大學推廣 STM 普物實驗課程實況

透過合作與售後服務中我們逐漸發現 STM EDUCA 仍有些待改善的問題。經由不斷改良部分機械結構、驅動電路與操控軟體，現在已有獲得部分的解決，但部分問題礙於機台先天限制無法有效改善，如手動步進器在操作需要相當的細心與熟練度，在推廣上學生需要一段時間的練習與摸索；以及在掃描地貌起伏小的樣品時，會因震動影響掃圖結果。還有因機台的不對稱性在溫度不穩定的環境中會出現熱飄移的現象。因為這些待改進的問題推動我們積極投入下一套研究版的掃描式穿隧電流顯微鏡 STM Lepto 的研發。



## 第二章、掃描式穿隧電流顯微鏡介紹

### 2.1 掃描式穿隧電流顯微鏡

#### 2.1.1 掃描穿隧式電流顯微鏡簡介

掃描隧道顯微鏡 (scanning tunneling microscope, STM)，是一種利用量子理論中的隧道效應探測物質表面結構的儀器。它由 1981 年格爾德·賓寧及海因里希·羅雷爾在 IBM 位於瑞士蘇黎世的蘇黎世實驗室發明，兩位發明者更因此與恩斯特·魯斯卡分享了 1986 年諾貝爾物理學獎。STM 作為一種掃描探針顯微術工具，可以讓科學家觀察甚至定位單個原子，它具有比它的同類原子力顯微鏡擁有更高的解析度。掃描隧道顯微鏡工作溫度範圍很廣，從液態氮的溫度到 1200K 都能工作。在低溫下更可以利用探針尖端精確操縱原子，而且它除了可以高真空中使用之外亦可以在大氣中工作，甚至可在液體中工作，因此掃描式穿隧電子顯微鏡成為目前作為極小區域探測，尤其是在原子尺度之觀察的主要工具。

掃描式穿隧電流顯微鏡主要利用量子物理中的穿隧現象來觀測樣品表面的地貌，而穿隧電流的產生是因為探針的尖端與樣品互相靠近使表面電子波函數重疊後，並外加電位形成高電場誘使電子穿越這個位障形成穿隧電流。因為穿隧電流大小與探針針尖到樣品表面間距成指數遞減的，當距離增加  $1\text{\AA}$  時，所以電流會減少為原本的十分之一，利用這敏感的特性，當探針在樣品表面掃描時，若保持穿隧電流為定值，記錄探針針尖的高低位置，其得到的影像便為樣品表面的地貌。

整個 STM 核心可分作四個區塊，機械主體、前置電流放大器、PI 回授控制電路以及 XY 掃描電路，如圖 2.1。首先由前置放大器收集穿隧電流放大轉成電壓訊號交給 PI 回授控制電路，此電路計算與設定的穿隧電流的差值，由這些差值搭配 I gain 與 P gain 的大小決定回授到 Z 軸的電壓，決定該增加 Z 軸電壓使針尖往樣品靠近增加穿隧電流，還是減少 Z 軸電壓使針尖稍遠離樣品減少穿隧電流，由 XY 掃描電路做樣品的掃描同時記錄此施加在 Z 軸電壓值形成樣品地貌的資訊，由電腦去計算出表面高低差轉成亮暗對比的 STM 影像。

機械主體在設計上必須提供良好的鋼性，使 STM 在掃描樣品時能避免外界環境的影響，如溫差變化會使圖像出現熱飄移的現象，所以設計上常做成圓對稱使各方向熱膨脹一致。又由於 STM 在進行掃圖時，針尖與樣品十分的靠近，外界的震動如聲波與地面傳來的震動都會產生很大的影響，如果無法將這些外界震動有效的隔離，容易造成回饋電路反應不及，使樣品與探針碰撞不僅會破壞樣品更嚴重影響掃圖的品質。所以避震系統設計的目的就是盡可能的避免外界環境的震動傳入掃描裝置，常見的做法為搭配彈簧懸吊搭配阻尼系統或光學避震桌，使 STM 震動對掃圖的影響降至最低。

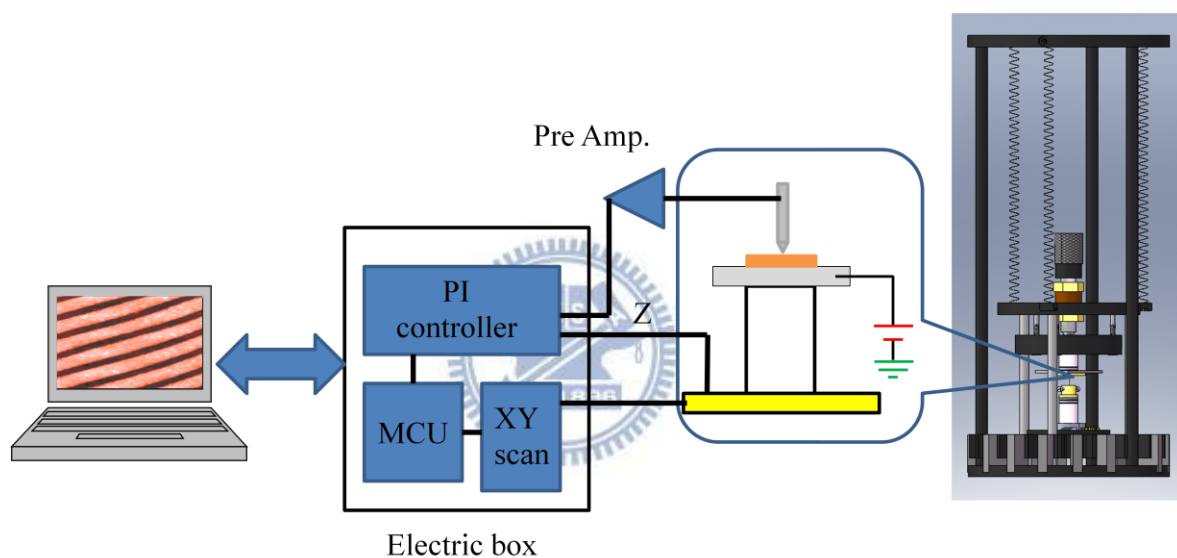


圖 2.1 STM 原理說明

### 2.1.2 STM 掃描模式

STM 掃描模式分成定電流模式(constant current mode)與定高度模式(constant height mode)兩種，不同的模式成像機制不同，所以需要回饋電路要做不同的控制。

當使用定電流模式時，STM 探針掃描樣品時，遇到表面上下起伏所量得的穿隧電流會因探針與樣品之間的間距改變而增加或減少，為了維持定電流回饋電路需要改變驅動 Z 軸的電壓以維持設定的穿隧電流，電腦再根據送出的 Z 軸驅動電壓，換算出樣品地貌的高低資訊。

定高度模式，顧名思義是保持 Z 軸方向固定做 XY 平面的掃描，實現辦法為關閉回饋電路，使掃描器在 Z 軸固定的狀態下掃描樣品，因樣品地貌的高低起伏會得到不同的穿隧電流，電腦在依據這些穿隧電流的數值推算出樣品地貌的資訊，如圖 2.2。也因為關閉回饋電路不需等 Z 軸穩定，所以在定高度模式下掃圖會比定電流模式快，不過僅能使用在表面相對平坦的樣品。

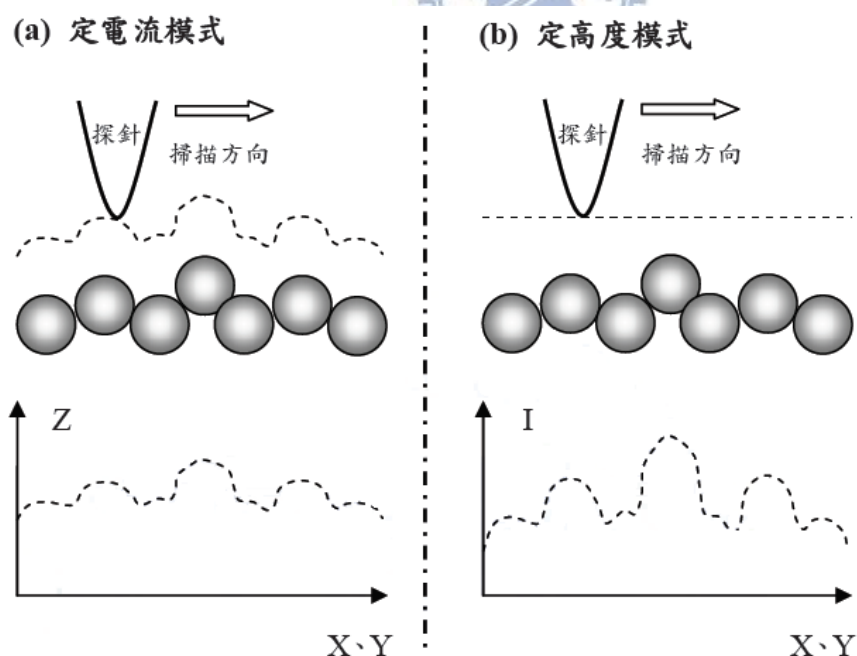


圖 2.2 定電流模式與定高度模式示意圖[1]

## 2.2 壓電效應介紹與應用

壓電效應為材料中機械能與電能互換的一種現象，此現象是在西元一八八零年由居禮兄弟發現的。他們發現了兩種現象，當一些自然非對稱晶體受壓的時候，它會因應其壓力的大小而電極化，產生電場；其二是同一塊晶體在電場下會變形。這兩種特性被稱為順壓電效應(或正壓電效應)及逆壓電效應(或負壓電效應)，而且實際上是線性和依賴方向的效應。如圖 2.3 所示，在電極化方向上施加壓力及拉力會產生電場，同時亦產生電壓。而這個現象是可逆的，即是說沿著電極化方向施加電場時，該材料會根據電場的方向膨脹或收縮。這兩種壓電效應主要應用在感應器或發送器，及傳動裝置或引擎上。就是這雙功能特性，壓電體可以應用在換能器上，互換電能及機械能上。

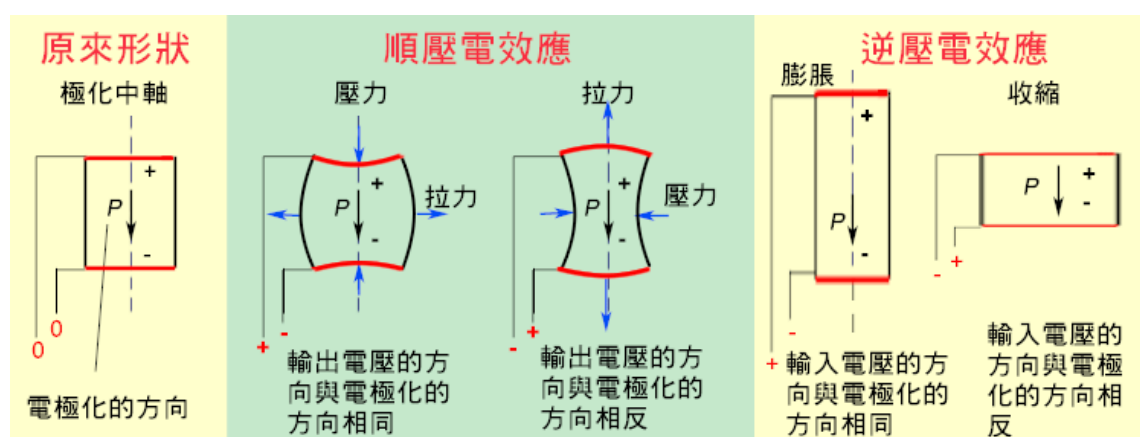


圖 2.3 正逆壓電效應示意圖

利用逆電壓效應的壓電元件將電壓或電荷轉換為力和移動，稱為壓電致動器 (piezo actuators or piezo motors)。一般可分為單層致動器 (single layer motors)、雙層致動器 (2.layer motors)、多層致動器 (multi.layer motors) 等三類 [3]。

單層致動器，當外加一與極化方向相同的電場時，在縱向方向會為了抵抗外加電場而伸長，這縱向伸長的特性稱作縱向致動器 (longitudinal (d33) motor) 如圖 2.4。而同時在平行極化方向的也會收縮，以維持整體體積不變，這個特性稱為橫向致動器 (transverse (d31) motor) 如圖 2.5，由於外加一偏壓會在與極化方向水平和鉛直的方向產生形變可用縱向和橫向致動器組合來描述，所以又稱做縱向與

橫向致動器(longitudinal and transverse motor)。

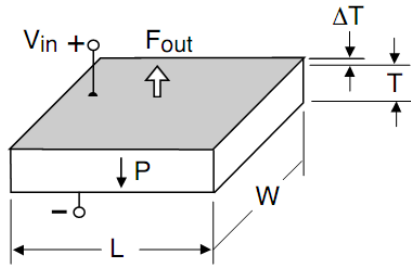


圖 2.4 縱向致動器[3]

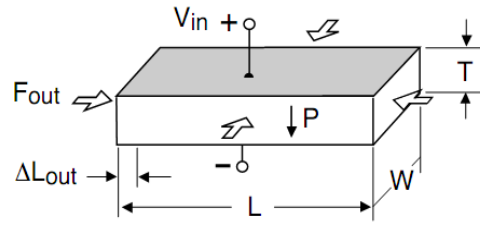


圖 2.5 橫向致動器[3]

其中平行極化方向伸展量可以用 $d_{33}$ 係數描述， $\Delta T = Vd_{33}$ ，如圖 2.6。而垂直極化方向的伸縮量則用 $d_{31}$ 描述， $\frac{\Delta L}{L} = \frac{\Delta W}{W} = \frac{Vd_{31}}{T}$ ，如圖 2.7，其中 V 為施加於致動器的電壓。

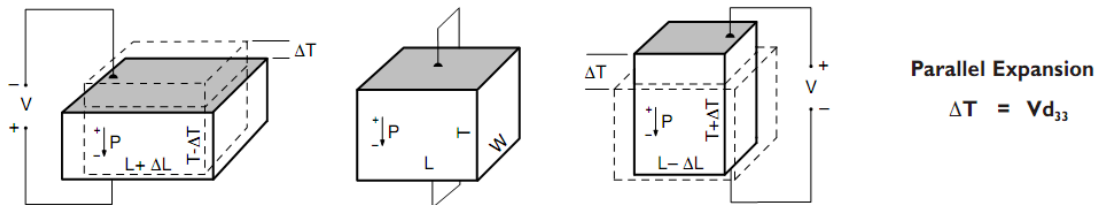


圖 2.6  $d_{33}$  係數[3]

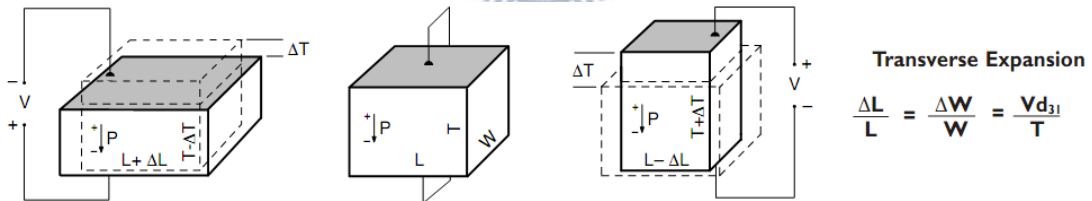


圖 2.7  $d_{31}$  係數[3]

雙層致動器，雙層指有兩個壓電層，根據壓電層組裝方式和接線方式的不同，可以實現彎曲、伸展、旋轉等動作。通常在兩個壓電層之間會夾一層薄鐵片，目的是希望增加機械強度，缺點是會減少可原本可活動的範圍。

伸展致動器(extension motors)，兩個壓電層是一起伸縮其動作和單層致動器很類似。當施加電場時，元件會變薄並往水平方向延展，如圖 2.8。典型的伸展量大約是數十微米(um)，產生的力大小約在十到一百牛頓之間。

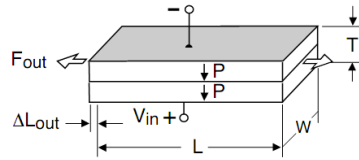


圖 2.8 伸展致動器[3]

彎曲致動器(bending motor)，當兩個壓電層其中一層伸展而另外一層收縮，便可達成彎曲的動作，常被稱為 bender、bimorphs、flexural elements。圖 2.9 為常用的結構。典型的伸展量大約是數百到數千微米(um)，產生的力大小約在十到一百牛頓之間。

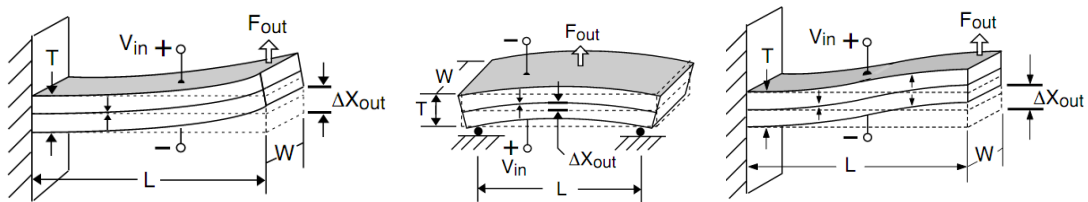


圖 2.9 彎曲致動器[3]

多層致動器(multi.layer motor)，將數個壓電層一層層疊起，增加整體壓電效應變化的體積並提升傳遞到負載的能量的一種組合方式，又稱為堆疊致動器(stack motor)。圖 2.10 為常見的堆疊致動器。

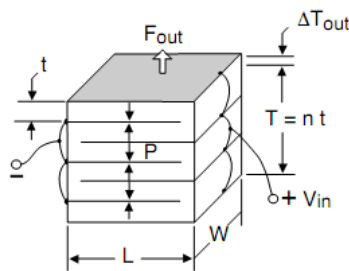


圖 2.10 推疊致動器[3]

## 2.3 量子穿隧效應原理介紹

在古典力學裡的知識告訴我們，電子是無法穿越比自身能量還高的位障，當電子遇到位障時，我們並不會在另一端觀察到被位障擋住的電子，所以電子穿透其能量比自身還高的位障機率為零，而在量子力學裡卻告訴我們電子穿越過能障的機會不為零。圖 2.11 是個淺而易懂的漫畫，在古典的世界裡，你不用擔心關在籠子裡的獅子會跑出來；但在量子世界中，你最好趕快逃命去，因為獅子是有機會穿越籠子把你吃掉。

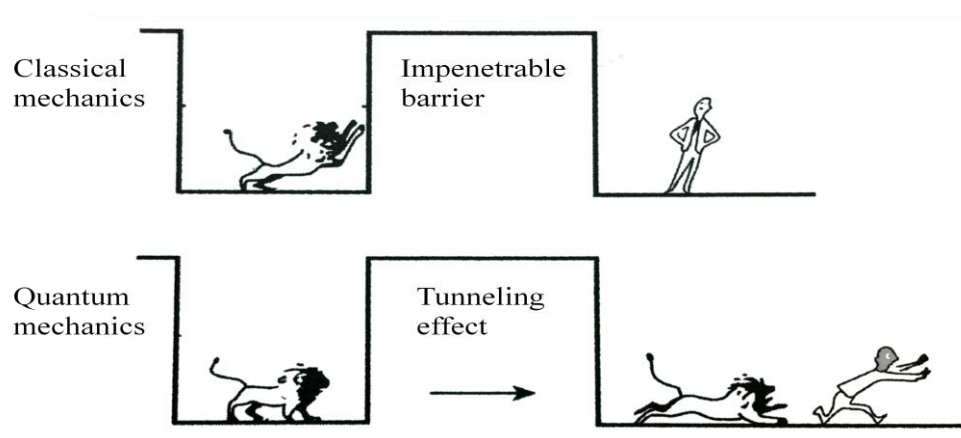


圖 2.11 古典世界與量子世界的差異[4]

量子力學是一門研究微觀尺度下的物理現象的一門學科，很多現象在引入量子力學後得以完整的被解釋，穿隧效應便是其中一個例子。1925 年薛丁格 (Schrödinger) 運用德布羅依之物質波假設，提出薛丁格波動方程式，用以描述粒子之波動行為，其薛丁格波動方程式如 2.1 式。

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \nabla_{\vec{r}}^2 \psi(\vec{r}, t) + U(\vec{r}) \psi(\vec{r}, t) = \hbar \frac{\partial}{\partial t} \psi(\vec{r}, t) \quad (2.1 \text{ 式})$$

其中  $\psi(\vec{r}, t)$  為粒子隨時間、空間變化的波函數(wave function)， $U(\vec{r})$  為描述空間中位能的函數。現在考慮一維且位能不隨時變的情況，設波函數  $\psi(z, t)$  可以變數分離如 2.2 式， $\phi(z)$  表  $\psi(z, t)$  的空間部分函數而  $T(t)$  為  $\psi(z, t)$  的時間部分函數，將 2.2 式代入 2.1 式，可以得到 2.3 式。

$$\psi(z, t) = \phi(z)T(t) \quad (2.2 \text{ 式})$$

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\phi''(z)}{\phi(z)} + U(z) = i\hbar \frac{T'(t)}{T(t)} = E \quad (2.3 \text{ 式})$$

其中  $E$  為粒子對應的能量，則薛丁格波動方程式空間部分可以被化簡為 2.4 式，而時間部分可以化簡為 2.5 式。

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\partial}{\partial x} \phi(z) + U(z)\phi(z) = E\phi(z) \quad (2.4 \text{ 式})$$

$$T'(t) = -\frac{E}{\hbar} T(t) \quad (2.5 \text{ 式})$$

由 2.5 式經由一些計算與化簡，過程如 2.6 式與 2.7 式，最後可得到  $\psi(z, t)$  時間部分的解  $T(t)$ ，如 2.8 式。

$$\int_{T(0)}^{T(t)} \frac{dT}{T} = -i \frac{E}{\hbar} \int_0^t dt \quad (2.6 \text{ 式})$$

$$\ln \frac{T(t)}{T(0)} = -i \frac{E}{\hbar} t \quad (2.7 \text{ 式})$$

$$T(t) \propto e^{-i \frac{E}{\hbar} t} \quad (2.8 \text{ 式})$$

解出時間部分後，接著來討論波函數空間部分的解，假設在  $z=0$  和  $z=\Delta z$  有一個位障，如圖 2.12 所示，我們將分成三個區域討論：CASE1：sample、CASE2：barrier 和 CASE3：tip。

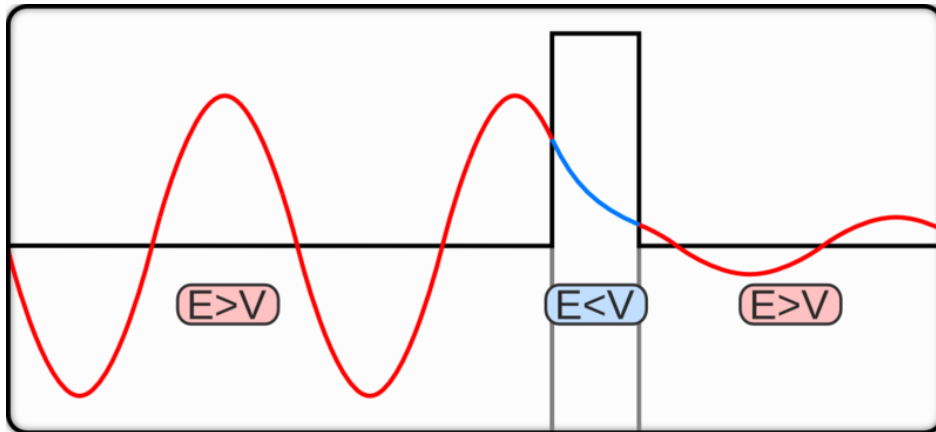


圖 2.12 樣品與探針間穿隧效應示意圖[5]

在 CASE1 部分，空間波函數可以假設為一入射波和一反射波的疊加，如 2.9 式。

$$\phi_{sample}(z) = Ae^{ikz} + Be^{-ikz} \quad (2.9 \text{ 式})$$

在 CASE2 部分，空間波函數可以假設為在位障內的一入射波和一反射波的疊加，如 2.10 式。

$$\phi_{barrier}(z) = Ce^{iKz} + De^{-iKz} \quad (2.10 \text{ 式})$$

在 CASE3 部分，空間波函數在探針部分則為透射波，如 2.11 式。

$$\phi_{tip}(z) = Fe^{ikz} \quad (2.11 \text{ 式})$$

其中入射波波向量  $k = \frac{\sqrt{2mE}}{\hbar}$ ，位障內波向量  $K = \frac{\sqrt{2m(U-E)}}{\hbar}$ 。利用空間波函數在位障不連續處會連續，而波函數一階微分在位障不連續處也會連續，得出 A、B、C、D、F 等係數關係式後，便可計算出重要的穿透係數，如 2.12 式。

$$T = \frac{F^* F}{A^* A} \approx 16 \frac{E}{U} \left(1 - \frac{E}{U}\right) e^{-2K\Delta z} \propto e^{-2K\Delta z} \quad (2.12 \text{ 式})$$

由上式我們可以了解到電子穿越位障的機率不會為零，而且其機率與位障寬度成指數反比。在量子穿隧效應中，所測得的穿隧電流正比於穿透係數如 2.13 式，也就是說當樣品與針間的間距發生微小的變化會造成穿隧電流很大的變化，STM 正是利用此原理所以能有如此良好的 Z 軸解析度。

$$I \propto e^{-ik\Delta z} \quad (2.13 \text{ 式})$$

## 2.4 避震系統

Binnig 與 Rohrer 曾表示當初發展的 STM 能夠達到原子級解析度，避震系統是不可或缺最主要的功臣。典型的 STM 影像其地貌皺摺大小的可能只有 10pm，所以 STM 必須能衰減外界的擾動至 1pm 或更小才不會影響圖的品質。接下來我們用簡單一維的避震系統模型來傳達彈簧避震系統的功能與重要性。

### 2.4.1 一維彈簧避震系統

STM 避震系統如何隔絕外界擾動的設計理念，其實大部分的物理概念都可以由簡單的一維彈簧避震系統來帶出，所以我們將 STM 的避震系統類比成一維彈簧避震系統[6]，從地面與空氣中傳到外框架的擾動為  $X(t)$ ，連接外框架與 STM 主體的彈簧彈力常數為  $k$ ，而 STM 的質量為  $M$ ，經由彈簧傳遞到 STM 的擾動為  $x(t)$ ，如圖 2.13。

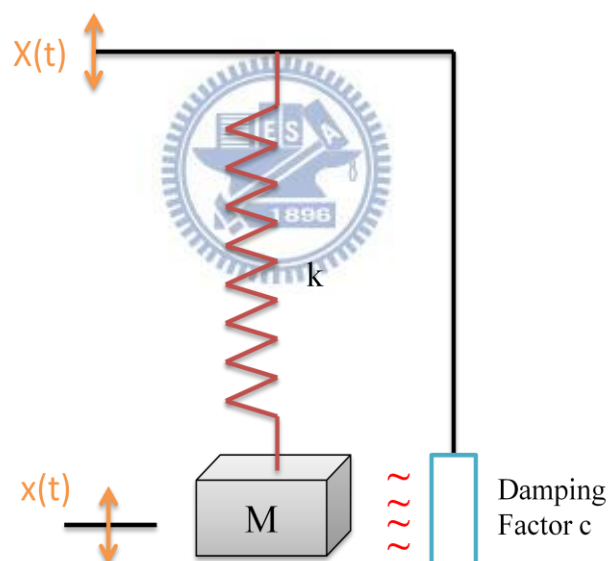


圖 2.13 將 STM 避震系統類比為一維彈簧避震系統示意圖[6]

我們最主要的目標是如何使外框架的擾動  $X(t)$  經由此避震系統使傳入 STM 主體的擾動  $x(t)$  為最小，根據圖 2.13 我們可以寫下質量  $M$  所受的彈簧回復力  $f_{spring}$ 、 $M$  受外框架上阻尼元件的阻尼力  $f_{damping}$  和外框架與  $M$  之間的運動方程，如 2.14 式、2.15 式和 2.16 式。

$$f_{spring} = -k(x - X) \quad (2.14 \text{ 式})$$

$$f_{damping} = -c(\dot{x} - \dot{X}) \quad (2.15 \text{ 式})$$

$$f_{spring} + f_{damping} = f(t) \quad (2.16 \text{ 式})$$

$f(t)$  為外界驅動力在此作為外界震動干擾，我們可以定義共振角頻率  $\omega_0$  及阻尼常數  $\gamma$  如 2.17 式與 2.18 式，利用此兩式可將 2.16 式改寫成 2.19 式

$$\omega_0 = 2\pi f_0 = \sqrt{\frac{k}{M}} \quad (2.17 \text{ 式})$$

$$\gamma = \frac{c}{2M} \quad (2.18 \text{ 式})$$

$$\ddot{x} + 2\gamma\dot{x} + \omega_0^2 x = f(t) = 2\gamma\dot{X} + \omega_0^2 X \quad (2.19 \text{ 式})$$

當  $f(t) = 2\gamma\dot{X} + \omega_0^2 X = 0$  時，在普通物理我們知道會有三種解，次阻尼(under damping)、臨界阻尼(critical damping)與過阻尼(over damping)，並可以定義一個與維度無關的物理量藉以描述震盪器的特性，此物理量稱為品質因子(Q factor 或 Q number)，記為  $Q$  定義如 2.20 式。簡略來說，品質因子為當一個外力使震盪器震盪時震盪器能震盪的次數，所以一個阻尼作用強的阻尼器其品質因子會很小。

$$Q \equiv \frac{\omega_0}{2\gamma} \quad (2.20 \text{ 式})$$

以上是關於齊性解的部分，但我們注重的是我們避震系統如何隨外界震動源  $X(t)$  將震動傳遞於 STM 主體，所以以下針對特解來做討論。假設外框架的震動為一個單一頻率的弦波，而傳遞到 STM 本身的震動也將會是一個弦波，如 2.21 式與 2.22 式。

$$X(t) = X_0 e^{i\omega t} \quad (2.21 \text{ 式})$$

$$x(t) = x_0 e^{i\omega t} \quad (2.22 \text{ 式})$$

將 2.21 式和 2.22 式代入 2.19 式可以得到 2.23 式，對 2.23 式取振幅大小可得本系統的頻率響應(response function)或轉移函式(transfer function)於 2.24 式。

$$\frac{x_0}{X_0} = \frac{\omega_0^2 + 2i\gamma\omega}{\omega_0^2 - \omega^2 + 2i\gamma\omega} \quad (2.23 \text{ 式})$$

$$K(\omega) \equiv \left| \frac{x_0}{X_0} \right| = \sqrt{\frac{\omega_0^4 + 4\gamma^2\omega^2}{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4\gamma^2\omega^2}} \quad (2.24 \text{ 式})$$

我們可以由三個特殊的情況，來觀察此彈簧阻尼避震系統的特性：

1. 在高頻的情況下，如果不計阻尼項則 2.24 可近似 2.25 式，轉移函數與頻率成反比，換而言之在高頻的頻段此種僅有懸吊彈簧的避震方式能有效的濾掉高頻的震動。

$$K(\omega) \approx \left(\frac{\omega_0}{\omega}\right)^2 = \left(\frac{f_0}{f}\right)^2 \quad (2.25 \text{ 式})$$

2. 當震動源頻率接近系統的自然共振頻率時，2.24 式可化簡為 2.26 式，此時轉移函數會大於一，始系統開始共振。這時整個系統的穩定度與品質因子有關，如果品質因子太大會使系統整體發生嚴重的震盪，所以為了避免在自然共振頻率食系統的不穩定，加入阻尼元件降低品質因子是必須的。

$$K(\omega_0) = \sqrt{1 + \frac{\omega_0^2}{4\gamma^2}} \approx \frac{\omega_0}{2\gamma} = Q \quad (2.26 \text{ 式})$$

3. 在高頻的頻段，有加入阻尼元件的彈簧懸吊系統，會使轉移函數較未加阻尼元件的彈簧懸吊系統還大，簡單的說加入阻尼元件後會使避震系統對高頻振動部分的隔絕能力下降，如 2.27 式。

$$K(\omega) \approx \frac{1}{Q} \frac{\omega_0}{\omega} = \frac{1}{Q} \frac{f_0}{f} \quad (2.27 \text{ 式})$$

由以上三種情況的討論，可以知道加入阻尼元件主要是希望能夠在外界震動源接近自然共振頻率時能降低  $K(\omega_0)$  即品質因子要小，但加入後會使系統對高頻項的

隔絕能力下降，所以品質因子也不能太小，一般而言品質因子通常介於 3~10 之間。不管有沒有加入阻尼元件這兩種避震系統都有一個共同點，那就是要設法降低自然共振頻率。在此彈簧的伸長量  $\Delta L$  可以被表示成 2.28 式，將此式與  $g = 9.8m/s^2$  代入 2.17 式可以得到自然共振頻率與伸長量的關係於 2.29 式。

$$\Delta L = \frac{Mg}{k} \quad (2.28 \text{ 式})$$

$$f_0 = 2\pi\sqrt{\frac{g}{\Delta L}} \approx \frac{5.0}{\sqrt{\Delta L(cm)}} \quad (2.29 \text{ 式})$$

如果想使自然共振頻率降到 1Hz 以下，根據 2.29 式可以推得彈簧伸長量必須至少要伸長 25 cm 以上，以上我們探討了懸吊彈簧的作用，可以發現彈簧懸吊系統能隔離垂直與水平的環境振動。

而圖 2.13 還能在類比 STM 主體的情況，將質量 M 當作樣品，而上方當作樣品，彈簧 k 則類比成裝載探針與樣品的機構。而此模型在探討 STM 內部結構的振動對針尖與樣品間位移的影響，就一般情況而言  $f \ll f_s$  時 2.23 式可被寫成 2.30 式，其中  $f_s$  為 STM 機構的自然共振頻率。

$$\frac{x_0 - X_0}{X_0} \approx \frac{f^2}{f_s^2} \quad (2.30 \text{ 式})$$

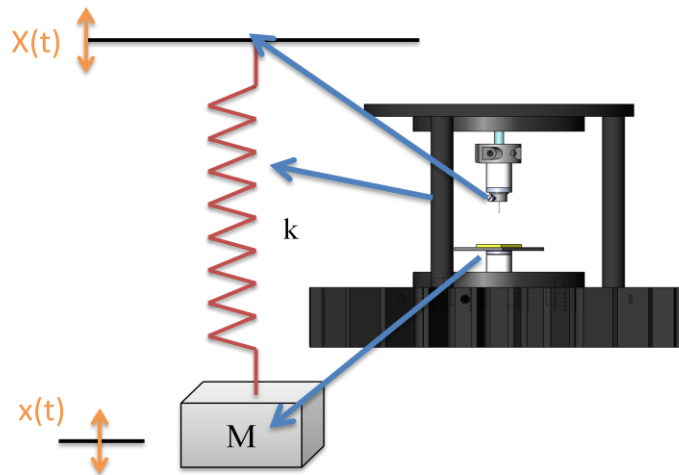


圖 2.14 探討 STM 剛性的模型介紹

由 2.30 式可以了解到如果 STM 機構的自然共振頻率夠高的話，低頻的振動對內部針尖與樣品的影響將微不足道，而 STM 機構的自然共振頻率要提高則代表 k 值要大意即 STM 機構的剛性(rigid)要強，所以在 STM 設計上如何提升剛性也是十分的重要。

合併前面兩者的討論，外界的環境振動藉由外框架傳入經過懸吊彈簧傳入 STM 主體，而傳到 STM 主體上的振動透過 STM 機構造成探針與樣品間的振動，所以在良好的設計下( $f_s > f > f_l$ )外界振動對探針與樣品間振動的轉移函數

$K(f)$  可被寫為 2.31 式，其中我們定義  $f_s$  為 STM 機構的自然共振頻率、 $f_l$  為懸吊彈簧系統的共振頻率、外界振動頻率為  $f$ 。

$$K(f) = \left(\frac{f_l}{f}\right)^2 \times \left(\frac{f}{f_s}\right)^2 = \left(\frac{f_l}{f_s}\right)^2 \quad (2.31 \text{ 式})$$

舉例來說，STM 共振頻率  $f_l = 2\text{kHz}$  彈簧共振頻率  $f_s = 2\text{Hz}$  則此避震隔絕能力轉移函數約為  $10^{-6}$  或 -120dB。因此 STM 要有良好的避震隔絕能力不僅懸吊彈簧共振頻率  $f_l$  要小，而 STM 主體的剛性也是十分重要的指標。

## 2.4.2 Eddy-current 阻尼器

當一導體在磁場中運動時，為了抵抗內部磁通量變化，導體內部會感應 eddy-current 企圖維持原本磁通量產生阻尼力(damping force)。磁鐵阻尼器不僅可靠且有熱穩定的優點，廣泛用於現今機械裝置與工程上。Nagsya 與 Kojima 也對其做了詳細的分析，eddy-current 示意圖如圖 2.15。設銅塊材的電阻率為  $\rho$  在永久磁鐵造的磁場  $B$  作用下，由 Maxwell 方程式可計算出產生的阻尼力  $F$ ，如 2.32 式。

$$F = -cV_x = -C_0 \left( \frac{B^2 \pi a^2 t}{\rho} \right) V_x \quad (2.32 \text{ 式})$$

從 2.32 式可以得知阻尼力正比於磁場作用面積  $\pi a^2$ 、銅塊材厚度  $t$ 、銅塊材運動速度  $V_x$ 、銅塊材的電阻率  $\frac{1}{\rho}$  以及磁場  $B$  的平方，所以想要有高的的阻尼力，選擇強磁場的永久磁鐵是容易採納的方案之一。Nagayaz 發現  $C_0$  是一個與幾何形狀有關的常數，如果銅塊材磁場面積遠大於磁鐵的面積則  $C_0 = 0.5$ ，倘若面積相當時  $C_0$  的大小則與銅塊材的幾何形狀有關。

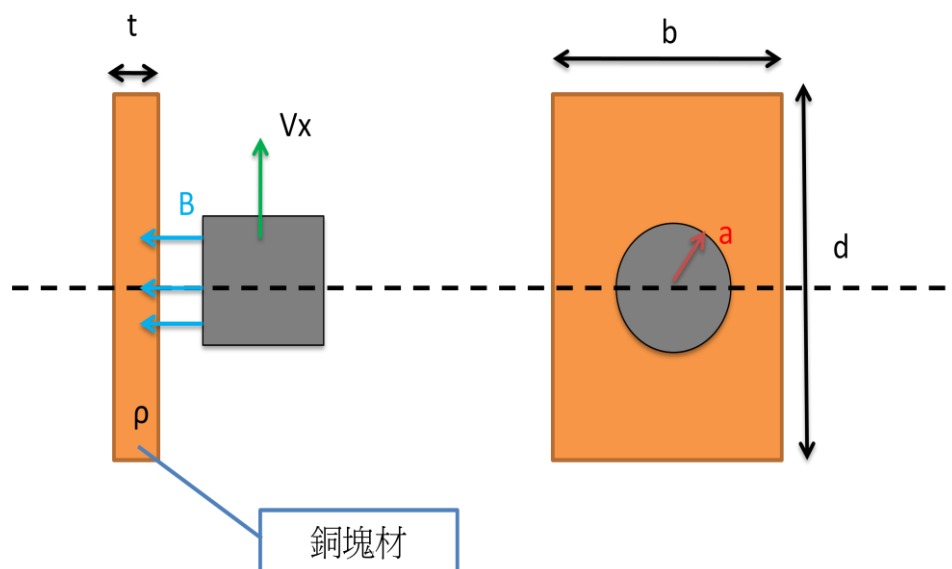


圖 2.15 eddy current 分析模型示意圖[6]

## 2.5 步進器的種類與介紹

根據穿隧效應 STM 要能接收到穿隧電流則樣品與探針的間距至少要小於 1nm 以下，為了達到此目的及保護樣品與探針在接近的過程中發生碰撞，便有許多種類的步進器(stepper)發明，下面介紹常見的步進器種類與工作原理。

### 2.5.1 Inchworm stepper

Inchworm stepper 結構主要由藍寶石棒與數個壓電塊組合而成，探針置於藍寶石棒前端，控制不同伸縮方向的壓電塊組合出數種伸展模式，有規律的重複這些運動模式，使藍寶石棒能帶動探針前進或後退。此步進器剛性很好，步進步伐小且穩定，不過其製作難度與成本都較高。

Inchworm stepper 進針的方式為利用六個階段的壓電塊伸展運動，經由循環六個階段運動達到穩定前進與後退的功能，首先先伸長前方壓電夾具夾住藍寶石棒完成初始化，接著分別執行以下六個步驟：

步驟一：伸長上下方的橫向壓電塊。

步驟二：伸長後方壓電夾具夾住藍寶石棒。

步驟三：釋放前方壓電夾具。

步驟四：縮短上下方橫向壓電塊，使藍寶石棒往前進。

步驟五：再次伸長前方壓電夾具夾住藍寶石棒。

步驟六：釋放後方壓電夾具，回到初使化狀態。

接著重複此六步驟便可以穩定往前步進，反之亦然，如圖 2.16 所示。



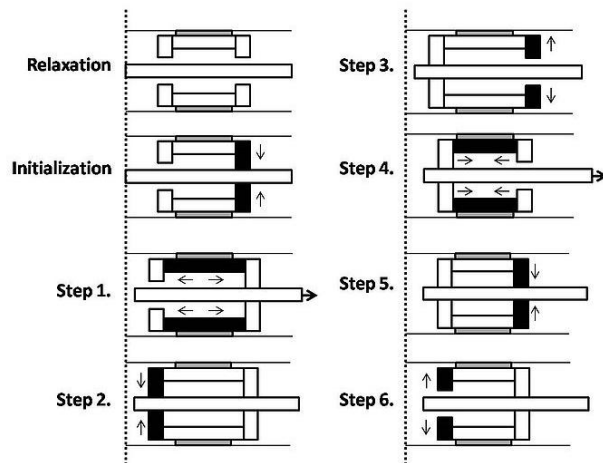


圖 2.16 Inchworm stepper 移動拆解步驟說明[6]

## 2.5.2 Slider stepper

Slider stepper 是一種利用慣性原理步進的步進器，其構造相對其它步進器較為簡單。在藍寶石棒一端固定上壓電陶瓷管或壓電片，並將兩片不鏽鋼以螺絲和彈簧對鎖做為步進裝置並夾住藍寶石棒，彈簧主要功用為調整其正向力藉以改變步進裝置的最大靜摩擦力，另外放置固定探針的裝置於步進裝置上。

其工作原理是將壓電材料瞬間伸縮並結合慣性原理使裝置步進。當壓電陶瓷瞬間收縮時，由於收縮力克服步進裝置與藍寶石棒之間的最大靜摩擦力，因此步進裝置會因慣性保持不動，造成藍寶石棒相對步進裝置滑出一小段距離，接著慢慢回復壓電陶瓷至原本長度，此時因為回復力小於最大動摩擦力，步進裝置相對藍寶石棒並無相對位移，當壓電材料回復至原長時，步進裝置較收縮前往前了一小段距離，經過不斷的循環達到往前步進的功能。反之如果要往後步進，則是使壓電材料快速伸長，使藍寶石棒克服其間的最大靜摩擦力，造成藍寶石棒滑進步進裝置內一小段距離，之後緩慢的使壓電材料慢慢收縮回復置原本長度，達到往後步進的效果[7]。

## 2.6 PID controller 原理介紹

### 2.6.1 PID controller 簡介

比例積分微分回授控制器(Proportional-Integral-Derivative controller，簡稱 PID controller)為一種閉迴路回授的控制器並廣泛用在工業控制系統中。PID controller 根據設定的目標值與輸出端量測到的實際值計算出誤差值(error value)，並企圖由比例單元 P、積分單元 I 以及微分單元 D 調整 error value 使其達到最小值達成穩定控制的目的。PID controller 藉由三個獨立的參數來調整 error value：比例參數、積分參數和微分參數，記為 P、I 和 D。這三個參數皆為與時間有關的物理量，P 與當前的 error value 有關，I 為與過去 error value 總和有關，而 D 則是根據當前的 error value 變化率去預測未來的 error value[8]。根據應用環境的不同有時只使用某一個或兩個單元來達成適合的控制系統。由於微分單元對量測時的雜訊較為敏感，所以一些應用只使用 P、I 單元稱做 PI controller。

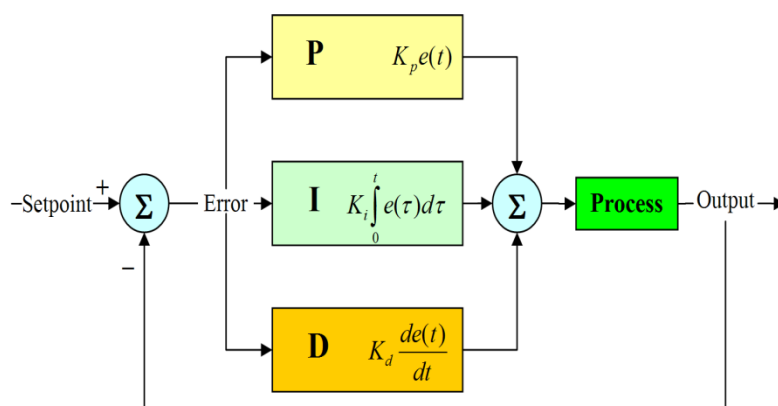


圖 2.17 PID controller 示意圖[8]

PID controller 將比例修正  $P_{out}$ 、積分修正  $I_{out}$  和微分修正  $D_{out}$  總合起來形成輸出訊號  $output(t)$  使  $e(t)$  最小， $output(t)$  可由(2.33 式)描述：

$$output(t) = P_{out} + I_{out} + D_{out} = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (2.33 \text{ 式})$$

其中

$K_p$ ：比例增益(Proportional gain)，為一調變參數。

$K_I$ ：積分增益(Integral gain)，為一調變參數。

$K_d$ ：微分增益(Derivative gain)，為一調變參數。

$e(t)$ ： $e(t) = error(t) = SP - output(t)$

### 2.6.2 比例修正項(Proportional term)

比例修正項(proportional term)，其修正輸出的改變量其正比於當前的 error value；而比例修正對輸出端響應的大小可由比例增益  $K_p$  (Proportional gain, P gain) 決定，即  $P_{out} = K_p e(t)$ 。P gain 如果太大容易使系統不穩定；小的 error value 經由比例修正項會造成大的輸出改變，造成更大的 error value，所以太大的 P gain 會把系統推向不穩定的狀態。相反的，過小的 P Gain 縮小了 error value，造成輸出提升時間(Rise time)增加。含有比例修正項的控制器，有減少提升時間、穩態誤差(steady-state error)與設定時間(settling time)的作用，如圖 2.18。

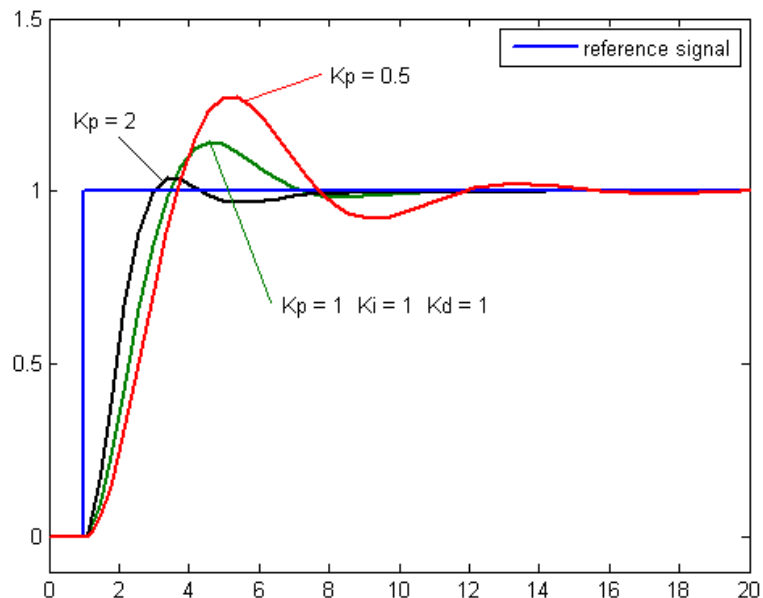


圖 2.18 P gain 大小對輸出的影響示意圖[8]

### 2.6.3 積分修正項(Integral term)

積分修正項(Integral term)，修正方式不僅為 error value 的倍數也與整個作用期間的 error value 有關。積分修正在 PID controller 裡將整個作用期間的 error value 累加後，乘上積分增益(Integral gain, I gain)，最後加在 controller 的輸出端。比例修正項可被表示為  $I_{out} = K_i \int_0^t e(\tau) d\tau$ 。加入積分修正項在只有比例修正項的系統中可以使 process 調整至設定值(set value)並消除 steady-state error，同時 I gain 增加時也有減少 rise time 的作用，如圖 2.19。

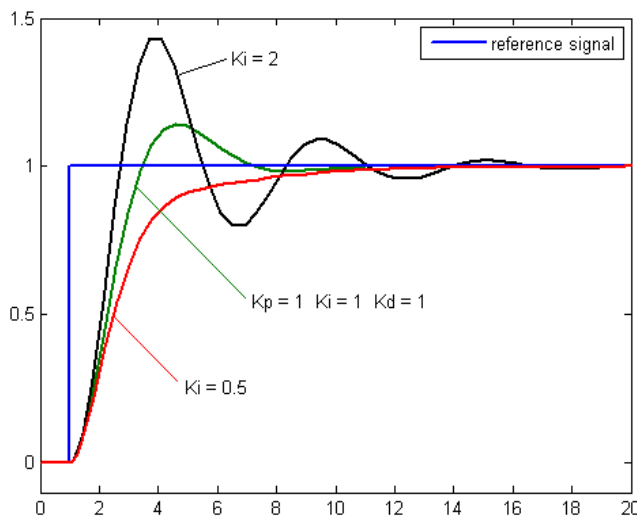


圖 2.19 I gain 大小對輸出的影響[8]

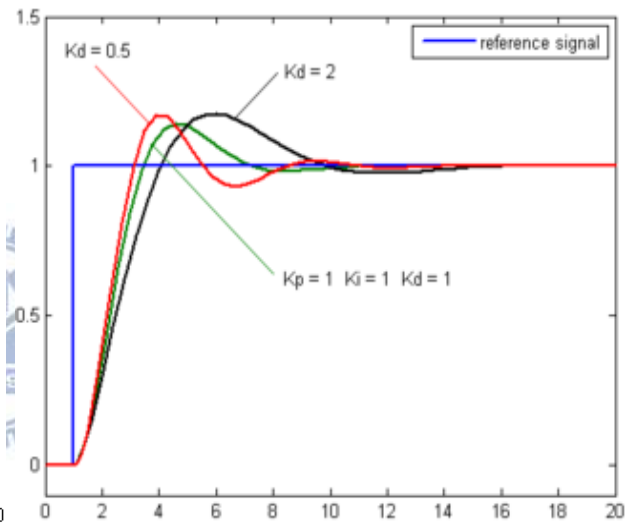


圖 2.20 D gain 大小對輸出的影響[8]

### 2.6.4 微分修正項(Derivative term)

微分修正項(derivative term)根據作用期間的 error value 的變化率，成上微分增益(derivative gain, D gain)  $K_d$ ，微分修正項可用  $D_{out} = K_d \frac{\partial e(t)}{\partial t}$  表式。將只有比例修正項的系統加入微分修正項，可以減少 overshoot 以及設定時間，對提升時間和穩態誤差也能有些為的改善，如圖 2.20。

最後將這三個修正項都納入 controller 稱為 PID controller 可以使系統沒有 overshoot、快速提升時間以及零穩態誤差等好處。

## 第三章、實驗成果(一) 低電壓掃描式穿隧電流顯微鏡

### 3.1 自製低電壓掃描式穿隧電流顯微鏡架構介紹

本章節我們將詳細介紹本實驗室自行設計的低電壓掃描式穿隧電流顯微鏡，包括機械結構的設計說明，電路設計與實現，以及簡紋濱教授撰寫的掃描掃描程式介紹，如圖 3.1。

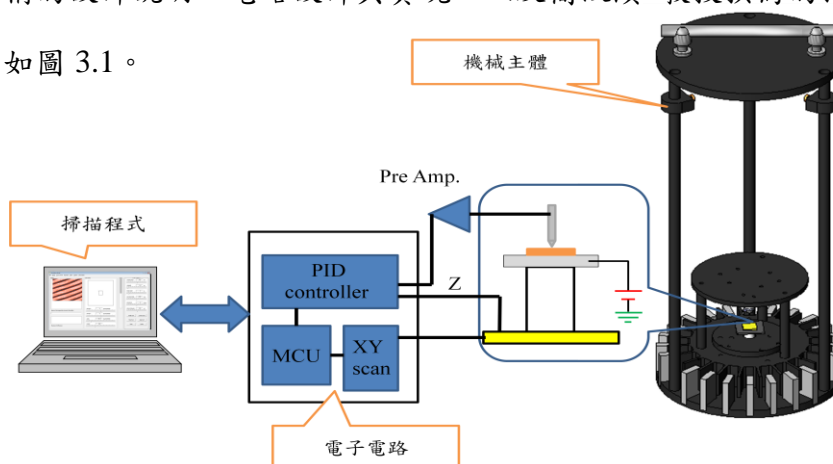


圖 3.1 低電壓掃描式穿隧電流顯微鏡架構圖

### 3.2 機械結構

機械結構包含外框架、主要的執行掃描的 STM 主體與下方的 Eddy current 阻尼系統。從最外層開始為外框架，在內部的三根支柱上各有一個彈簧懸吊臂用來懸吊彈簧，轉鬆固定螺絲後可以上下移動三個彈簧懸吊臂調整下方懸掛的 STM 主體使之保持水平，如圖 3.2、圖 3.3。而 STM 主體將分為三個主要部分，步進器、掃描器以及 Eddy current 阻尼系統來介紹。

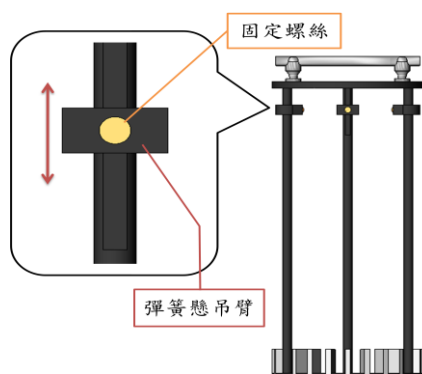


圖 3.2 彈簧懸吊臂位置與動作示意圖

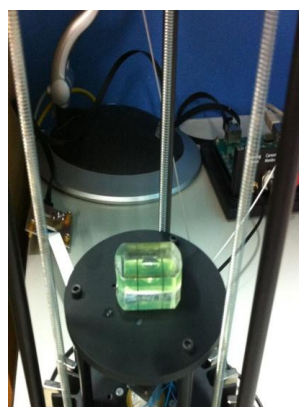


圖 3.3 調整使下方 STM 主體保持水平

### 3.2.1 低電壓掃描器

用於研究型穿隧電流顯微鏡的掃描器，我們仍採用在 STM EDUCA 中使用的低電壓掃描器，因為它有低電壓驅動以及成本較低的特性，正是我們想發展攜帶型 STM 不可或缺的元素。

此種低電壓的掃描器製作和 STM EDUCA 相似，是將一蜂鳴片壓電材料部分切成四等份，將四個上電極分別接上  $X+$ 、 $X-$ 、 $Y+$  與  $Y-$ ，在其四個電極上方用絕緣陶瓷膠黏上陶瓷管。但和上一版本不同的地方是下電極接上控制  $Z$  軸的電壓訊號而非原本接地的設計，如圖 3.4。在此不接地主要因為在上一版本， $Z$  軸電壓是透過 OP 加法器疊加 XY 掃描訊號後輸出到四個象限，如圖 3.5，此種驅動方式會使掃描器在大範圍掃描邊界附近，使驅動電壓  $\pm X + Z > V_{DD}$  或  $\pm Y + Z > V_{DD}$  造成 OP 輸出飽和使  $Z$  軸失靈。

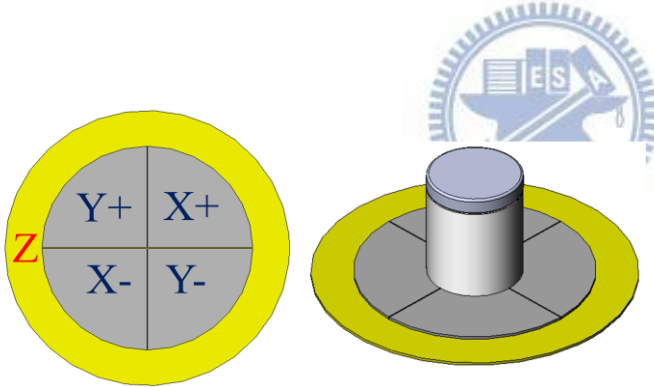


圖 3.4 研究型 STM 掃描器驅動方式

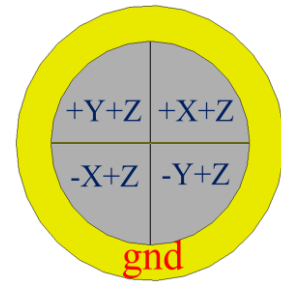


圖 3.5 舊版使用的驅動方式

解決方法為利用壓電材料的伸長量正比於兩端電壓差的性質。由於 OP 輸出上下限分別為  $V_{DD}$  與  $-V_{DD}$ ，也就是說可以使用的電壓範圍為  $2V_{DD}$ ，我們將原本的 XY 掃描訊號施加於上電極，而  $Z$  軸訊號則經過一個反向器施加於共同的下電極，則四個壓電材料的端電壓差分別為 3.1 式 3.2 式。

$$\Delta V_{\pm X} = \pm X - (-Z) = \pm X + Z \quad (3.1 \text{ 式})$$

$$\Delta V_{\pm Y} = \pm Y - (-Z) = \pm Y + Z \quad (3.2 \text{ 式})$$

利用此種驅動方式，我們不必再限制 XY 掃描電壓的上限，因此可增加掃描器的掃描範圍。例如使用  $V_{DD}$  為 13V 的運算放大器，假設 +X 驅動電壓為 12V，Z 軸電壓為 4V，則舊的驅動方式會因 OP 飽和端電壓差限制在 15V 使掃描器動作受限；而新的驅動方式則不會使 OP 達飽和，所以端電壓差可設定為 16V。

而為了能提供下電極 Z 軸電壓的驅動，所以設計上不能直接黏在鰭片盤上，因此我們使用石英板讓蜂鳴片與鰭片盤隔離而且為了保留蜂鳴片作上下扭曲的形變空間，我們在其間加入一個銅環。固定方式則是設計一個壓版在鎖上螺絲固定於鰭片盤，最後再將掃描蓋鎖上，如圖 3.6。這樣的設計會比用銀膠固定有更好的剛性，而且模組化的設計在日後維修處理上也會方便許多。

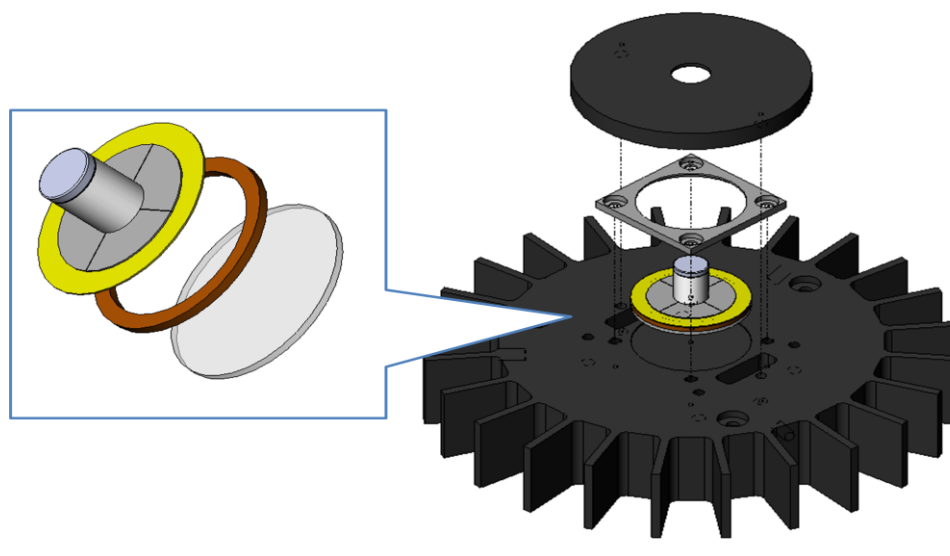


圖 3.6 掃描器的組裝與固定方式

### 3.2.2 低電壓自動步進器

步進器在穿隧電流顯微鏡中是相當重要的一個元件，在上一版本的手動步進器，因為需要維持其相似三角形縮小比例關係機台有縮小下限，而且如果想設計成對稱的圓形結構不僅會相當占體積大、成本昂貴而且相當浪費材料；而在操作上手動步進器需要相當的熟練度才能穩定操作，否則相當容易撞針造成樣品的破壞。

為了操作更方便和縮小體積，我們嘗試發展自動步進器，為了節省成本與維持低電壓的設計，因此仍利用蜂鳴片來製作低電壓的步進器。在第二個章節介紹了常見步進器種類，因為蜂鳴片形狀為扁平狀，所以較難設計出 Inchworm stepper，所以我們往 Slider stepper 方向去思考與研發。

首先我們在蜂鳴片黏上藍寶石棒，做為驅動步進器的驅動源，選用藍寶石棒是因為它高絕緣且表面硬度高，不會因為步進器長期在上面滑動而造成磨損，如圖 3.7。步進器的主體由兩個半圓柱形鋁合金元件組成，內側分別加工長方形軌道與三角形軌道，如圖 3.8、3.9。

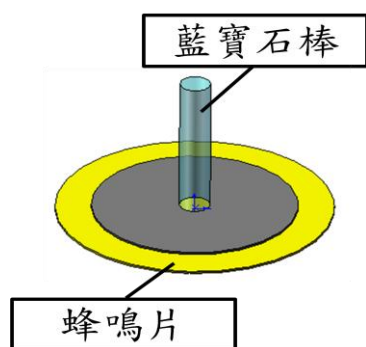


圖 3.7 藍寶石棒與蜂鳴片結合方式

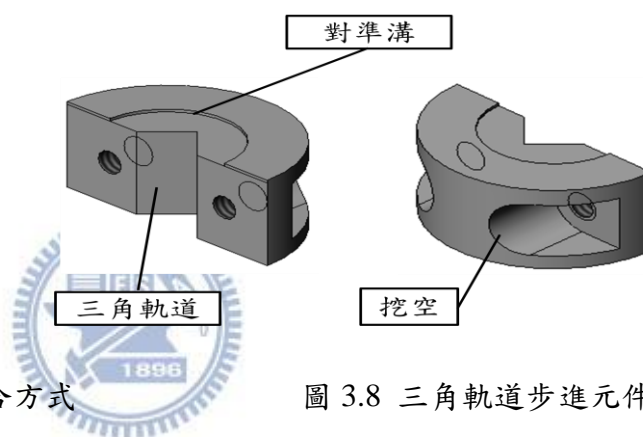


圖 3.8 三角軌道步進元件

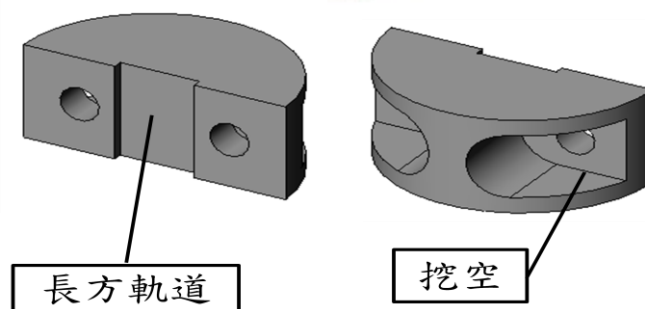


圖 3.9 長方形軌道步進元件

長方形軌道與三角形軌道的設計是為了夾住藍寶石棒時能保持有效的三線接觸，這樣的接觸能使步進器在步進時與藍寶石的接面正向力能夠保持固定與均勻，如圖 3.10。正向力的調整則是使用兩組彈簧藉由旋緊螺絲壓縮彈簧來達到調整的效果，而其中加入的墊圈是為了使彈簧受力更均勻，部分挖空則是為了減輕掃描器的重量如圖 3.11。

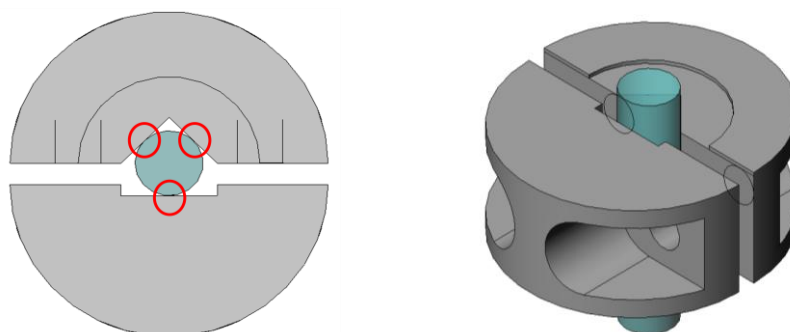


圖 3.10 步進器元件與藍寶石棒接觸位置示意圖

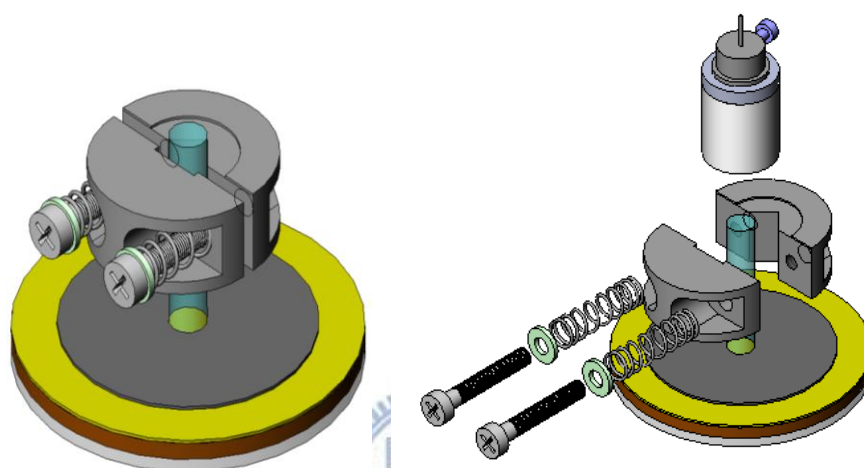


圖 3.11 螺絲調整彈簧調整正向力

介紹完步進器硬體部分，接下來說明我們如何驅動此低電壓步進器。回顧其工作原理是將蜂鳴片瞬間伸縮並結合慣性原理使裝置步進。當壓電陶瓷瞬間收縮時，由於收縮力克服步進裝置與藍寶石棒之間的最大靜摩擦力(圖 3.12 a)，因此步進裝置會因慣性保持不動，造成藍寶石棒相對步進裝置滑出一小段距離(圖 3.12 b)，接著慢慢回復壓電陶瓷至原本長度，此時因為回復力小於最大動摩擦力，所以步進裝置相對藍寶石棒並無相對位移(圖 3.12 c)。當壓電材料回復至原長時，步進裝置相較於收縮前往前了一小段距離(圖 3.12 d)，經過不斷的循環來實現往前步進的功能。反之如果要往後步進，則是使壓電材料快速伸長，使藍寶石棒克服其間的最大靜摩擦力，造成藍寶石棒滑入步進裝置內一小段距離，之後緩慢的使壓電材料慢慢收縮回復置原本長度，達到往後步進的效果。

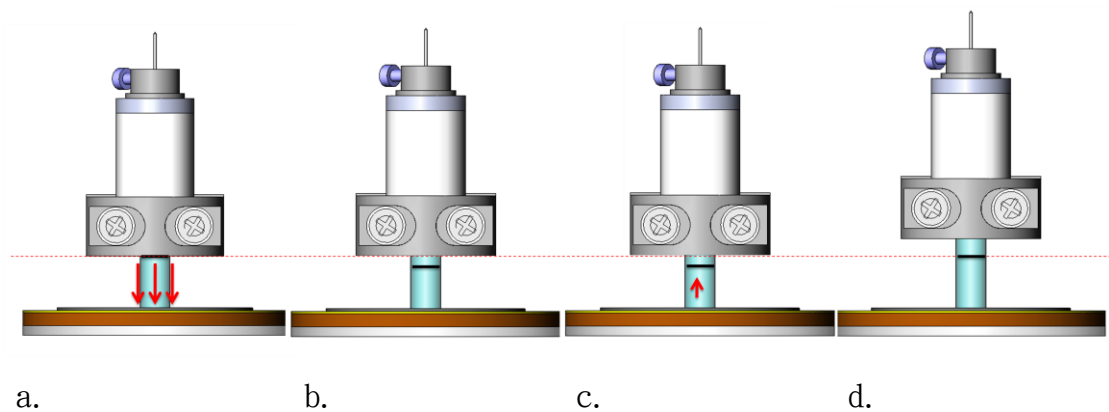


圖 3.12 步進器往前步進示意圖

由上說明我們驅動步進器電壓需要有使壓電材料急遽收縮和緩慢恢復兩個區段，如圖 3.13a, 3.13b。圖 3.13a 中前半段 I 區電壓急遽下降使壓電材料快速收縮，此時滑動力克服最大靜磨擦力使藍寶石棒抽出步進裝置，當達到設定振幅電壓後，開始緩慢回復電壓使藍寶石棒慢慢帶動步進器往上，回到電壓為零時，藍寶石棒回復到原來的位置而步進器也被往上帶動；同理，圖 3.13b 中前半段 I 區電壓急遽上升使壓電材料快速伸長，此時滑動力克服最大靜磨擦力，與藍寶石棒插入步進裝置，而達到設定振幅電壓後，開始緩慢回復電壓使藍寶石棒慢慢帶動步進器往下，回到電壓為零時，藍寶石棒回復到原來的位置而步進器也被往下帶動。

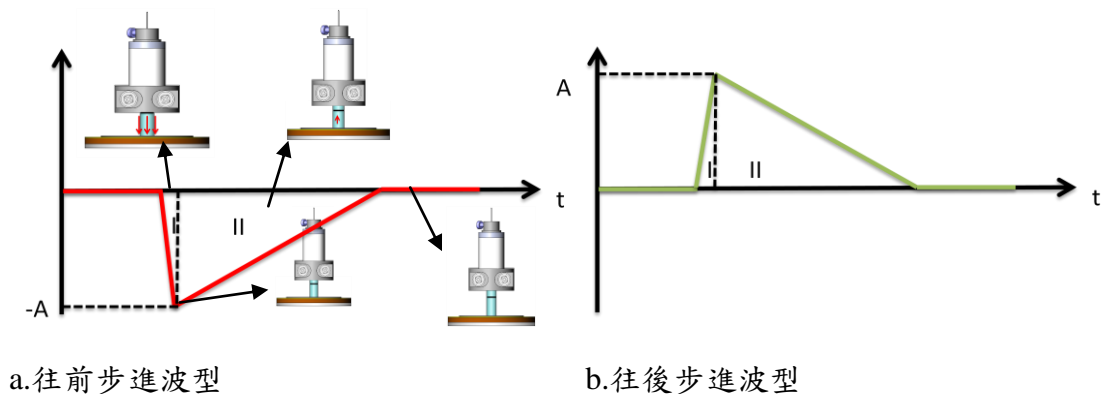


圖 3.13 步進器驅動電壓波型與動作對照圖

### 3.2.3 避震系統

回顧第二章所提到發展的 STM 之所以能夠達到原子級解析度，避震系統是不可或缺最主要的功臣。在一維彈簧懸吊系統裡，我們也提到外界的環境振動藉由外框架傳入經過懸吊彈簧傳入 STM 主體，而傳到 STM 主體上的振動透過 STM 機構造成探針與樣品間的振動，而其轉移函數為  $K(f) = (\frac{f_l}{f_s})^2$ 。為了使  $f_l \approx 1\text{Hz}$ ，

還推論出  $f_l = 2\pi\sqrt{\frac{g}{\Delta L}} \approx \frac{5.0}{\sqrt{\Delta L(\text{cm})}}$ ，彈簧伸長量應大於 15 cm。

設計上我們使用三組彈簧來懸吊 STM 主體調整其伸長量約為 15cm 來降低  $f_l$ ，如圖 3.14。在下方 STM 主體懸吊的螺絲選擇不會被磁鐵吸附的材質，而且彈簧在摺耳朵時應折到中間，以避免放入阻尼陣列時會偏離其平衡位置，如圖 3.14。



圖 3.14 彈簧懸吊系統位置與 STM 主體懸吊置於 eddy current 阻尼陣列中，平衡時磁鐵應在兩個鰭片之間。

### 3.2.4 阻尼系統

當導體在磁場中運動時，為了抵抗內部磁通量變化，導體內部會感應 eddy current 企圖維持原本磁通量產生阻尼力(damping force)。設銅塊材的電阻率為  $\rho$  在永久磁鐵造的磁場  $B$  作用下，由 Maxwell 方程式可計算出產生的阻尼力

$$F = -cV_x = -C_0 \left( \frac{B^2 \pi a^2 t}{\rho} \right) V_x, \text{ 可以得知阻尼力正比於磁場作用面積 } \pi a^2、\text{銅塊材厚度 } t、\text{銅塊材運動速度 } V_x、\text{銅塊材的電阻率 } \frac{1}{\rho} \text{ 以及磁場 } B \text{ 的平方。}$$

由以上第二章的討論，磁場的強度是影響阻尼力很重要的因素，因此我們在設計時用了高磁場的鈹鐵硼磁石，其磁場強度大約為 12 KOe，等距排列於下板，如圖 3.15。而在排列時每個磁場方向同向，使任兩個磁鐵間均有相吸磁場，如圖 3.16。

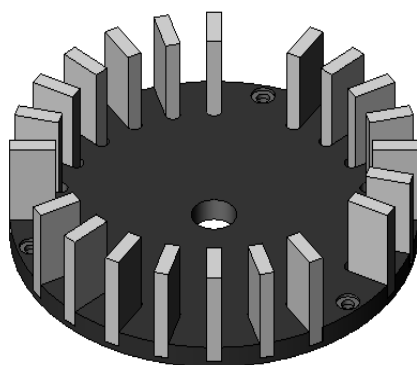


圖 3.14 磁鐵等距排列於下板

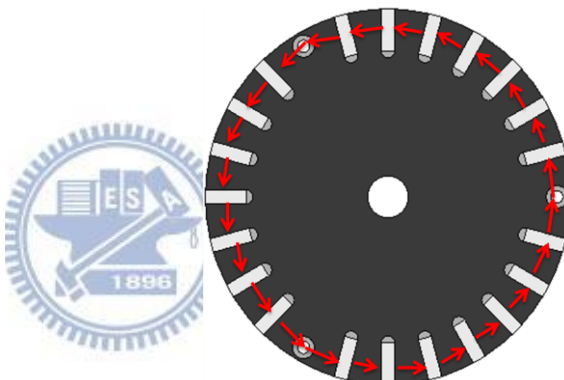


圖 3.16 任兩磁鐵間均有相吸的磁場

從公式也可以看出，鰭片受磁場作用有效面積越大阻尼力也越大，所以在懸吊彈簧時要調整 STM 主體使鰭片完全浸在磁場中，如圖 3.17，而底座選用銅是因為其電阻率小且密度大，不僅能提供阻尼力也能減少共振頻率  $f_l$ 。

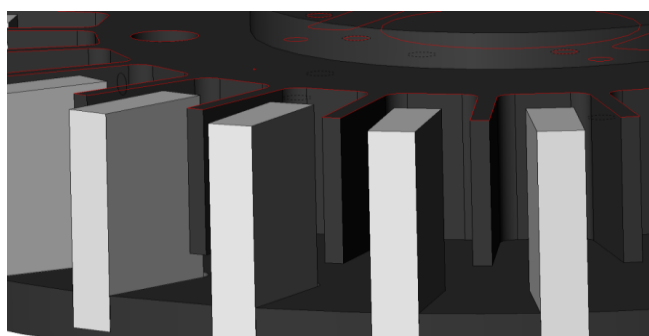


圖 3.17 鰭片完全浸在磁場中，此時受磁場作用面積為最大

### 3.3 穿隧電流顯微鏡電路設計

本儀器電路設計與實作主要由我們的工作夥伴 許俸昌先生提供。穿隧電流顯微鏡的電子電路工作為負責接收穿隧電流並放大、放大後與設定的穿隧電流做比較，之間的誤差由 PI 回饋電路來決定修正量後修正 Z 軸電壓，同時將此電壓透過微處理器，傳回電腦計算出樣品地貌資訊。而掃描器的驅動電壓控制和處理電腦下達的指令也是其重要功能。電路主要包含了數位類比轉換器、微處理器、前置電流放大器與 PI 回饋電路，接下來將一一做介紹。

#### 3.3.1 電流放大器

由於發生穿隧效應時穿隧電流約為 0.01nA 到 50nA 之間，十分的微小而且訊號容易受外界雜訊干擾，因此在做處理前需要先經由穿隧電流放大器放大。本儀器的穿隧電流放大器如圖 3.18，當穿隧電流經由 SMA 線傳到穿隧電流放大器時，因為 OP 輸入阻抗視為無窮大，所以穿隧電流直接經由 R11 和 R12 至 OP 輸出端，放大電壓為  $V_{out}$ ，轉成電壓有助於後續處理， $V_{out}$  推導如 3.1 式與 3.2 式，所以本電路放大倍率約為  $10^8(\frac{V}{A})$ 。

$$I = \frac{0 - V_{out}}{R11 + R12} \quad (3.1 \text{ 式})$$

$$\frac{V_{out}}{I} = -(R11 + R12) \quad (3.2 \text{ 式})$$

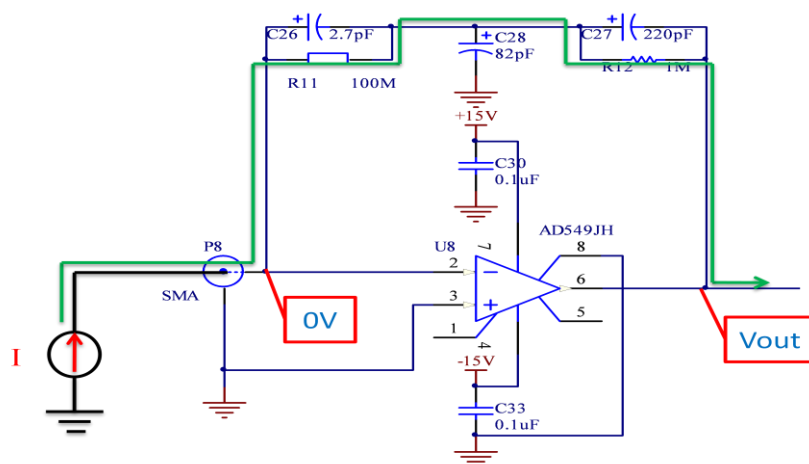


圖 3.18 穿隧電流放大器電路圖

### 3.3.2 絕對值電路

因為量到的穿隧電流會因外加的正負偏壓，而有正負的穿隧電流所以在與設定值比較之前，要先去電正負號。負責這個功能的電路便是絕對值電路，如圖 3.19。

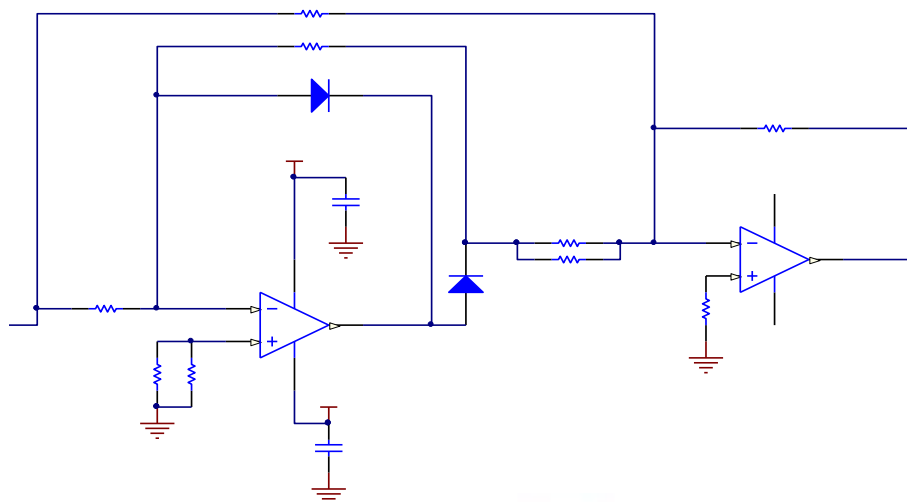


圖 3.19 絕對值電路

### 3.3.3 回饋電路 PI controller

回顧第二章的介紹，比例積分微分回授控制器為一種閉迴路回授的控制器並廣泛用在工業控制系統中。PID controller 根據設定的目標值與輸出端量測到的實際值計算出誤差值(error value)，並企圖由比例單元 P、積分單元 I 以及微分單元 D 調整 error value 使其達到最小值達成穩定控制的目的。PID controller 藉由三個獨立的參數來調整 error value：比例參數、積分參數和微分參數，記為 P、I 和 D。這三個參數皆為與時間有關的物理量，P 與當前的 error value 有關，I 為與過去 error value 總和有關，而 D 則是根據當前的 error value 變化率去預測未來的 error value。

在我們 STM 系統裡會用到 PI controller 的目的是希望藉由此回饋電路的機制達到定電流模式的掃描控制，當穿隧電流與設定的電流有誤差時分別經由比例修正項(Proportional term)與積分修正項(Integral term)調整決定修正量後，將修正值給 Z 軸驅動電路，再由 Z 軸驅動電路控制 Z 軸減少穿隧電流的誤差，如圖 3.20。

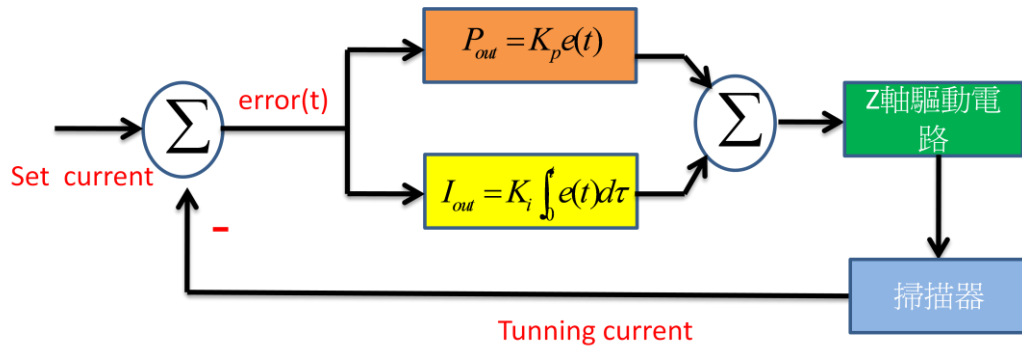


圖 3.20 PI controller 回饋機制示意圖

$error(t)$  的計算由圖 3.21 的電路來完成，輸入為設定的參考電壓  $V_t$  與經電流放大器放的電壓訊號  $V(t)$ ，則輸出的  $error(t) = 0.1(V_t - V(t))$ ，其推導如 3.3 式到 3.5 式。

$$\frac{V_t - \frac{V(t)}{11}}{10k} = \frac{\frac{V(t)}{11} - error(t)}{1k} \quad (3.3 \text{ 式})$$

$$V_t - \frac{V(t)}{11} = \frac{10}{11}V(t) - 10error(t) \quad (3.4 \text{ 式})$$

$$error(t) = 0.1(V_t - V(t)) \quad (3.5 \text{ 式})$$

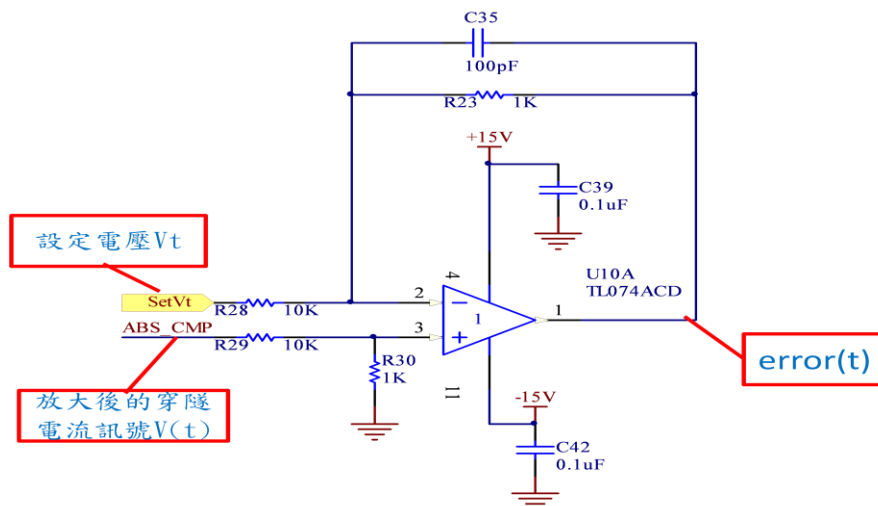


圖 3.21  $error(t)$  計算電路圖

積分修正項的電路則由運算放大器與電容接成積分器，如圖 3.22，其輸出為

將  $error(t)$  對時間積分後乘上  $K_I$ ， $R25$  為  $10k$  的可變電阻，以下 3.6 式到 3.9 式

為積分修正項  $I_{out} = -\frac{1}{(R25+R24)C} \int_0^t error(\tau) d\tau$  與  $K_I = -\frac{1}{(R25+R24)C}$  推導。

$$\frac{error(t)-0}{R25+R24} = C \frac{d(0-I_{out})}{dt} \quad (3.6 \text{ 式})$$

$$dI_{out} = -\frac{1}{(R25+R24)C} error(t) dt \quad (3.7 \text{ 式})$$

$$I_{out} = -\frac{1}{(R25+R24)C} \int_0^t error(\tau) d\tau \quad (3.8 \text{ 式})$$

$$K_I = -\frac{1}{(R25+R24)C} \quad (3.9 \text{ 式})$$

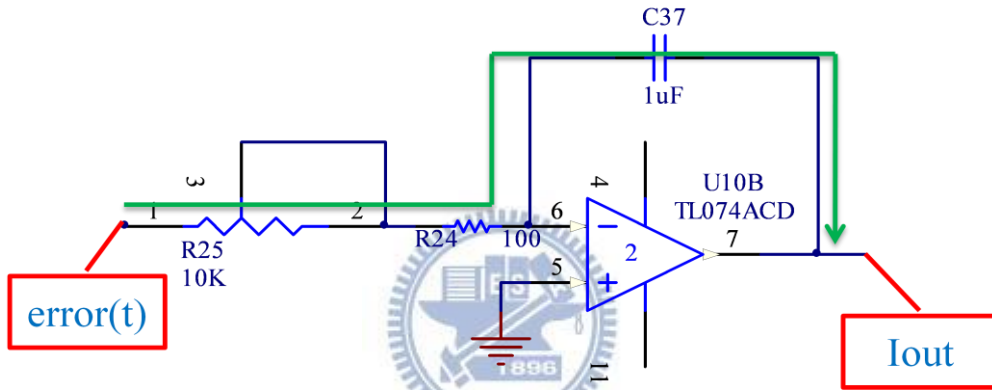


圖 3.22 積分修正項電路圖

比例修正項的電路由運算放大器與電阻阻成一個反向放大器，作用為使

$error(t)$  乘上比例增益  $K_P$  得到修正量  $P_{out}$  如圖 3.23，下面 3.10 式到 3.12 式將推導

比例修正項  $P_{out} = -\frac{R22}{R33+R26} error(t)$  和  $K_P = -\frac{R22}{R33+R26}$ 。

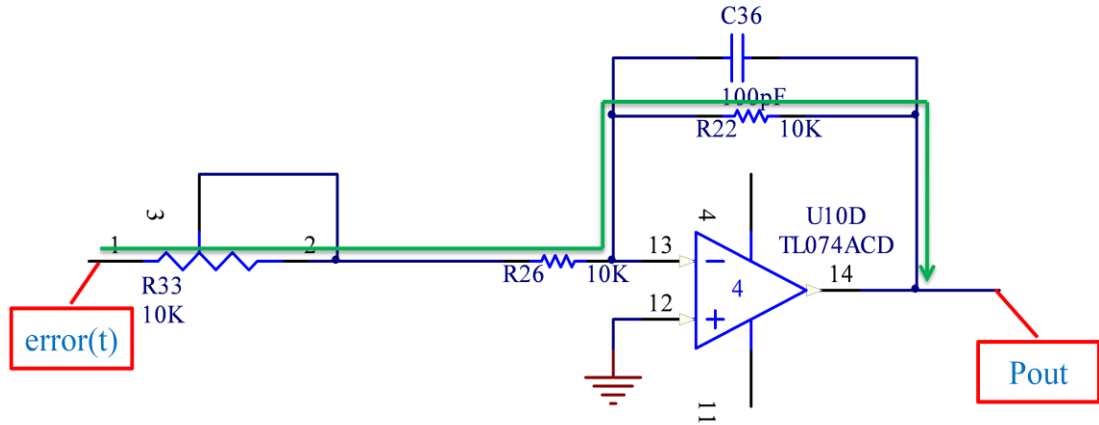


圖 3.23 比例修正項電路圖

$$\frac{error(t) - 0}{R33 + R26} = \frac{0 - P_{out}}{R22} \quad (3.10 \text{ 式})$$

$$P_{out} = -\frac{R22}{R33 + R26} error(t) \quad (3.11 \text{ 式})$$

$$K_p = -\frac{R22}{R33 + R26} \quad (3.12 \text{ 式})$$

接著在利用加法器將積分修正項與比例修正項疊加後送到 Z 軸驅動電路，如圖 3.24，再由 Z 軸驅動電路驅動步進器 Z 軸，由於 Z 軸改變後穿隧電流大小也會跟著往設定的穿隧電流值改變，再次測量其穿隧電流與設定穿隧電流比較，重複循環達到定電流模式的掃描控制。

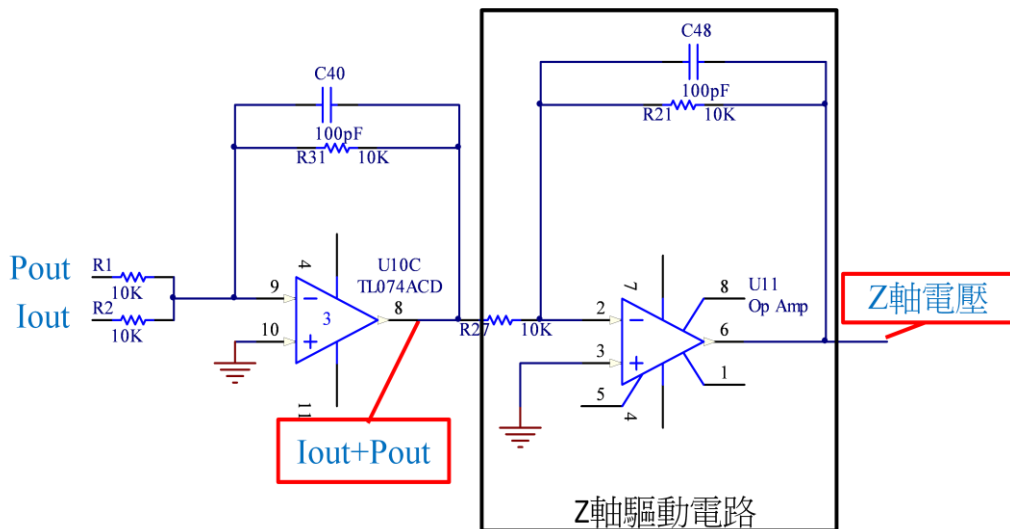


圖 3.24 加法器 將比例修正項與積分修正項相加送給 Z 軸驅動電路

### 3.3.4 掃描器 XY 控制電路

STM 掃描器驅動方式是當電腦下達給微處理器要求掃描器移動到指定的位置時，微處理器會根據指令要求的位置記算出數位類比轉換器(DAC)該輸出的 X 軸驅動電壓與 Y 軸驅動電壓，將這兩個電壓送交給 XY 控制電路。首先訊號個別經過一個反向器得到 -X 驅動電壓與 -Y 驅動電壓，再經過下一個反向器處理後送出 +X 驅動電壓與 +Y 驅動電壓，最後著四組驅動電壓再施加於蜂鳴片上完成電腦所下達的指令，如圖 3.25 與圖 3.26。而掃描動作的進行則是由使用者指定要掃描的範圍，電腦根據所設的解析度與要求的掃描範圍換算出全部所需停留的位置，再根據這些位置要求 XY 控制電路到達指定位置量取地貌資訊。

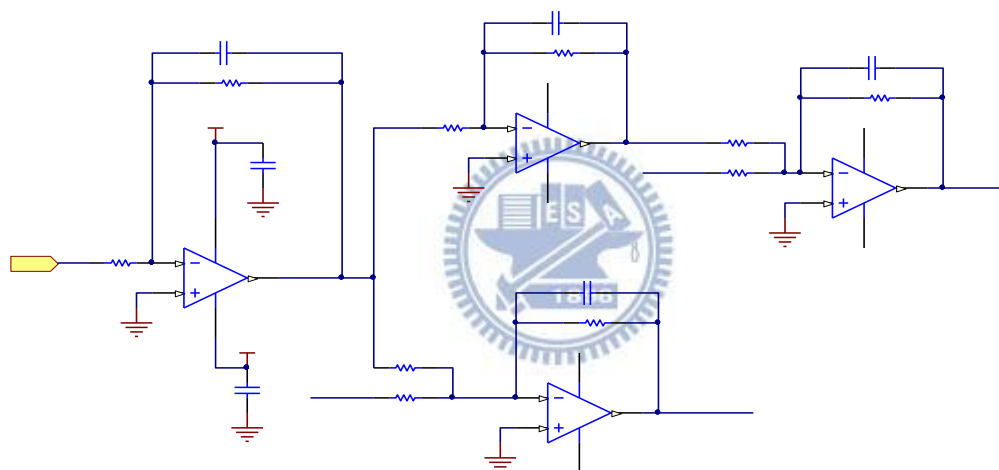


圖 3.25 X 軸驅動電路，透過兩個反向器得到 +X 與 -X 電壓

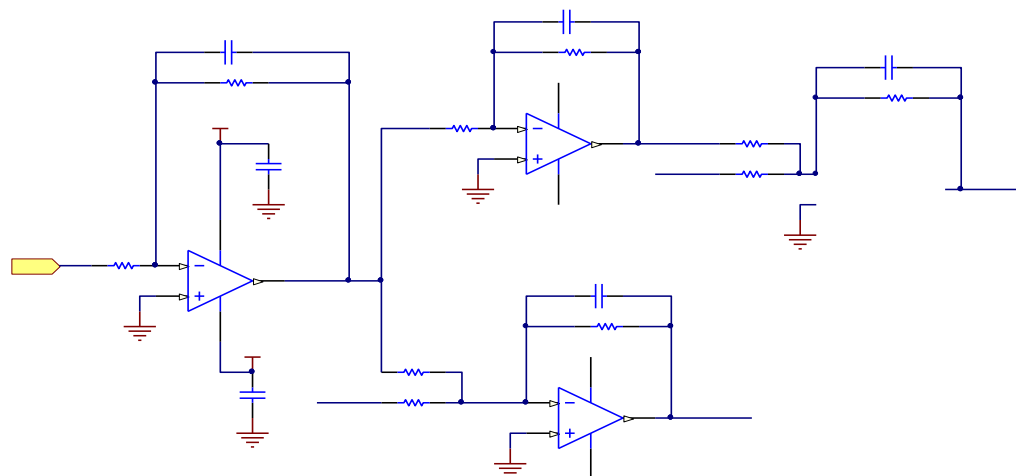


圖 3.26 Y 軸驅動電路，透過兩個反向器得到 +Y 與 -Y 電壓

### 3.4 掃描程式

在電腦端的掃描程式負責下達指令控制電控盒與根據回傳的地貌資訊做成像，是穿隧式電流顯微鏡中核心的部分。本套 STM 程式由交通大學電以物理系簡紋濱教授所撰寫，以下來介紹其功能與介面，如圖 3.27

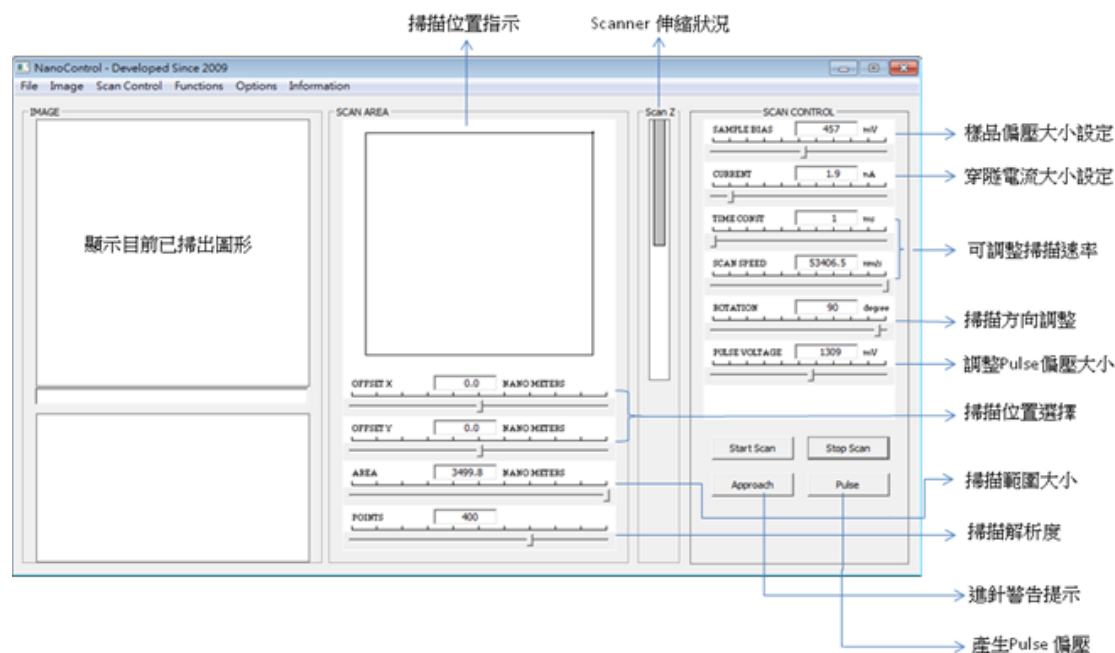


圖 3.27 程式介面與功能簡介。

#### (a)樣品偏壓設定

此參數為給定樣品與針尖之間的電位差，調整範圍為-10V~10V，根據掃描樣品的不同其功函數也不同，所需給定的偏壓也會不同。

#### (b)穿隧電流設定

本 STM 所使用的掃描模式為定電流掃描，所以此參數為設定欲保持的穿隧電流值。當欲保持的穿隧電流設的越大，代表探針與樣品越近而且較不受雜訊干擾；反之設定的越小則探針與樣品距離會較遠，適合使用再表面較粗糙貨位之的樣品，但過小的設定值會容易受雜訊影響。

#### (c)Time Constant (等待時間)

設定掃描器到達指定地點後，需等待 PI controller 回饋電路穩定所需的時間。設的越大在樣品較粗糙時探針較有時間反應可避免探針與樣品間的碰撞，但過大會

有可能因為熱飄移使圖形發生不連續而掃圖時間也會提高；反之如果設的小掃圖會變快而且較容易有熱飄移。

#### (d) Plus 電壓

設定好 plus 電壓後，按下 pluse 按鈕會在樣品偏壓上送出周期為 1ms 振幅為設定值的方波，會在針尖產生很大的電場使針尖原子重新排列，讓針尖有機會回復繼續掃圖。

#### (e) 掃描器 Z 軸伸縮量

此狀態軸顯示掃描器 Z 軸位置，一開始未進針前掃描器應伸至最長，此時 Z 軸位置為全灰，當偵測到穿隧電流時，掃描器 Z 軸會因 PI controller 回饋電路而收縮，灰色顯示條往上提升。一般在掃圖時會讓 Z 軸保有最大的伸縮範圍，即讓灰色顯示條在中間。

#### (f) 步進器控制介面

步進器控制介面是要控制低電壓步進器的動作，介面如圖 3.28。在 3.2.2 節有介紹步進器的驅動原理，對照程式的三角波振幅控制的是步進的步伐大小，振幅越大步伐越大，越小則步伐越小，不過太小可能會導致步進器無法克服最大靜磨擦力。而步進頻率則是設定每秒要走幾步，越大步進器走的越快適合用在粗調進針；而設的越小則每秒步進的次數少適合在探針與樣品很接近時細調進針用。

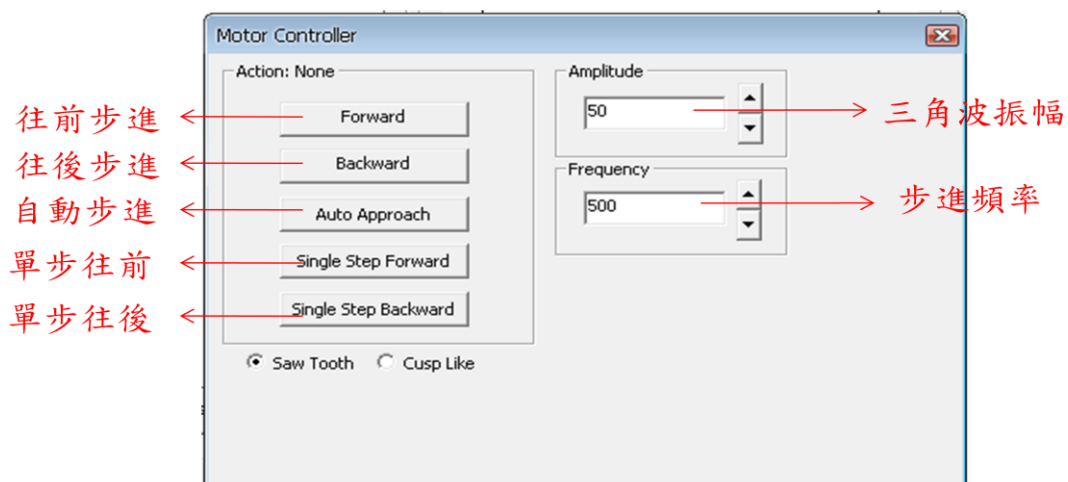


圖 3.28 步進器控制介面

### 3.5 結果與討論

由上一代版本上看到的問題，我們主要想解決機台會熱飄移、最大範圍掃描可能會失真和 P Gain 功能受 I Gain 限制這三個問題。

為解決熱飄移問題，我們決定採用圓對稱的設計使各方向熱膨脹一致藉以消除熱飄移，所以 STM 主體裡的元件我們都是採用此概念設計。在實際掃圖時如果遇到熱飄移現象圖形會扭曲且重複掃描時會移位，不過從圖 3.29 的掃描圖中，可以看到兩者地貌沒有熱飄移造成的位和扭曲。

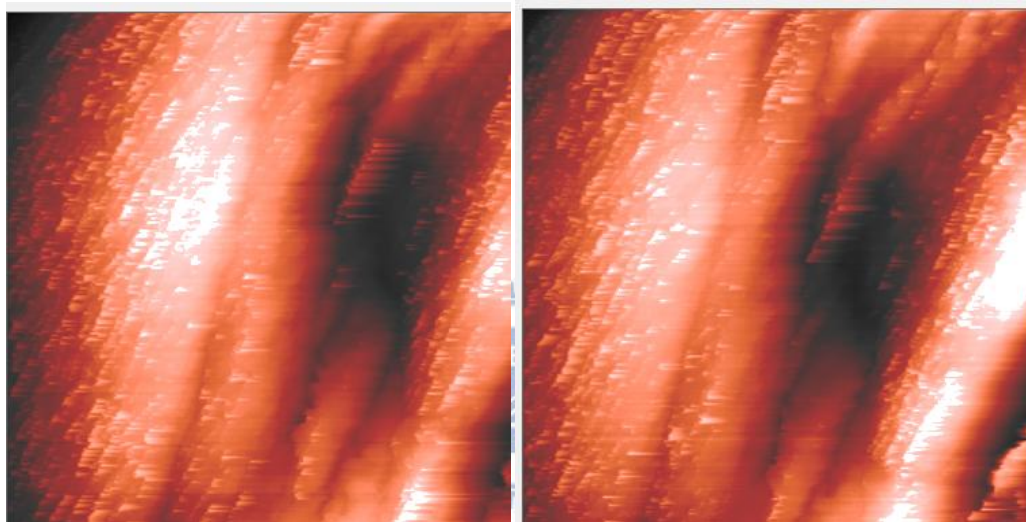


圖 3.29 藉由機台的高對稱來改善熱飄移現象

在先前的電路設計中，因為 Z 軸訊號是加載在四個電極上，在 3.2.1 節我們有討論此法在最大範圍掃描邊緣會使運算放大器輸出端電壓飽和，造成圖像邊緣地貌失真。因為在邊緣時由於電壓飽和造成 Z 軸電壓無法施加在電極上，如圖 3.30。

解決方式就是將 Z 軸電壓施加於共同的下電極上，即 3.3.4 節後半部所介紹的 Z 軸獨立電路，不僅能解決飽和問題還可以增加掃描範圍。因為現在的 XY 驅動電壓有被限制在 -10V~10V 之間盡量避免飽和失真，Z 軸獨立後便可以解除此限制解放 XY 驅動電壓到 -13V~13V，約可以提升範圍 30%。圖 3.31 為 Z 軸獨立後掃描的結果，不過因為現在電路為測試用電路板因此還沒有重寫程式解除限制，

所以看不出範圍的增加，但已經有改善最大範圍邊緣會飽和失真的問題。

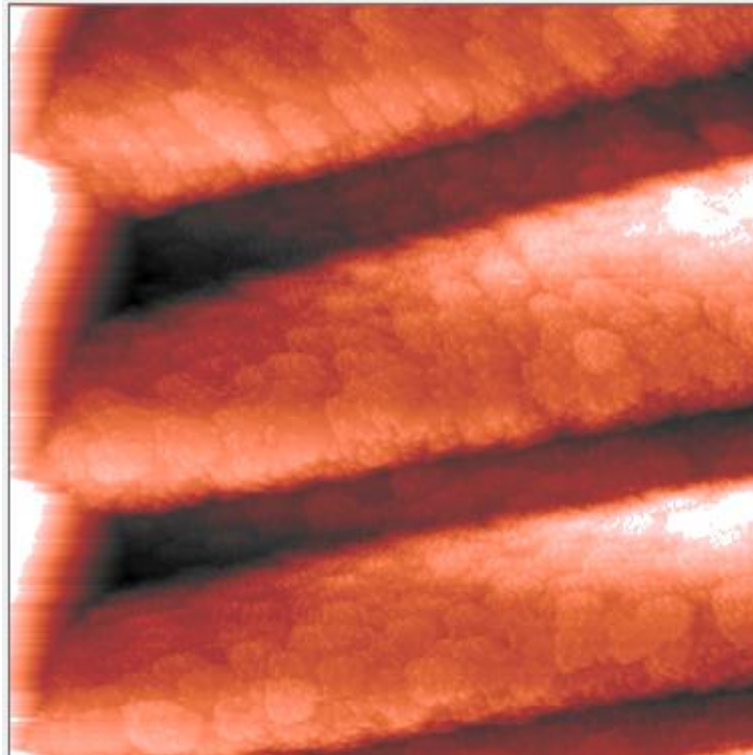


圖 3.30 Z 軸未獨立可能造成最大範圍掃描時飽和失真現象

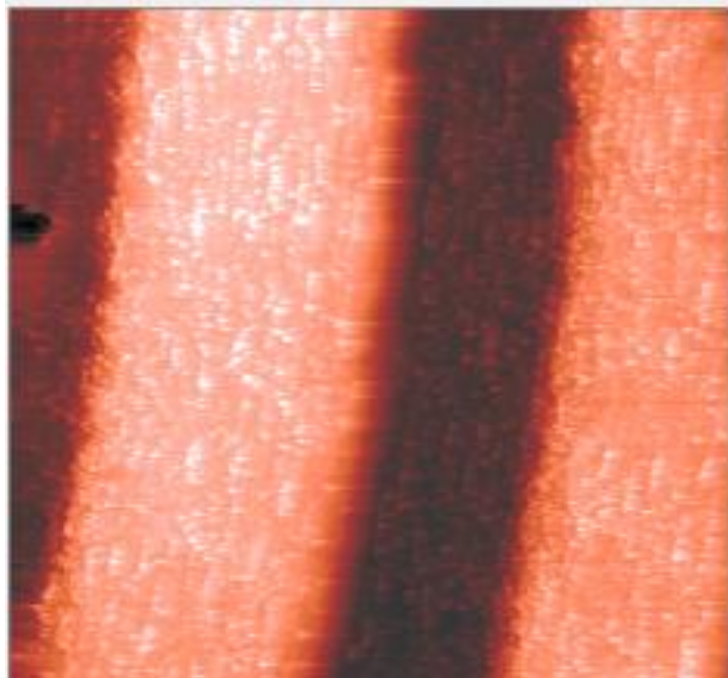


圖 3.31 Z 軸獨立後，在最大範圍掃描時沒有飽和失真的現象

而 P Gain 功能受 I Gain 限制是因為我們舊的回饋電路積分修正項與比例修正項為串聯，如圖 3.32 與圖 3.33；即積分修正項的輸出再經由比例修正項得到後來的修正量  $K_p(K_i \int_0^t error(\tau) d\tau)$ 。

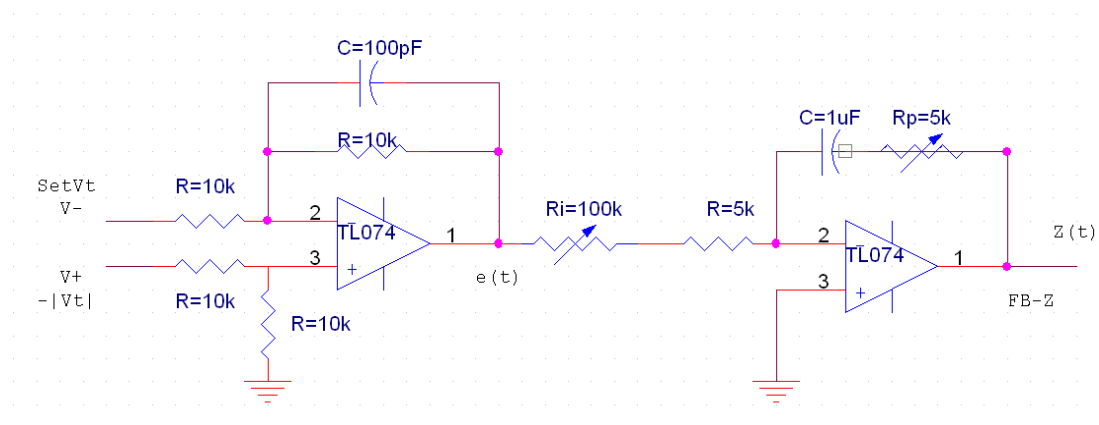


圖 3.32 舊版回饋電路積分修正項與比例修正項為串聯設計

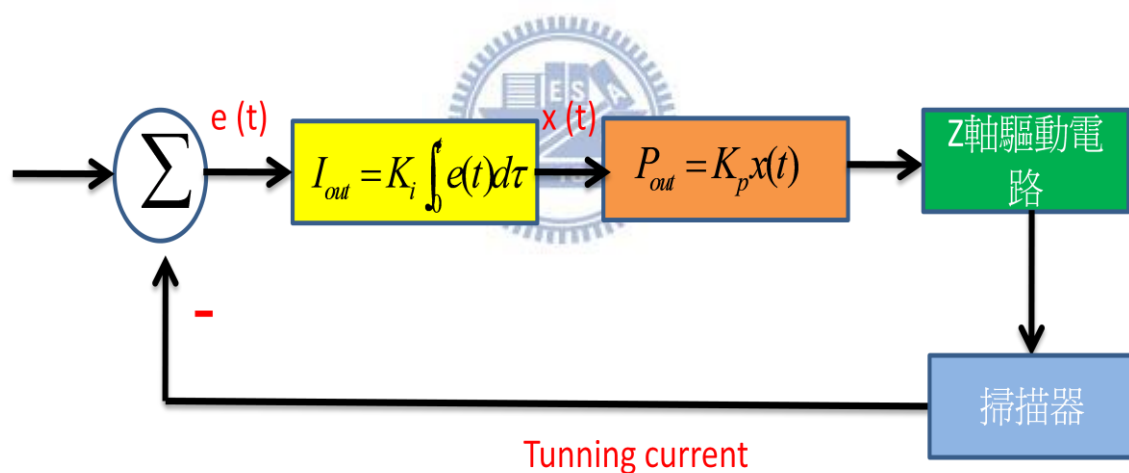


圖 3.33 舊版回饋電路流程方塊圖

此種串聯回饋方式，在地貌起伏較陡峭的部分會不夠銳利反應不夠快，同時 Igain 調小時，Pgain 作用範圍會被縮小與限制。所以我們新的設計上使用比例修正項和積分修正項並聯的設計，如 3.3.3 節的介紹。改用並連設計後，陡峭地貌部分回饋電路比例修正項能正確作用使陡峭地貌銳利度提高，如圖 3.34。

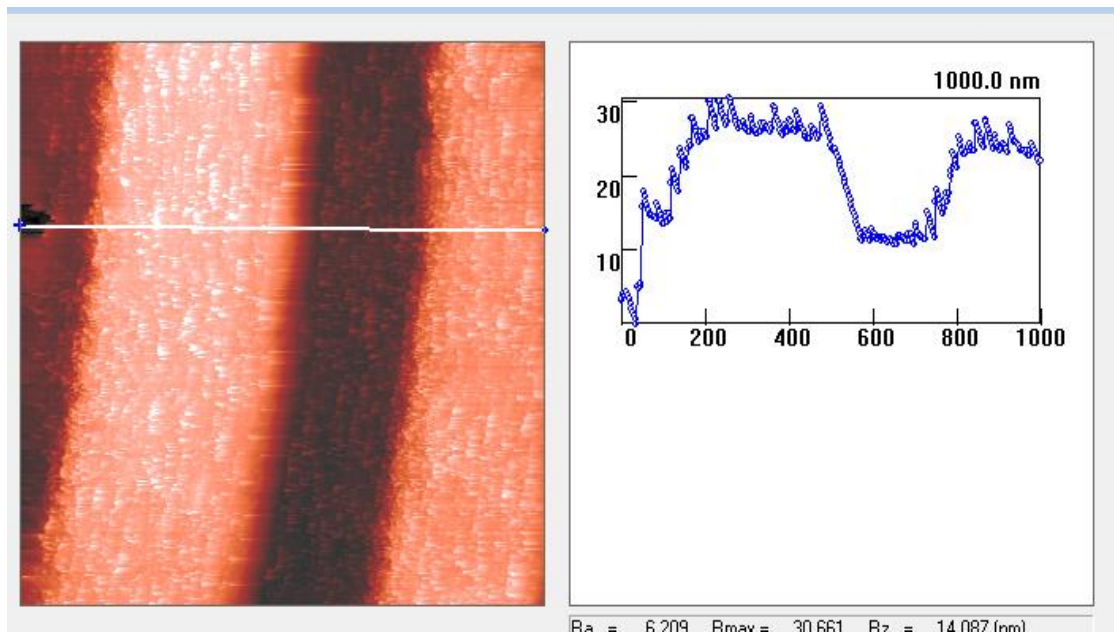


圖 3.34 積分修正項與比例修正項並聯後，銳利度提升



## 第四章、實驗成果(二) 大範圍掃描器與作針系統

### 4.1 大範圍掃描器設計與成果

低電壓蜂鳴片的掃描範圍被電控盒輸出電壓所限制，我們透過 Z 軸獨立和延伸陶瓷管來提升的掃描範圍有限；另一方面也為了後續發展原子力顯微鏡 (AFM) 所需要的大範圍掃描器，我們嘗試著利用其他壓電材料設法達到目的，後來選用 bimorph 壓電片成功做出約 100 $\mu$ m 的大範圍掃描器。

一開始我們使用市面上所販售的 bimorph 壓電片，長 40mm 寬 10mm 如圖 4.1。根據第二章提到的彎曲制動器的動作原理，將三片 bimorph 壓電片組裝成三軸的掃描器，如圖 4.2。

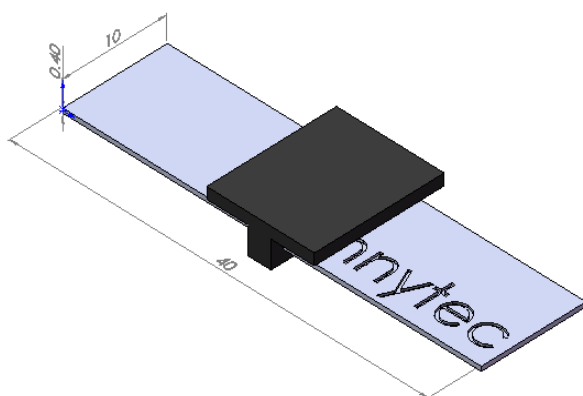


圖 4.1 市售 bimorph 外觀壓電片外觀

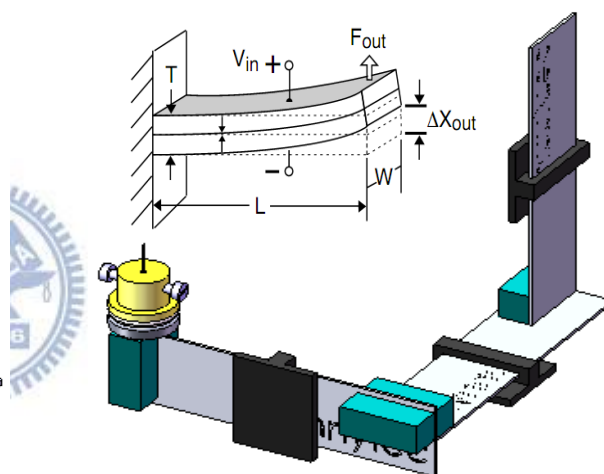


圖 4.2 由 bimorph 組成的三軸掃描器

其掃描範圍在  $-10V \sim +10V$  的電壓驅動下達  $0.25\text{mm} \times 0.25\text{mm}$ ，範圍太大沒辦法使用在穿隧電流顯微鏡與原子力顯微鏡上，檢討原因後我們決定將壓電片的長度縮小四倍，即定做一個  $10\text{mm} \times 10\text{mm}$  的 bimorph 壓電片，如圖 4.3。為了固定好三個 bimorph 壓電片，我們設計了 5 種不同的陶瓷固定塊來固定，最後組裝成三軸的掃描器，如圖 4.4。

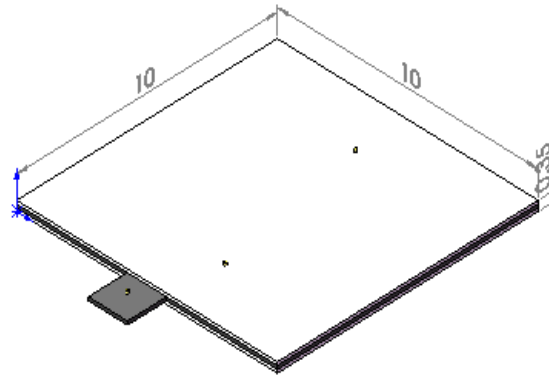


圖 4.3 重新訂做的 bimorph 壓電片

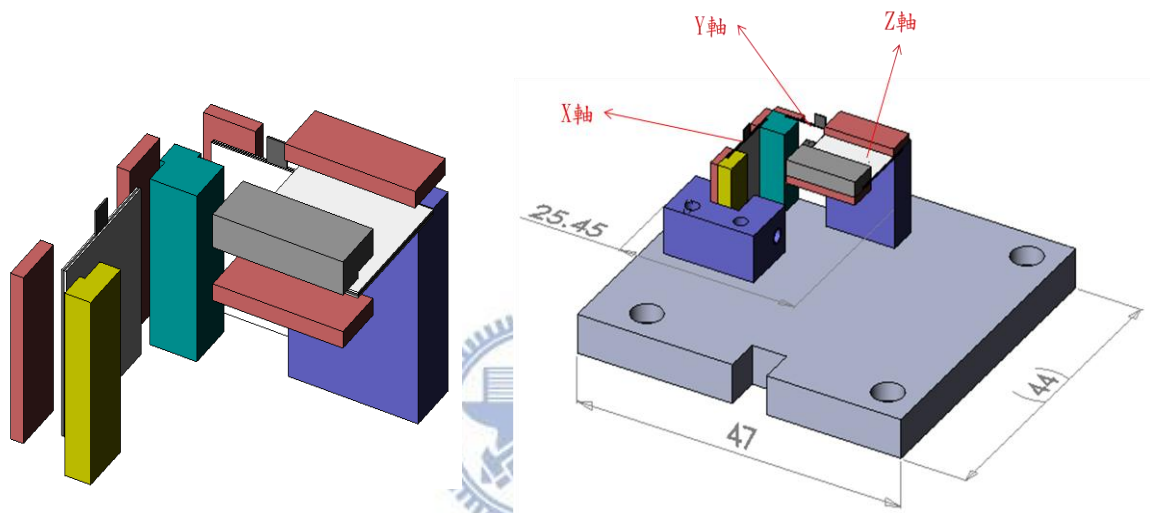


圖 4.4 掃描器的組裝與成品示意圖

由於固定方式是用陶瓷固定塊黏上陶瓷膠來連接各個 bimorph 壓電片，因此在陶瓷膠固化之前十分容易鬆脫與移位。為了解決這個問題，我們設計了模具用來固定這些元件的相對位置，使之陶瓷膠在硬化前各個零組件都不會移位，如圖 4.5。

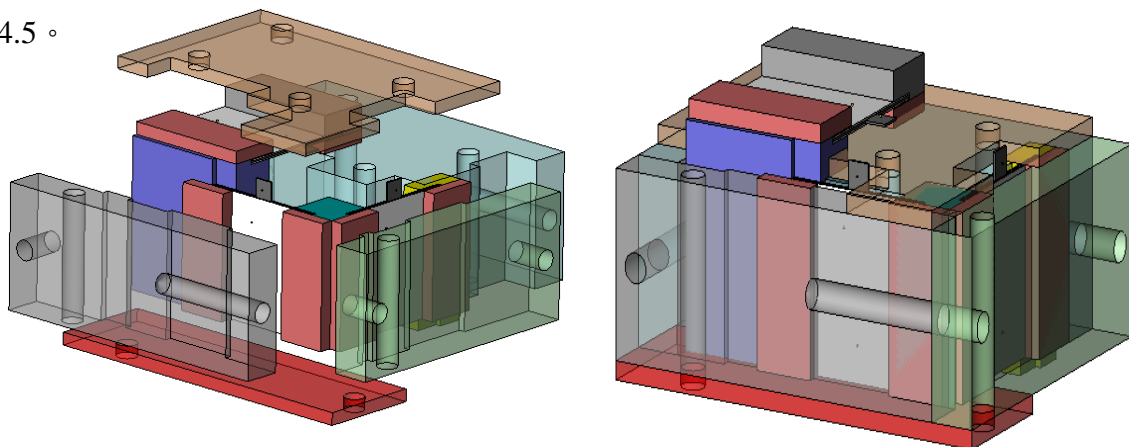


圖 4.5 掃描器固定模具爆炸圖與示意圖

完成掃描器的組裝後，我們將驅動電壓分別接上設計的掃描器上，其 XY 驅動電壓暫用 STM 控制電路中 XY 驅動電路的 +X 與 +Y 電壓，如圖 4.6

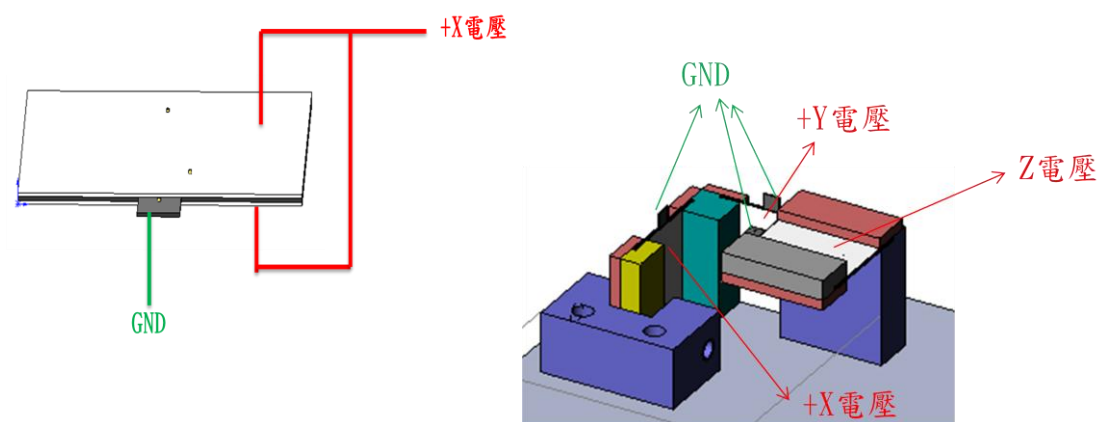


圖 4.6 掃描器驅動電壓接法示意圖

我們暫時將掃描器搭載於 STM EDUCA 上，運用其掃描機構來掃圖，首先我們先掃週期 700nm 溝槽縱深 30nm 的 DVD 標準樣品來測量掃描範圍。XY 驅動電壓分別為 -0.6V~0.6V 之間，有掃到 20 個 DVD 溝槽，所以掃描範圍推估為 14μm\*14μm，如圖 4.7。

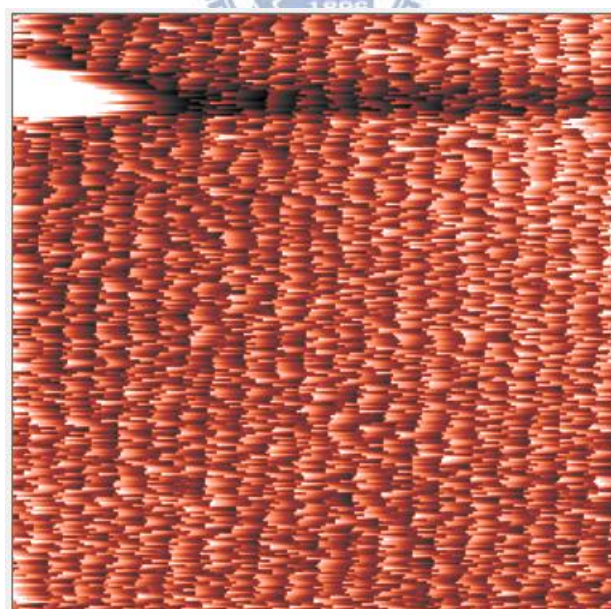


圖 4.7 當驅動電壓範圍為 -3V~3V 時，約可以少到 20 的週期，換算範圍約為 14μm\*14μm

接下來位驗證掃到的圖真實性與掃描器的線性度，我們將 XY 驅動電壓改為  $-0.925\text{V}\sim 0.925\text{V}$  之間約縮小 4.6 倍，掃描後約掃到 4.5 個週期的 DVD 溝槽，所以掃描範圍推估為  $3.15\mu\text{m}\times 3.15\mu\text{m}$ ，如圖 4.8。

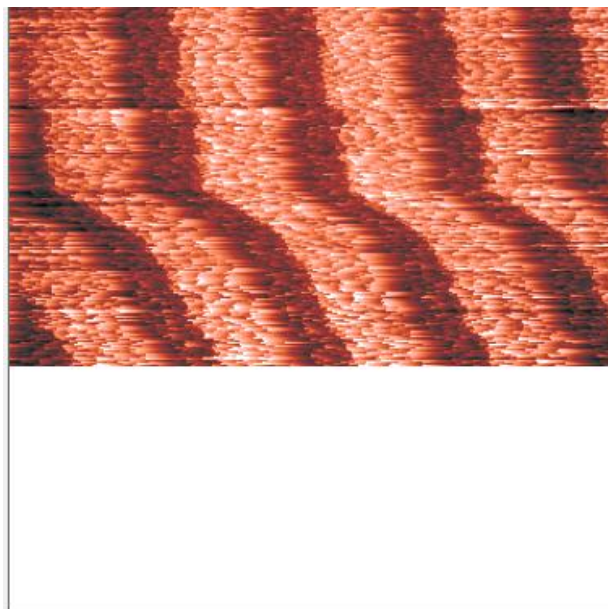


圖 4.8 約 4.5 週期的 DVD 溝槽，推算其範圍約為  $3.15\mu\text{m}\times 3.15\mu\text{m}$

根據圖 4.8 與圖 4.9 可驗證，當我們縮小驅動電壓 4.67 倍，掃描範圍也大致縮小為 4.28 倍符合預期線性度。所以我們試著由此關係推估此掃描器在  $-10\text{V}\sim 10\text{V}$  驅動電壓時最大掃描範圍，在  $-3\text{V}\sim 3\text{V}$  驅動電壓時掃描範圍約為  $14\mu\text{m}\times 14\mu\text{m}$ ，所以驅動能力約為  $4.67\mu\text{m}/\text{V}$ ，所以推估最大範圍約為  $47\mu\text{m}\times 47\mu\text{m}$ 。圖 4.9 則為試掃藍光 DVD 的結果。

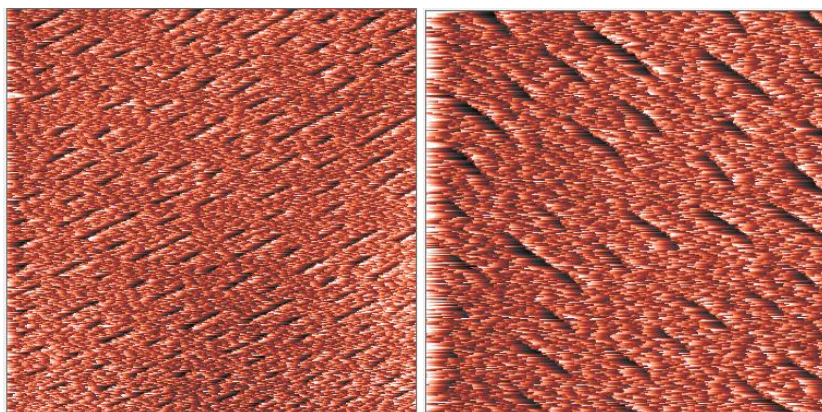


圖 4.9 藍光 DVD

## 4.2 自動製作探針系統

還記得剛進實驗室的時候，第一次學習製作 STM 掃圖用的鎢針，那時製備方法是將鎢線置於 KOH 溶液做電解蝕刻，在用肉眼去觀察探針蝕刻完成然後切斷電源，因此反應時間和專心度在製作品質好的鎢針便顯得十分關鍵。也因為我們自製 STM 系統當時還在測試階段，需要品質一致好的探針來協助我們排除問題，而當時人工斷電品質真的很難控管，也因此激發了我們研發自動製作探針系統。

一開始我們是用實驗室 NI-USB6009 這張 DAQ 卡來擷取電流資訊，如圖 4.10。由圖可以看到在斷針點電流有很大的不連續，因此我們想利用這個特性來實現自動斷電的裝置。

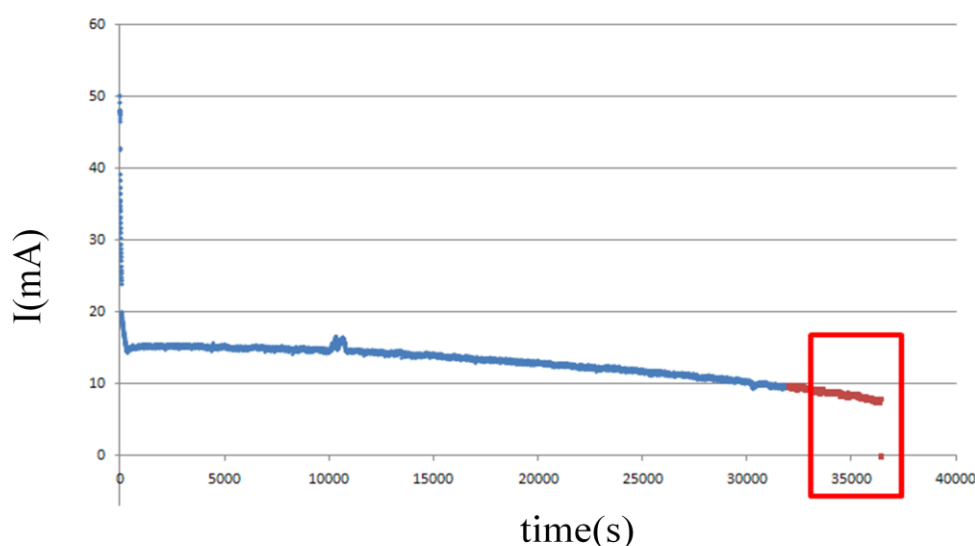


圖 4.10 鎢針蝕刻時電流隨時間變化關係圖

設計的測試電路如圖 4.11，我們使用繼電器(Relay)來切斷蝕刻電源 Vcc，而 DAQ 的數位輸出端 Dight out0 輸出電流小不能直接推負載，因此讓它供應電晶體 Q1 基級的電流並使 Q1 操作在飽和區，此時集級電流為基極電流的  $\beta$  倍，足夠來推動繼電器的開關。我們利用小電阻 R1 將蝕刻電流轉成為電壓，由 DAQ 的類比輸入端 AI0 來偵測。

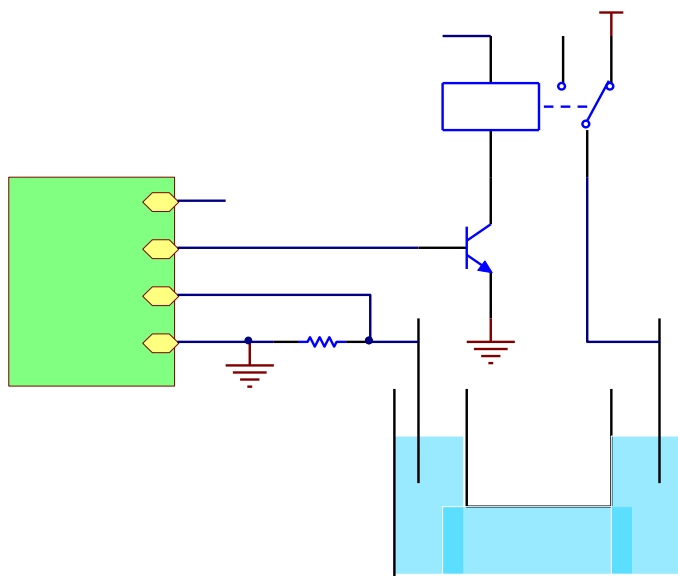


圖 4.11 測試蝕刻斷電的電路圖

而測試程式則用 Labview 撰寫，其透過 DAQ 擷取 R1 的電壓值  $V_t$  後，將其電壓與上一時刻量到的電壓  $V_{t-1}$  做比較，當其變化率超過設定的百分比如 60%，4.1 式後命令 DAQ 的 Digital out0 輸出準位為零將繼電器關掉，程式碼如圖 4.12。

$$\frac{V_t - V_{t-1}}{V_t} > 60\% \quad (4.1 \text{ 式})$$

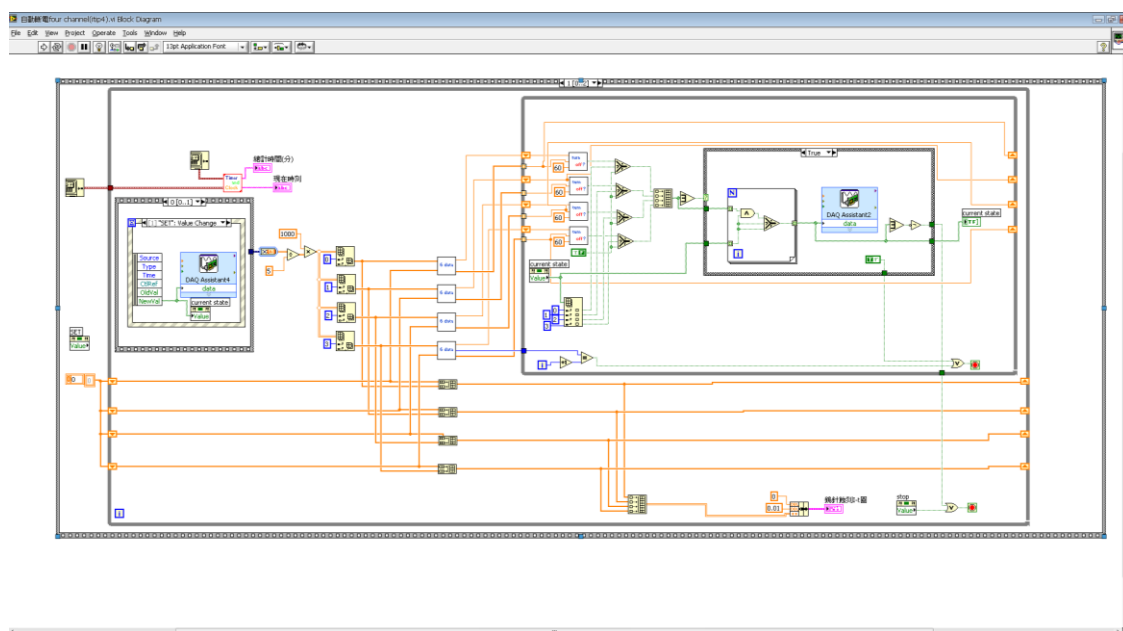


圖 4.12 Labview 程式碼

我們測試的時候是發展一次做四根探針，DAQ 每個通道取樣速度為 3kps，理論判斷時間為 0.3ms，由此系統發展的探針經過 SEM 確認後針尖取率半徑約為 50nm~60nm 且品質一致如圖 4.13，程式在執行時可以依序斷針，以前一根針大概需要十分鐘，現在產能則提高為 4 倍，圖 4.14 為程式執行畫面。

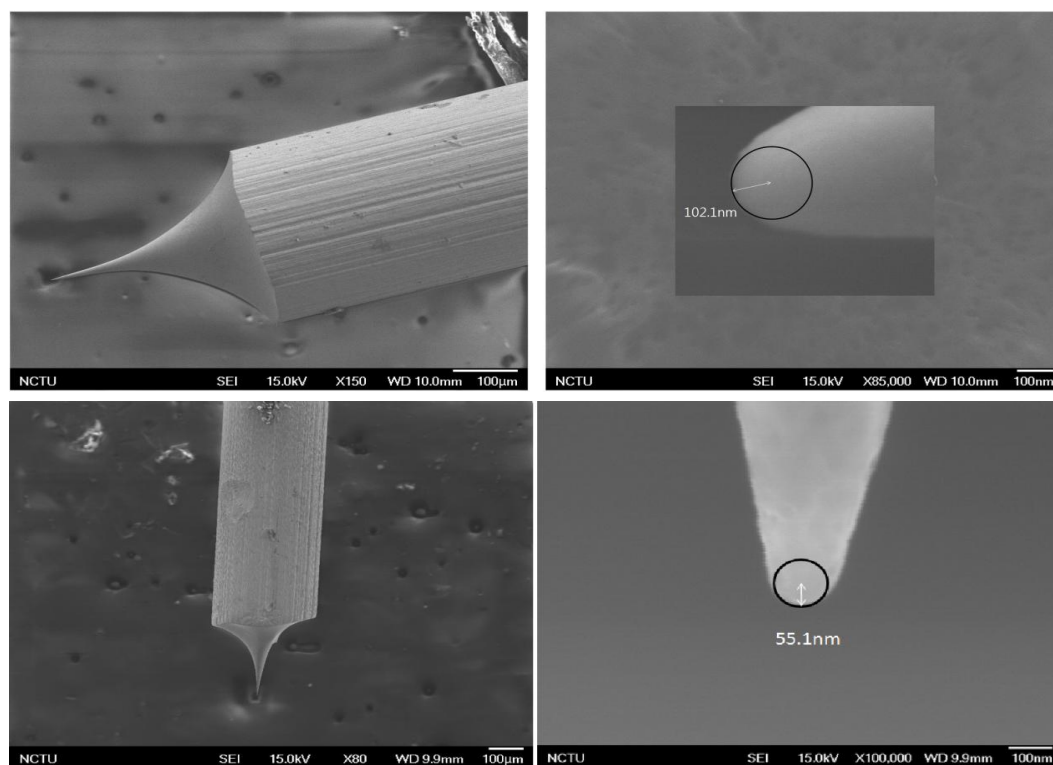


圖 4.13 本自動斷電系統製作探針的 SEM 影像

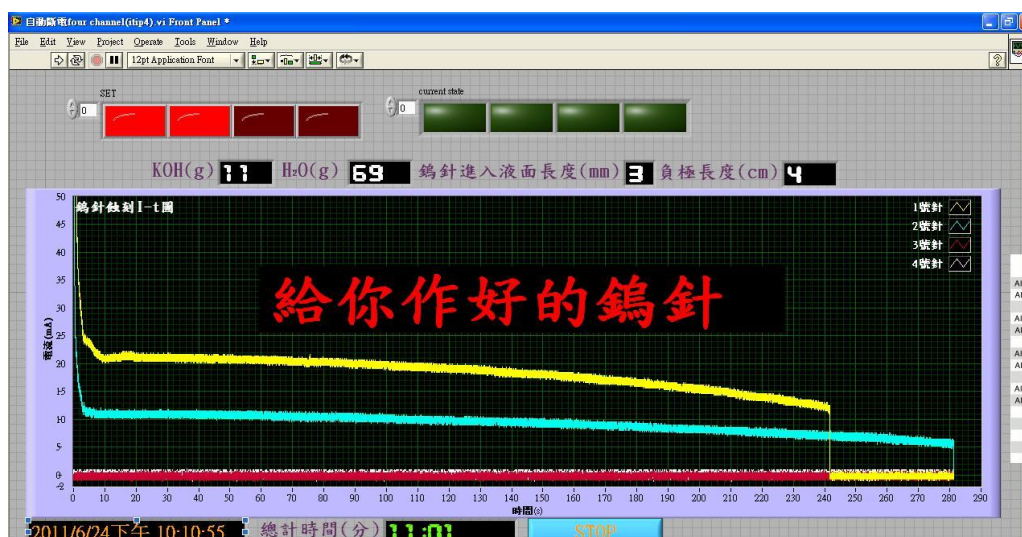


圖 4.14 程式執行介面

經過一年穩定測試後，我們發展了不用 PC 判斷的概念版，如圖 4.15。其機械裝置與電子電路系統大至上已經成形；機械部分為我的搭擋林光華所設計，如圖 4.16，而電路部分還是由許俸昌先生所完成，如圖 4.17。

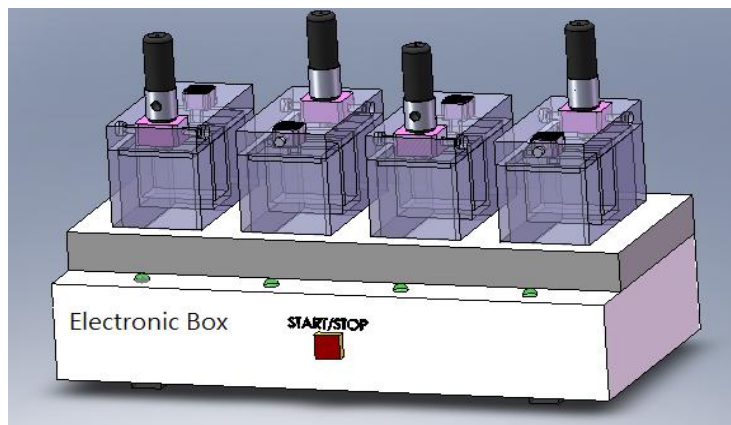


圖 4.15 自動做針概念版



圖 4.16 自動做針裝置機械部分

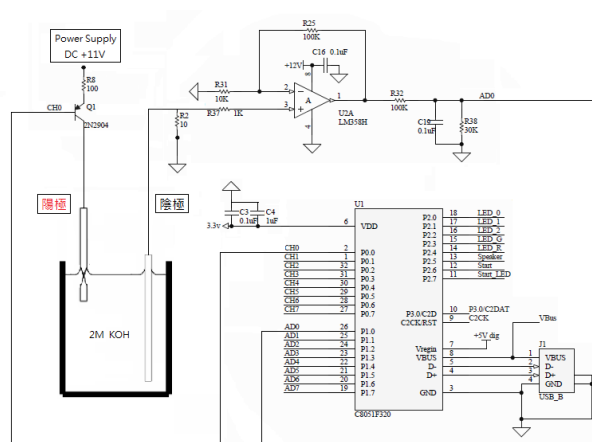


圖 4.17 用 MCU 控制的自動斷電電路

## 第五章、結論

本實驗室發展掃描穿隧式電流顯微鏡已經有許多年以累積的經驗，在上一版 STM EDUCA 成功推廣到各大專院校後，我們便致力於提升品質與可靠度。經過一些機構上的修改與細部微調目前已經使解析度已提升許多，但礙於機構上的限制仍無法有效改善熱飄移與最大範圍掃描失真的問題，因此我們重新設計新的研究型掃描式穿隧電流顯微鏡來改善這些問題

### a.熱飄移改善：

而我們的解決方法發展低電壓自動步進器，使機台在設計時能夠使用高對稱的概念設計。由於有良好的對稱性，所以 STM 在掃描時因環境溫度的變化造成的熱膨脹會因機械的對稱性互相抵消，使圖像不易發生熱飄移。而低電壓步進器因採用對稱性的設計也有改善熱飄移的作用，而且可以經由彈簧調整自由正向力使步進器更加可靠。



### b.解決最大範圍掃描失真：

過去直接將 Z 軸電壓與四個驅動電壓疊加來驅動掃描器，存在著最大範圍掃描時運算放大器輸出飽和造成圖像失真的問題。因此在新版本裡將 Z 軸電壓加至於掃描器共同下電極，即 Z 軸獨立的設計概念，使 OP 輸出端的擺幅提高來避免飽和失真的發生，也能增大低電壓蜂鳴片掃描器的掃描範圍

### c.改善 P gain 會受 I gain 影響：

在舊的回饋電路中比例修正項會受積分修正項的大小影響其作用，因此我們將比例修正項與積分修正項個別獨立出來，再將其個別修正量加起來後來控制掃描器 Z 軸。獨立後已經能讓 P gain 不會再受 I gain 影響，因此在地貌起伏較陡峭的地方能有更好的銳利度。雖然已有銳利度的改善，但現在的 P gain 與 I gain 可調整範圍還是不足且偏大，造成在掃描微小表面起伏時容易振盪，是目前還得積極解決的問題；而從大範圍的 bimorph 掃描器上，也有看到 I gain 與 P gain 過大造成在表面振盪，因此大範圍的 bimorph 掃描器驅動電路 P gain 與 I gain 的可調

範圍也需要再做調整。

我們利用三個低電壓 bimorph 壓電片成功發展出大範圍掃描器，其最大範圍推估為  $100\mu\text{m}\times 100\mu\text{m}$ ，能用於公司正在發展原子力顯微鏡機台上。另一方面我們也發展了鎢針蝕刻自動斷電系統，解決了傳統做針時因人工斷電容易使針尖品質參差不齊的問題，不僅節省時間也提高針尖的品質。



## 參考文獻

1. 郭融學，用低溫掃描穿隧電流顯微鏡研究奈米金顆粒之電子能譜，國立交通大學電子物理研究所碩士論文，新竹市(2008)。
2. Piezo Systems, CATALOG #8 (2011), pages 22, 23, 24, 25, 62, 63 & 64.
3. Introduction to Scanning Tunneling Microscopy , C.JULIAN CHEN,Chapter1
4. Wikipedia web site ‘[http://en.wikipedia.org/wiki/Quantum\\_tunnelling](http://en.wikipedia.org/wiki/Quantum_tunnelling)’
5. Introduction to Scanning Tunneling Microscopy , C.JULIAN CHEN,Chapter10
6. Wikipedia web site ‘[http://en.wikipedia.org/wiki/Inchworm\\_motor](http://en.wikipedia.org/wiki/Inchworm_motor)’
7. Ch. Renner , Ph. Niedermann ,A.D. Kent ,and  $\Phi$ . Fischer , Rev. Sci. Instrum.69,865 (1990)
8. Wikipedia web site ‘[http://en.wikipedia.org/wiki/PID\\_controller](http://en.wikipedia.org/wiki/PID_controller)’

