

前 瞻 性 奈 米 探 針 陣 列 之 製 作 與 應 用)

學生：王敬雅

指導教授：柯富祥

國立交通大學奈米科技研究所碩士班

摘 要

奈米科技日漸重要，朝向微觀世界發展，首先要先製作出可以量測更精細的工具。目前已製作的各類探針情況各有侷限，比如有的散亂成長，無法成長探針在指定的位置，因此我們將研究奈米探針之製作方法，未來可以運用到生化系統上，降低誤差並提高操作的精確度，量測單一神經元細胞的奈伏至微伏訊號，最終預期將成爲一前瞻性研究生物細胞等級的奈米工作平台，對往後生物醫學的研究與應用有突破性發展。

本論文針對奈米探針設定目標，由於未來希望運用在生物上研究生命跡象，因此內部爲導電材料，而且探針尖小於 30 度。先用乾蝕刻方式，之後經熱氧化和去除的過程，使探針尖小於 30 度。奈米探針外部必須對周遭環境絕緣，以避免電雜訊干擾。因此奈米探針上增長熱氧化物，且利用濕式蝕刻法來得到開口式的探針。可有效控制探針成長的位置。研究中發展新式的半導體陣列製造技術，結果不同的微影及蝕刻製程設計，成功的製造出各種不同型態的奈米探針，並瞭解其製程探針的成形機制。另外我們也嘗試在探針上以自我對準方式來成長單一奈米碳管。針對所發展之奈米探針，其場發射特性已成功的被測定到。

(Fabrication of Ultrasharp Nanotip Arrays and Application)
student : Ching-Ya Wang

Advisors : Dr. Fu-Hsiang Ko

Institute of Nanotechnology (INT)

National Chiao Tung University

ABSTRACT

Nanoscaled tips are received much attention recently due to its versatile applications such as near-field optical microscopy, scanning tunneling microscopy, flat panel displays, and high-efficiency field emission. A sharp tip can induce the stronger field enhancement effect, and therefore, increase the field emission current. Similarly, the sharp tip is also beneficial for improving the spatial resolution in scanning probe microscopy. In this thesis, well aligned nanotip arrays by combining the electron beam lithography and reactive ion etching (RIE) technology are fabricated. From the SEM observation, a nanoscaled tip with apexes of about 12 nm radius and 500 nm height is achieved. The tip-end radius can be further sharpened by a subsequent oxidization and wet etch process to achieve a very smaller apex.

The etching mechanism to form the nanotips is also discussed in this thesis. We find the remained photoresist on top of the tip is gradually reduced with increasing the etching time. The photoresist serves as the purpose of shielding mask to protect the underlying silicon. As the photoresist is fully etched away at the final, a pyramid-like shape is formed at the tip-end due to the etch probability of incident ion on the sidewall. We find a pyramid shape is formed

although the initial pattern is defined as cylinder. The shape conversion is at various etching times. Interestingly, the initial shape is cylinder, and will turn into pyramid with tapered sidewall after 3 min etching. The tip becomes pyramid shape with slope sidewall after 6 min etching, and become pyramid with recessed sidewall after 7 min etching. The shape of the nanotip can influence the field emission property, and more field emission results will be given in the thesis.

\



誌 謝

首先誠摯的感謝指導教授柯富祥博士，老師悉心的教導使我得以一窺奈米科技領域的深奧，不時的討論並指點我正確的方向，使我在這些年中獲益匪淺。老師對學問的嚴謹更是我輩學習的典範。

本論文的完成另外亦得感謝 NDL 的鄭旭君先生大力協助，及 NDL 劉正財先生的支持。因為有你們的體諒及幫忙，使得本論文能夠更完整而嚴謹。

兩年裡的日子，實驗室裡共同的生活點滴，學術上的討論、言不及義的閒扯，感謝眾位學長姐、同學、學弟妹的共同砥礪，你/妳們的陪伴讓兩年的研究生活變得絢麗多彩。

感謝吳其昌、吳佳典、徐乙介、邱志威、李坤霖、黃建文學長們不厭其煩的指出我研究中的缺失，且總能在我迷惘時為我解惑，也感謝吳奕儂、林志杰、游群芳同學的幫忙，恭喜我們順利走過這兩年。實驗室的吳中書、魏宜生學弟、蔡依蓁、夏德玲、黃美榕學妹們當然也不能忘記，妳的幫忙及搞笑我銘感在心。

另外法輪大法社徐仁乾、陳春豪、何智偉和鄭少凡等眾多學長和朋友學弟學妹們對我研究上、生活上的指教評點，朋友李佳鴻在背後的默默支持更是我前進的動力，還有親愛的姊姊王虹文，沒有大家的體諒、包容，相信這兩年的生活將是很不一樣的光景。

法輪大法所教導的真善忍更是無時無刻的陪伴著我。

最後，謹以此文獻給我摯愛的雙親。

目錄

中文提要	.....	i
英文提要	.....	ii
誌謝	.....	iv
目錄	.....	v
表目錄	.....	vi
圖目錄	.....	vii
第一章	.....	1
1.1	前言.....	1
1.2	背景介紹.....	2
1.3	研究目的	2
1.4	文獻探討.....	3
第二章	.....	14
2.1	光學微影技術.....	14
2.2	蝕刻.....	14
2.2.1	濕蝕刻原理.....	15
2.2.2	乾式蝕刻.....	15
2.3	實驗儀器.....	16
2.3.1	SEM 掃描電子顯微鏡的工作原理.....	16
2.3.2	TCP 9400SE 多晶矽乾蝕刻機.....	16
2.3.3	In-line SEM.....	16
2.3.4	Clean Track MK-8.....	17
2.3.5	WEPRINT 200 電子束系統.....	17
2.3.6	N&K 薄膜測厚儀.....	17
2.3.7	FUSION OZONE 乾式光阻去除機.....	18
2.3.8	水平爐管.....	18
2.4	晶圓清洗簡介.....	18
2.5	RCA 清潔技術.....	18
2.6	探針主要製程.....	19
2.6.1	微影製程及其條件參數.....	19
2.6.2	蝕刻條件.....	20
2.6.3	FUSION OZONE 乾式光阻去除機條件參數.....	20
2.6.4	爐管氧化前清洗.....	20
2.6.5	爐管氧化.....	20
2.7	探針製作過程.....	21
第三章	實驗結果.....	23
3.1	蝕刻時間變化與探針形狀的關係.....	23

3.2	光阻與蝕刻時間的關係	28
3.3	蝕刻機制	38
3.4	探針製程結果	38
3.4.1	探針影像	38
3.4.2	探針的針尖影像	39
3.4.3	探針的尖銳化	40
3.4.4	蝕刻時間變化與針尖角度的關係	40
3.4.5	浸泡被稀釋後的去光阻液時間和探針尖露出的關係	40
第四章	奈米探針的應用	56
4.1	奈米探針之場發射應用	56
4.1.1	量測結果	58
4.2	利用奈米探針結構自行對準成長奈米碳管	59
第五章	結論與未來展望	63
5.1	結論	63
5.1.1	優點	63
5.2	未來展望	63
參考文獻		63
自傳		68



表目錄

表 2.6.1	微影製程之流程條件參數	19
表 2.6.1.2	微影製程之條件參數	19
表 2.6.2	蝕刻條件參數	20
表 2.6.3	FUSION OZONE 乾式光阻條件參數	20

圖目錄

- 圖 1-3：本研究擬研究並製造之奈米探針結構圖.....3
- 圖 1-4-1：乾蝕刻製作探針流程圖：(A)表示反應氣體為矽烷、甲烷、氫氣和氬氣的混合氣體，(B)表示奈米尺寸的 SiC 經由 SiH₄ 和 CH₄ 電漿的反應，然後分佈在基材表面上，(C)表示沒有被 SiC 遮蔽的區域將被氫氣和氬氣電漿蝕刻，被 SiC 遮蔽的地方就形成探針。.....7
- 圖 1-4-2：乾蝕刻之二，(A)表示在基材上沈積一層不平坦的銀膜，(B)經由噴濺電漿使銀膜區域變小，而其中沒有銀膜保護的矽表面就會開始被蝕刻，(C)經蝕刻後形成的矽柱和探針。.....7
- 圖 1-4-3：電化學蝕刻：不銹鋼為陰極，鎢絲為陽極，電解蝕刻液為氫氧化鉀，經由電化學反應所製作的探針.....8
- 圖 1-4-4：電化學蝕刻，以鎢絲製作鎢探針：空氣和電解液介面附近的情況.....8
- 圖 1-4-5：使用場發射誘發的方式製作高解析度的奈米線：(a) 為 SEM 影像，展示 AFM 探針和兩個鎢探針的位置圖，兩個蝕刻過的鎢探針被連接在操作端以便場發射誘導成長奈米線，(b)為在 AFM 探針有 200 nm 長的鎢奈米線 SEM 圖。.....8
- 圖 1-4-6：場發射誘發成長方法成長的奈米探針：(a)為 TEM 影像，FEIG 的碳之奈米探針長在鎢探針上，(b)為此奈米探針的高解析度影像，(c)為 SEM 影像，分別為奈米探針經場發射誘導成長的結果，分為 5, 11, 22,和 32 秒，奈米探針長度隨著誘發時間長而拉長。.....9
- 圖 1-4-7：透過電漿輔助的熱細絲化學氣相沈積法，做成大小均勻而且密度很高的奈米探針，(a)展示了高密度的不規則奈米探針陣列，(b)為在其不規則結構中有關尺寸大小和探針針尖角度和分佈情況。.....10
- 圖 1-4-8：使用表面不平整的金屬膜片製成矽支柱，(a) (b)為經 RIE 蝕刻兩分鐘後之 SEM 影像，(a)為大小 10 μm 平方的景象，(b)為其中間有規則排列的部分影像。.....11

圖 1-4-9：使用模版製作探針的方式，(a)為 Si 模版的製作，(b)為沈積半導體鑽石薄膜，(c) 為使用有傳導性的環氧化物接著劑黏接半導體鑽石薄膜和電極，(d)為使用 HF:HNO ₃ :H ₂ O(1:2:1)蝕刻 Si 模版，最終剩下鑽石探針。	12
圖 1-4-10：製造探針的流程圖，(a)是在氧化物上轉印形成光阻圖案，(b)為經由 CH ₄ 電漿蝕刻後的圖形，(c)為經由濕蝕刻後形成的金字塔結構探針，(d)為再經由 SF ₆ 電漿蝕刻後所得的矽探針，(e)為在探針上使用熱氧化成長法，(f)為去掉氧化層之後，尖銳化探針的完成示意圖。	12
圖 1-4-11：尖銳化前 SEM 圖，為經濕蝕刻所形成的金字塔結構探針	13
圖 1-4-12：尖銳化後 SEM 圖，經由熱氧化尖銳法後所形成的探針 SEM 圖	13
圖 2-7-1：實驗流程圖之一	22
圖 2-7-2：實驗流程圖之二	22
圖 3-1-1：經乾蝕刻後的平面 SEM 圖: (a) 未蝕刻(0 min), (b) 3 min, (c) 4 min, (d) 6 min, and (d) 7 min. 奈米探針圖形隨著蝕刻時間增加而變化	24
圖 3-1-2 多晶矽蝕刻八分鐘平面照	24
圖 3-1-3 單晶矽蝕刻八分鐘平面照	24
圖 3-1-4 蝕刻零分鐘之 SEM 平面圖	24
圖 3-1-5 蝕刻一分鐘之 SEM 平面圖	25
圖 3-1-6 蝕刻兩分鐘之 SEM 平面圖	25
圖 3-1-7 蝕刻三分鐘之 SEM 平面圖	25
圖 3-1-8 蝕刻四分鐘之 SEM 平面圖	26
圖 3-1-9 蝕刻五分鐘之 SEM 平面圖	26
圖 3-1-10 蝕刻六分鐘之 SEM 平面圖	26

圖 3-1-11 蝕刻七分鐘之 SEM 平面圖·····	27
圖 3-1-12 蝕刻八分鐘之 SEM 平面圖·····	27
圖 3-1-13 蝕刻九分鐘之 SEM 平面圖·····	27
圖 3-1-14 蝕刻十分鐘之 SEM 平面圖·····	28
圖 3-2-1：蝕刻 3min，為探針大小 150 nm，距離 100nm·····	30
圖 3-2-2：蝕刻 4min，為探針大小 150 nm，距離 100nm·····	30
圖 3-2-3：蝕刻 5min，為探針大小 150 nm，距離 100nm·····	30
圖 3-2-4：蝕刻 6min，為探針大小 150 nm，距離 100nm·····	31
圖 3-2-5：蝕刻 3min，為探針大小 150 nm，距離 200nm·····	31
圖 3-2-6：蝕刻 4min，為探針大小 150 nm，距離 200nm·····	31
圖 3-2-7：蝕刻 5min，為探針大小 150 nm，距離 200nm·····	32
圖 3-2-8：蝕刻 6min，為探針大小 150 nm，距離 200nm·····	32
圖 3-2-9：蝕刻 3min，為探針大小 150 nm，距離 800nm·····	32
圖 3-2-10：蝕刻 4min，為探針大小 150 nm，距離 800nm·····	33
圖 3-2-11：蝕刻 5min，為探針大小 150 nm，距離 800nm·····	33
圖 3-2-12：蝕刻 6min，為探針大小 150 nm，距離 800nm·····	33
圖 3-2-13：蝕刻 3min，為探針大小 200 nm，距離 300nm·····	34
圖 3-2-14：蝕刻 4min，為探針大小 200 nm，距離 300nm·····	34
圖 3-2-15：蝕刻 5min，為探針大小 200 nm，距離 300nm·····	34
圖 3-2-16：蝕刻 6min，為探針大小 200 nm，距離 300nm·····	35
圖 3-2-17：蝕刻 3min，為探針大小 200 nm，距離 500nm·····	35

圖 3-2-18：蝕刻 4min, 為探針大小 200 nm , 距離 500nm	35
圖 3-2-19：蝕刻 5min, 為探針大小 200 nm , 距離 500nm	36
圖 3-2-20：蝕刻 6min, 為探針大小 200 nm , 距離 500nm	36
圖 3-2-21：蝕刻 3min, 為探針大小 300 nm , 距離 800nm	36
圖 3-2-22：蝕刻 4min, 為探針大小 300 nm , 距離 800nm	37
圖 3-2-23：蝕刻 5min, 為探針大小 300 nm , 距離 800nm	37
圖 3-2-24：蝕刻 6min, 為探針大小 300 nm , 距離 800nm	37
圖 3-3-1：經由乾蝕刻製作之奈米探針之蝕刻機制：乃配合 SEM 的照片所推測出的蝕刻 機制	38
圖 3-4-1-1 為探針大小 200nm , 距離為 200nm 的 SEM cross-section 圖	41
圖 3-4-1-2 為探針大小 200nm , 距離為 300nm 的 SEM cross-section 圖	41
圖 3-4-1-3 為探針大小 300nm , 距離為 500nm 的 SEM cross-section 圖	42
圖 3-4-1-4 為探針大小 300nm , 距離為 800nm 的 SEM cross-section 圖	42
圖 3-4-1-5 為探針大小 300nm , 距離為 800nm 的 SEM cross-section 圖	43
圖 3-4-1-6 為探針大小 300nm , 距離為 1000nm 的 SEM cross-section 圖	43
圖 3-4-2-1a 為探針大小 200nm , 距離為 200nm 的 SEM cross-section 圖	44
圖 3-4-2-1b 為探針大小 200nm , 距離為 200nm 的 SEM cross-section 圖	44
圖 3-4-2-2a 為探針大小 200nm , 距離為 200nm 的 SEM cross-section 圖	45
圖 3-4-2-2b 為探針大小 200nm , 距離為 200nm 的 SEM cross-section 圖	45
圖 3-4-2-3a 為探針大小 200nm , 距離為 200nm 的 SEM cross-section 圖	46
圖 3-4-2-3b 為探針大小 200nm , 距離為 200nm 的 SEM cross-section 圖	46

圖 3-4-2-4a 爲探針大小 200nm，距離爲 300nm 的 SEM cross-section 圖	47
圖 3-4-2-4b 爲探針大小 200nm，距離爲 300nm 的 SEM cross-section 圖	47
圖 3-4-2-5a 爲探針大小 200nm，距離爲 300nm 的 SEM cross-section 圖	48
圖 3-4-2-5b 爲探針大小 200nm，距離爲 300nm 的 SEM cross-section 圖	48
圖 3-4-2-6a 爲探針大小 200nm，距離爲 300nm 的 SEM cross-section 圖	49
圖 3-4-2-6b 爲探針大小 200nm，距離爲 300nm 的 SEM cross-section 圖	49
圖 3-4-2-7a 爲探針大小 300nm，距離爲 800nm 的 SEM cross-section 圖	50
圖 3-4-2-7b 爲探針大小 300nm，距離爲 800nm 的 SEM cross-section 圖	50
圖 3-4-2-8a 爲探針大小 300nm，距離爲 1000nm 的 SEM cross-section 圖	51
圖 3-4-2-8b 爲探針大小 300nm，距離爲 1000nm 的 SEM cross-section 圖	51
圖 3-4-2-9a 爲探針大小 300nm，距離爲 1000nm 的 SEM cross-section 圖	52
圖 3-4-2-9b 爲探針大小 300nm，距離爲 1000nm 的 SEM cross-section 圖	52
圖 3-4-2-10a 爲探針大小 300nm，距離爲 1000nm 的 SEM cross-section 圖	53
圖 3-4-2-10b 爲探針大小 300nm，距離爲 1000nm 的 SEM cross-section 圖	53
圖 3-4-3-1 探針未尖銳化前，探針大小 200nm，距離 200nm	54
圖 3-4-3-2 探針未尖銳化前，探針大小 300nm，距離 500nm	54
圖 3-4-3-3 探針未尖銳化前，探針大小 300nm，距離 1000nm	54
圖 3-4-3-4 探針尖銳化後，探針大小 200nm，距離 200nm	55
圖 3-4-3-5 探針尖銳化後，探針大小 300nm，距離 500nm	55
圖 3-4-3-6 探針尖銳化後，探針大小 300nm，距離 1000nm	55
圖 4-1-1 field emission SEM 圖	56

圖 4-1-2 field emission SEM 圖	57
圖 4-1-3 field emission SEM 圖	57
圖 4-1-4 field emission SEM 圖，距離 $0.101 \mu\text{m}$	58
圖 4-1-5 field emission SEM 圖，距離 326.9nm	58
圖 4-1-1-1 field emission 量測結果圖	59
圖 4-2-1 探針針尖長 CNT 圖，從探針尖延伸長出去	60
圖 4-2-2 探針針尖長 CNT 圖，勾勾狀	60
圖 4-2-3 探針針尖長 CNT 圖，從探針尖延伸長出去	60
圖 4-2-4 探針針尖長 CNT 圖，手勾狀	61
圖 4-2-5 探針針尖長 CNT 圖，愛心狀	61
圖 4-2-6 探針針尖長 CNT 圖，海龍狀	61
圖 4-2-7 探針針尖長 CNT 圖，CNT 連接在各探針頂端	62
圖 4-2-8 探針針尖長 CNT 圖，CNT 在探針頂端連成直線，並轉折好幾個彎	62

第一章

1.1 前言

在科學發展史上，顯微技術一直隨著人類科技文明而不斷地突破，科學研究及工業技術，也隨著新的顯微技術的發明而推升至更微小的世界。近十年來，工業界的半導體電路技術由次微米（submicron, 1 micron= 10^{-6} m）推向深次微米，新的電子元件也越做越小，在高科技之微電子時代中，奈米尺度（nanometer, 1 nm= 10^{-9} m）科學及技術之發展已成為世界各科技高度發展國家全力以赴的目標，奈米材料和奈米人造結構之研究，由於在高科技應用上有廣闊的應用前景，更是奈米科技的重點發展項目之一。

要研究各類凝態之奈米（nanometer）尺度的結構及物理特性，如各類奈米結構的光學性質，進而能製作各類有用之奈米尺寸的人工結構，目前計量型之精密量測儀器有原子力顯微鏡（AFM）⁽¹⁾、掃描式穿隧顯微鏡（STM）⁽²⁾及近場光學顯微鏡（NFOM）⁽³⁾，磁力探針顯微儀(Magnetic Force Microscope)⁽⁴⁾等儀器的發明，可量測獲得材料表面結構、階高、電性、磁性及光學性質等關鍵性訊息及數據。可運用在物理性質的研究，尤其是奈米光子學(Nano-photonics)的研究。

掃描探針技術(Scanning Probe Techniques)以掃描穿隧顯微鏡(Scanning Tunneling Microscopy, STM)、原子力顯微鏡(Atomic Force Microscopy, AFM)和近場光學顯微鏡(Scanning Near-Field Optical Microscopy, SNOM)等奈米級顯微鏡已形成一類新的顯微技術(通稱為 Scanning Probe Microscopy, SPM)掃描探針顯微術。掃描探針顯微術是各種以探針方式研究樣品表面性質（例如：表面形貌、電性、磁性、力學特性...等）的顯微術總稱。SPM 可相當準確直接於樣品表面進行奈米刻痕或微影，並且對於探針的位移可得到良好的操控。這是除了電子束曝光與化學濕蝕刻以外，另一項有利的選擇工具。其特點是採用一個極微小(奈米級大小， 10^{-9} - 10^{-7} m)的探針或量測某特定物理性質的微感測器(例如量測磁性的 SQUID 或 Hall 奈米感測器)，在距樣品表面極小的距離內進行掃描，以同時獲得樣品表面的各種訊息。SPM 不僅可以幫助人們認識奈米世界，而且還可以被用來操縱原分子、製造奈米新材料、進行奈米微影及微加工、甚至用為超高密度的資料儲存方法。SPM 的分辨率主要取決於針尖的大小、形狀與樣品之距離以及感測特性等，當進行電、磁力顯微鏡或奈米微加工時，針尖的大小及形狀更是關鍵。

由上述可知探針在奈米科技方面是一個非常重要的工具，用以測量分析物質的各種性質，針對生物體，包括電性等各種性質量測。在未來奈米生物科技日益重要的時代裡，更凸顯其重要性。

1.2 背景介紹

1981年，在瑞士蘇黎世 IBM 實驗室內，Binnig 和 Rohrer 兩位科學家首先使用具有原子級解析能力的掃描式電流穿隧顯微鏡 (Scanning Tunneling Microscope, STM) 量測物體表面，並成功的獲得該物體之三維表面圖像 (Three-dimension Images)；這新發明的儀器使得 Binnig 和 Rohrer 共同獲得 1986 年諾貝爾物理獎。相較於光學顯微鏡，掃描式穿隧顯微鏡沒有接物鏡及接目鏡，也不需要光源，

STM 的作用原理是利用一極細小的導電探針以極靠近 ($<10\text{nm}$) 的距離掃描工件表面，過程中穿隧電流因為表面高低起伏不同而變化成像，經電腦運算可得材料表面的三維圖形，其在水平方向的解析度可達到 $0.1\text{-}1.0\text{nm}$ ，在垂直方向更可達到 0.01nm ，非常適合於奈米結構的量測。

掃描穿隧顯微儀的主要物理原理是利用量子力學中的電子穿隧效應，當一個金屬探針被帶到導電樣品表面 1-nm 左右的距離範圍內，電子可由樣品或針尖（端視加在針尖及樣品兩極間的電壓 V 之相對極性）穿過真空位障抵達相對之電極。由於穿隧的機率和兩極間間距成指數反比的敏感關係，所以藉偵測穿隧電流的大小並以回饋系統控制兩極間距，可以維持兩極的距離固定在 0.1 \AA ($1\text{ \AA}=0.1\text{ nm}$) 的精度內。因此，藉著掃描金屬探針在可導電樣品(例如金屬、半導體等) 的表面，我們可以獲知樣品之表面形貌。

STM 讓原子的排列具體地呈現，有助於我們從基本層面來瞭解許多物理及化學現象。此外，科學家也空前地展示了搬移原子的能力，同時也能人為地改變電子量子化的狀態，使製造原子級的材料和元件，已不再只是夢想。自掃描穿隧顯微術問世以來，已衍生出許多相關技術，用途更擴展至許多不同的研究領域及產業。奈米科技日漸重要，朝向微觀世界發展，首先要先製作出可以量測更精細的工具，這也是為什麼會想要研究製作探針，為本論文的動機來由，並最終使成長的奈米探針應用到生化系統上。

1.3 研究目的

奈米科技日漸重要，朝向微觀世界發展，首先要先製作出可以量測更精細的工具。目前已製作的各類探針情況各有侷限，比如有的散亂成長，無法成長探針在指定的位

置，這些內容將在文獻探討中進一步說明，因此我們將製作的探針是有效控制探針成長的位置，如能應用到生化系統上，降低誤差並提高操作的精確度，量測單一神經元細胞的奈伏至微伏訊號，最終預期將成爲一前瞻性研究生物細胞等級的奈米工作平台，對往後生物醫學的研究與應用有突破性發展。

本研究之奈米探針目標，如圖 1-3 所示。它的內部需要導電材料，例如金屬或者重摻雜的半導體，用來擷取生物細胞訊號。除了針尖之外，奈米探針的外部必須對周遭環境絕緣，以避免電雜訊干擾。在刺穿細胞以及在讀取訊號同時，探針的尖端必須儘可能的銳利，才能降低誤差並提高操作的精確度要探針尖小於 30 度。

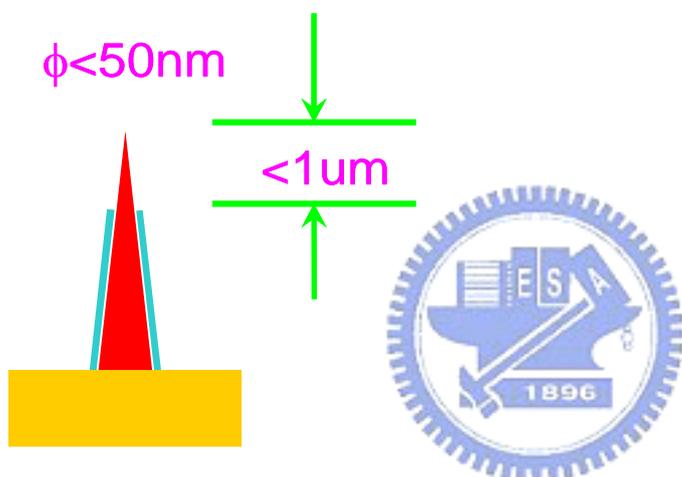


圖 1-3 本研究擬研究並製造之奈米探針結構圖

1.4 文獻探討

在針對我們要製作的奈米探針前，首先說明目前製作探針的主要三種方式，分別爲蝕刻 (etching)^[5-16]、連接 (attachment)^[17-21] 以及沈積 (deposition)^[22-25] 三種，在製作探針過程中，這三種方式會交叉使用，並不單獨侷限，主要是根據想到達成的目的不同，所需不同而設計使用各種方式，但是都有可改進的空間，各有其優缺點。

第一個是蝕刻技術，分乾蝕刻和濕蝕刻兩種類型，以下舉幾個例子加以說明。如圖 1-4-1 所示^[5]，基材爲矽基版，利用矽烷、甲烷的混合氣體，形成自組裝反應的碳化矽作爲抵擋蝕刻的遮蔽物 (mask)，再透過氫和氫混合氣體的蝕刻，電子迴旋共振電漿製程得到排列良好的奈米探針^[26-28]。其中(A)表示反應氣體爲矽烷、甲烷、氫氣和氫氣的混合氣體，(B)表示奈米尺寸的SiC 經由SiH₄和 CH₄電漿的反應，然後分佈在基材表面上，(C)

表示沒有被SiC遮蔽的區域將被氫氣和氫氣電漿蝕刻，被SiC 遮蔽的地方就形成探針。缺點為無法有效控制探針成長的位置，所以對於應用到生化系統上仍有需要突破的地方。

圖1-4-2所示^[6]是另一種乾蝕刻製作探針的方式。首先在矽基材上噴濺沈積一層不平坦的銀薄膜，此處銀薄膜由於本身銀本身特性的影響，所以形成的為不平坦的薄膜，而非層層疊上去，再經由RIE蝕刻，利用SF₆和CF₄為蝕刻氣體，由於銀薄膜的不平，在蝕刻中薄的會先被消耗掉，因此就會開始較其他地方先蝕刻到矽基材上，而形成矽柱和矽探針^[29-34]。(A)表示在基材上沈積一層不平坦的銀膜，(B)經由噴濺電漿使銀膜區域變小，而其中沒有銀膜保護的矽表面就會開始被蝕刻，(C)經蝕刻後形成的矽柱和探針。缺點跟上面的一樣，無法有效控制探針成長的位置，所以對於應用到生化系統上仍有需要突破的地方。由上可知作為乾蝕刻時阻擋的遮蔽物可以有許多方式，比如自組裝反應形成或直接噴濺沈積上去。

圖1-4-3所示為電化學濕蝕刻^[15]。以不銹鋼為陰極，鎢絲為陽極，電解蝕刻液為氫氧化鉀，經由電化學反應，使鎢絲在電解蝕刻中頸縮（neck）然後約20分鐘後斷裂，形成鎢探針^[35-40]。圖中兩個電極被分開是為了避免在陰極產生氫氣泡泡而干擾蝕刻。缺點是需要有人隨時看著，當蝕刻一結束就馬上關掉電源，不然就會造成浪費。缺點為無法一次大量生產而使用。

圖 1-4-4 所示同樣是電化學蝕刻，以鎢絲製作鎢探針^[16]。比上面所提的設計更精密，可更精確控制，中間電解質為氫氧化鈉，下面為四氯化碳，由於液體密度不同，四氯化碳會在下層，而之上的氫氧化鈉也就成為漂浮層^[41-43]。圖展示了空氣和電解液介面附近的情況，利用密度不同而應用到實驗上。好處是可以一次做成兩個探針，上下各一個，所以蝕刻液要在中間的位置。而最下面要選密度大而不會容易跟鎢起反應作用的，四氯化碳的缺點是毒性太強。缺點為無法大量製作。

圖1-4-5所示^[17]為另一種探針製作法。以矽探針作為基礎和陽極，鎢探針為陰極，使用場發射誘發的方式製作高解析度的奈米線。使用含有羰基的鎢化合物作為催化劑誘導，當施加在矽探針上的電場足夠大時，就開始成長奈米線於其上^[44-45]。(a) 為SEM影像，展示AFM探針和兩個鎢探針的位置圖，兩個蝕刻過的鎢探針被連接在操作端以便場發射誘導成長奈米線，(b)為在AFM探針有200 nm 長的鎢奈米線SEM圖。缺點是此種方式無法大量製作，而且在成長過程中要小心對準，所以對於商品化還有很多改進空間。

圖1-4-6所示^[18]為單壁的碳的奈米探針成長過程。用場發射誘發的成長方法，成長的奈米探針長度隨著誘發時間長而拉長。使用的氣體為乙炔作為碳來源。當施加電壓到達，場發射電子和乙炔氣體的互相作用下造成碳氫離子聚集，隨而之沈積在作為陰極的探針上形成奈米探針^[46-47]。(a)為TEM影像，FEIG的碳之奈米探針長在鎢探針上，(b)為此奈米探針的高解析度影像，(c)為SEM影像，分別為奈米探針經場發射誘導成長的結果，分為5, 11, 22,和32秒，奈米探針長度隨著誘發時間長而拉長。缺點是此種方式無法大量製作，一次只能一根，對於產品商品化還有很多改進空間。

圖1-4-7所示^[18]為混合氫、氮、甲烷等氣體，透過電漿輔助的熱細絲化學氣相沈積法，最後做成大小均勻而且密度很高的奈米探針^[48-50]。密度高達 $10^8/\text{cm}^2$ ，其中(a)展 是了高密度的不規則奈米探針陣列，(b)為在其不規則結構中有關尺寸大小和探針針尖角度和分佈情況。其缺點為散亂生長，雖然密度高，但是無法使其生長在想要的位置，因此應用起來有困難。

圖 1-4-8 所示^[22]為使用表面不平整的金屬膜片製成矽支柱，雖然成功省略微影過程，但是矽支柱粗係大小不同。製作方式首先上光阻，在塗上一層聚苯乙烯高分子，此時高分子聚集成一圈一圈的外型，再塗上銀，之後用丙酮和三氯甲烷去除，利用高分子聚集後孔隙被銀填滿，當高分子被去除後，被銀填滿的地方就成為抵擋蝕刻的遮蔽物，經由RIE蝕刻出矽支柱^[51-58]。圖中(a) (b)為經RIE蝕刻兩分鐘後之SEM影像，(a)為大小 $10\ \mu\text{m}$ 平方的景象，(b)為其中間有規則排列的部分影像。缺點是塗佈於上的高分子厚度要剛好一層，只要超過一層就無法長成矽支柱，因此控制不易，只能在小面積上製作，無法大面積大量製作。

圖1-4-9所示^[23]為一種使用模版製作探針的流程圖。首先旋塗一層氮化矽薄膜，經由氫氧化鉀非等向性蝕刻後，由於氫氧化鉀的作用形成正方金字塔型的探針，用氟化氫去掉氮化矽剩下矽基材模版，後沈積鑽石薄膜於其上，在黏附黃銅於其上，最後用氟化氫濕蝕刻去掉矽基板，就形成了鑽石探針。(a)為Si模版的製作，(b)為沈積半導體鑽石薄膜，(c)為使用有傳導性的環氧化物接著劑黏接半導體鑽石薄膜和電極，(d)為使用HF:HNO₃:H₂O(1:2:1)蝕刻Si模版，最終剩下鑽石探針。缺點因為氫氧化鉀蝕刻所得的形狀，很固定一致，探針尖無法變小。

上述種種關於奈米探針的製造，Seeger和Palmer使用表面不平整的金屬膜片製成矽支柱。他們成功的省略微影過程，但矽支柱的粗細與大小不盡相同。Bai et al.混合氫、氮

和甲烷這些氣體，並透過電漿輔助的熱細絲的化學氣相沉積法的熱細絲把矽做成均勻的 nanotip 使用，但無法成長在想要的位置。Hsu et al. 利用矽烷、甲烷、氫和氫的混合氣體，並透過電子迴旋加速器共振 (ECR) 電漿製程得到排列良好的奈米探針。然而，儘管 nanotips 的均勻性再好，如何有效的控制探針成長的位置，以使得成長的奈米探針應用到生化系統上是需解決的問題。

圖 1-4-10 所示^[59] 為製造探針的流程圖。如圖 1-4-11 和圖 1-4-12 所示^[59] 為其結果的 SEM 照片。從圖中其探針尖變尖是先使用氫氧化鉀濕蝕刻，再用 SF₆ 氣體 RIE 的乾蝕刻，最後使用熱氧化法，去掉氧化的部分使其尖銳化。以二氧化矽為阻擋蝕刻的遮蔽物^[60-64]。圖 1-4-10 為探針形成的步驟流程圖，(a) 是在氧化物上轉印形成光阻圖案，(b) 為經由 CH₄ 電漿蝕刻後的圖形，(c) 為經由濕蝕刻後形成的金字塔結構探針，(d) 為再經由 SF₆ 電漿蝕刻後所得的矽探針，(e) 為在探針上使用熱氧化成長法，(f) 為去掉氧化層之後，尖銳化探針的完成示意圖。圖 1-4-11 為經濕蝕刻所形成的金字塔結構探針，而圖 1-4-12 為經由熱氧化尖銳法後所形成的探針 SEM 圖。

在本論文中，我們也同樣有使用到熱氧化法，並順利成功的使探針尖達到我們的目標值。而我們的製作方式更簡單，簡化步驟並得到更好的結果。只需先經乾蝕刻，熱氧化後再去掉氧化部分即可得到相似的結果，而且我們的探針更小更尖。

探針在整個 SPM 系統中扮演著非常重要的角色，根據所需的目標而設計各種探針，應用在系統中使量測更精密精確，在未來奈米科技結合生物技術的領域中，更顯重要。探針製作的方式、數量，在在都影響了未來世界的發展，能不能擴及到家家戶戶的普及，產品的產量和良率，每一個環節都不可忽視。而在研究中，奈米時代下，設計出可以測量更精確的工具為必要，也因為新的探針發展，對於各相關領域的研究勢必會有所進步，就本論文的研究方向而言，有效控制探針成長的位置，在運用到生化系統上，降低誤差並提高操作的精確度，量測單一神經元細胞的奈伏至微伏訊號，最終預期將成為一前瞻性研究生物細胞等級的奈米工作平台，對往後生物醫學的研究與應用有突破性發展。

目前探針的研究情況如上所言，因此我們著手設計探針製程，其條件包括小於三十度並以及外包氧化層，首先我們經由半導體的微影製程可一次製造大量的探針，長在我們所想要的位置上。經由各方面適當的條件參數搭配，到最佳的結構，並以此新製作出的探針結構，做出其他的應用，比如成長 CNT 等等。我們首先設計探針，選擇幾種可

能適用的探針大小，之後先做出探針尖小於三十度的，再進一步做出外包氧化層的結構，最後再做出只有針尖露出的結構。過程中需要不斷的嘗試各種條件，以得到最佳的條件，做出我們想要的成果，探針的針尖，平面圖以及側面圖等成品均由 SEM 儀器拍攝所得，AFM 則可模擬出 3D 立體結構。一開始用乾蝕刻方式時探針尖大多大於 30 度，之後經熱氧化和去除的過程中成功的使探針尖小於 30 度。而探針尖銳化也在許多論文中提及，我們也經由實驗實地印證。

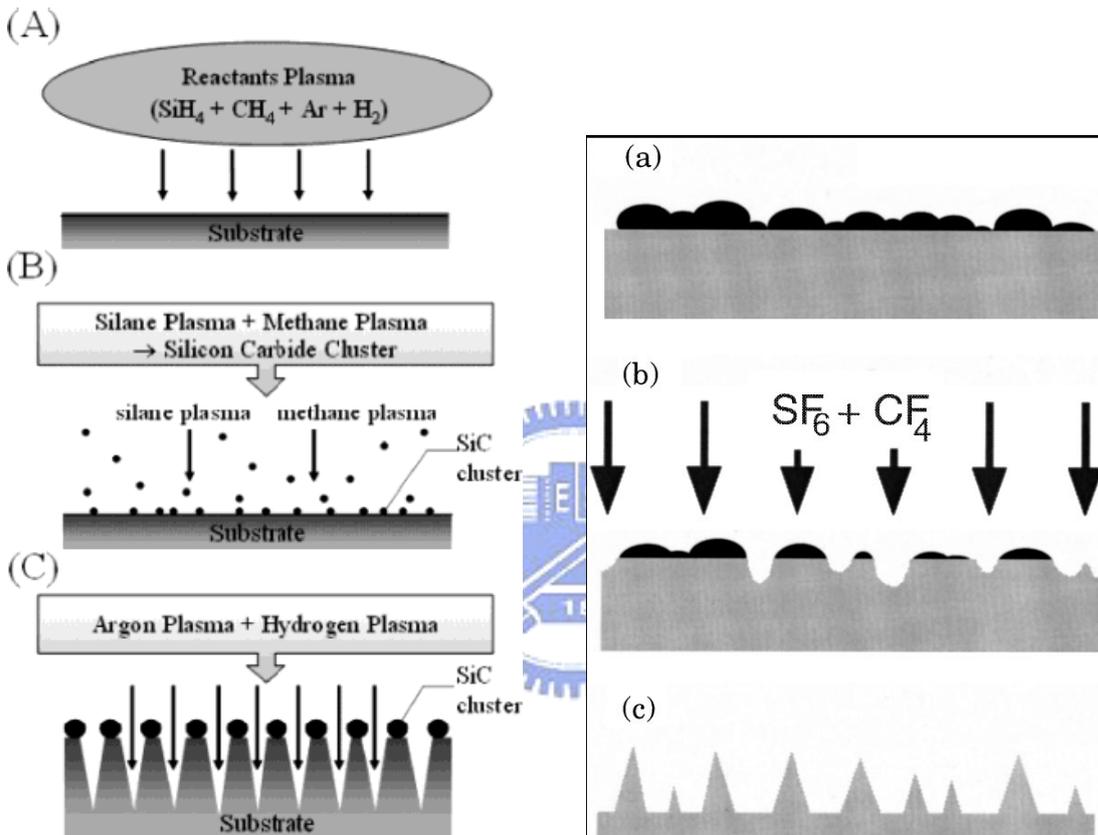


圖 1-4-1：乾蝕刻製作探針流程圖：(A)表示反應氣體為矽烷、甲烷、氬氣和氫氣的混合氣體，(B)表示奈米尺寸的 SiC 經由 SiH₄ 和 CH₄ 電漿的反應，然後分佈在基材表面上，(C)表示沒有被 SiC 遮蔽的區域將被氬氣和氫氣電漿蝕刻，被 SiC 遮蔽的地方就形成探針。

圖 1-4-2：乾蝕刻之二，(A)表示在基材上沈積一層不平坦的銀膜，(B)經由噴濺電漿使銀膜區域變小，而其中沒有銀膜保護的矽表面就會開始被蝕刻，(C)經蝕刻後形成的矽柱和探針。

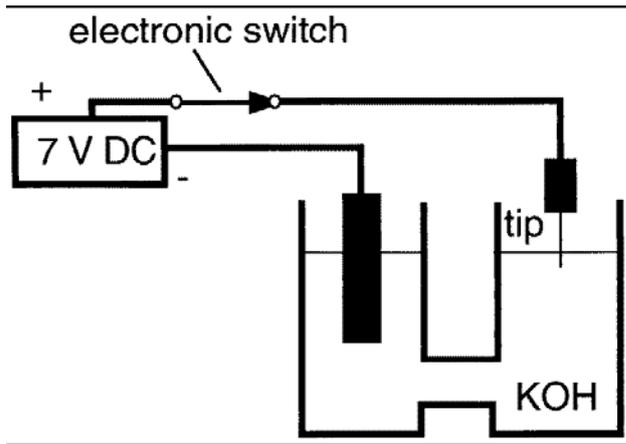


圖 1-4-3：電化學蝕刻：不銹鋼為陰極，鎢絲為陽極，電解蝕刻液為氫氧化鉀，經由電化學反應所製作的探針

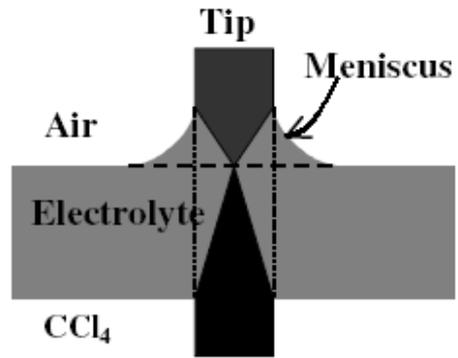


圖 1-4-4：電化學蝕刻，以鎢絲製作鎢探針：空氣和電解液介面附近的情況

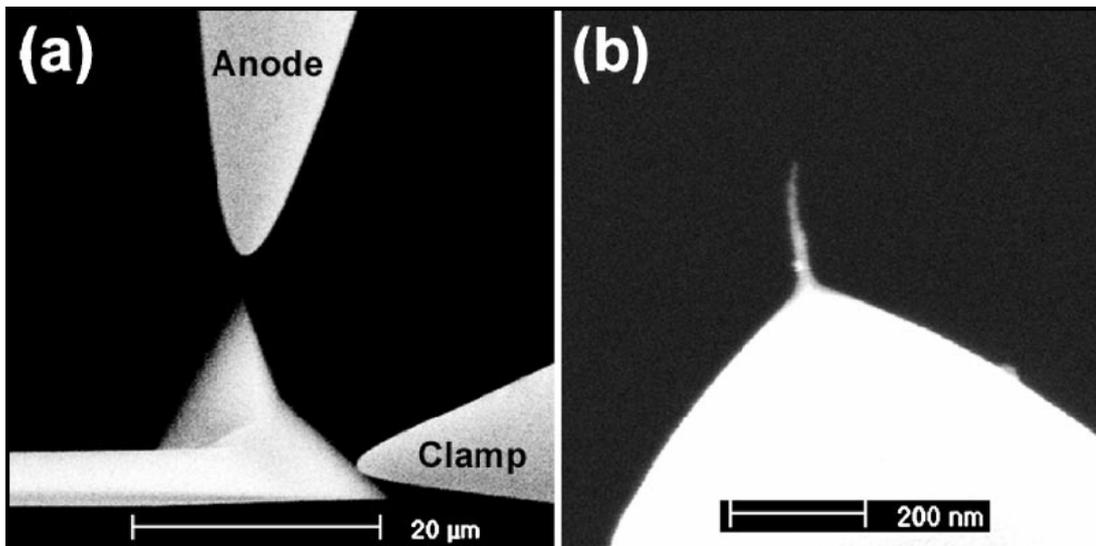


圖 1-4-5：使用場發射誘發的方式製作高解析度的奈米線：(a) 為 SEM 影像，展示 AFM 探針和兩個鎢探針的位置圖，兩個蝕刻過的鎢探針被連接在操作端以便場發射誘導成長奈米線，(b)為在 AFM 探針有 200 nm 長的鎢奈米線 SEM 圖。

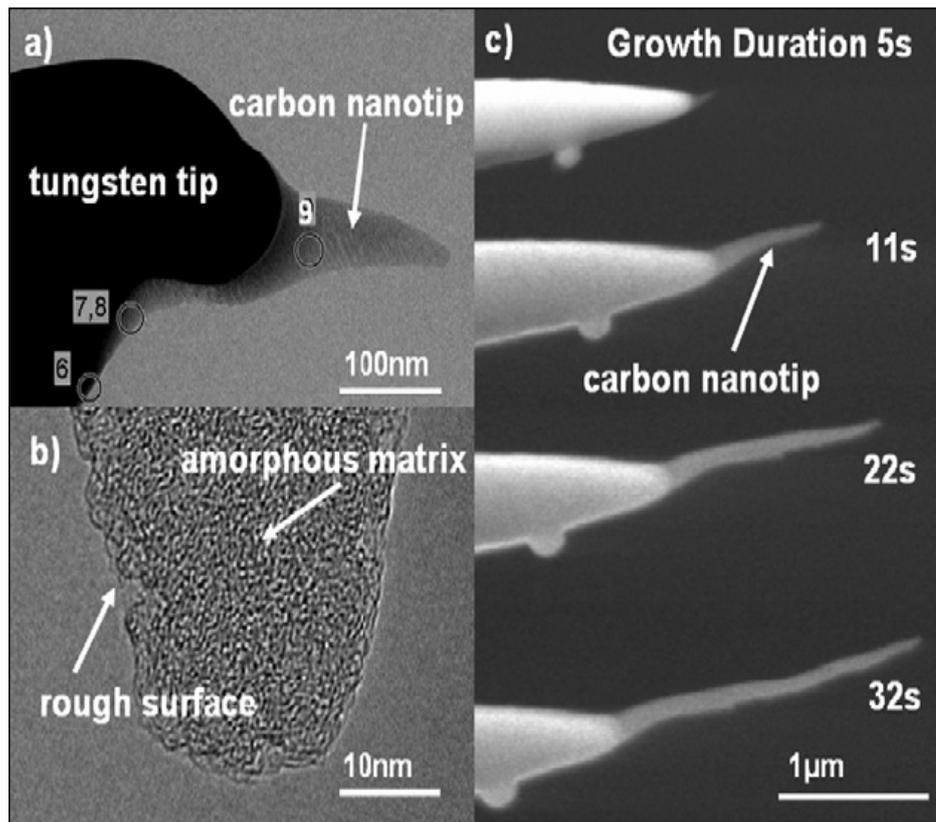


圖 1-4-6：場發射誘發成長方法成長的奈米探針：(a)為 TEM 影像，FEIG 的碳之奈米探針長在鎢探針上，(b)為此奈米探針的高解析度影像，(c)為 SEM 影像，分別為奈米探針經場發射誘導成長的結果，分為 5, 11, 22, 和 32 秒，奈米探針長度隨著誘發時間長而拉長。

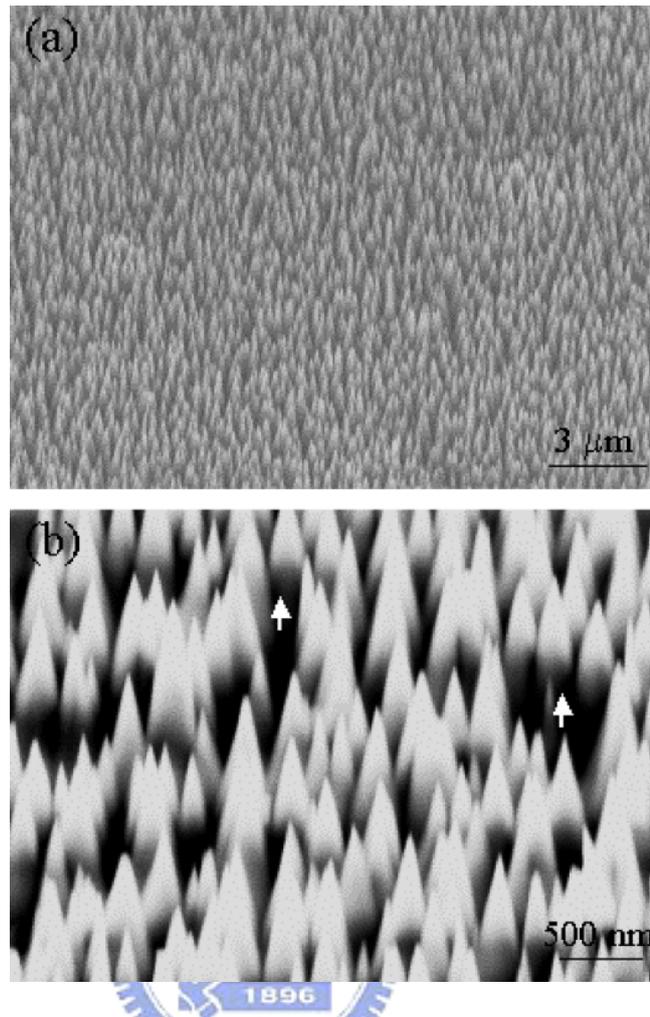


圖 1-4-7：透過電漿輔助的熱細絲化學氣相沈積法，做成大小均勻而且密度很高的奈米探針，(a)展示了高密度的不規則奈米探針陣列，(b)為在其不規則結構中有關尺寸大小和探針針尖角度和分佈情況。

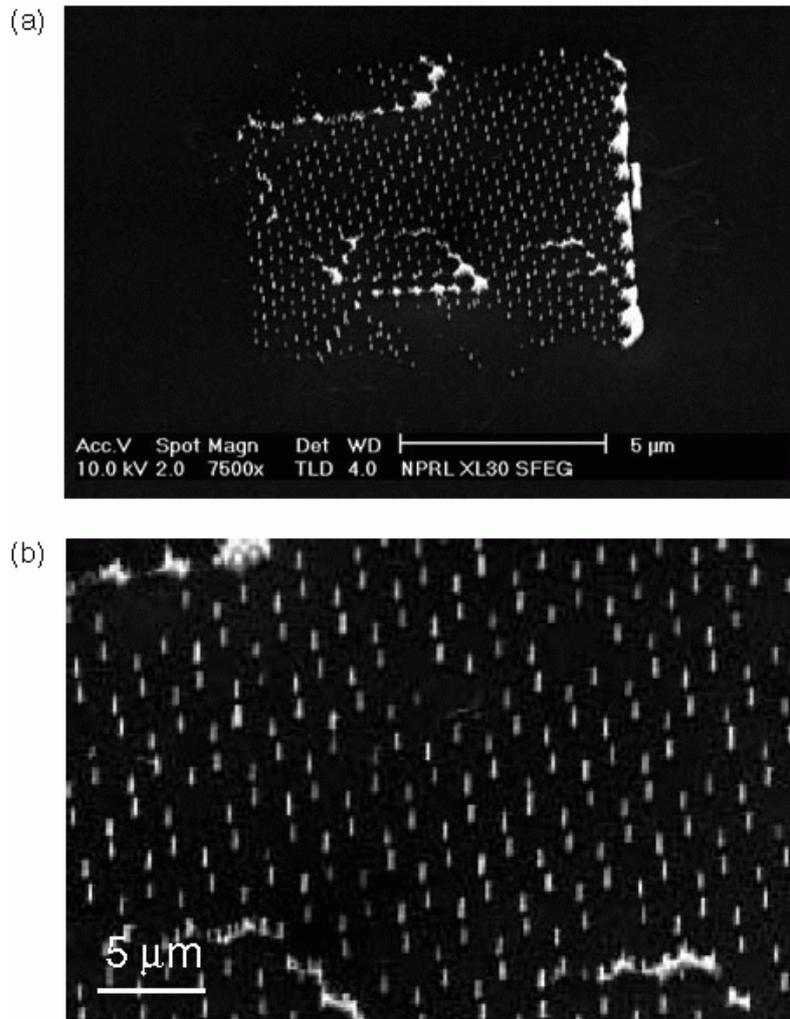


圖 1-4-8：使用表面不平整的金屬膜片製成矽支柱，(a) (b)為經 RIE 蝕刻兩分鐘後之 SEM 影像，(a)為大小 10 μm 平方的景象，(b)為其中間有規則排列的部分影像。

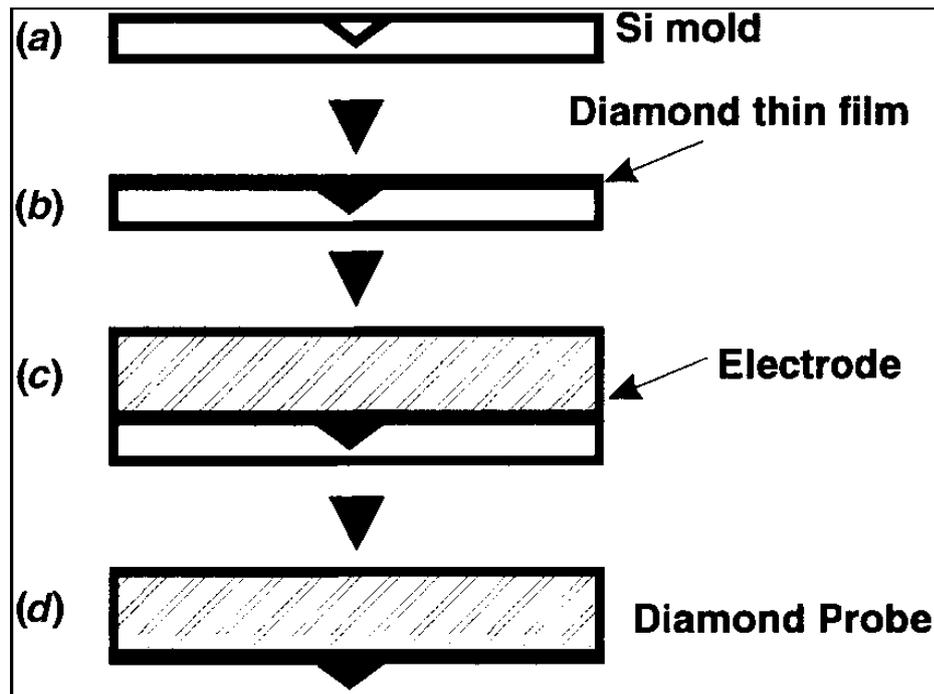


圖 1-4-9：使用模版製作探針的方式，(a)為 Si 模版的製作，(b)為沈積半導體鑽石薄膜，(c)為使用有傳導性的環氧化物接著劑黏接半導體鑽石薄膜和電極，(d)為使用 HF:HNO₃:H₂O(1:2:1)蝕刻 Si 模版，最終剩下鑽石探針。

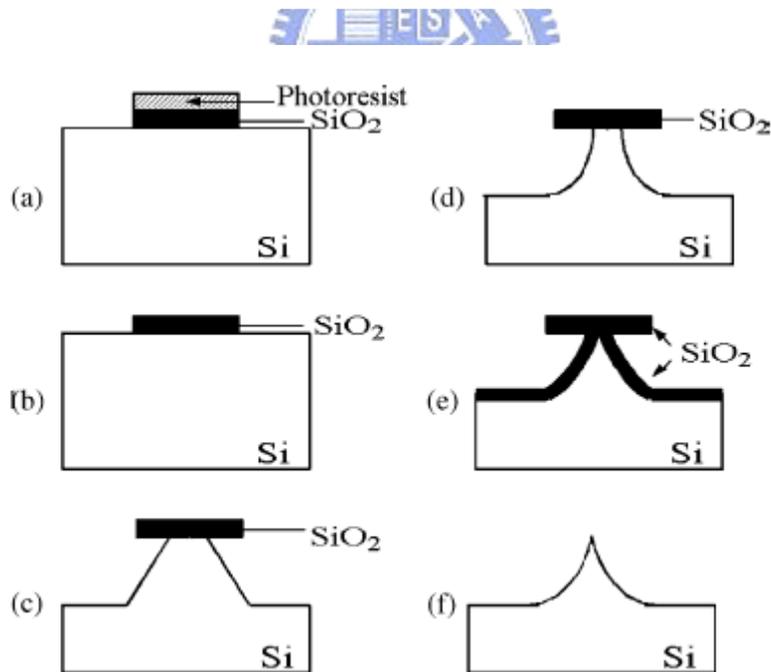


圖 1-4-10：製造探針的流程圖，(a)是在氧化物上轉印形成光阻圖案，(b)為經由 CH₄ 電漿蝕刻後的圖形，(c)為經由濕蝕刻後形成的金字塔結構探針，(d)為再經由 SF₆ 電漿蝕刻後所得的矽探針，(e)為在探針上使用熱氧化成長法，(f)為去掉氧化層之後，尖銳化探針的完成示意圖。

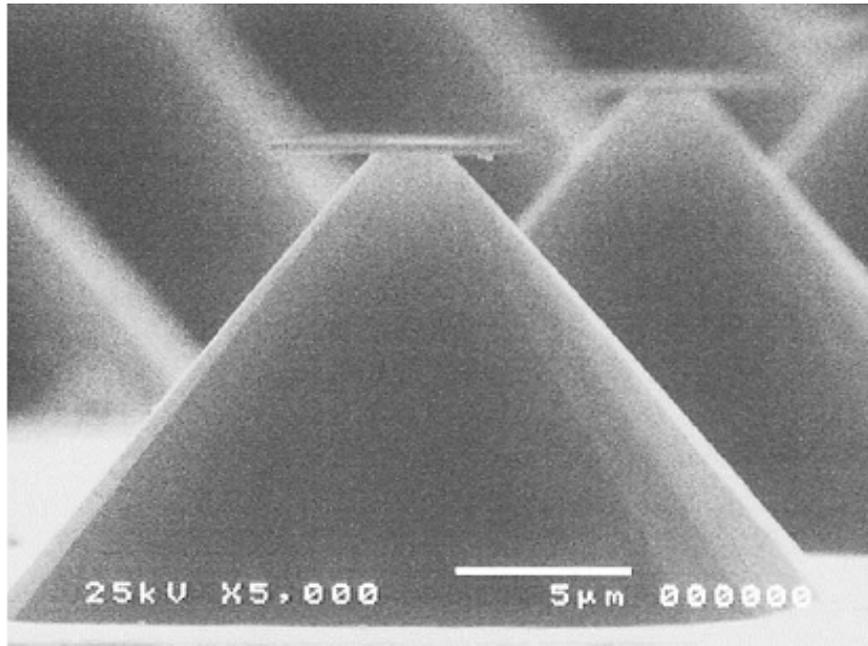


圖 1-4-11 尖銳化前 SEM 圖，為經濕蝕刻所形成的金字塔結構探針

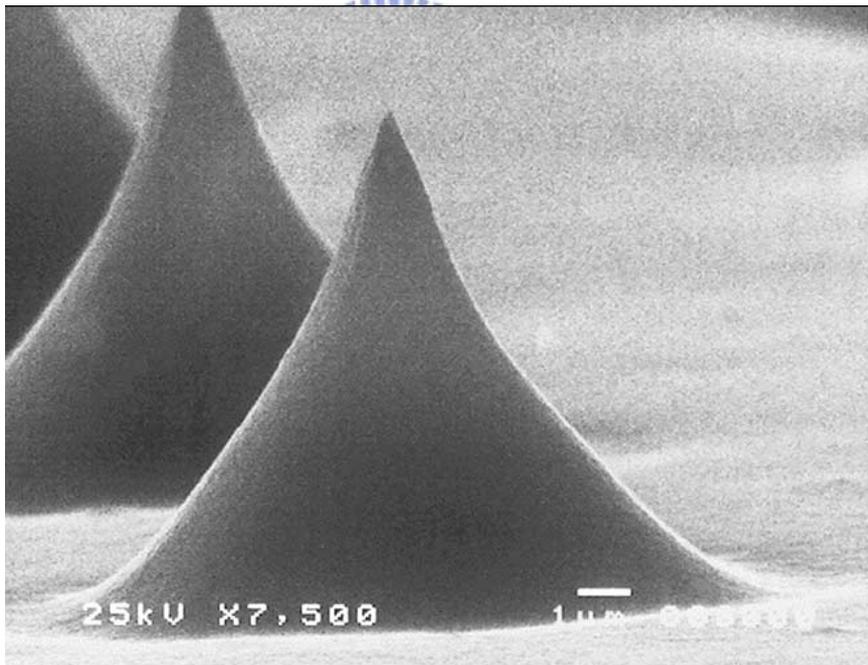


圖 1-4-12：尖銳化後 SEM 圖，經由熱氧化尖銳法後所形成的探針 SEM 圖

第二章

在製作探針的過程中，我們將會運用到很重要的微影技術(lithography)以及蝕刻技術。以下將對這兩方面作原理概念的介紹。

2.1 光學微影技術

微影術(Lithography)在半導體製程上是指以光子束經由光罩(Mask 或 Reticle)對晶圓(Wafer)上之阻劑照射；以電子束、離子束經由光罩對阻劑照射；或不經由光罩，對阻劑直接照射（直寫），使阻劑產生化學鍵結變化、主鏈斷鏈、主鏈交聯等化學作用，經顯影後將光罩或直寫之特定圖案轉移至晶圓。此特定之圖案可供後續製程，如離子佈植、金屬蒸鍍，電漿蝕刻之用。

所謂的光學微影術，是將設計好的線路圖形，完整且精確地複製到晶圓上。光微影術所能製作的最小線寬與光源的波長成正比，因此要得到更小的線寬，就必須採波長更短的光源。不同波長的光源，適用於不同的線寬尺寸。光源的能量越高，波長越短，可製作的線寬越小。

電子束微影與光學微影製程的步驟類似，都是將所需的圖形縮小複製到晶片上，差別在於光學微影術是利用「光線」來刻劃圖形，電子束微影則是利用能量為數萬電子伏特(eV)的「電子束」作為曝光源。由於電子的波長比一般光微影製程所使用的光源波長更小，因此能提供更高的解析度。電子束微影中有正、負光阻劑(用來曝光或曝電子源的化學藥劑統稱為光阻劑，resist)，光阻劑是一種易受電子束影響的化學材料，在定義圖形前要先均勻塗抹在晶圓上。正光阻利用電子轟擊時會破壞其化學鍵的原理，將圖形「寫」在晶元上，再經過顯影處理，即可得到我們所需的圖形。

電子束微影技術的另一項應用為投影式電子束微影技術(E-Beam Projection Lithography, EPL)，又名為有限孔徑散射投影式電子束（SCattering with Aperture Limited Projection Electron Lithography, SCALPEL），此乃利用類似光學投影的方式，將透過光罩所形成的電子束分佈圖案照射於晶圓表面，具有極高的解析度與合理的產能。^[65-70]

2.2 蝕刻

積體電路(Integrated Circuits)的製造過程中，常需要在晶圓上做出極微細尺寸之圖形

(Pattern)。而這些微細圖形最主要的形成方式，就是蝕刻(Etching)技術。蝕刻技術的分類有兩種，濕式蝕刻(Wet Etching)：以化學反應來進行薄膜的蝕刻。乾式蝕刻(Dry Etching)：以物理性離子轟擊或化學反應進行薄膜蝕刻。而薄膜經蝕刻後所呈現的截面輪廓(Profile)可分為等向性(Isotropic)蝕刻以及非等向性(Anisotropic)蝕刻兩種形式。

2.2.1 濕蝕刻原理

屬於液相與固相的化學反應，溶液裡的反應物利用擴散效應(Diffusion)通過厚度相當薄的邊界層(Boundary)達到被蝕刻薄膜的表面，與薄膜表面分子產生化學反應產生生成物，這些生成物利用擴散效應通過邊界層到溶液裡，而後隨著溶液被排出。蝕刻是利用容易與薄膜經過反應所產生的氣態或是液態的生成物來執行薄膜分子的移除。會有等向性蝕刻發生。濕式蝕刻是最早被使用的蝕刻技術。它是利用薄膜與特定溶液間所進行的化學反應，來去除未被光阻覆蓋的薄膜。它的優點是製程單純，設備簡單，成本低，且產量速度(Throughput)快。

但因為濕式蝕刻是利用化學反應來進行薄膜的去除，因此化學反應沒有特定的方向性，所以是屬於等向性的蝕刻。然而當積體電路的元件尺寸愈做愈小時，由於化學反應沒有方向性，所以會有側向蝕刻的情形，而產生底切(Undercut)的現象，導致元件線寬失真。因此逐漸被乾蝕刻所取代。



2.2.2 乾式蝕刻

以電漿(Plasma)來進行薄膜侵蝕的一種技術。因為蝕刻反應不涉及溶液。乾式蝕刻最主要的優點在於可進行非等向性蝕刻。乾蝕刻之重點在垂直方向蝕刻率大於橫向的，可使得薄膜經蝕刻後所轉移的圖案與原圖相同，以減少底切現象。不過因為乾蝕刻是利用粒子轟擊現象來做蝕刻，此種方式可以同時對晶片上的光阻及裸露出的薄膜執行蝕刻，所以其選擇性比濕蝕刻較低。

電漿輔助蝕刻主要利用各式能量源(RF, DC, 或microwave等) 給予氣體能量，使氣體產生解離後與擬被蝕刻膜層產生反應，並將反應副產物帶走，達到蝕刻目的，其反應步驟最初是電子撞擊氣體分子，產生解離，再將解離及未解離之電子，離子，自由基(radical)傳送至反應介面，然後反應物種吸附於反應介面並與膜層產生反應，之後反應副產物脫附膜層表面，再擴散至腔體中，最後被pump帶走或重新沉積於表面膜層及腔體表面。

Array 製程蝕刻主要可分為非金屬及金屬蝕刻，非金屬蝕刻有，a-Si/n+ Si/SiNx蝕刻，可概括性的視為Si蝕刻，其蝕刻氣體可選用的有SF₆及CF_x系，一般在LCD製程選用SF₆，因為其解離之Fradical較多，反應速率較快，且製程較為潔淨；CF_x系由於在反應過程中，容易有CH化合物產生，較不被選用，但CF_x系可通入O₂，由F/C ratio及藉由O與C的結合，減少CF_x與F的再結合(recombination)增加F radical來加快蝕刻速率，並可調整Si/Oxide之選擇比，製程控制的彈性較SF₆為高。^[71-77]

2.3 實驗儀器

2.3.1 SEM 掃描電子顯微鏡的工作原理

掃描電鏡的工作原理。在高電壓作用下，從電子槍射出來的電子束經聚光鏡和物鏡聚焦成很細的高能電子束，在掃描線圖的作用下，在試片的表面上作用掃描，電子束與試片表層物質相互作用，產生背散電子、二次電子等各種信息，探測器將這些信息接收，經放大器放大，送到陰極射線管(顯像管)的極，調製顯像管的亮度。掃描電鏡的放大倍數，等於電子束在顯像上的掃描寬度與在試樣上的掃描寬度的比值。設顯像管的屏為正方形，邊長為電子束在試樣上的掃描面積也為正方形。因為顯像屏的尺寸是固定的，要改變放大倍數，必須改變試樣上的掃描面積，例如需要增大放大倍數，必須使試樣上的掃描面積減小，這是通過改變掃描線圈的電流來實現的。^[78]

2.3.2 TCP 9400SE 多晶矽乾蝕刻機

TCP 9400SE 多晶矽乾蝕刻機儀器是利用乾式蝕刻之非等向性特性製作特定形狀之圖樣，此為電漿發光，在離子化後會有各式各樣的波長，判斷產物。SiCl₂會被激發，波長在 2882 埃。到 SiO₂時，會有強度的驟降變化，但是如果厚度不大，所造成的強度差異不大的話，就不是用 end point，而是改用 time mode，就是用偵測光的強度來確定實驗已完成。^[79]

2.3.3 In-line SEM

In-line SEM 主要用途為線上產品線寬量測，又稱 CD-SEM，其特點為 WAFER 無須經過切片或鍍金屬膜等預處理步驟，即可觀察及量測光阻、絕緣層及金屬層等之圖案，本量測設備屬於非壞性檢測，量測完成之 WAFER 可以繼續進行下一製程步驟，因此稱為線上型電子顯微鏡。本機台僅能量測線寬，由於試片無法傾斜，因此無法觀察試片斷面，在本論文實驗中，其主要是看平面圖，做最初的判別，光阻在不同蝕刻條件下的情

況。^[80]

2.3.4 Clean Track MK-8

Clean Track MK-8 的主要功能為曝光前阻劑塗佈於晶圓表面的處理及曝光後圖案之顯影，以求將光罩上的圖案精準的轉印於阻劑，以利後續製程如蝕刻、離子植入等的進行。晶圓必須經上 HMDS、阻劑塗佈、軟烤、曝光、曝後烤、顯影及硬烤等幾個基本的製程，將光罩上的圖案精準的轉印於阻劑上。正光阻，經光罩阻擋而未曝光的部份可以保護底下的晶圓，曝光的部份最後則經蝕刻移除；負光阻，移除的是曝光的部份。^[80]

2.3.5 WEPRINT 200 電子束系統

由德國 Leica 公司所生產。EBL 採用掃描式電子顯微鏡(scanning electron microscope)運作的原理，利用電子束直接將圖形「寫」在已經塗佈過光阻的晶圓上。當電子束由電子槍形成後，會經過二組成形孔隙，藉由這兩組成形孔隙的相對位置變化，產生三類曝光圖形，分別為矩形、傾斜 45°之矩形、以及直角三角形，可組成我們設計的曝光圖案。另外曝光腔體內具有偏折系統(Deflection System)，用來控制電子束在曝光時的定位能力。其定位方式主要分為二部分：第一為利用電磁(Electromagnetic)方式所控制的主偏折器，其偏折的範圍較大，可達 1200 微米；另一為次偏折器，乃利用靜電(Electrostatic)原理控制電子束偏折，可進行快速定位，偏折的範圍較小，最大為 60 微米。關於 WEPRINT 200 的使用者操作系統大致分為三個部份：曝光圖形格式切割轉檔、曝光位置編輯與曝光系統操作。^[80]

2.3.6 N&K 薄膜測厚儀

N&K 薄膜測厚儀，基材為矽晶片，大小必須超過 5cm x 5cm，作為量測單層或多層膜的厚度和 N 值，可量測的包括二六族的化合物，三五族的化合物，鋁的化合物，銻的化合物，玻璃，金屬，氮化物，氧化物，矽化物等等。^[81]

2.3.7 FUSION OZONE 乾式光阻去除機

FUSION OZONE 乾式光阻去除機，本機台的原理乃利用 RF POWER 將 O₂ 解離成 Plasma 狀態，在高溫下(300°C)與光阻內之有機成份反應形成 CO₂-Gas(為另一種燃燒反應)，最後由 Pump 帶走。END POINT 之偵測乃經由排出之 CO₂ 氣體含量(ppm)變化來確定是否完成光阻移除工作，其與光阻反應之溫度為 300°C。通入 N₂O 氣體的作用乃使 O₂ 能均勻分散在 Wafer 表面。若 Wafer 上光阻進行 Ion Implant 後，因受 Ion 轟擊使得 PR 結

構變硬且緊密，故需更多流量的反應氣體與反應時間才可將光阻移除。^[79]

2.3.8 水平爐管

水平爐管薄膜沈積機構發生順序：長晶→晶粒成長→晶粒聚結→縫道填補→沈積膜成長。因爐管反應室(Quartz Tube)是藉由熱阻絲三區加熱，晶片在進出爐管時，其輸送速度不宜太快，使晶片因溫度變化過大的熱應力，導致破片。影響薄膜沈積速率的主要因素為溫度、壓力大小及氣體流量。乾式氧化法長出的 SiO₂ 具較佳氧化層電性。若所需 SiO₂ 層電性品質要求高或所需厚度不厚時，都以乾式氧化法來製作 SiO₂。如 Gate Oxide 及 Pad Oxide(300Å)等。^[82]

2.4 晶圓清洗簡介

在超大型積體電路 (ULSI)製程中，晶圓洗淨之技術及潔淨度(Cleanliness)，是影響晶圓製程良率(Yield)、元件品質(Quality)及可靠度(Reliability)，最重要的因素之一。洗淨的目的，是藉由化學品來去除髒污，並用超純水來洗濯雜質，主要是清除晶片表面的污染物，如微塵粒(Particle)、有機物(Organic)、無機物金屬離子(Metal - Ions)等雜質。^[83]

2.5 RCA 清潔技術

SC-1 溶液為鹼性溶液，可去除微塵粒與有機物。藉由微粒之氧化過程或是靜電排斥效應，以將微粒移除。主要的反應機制為：H₂O₂ 為強氧化劑，能將微粒與晶圓表面氧化，此形成於微粒上之氧化層促使微粒剝離（破壞微粒吸附於晶片表面之附著力），進一步使微粒剝蝕、分解於 NH₄OH(氨水)溶液中。晶圓表面上經氧化後所形成之氧化層，可避免微粒再接觸晶圓表面。

SC-2 溶液為酸性溶液，可將金屬物移除。強烈之氧化作用，使金屬離子化且溶解於酸性溶液，吸引金屬與有機污染物之電子並將其氧化，離子化金屬溶解於溶液，而有機物雜質則分解於溶液。光阻經臭氧電漿去灰後，再經硫酸清洗。因光阻主要的成份是碳氫氧有機物，當硫酸(H₂SO₄)和過氧化氫(H₂O₂)混合後，即產生「卡羅酸」(Caro's Acid-H₂SO₄);光阻去除時，卡羅酸即分解形成自由基和光阻產生化學作用，而將光阻去除。^[83]

2.6 探針主要製程

2.6.1 微影製程及其條件參數

本研究之奈米探針製造所使用之微影製程參數列於表 2-6-1 與表 2-6-1-2 中

HMDS	90°C / 60 sec
Cooling down	23°C / 30 sec
Spin-coating	Spreading PGMEA solvent before coating resist. 4500rpm / 570nm resist thick. Edge/back remove by PGMEA
Soft bake	110°C / 120 sec
expose	Dose around 7.2 μ C/cm ² for 100nm isolated line at 40kev
Post expose bake	105°C / 120 sec
Cooling down	23°C / 30 sec
developer	E2-nozzle developer TMAH 2.38% / 60 sec

表 2-6-1: 微影製程之流程條件參數^[80]

Wafer flow No	Function	Step2	Step5
1	NEB Resist Coatiog	AD(2-3) 90°C	HP(2-8) 110°C , 120sec
2	DSE Resist Coating	AD(2-3) 90°C	HP(2-8) 95°C , 120sec
5	NEB Resist Develop	HP(2-4) 105°C , 120sec	DHP(2-7) 110°C , 120sec
4	DSE Resist Develop	HP(2-4) 115°C , 120sec	DHP(2-7) 115°C , 60sec

表 2-6-1-2 : 微影製程之條件參數^[80]

2.6.2 TCP 蝕刻條件

本研究所使用之奈米探針蝕刻參數列於表 2-6-2 中

Chamber Temp:65°C Elect Temp:65°C He clamp:8.0Torr

Recipe: 001 : Breakthrough etching (BT) 10sec + main etching (ME) 300sec

recipe name	Recipe	remark
001	12mT/310W _{tcp} /120W _{bot} /35Cl ₂ /125HBr/8T/300"	E-beam Mark

表 2-6-2 : 蝕刻條件參數^[79]

2.6.3 FUSION OZONE 乾式光阻去除機條件參數:

本研究所使用之乾式光阻去除機條件列於表 2-6-3 中

number	Recipe Name	Condition
6	ADI REWORK	O ₂ /N ₂ O, 300°C, 60sec.

表 2-6-3 : FUSION OZONE 乾式光阻條件參數^[79]

2.6.4 爐管氧化前清洗

一般薄膜成長前之清洗 SC-1 + SC-2 + native oxide remove

NH₄OH : H₂O₂: H₂O =1:4:20 (SC1) 煮10~20分鐘(75°C~85°C) ---去除微小粒子污染

HCl : H₂O₂: H₂O = 6 : 1 : 1 (SC2) 煮10~20分鐘 (75°C~85°C) ----去除鹼金族離子金屬污染

HF : H₂O = 1:100 ----- 去除Chemical Oxide^[83]

2.6.5 爐管氧化

熱氧化層以水平爐管 APCVD 的方式成長，通入純氧跟矽基板反應形成 SiO₂，薄膜成長速度慢，適合用於成長較薄的氧化層，長出的 Oxide 具較佳氧化層電性。反應溫度為 925°C。^[82]

2.7探針製作過程

本論文所製作之探針有兩種方式，分別表示於圖2-7-1和圖2-7-2中。

首先在Si晶圓上經由微影製程將圖案轉寫在上面，本實驗所用的是負光阻，微影製程之各項流程條件如表2-6-1所示，其後經TCP乾蝕刻，蝕刻條件參數如表2-6-2所示，於適當時間得到探針。將此探針晶圓經由SC1以及SC2和HF等清洗製程後，放入水平爐管中以乾氧化法成長化層。待氧化完成後在其晶圓上塗附一層負光阻，隨後將晶圓浸泡去光阻液，讓探針尖露出，再將晶圓浸泡BOE去掉針尖氧化部分，BOE蝕刻BOE 7:1(Buffer Oxide Etch)。比例： $\text{NH}_4\text{F}:\text{HF}=7:1$ 。秒數依所成長的氧化物厚度而定。最後在將其於的光阻液去除，同上述ozone所述，並再加上浸泡硫酸，確保光阻完全去掉，FUSION OZONE 乾式光阻去除條件參數如表2-6-3所示，而 H_2SO_4 (P.R. STRIP) 的反應溫度為 120°C ，反應時間600秒，除了硫酸還會外加雙氧水50ml。之後即得我們所要的探針。其中在浸泡去光阻液時，依所浸泡時間不同露出的情況也不同，看之後要運用的用途所需要而製作，而所浸泡之去光阻液為經一適當比例加以DI水稀釋後所得。



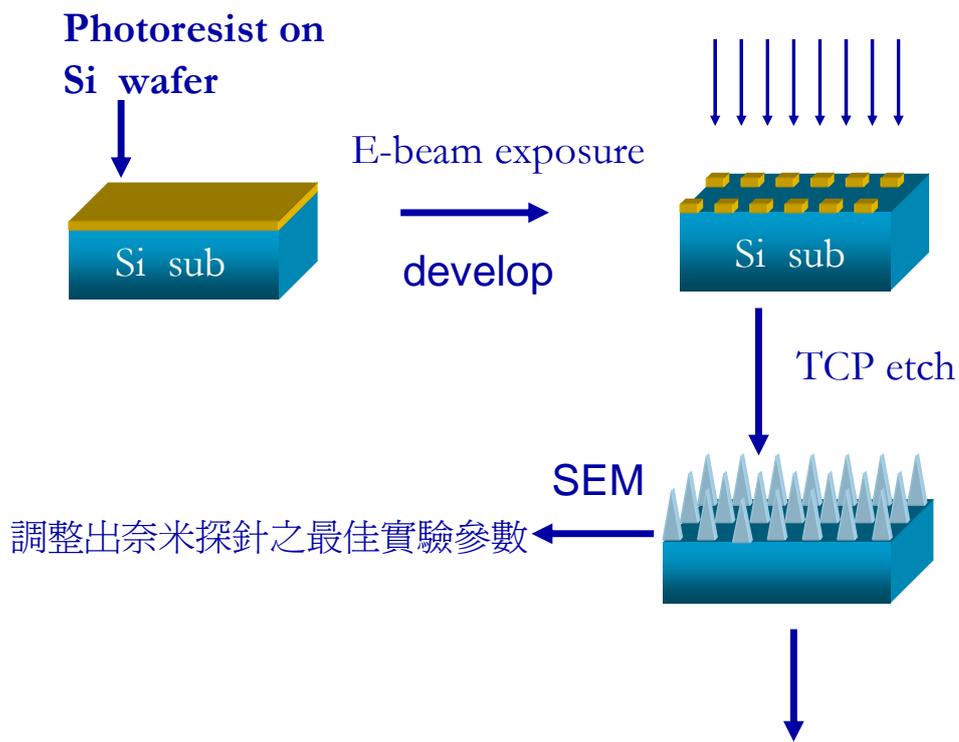


圖 2-7-1：實驗流程圖之一

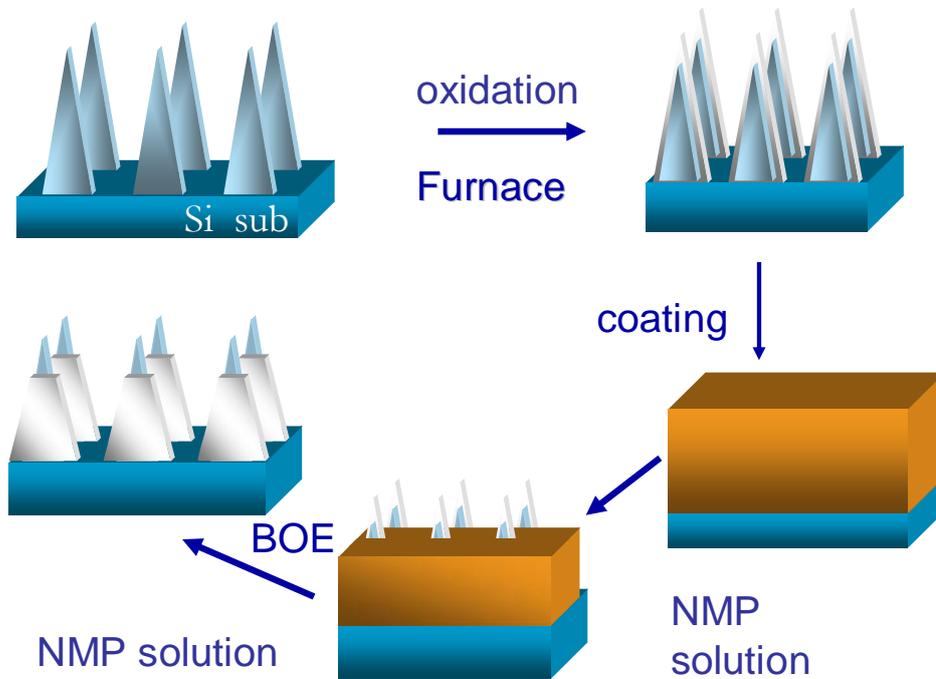


圖 2-7-2：實驗流程圖之二

第三章 實驗結果

為達到本論文在圖 1—3 所示之奈米探針目標，我們花了很長一段時間研究各種參數對探針幾何形狀之效應，並藉由拍攝之電子顯微鏡圖形來瞭解半導體製程之影響機制。本章經由各項實驗結果，推測出 etching 的蝕刻機制並且對製作流程加以分析討論。

3.1 蝕刻時間變化與探針形狀的關係

經由平面圖和 cross-section 圖，研究不同蝕刻條件的效應，並推測出蝕刻對奈米探針形狀的機制。

如圖 3-1-1 為經乾蝕刻後的平面 in-line SEM 圖。其中(a)為未蝕刻(0 min), (b)為蝕刻時間 3 min 之平面 in-line SEM 圖, (c)則為蝕刻時間 4 min 平面 in-line SEM 圖, (d) 為 6 min 平面 in-line SEM 圖, 以及(d)為 7 min 平面 in-line SEM 圖。藉由這些平面圖可知，隨著蝕刻時間的加長，奈米探針圖形隨著蝕刻時間增加而變化，並形成探針形狀。

圖 3-1-2 多晶矽蝕刻八分鐘平面照以及圖 3-1-3 單晶矽蝕刻八分鐘平面照為比較蝕刻時間八分鐘時，單晶矽晶片和多晶矽為基材的蝕刻形狀，都會隨著蝕刻時間增加變成菱形，可知不是因為單晶晶面（110）所造成的蝕刻形狀。

圖 3-1-4 到圖 3-1-14 的 in-line SEM 圖形為蝕刻時間從零到十分鐘的平面圖，更進一步詳細的把蝕刻過程以及每分鐘蝕刻後的結果一一展現出來。其中圖 3-1-4 為蝕刻零分鐘之 SEM 平面圖；圖 3-1-5 為蝕刻一分鐘之 SEM 平面圖；圖 3-1-6 為蝕刻兩分鐘之 SEM 平面圖；圖 3-1-7 為蝕刻三分鐘之 SEM 平面圖；圖 3-1-8 為蝕刻四分鐘之 SEM 平面圖；圖 3-1-9 為蝕刻五分鐘之 SEM 平面圖；圖 3-1-10 為蝕刻六分鐘之 SEM 平面圖；圖 3-1-11 為蝕刻七分鐘之 SEM 平面圖；圖 3-1-12 為蝕刻八分鐘之 SEM 平面圖；圖 3-1-13 為蝕刻九分鐘之 SEM 平面圖；圖 3-1-14 為蝕刻十分鐘之 SEM 平面圖。

光阻從剛顯影完的方圓狀，在經乾蝕刻的過程中，可從蝕刻時間 1~3 分鐘的照片，圖 3-1-5、圖 3-1-6、圖 3-1-7 之圖上探針中間的圓形狀部分，可知光阻仍然存在，而其圓形狀部分隨著蝕刻時間增加而減少，到蝕刻時間 4 分鐘時幾乎完全不見了，如圖 3-1-8 所示，在探針中間可明顯的看到十字交叉的探針針尖位置，到蝕刻時間 5 分鐘時光阻完全消耗完，如圖 3-1-9；而之後隨著蝕刻時間的增加，探針隨著時間的增加而過蝕刻，

探針大小慢慢變小，此外隨著蝕刻時間的增加，探針形狀也慢慢的形成，其邊緣也從圓形變成菱形。

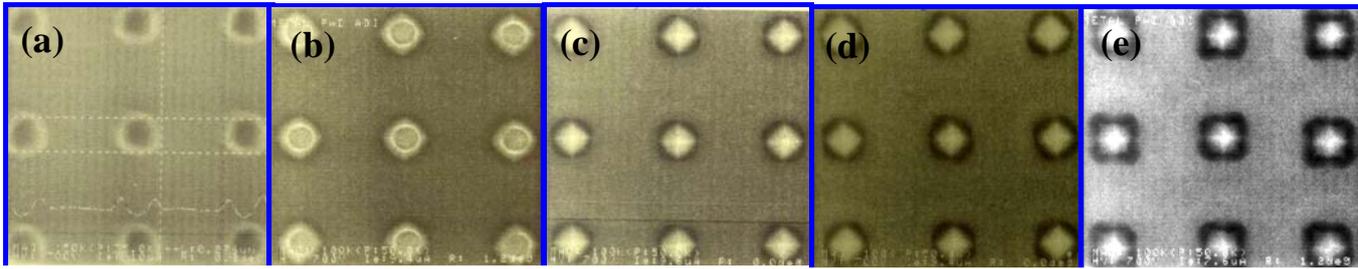


圖 3-1-1 經乾蝕刻後的平面 SEM 圖: (a) 未蝕刻(0 min), (b) 3 min, (c) 4 min, (d) 6 min, and (e) 7 min. 奈米探針圖形隨著蝕刻時間增加而變化

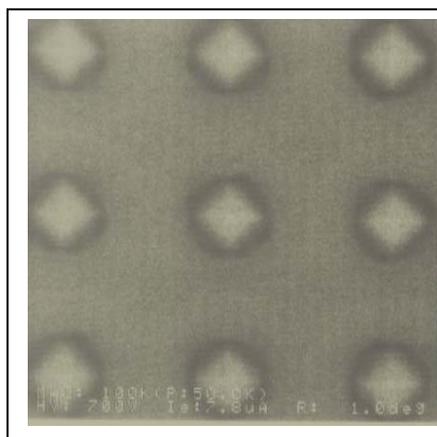


圖 3-1-2 多晶矽蝕刻八分鐘平面照

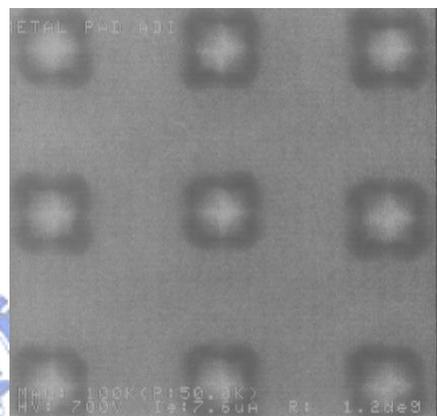


圖 3-1-3 單晶矽蝕刻八分鐘平面照

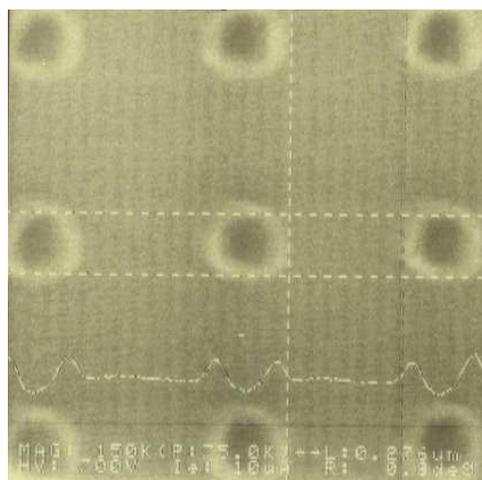


圖 3-1-4 蝕刻零分鐘之 SEM 平面圖

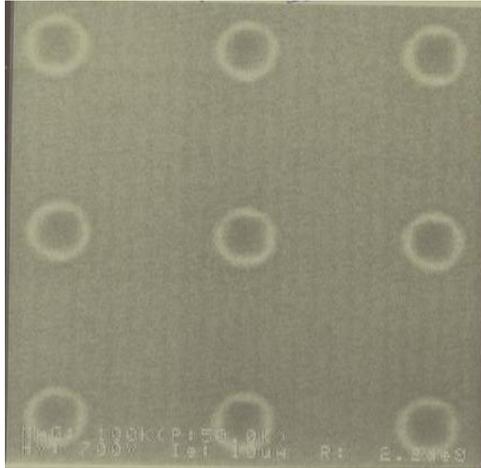


圖 3-1-5 蝕刻一分鐘之 SEM 平面圖

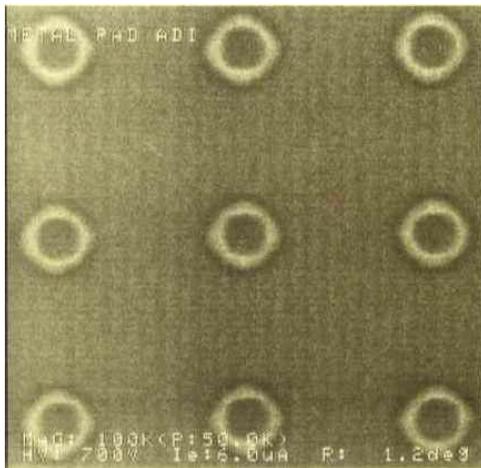


圖 3-1-6 蝕刻二分鐘之 SEM 平面圖

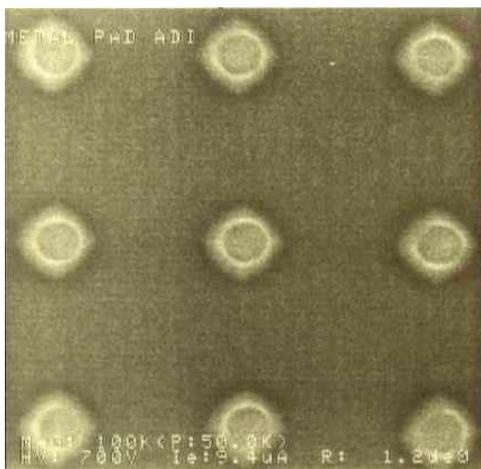


圖 3-1-7 蝕刻三分鐘之 SEM 平面圖

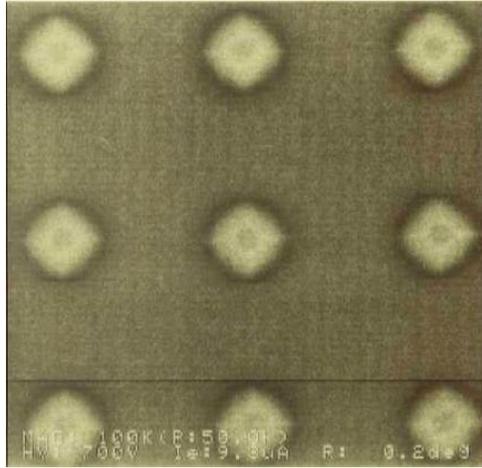


圖 3-1-8 蝕刻四分鐘之 SEM 平面圖

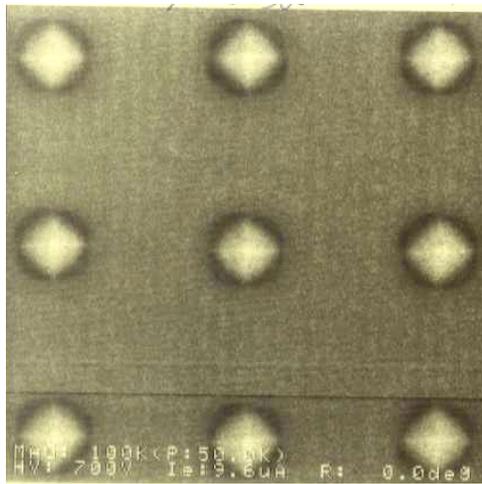


圖 3-1-9 蝕刻五分鐘之 SEM 平面圖

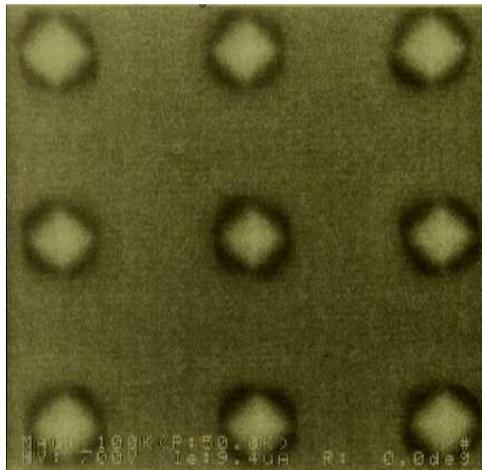


圖 3-1-10 蝕刻六分鐘之 SEM 平面圖

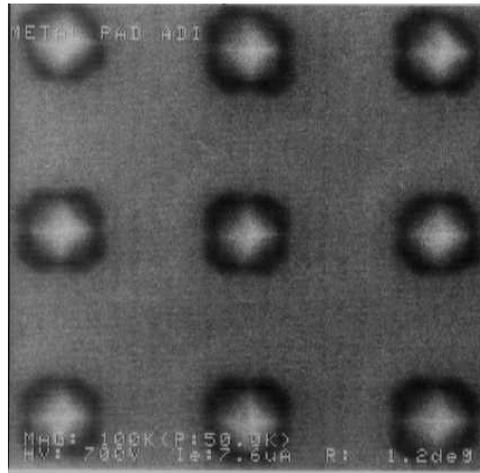


圖 3-1-11 蝕刻七分鐘之 SEM 平面圖

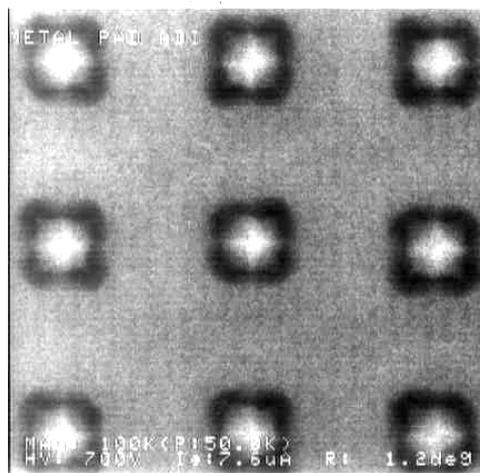


圖 3-1-12 蝕刻八分鐘之 SEM 平面圖

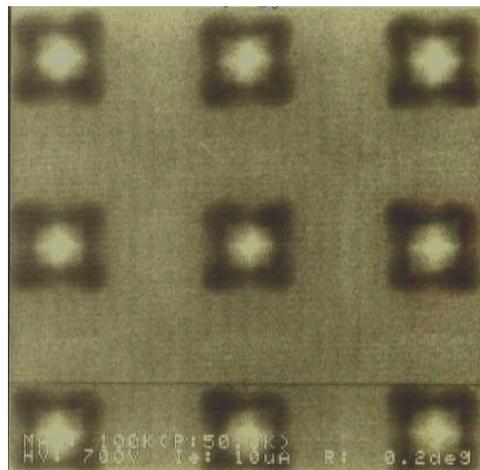


圖 3-1-13 蝕刻九分鐘之 SEM 平面圖

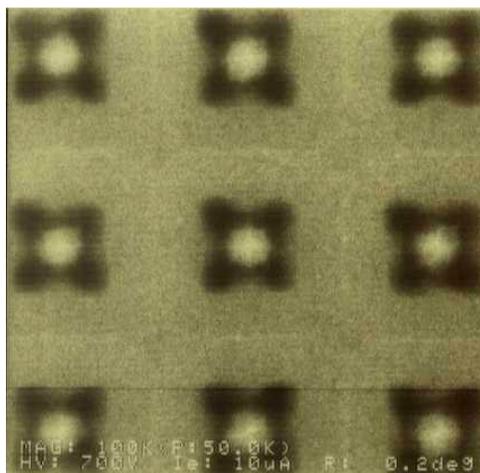


圖 3-1-14 蝕刻十分鐘之 SEM 平面圖

3.2 光阻與蝕刻時間的關係

此外也列了四種條件之 SEM 剖面照，可清楚看出光阻和蝕刻時間的關係，並推測出蝕刻的機制。

圖 3-2-1~3-2-4 為光阻與蝕刻時間變化照系列照，分別為不同條件下，蝕刻時間從 3 分鐘到六分鐘的 cross-section 照片，為探針大小不同、距離不同下的照片，4 張照片一組有六組，可明顯的看出隨著蝕刻時間的加長，探針形狀形成的過程，從光阻很多，到光阻慢慢被消耗，探針逐漸形成，到光阻完全被消耗完，探針製作完成，我們可很明顯的看出 5 分鐘時光阻幾乎被蝕刻完，4 分鐘和 5 分鐘的 SEM 圖可看出光阻被消耗的情況，發現探針不光有非等向性蝕刻，也有側向蝕刻的情形，最後形成經乾蝕刻後形成的探針。

圖 3-2-1~3-2-4 為探針大小 150 nm，距離 100nm，圖 3-2-1 為蝕刻 3 分鐘的 SEM 圖，圖 3-2-2 為蝕刻 4 分鐘的 SEM 圖，圖 3-2-3 為蝕刻 5 分鐘的 SEM 圖，圖 3-2-4 為蝕刻 6 分鐘的 SEM 圖。蝕刻 3 分鐘時光阻尚有很多，蝕刻 4 分鐘時光阻被消耗大部分，蝕刻五分鐘時光阻幾乎被消化蝕刻完，蝕刻六分鐘時光阻完全被消耗結束。

圖 3-2-5~3-2-8 為探針大小 150 nm，距離 200nm，圖 3-2-5 為蝕刻 3 分鐘的 SEM 圖，圖 3-2-6 為蝕刻 4 分鐘的 SEM 圖，圖 3-2-7 為蝕刻 5 分鐘的 SEM 圖，圖 3-2-8 為蝕刻 6 分鐘的 SEM 圖。蝕刻 3 分鐘時光阻尚有很多，蝕刻 4 分鐘時光阻被消耗大部分，蝕刻五分鐘時光阻幾乎被消化蝕刻完，針尖尖銳，蝕刻六分鐘時光阻完全被消耗結束，甚至有過蝕刻的情況出現。

圖 3-2-9~3-2-12 為探針大小 150 nm，距離 800nm，圖 3-2-9 為蝕刻 3 分鐘的 SEM 圖，

圖 3-2-10 為蝕刻 4 分鐘的 SEM 圖，圖 3-2-11 為蝕刻 5 分鐘的 SEM 圖，圖 3-2-12 為蝕刻 6 分鐘的 SEM 圖。蝕刻 3 分鐘時光阻尚有很多，蝕刻 4 分鐘時光阻被消耗大部分，蝕刻 5 分鐘時光阻幾乎被消化蝕刻完，蝕刻六分鐘時光阻完全被消耗結束，甚至有過蝕刻的情況出現。

圖 3-2-13~3-2-16 為探針大小 200 nm，距離 300nm，圖 3-2-13 為蝕刻 3 分鐘的 SEM 圖，圖 3-2-14 為蝕刻 4 分鐘的 SEM 圖，圖 3-2-15 為蝕刻 5 分鐘的 SEM 圖，圖 3-2-16 為蝕刻 6 分鐘的 SEM 圖。蝕刻 3 分鐘時光阻尚有很多，蝕刻 4 分鐘時光阻被消耗大部分，蝕刻五分鐘時光阻幾乎被消化蝕刻完，蝕刻六分鐘時光阻完全被消耗結束，甚至有一些過蝕刻的情況出現。

圖 3-2-17~3-2-20 為探針大小 200 nm，距離 500nm，圖 3-2-17 為蝕刻 3 分鐘的 SEM 圖，圖 3-2-18 為蝕刻 4 分鐘的 SEM 圖，圖 3-2-19 為蝕刻 5 分鐘的 SEM 圖，圖 3-2-20 為蝕刻 6 分鐘的 SEM 圖。蝕刻 3 分鐘時光阻尚有很多，蝕刻 4 分鐘時光阻被消耗大部分，蝕刻五分鐘時光阻幾乎被消化蝕刻完，探針長且尖，蝕刻六分鐘時光阻完全被消耗結束，有過蝕刻的情況出現。

圖 3-2-21~3-2-24 為探針大小 300 nm，距離 800nm，圖 3-2-21 為蝕刻 3 分鐘的 SEM 圖，圖 3-2-22 為蝕刻 4 分鐘的 SEM 圖，圖 3-2-23 為蝕刻 5 分鐘的 SEM 圖，圖 3-2-24 為蝕刻 6 分鐘的 SEM 圖。蝕刻 3 分鐘時光阻尚有很多，蝕刻 4 分鐘時光阻被消耗大部分，蝕刻 5 分鐘時光阻幾乎被消化蝕刻完，蝕刻六分鐘時光阻完全被消耗結束，由於探針大小為 300nm，光阻無法繼續遮擋下，探針尖非尖銳為平台，蝕刻時間加長平台縮小。

從圖 3-2-1 到圖 3-2-24 的光阻與蝕刻時間變化系列照中，雖然由於探針大小以及距離的不同，在蝕刻時間不同時所得到的 SEM 照有所差異，但是我們從照片中仍可得出一些共同的結論，在蝕刻三分鐘時，光阻仍存留大部分，探針形狀已經開始形成，只是最上面的光阻遮蓋住，因此單從平面照看不出來，加上探針的 cross-section 照就可以很清楚的看出整個的變化，到了蝕刻時間四分鐘時，光阻被消耗掉大部分，而探針的形狀也更為明顯，蝕刻的製程步驟有的條件已經接近完成，到了蝕刻時間五分鐘時，大部分條件下的探針其光阻已經被消耗完畢，剩下探針大小 300nm 的最上面還有一點點探針，蝕刻的製程步驟有的條件已經完成，從圖中可以看出若光阻消耗終結的蝕刻時間為 5 分鐘，其五分鐘的照片探針最高也最尖，之後在蝕刻時間六分鐘時，探針的高度因蝕刻而有所降低，不過到蝕刻時間六分鐘時，蝕刻步驟的製程已經結束，探針的形狀已經形成。

這些過程都非常有助於探針蝕刻機制的建構。

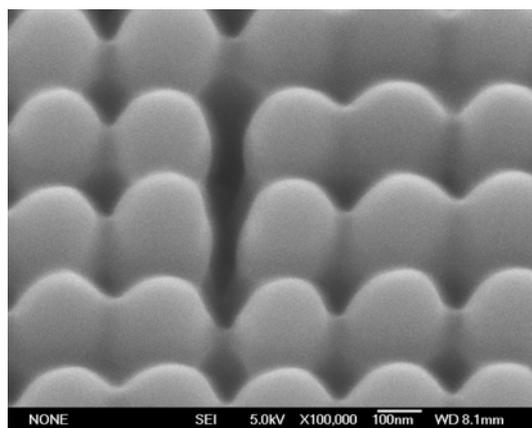


圖 3-2-1：蝕刻 3min，為探針大小 150 nm，距離 100nm

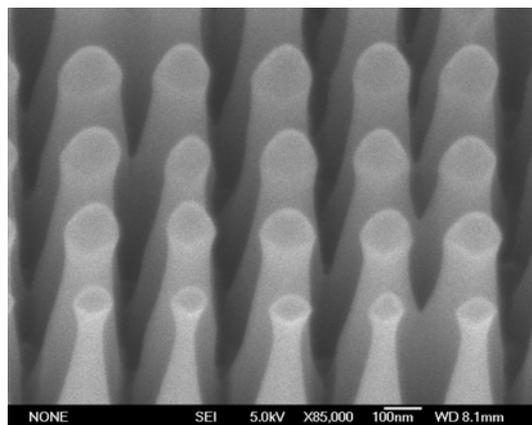


圖 3-2-2：蝕刻 4min，為探針大小 150 nm，距離 100nm

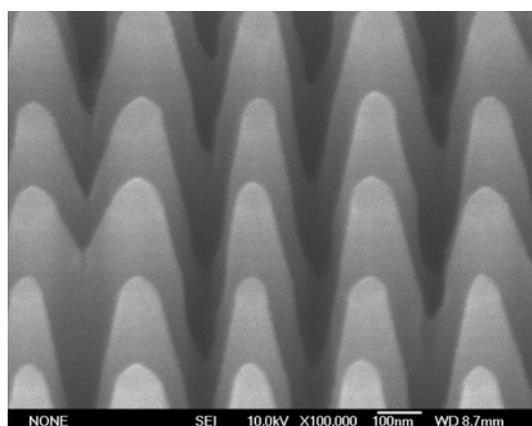


圖 3-2-3：蝕刻 5min，為探針大小 150 nm，距離 100nm

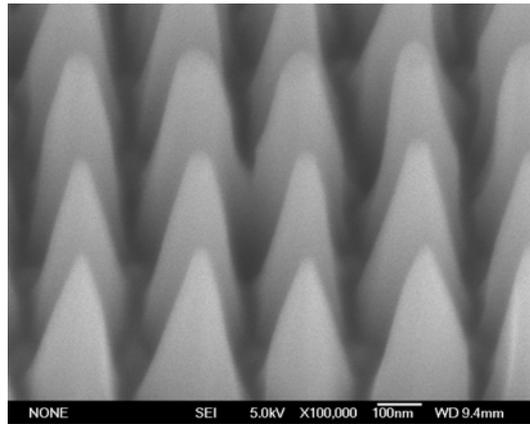


圖 3-2-4：蝕刻 6min，為探針大小 150 nm，距離 100nm

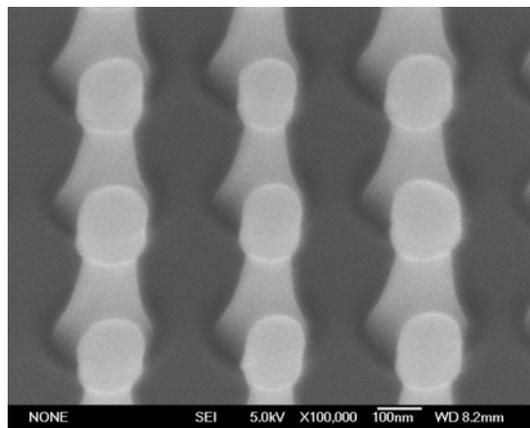


圖 3-2-5：蝕刻 3min，為探針大小 150 nm，距離 200nm

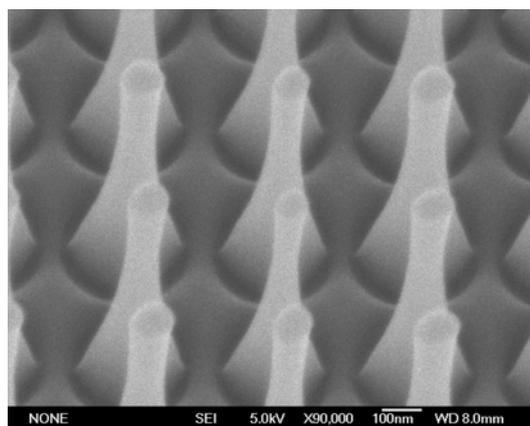


圖 3-2-6：蝕刻 4min，為探針大小 150 nm，距離 200nm

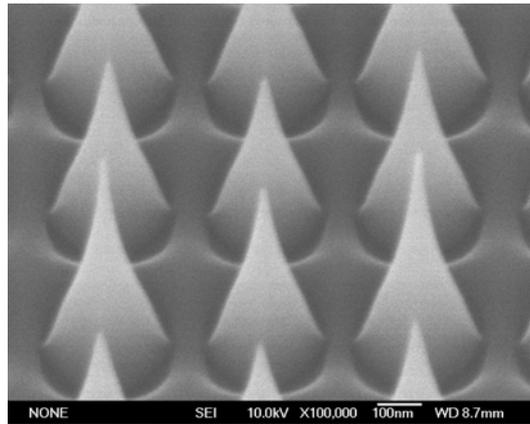


圖 3-2-7：蝕刻 5min，為探針大小 150 nm，距離 200nm

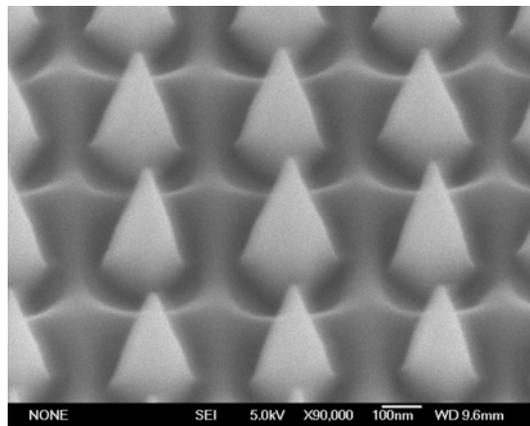


圖 3-2-8：蝕刻 6min，為探針大小 150 nm，距離 200nm

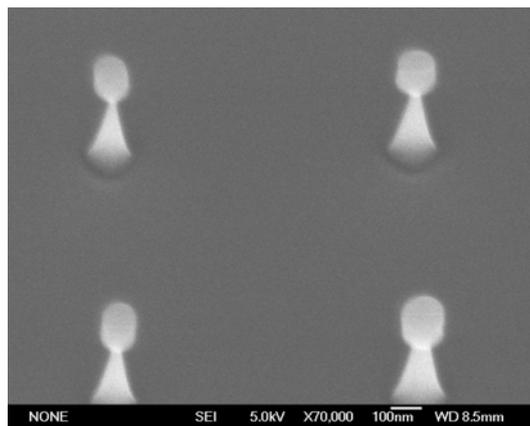


圖 3-2-9：蝕刻 3min，為探針大小 150 nm，距離 800nm

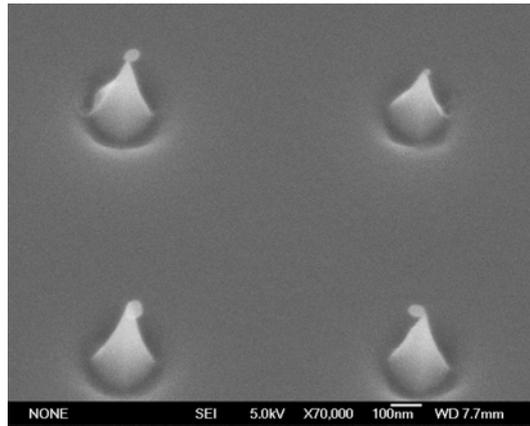


圖 3-2-10：蝕刻 4min, 為探針大小 150 nm，距離 800nm

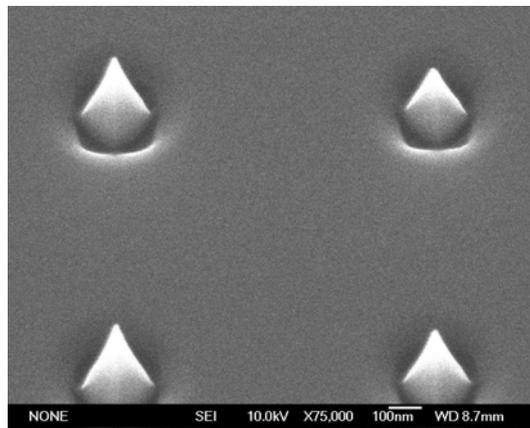


圖 3-2-11：蝕刻 5min, 為探針大小 150 nm，距離 800nm

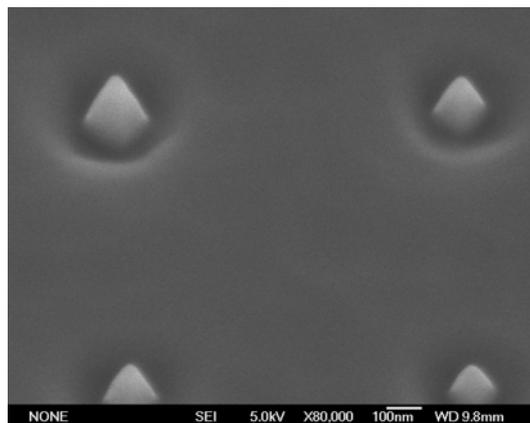


圖 3-2-12：蝕刻 6min, 為探針大小 150 nm，距離 800nm

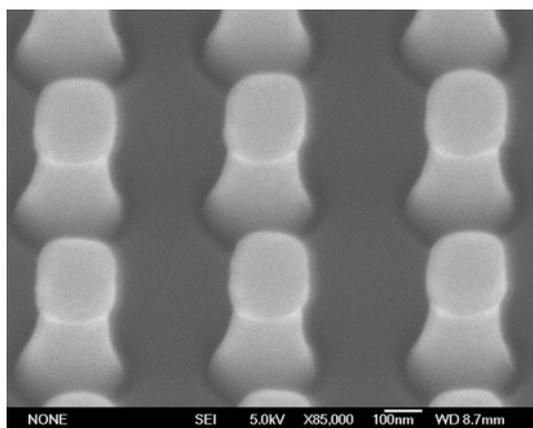


圖 3-2-13：蝕刻 3min, 為探針大小 200 nm，距離 300nm

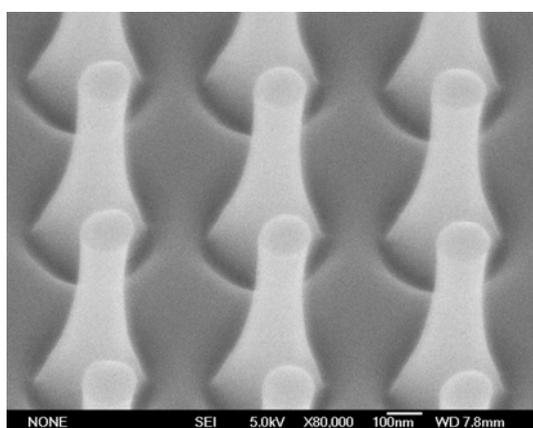


圖 3-2-14：蝕刻 4min, 為探針大小 200 nm，距離 300nm

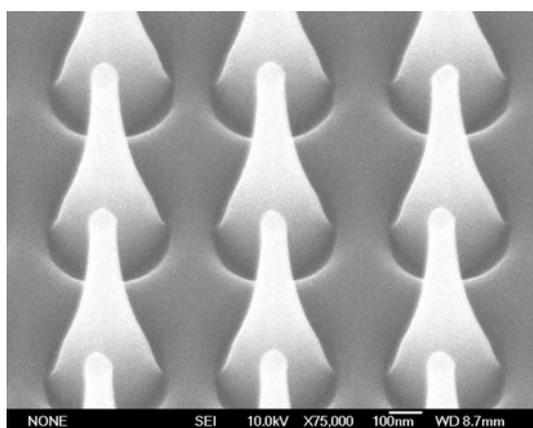


圖 3-2-15：蝕刻 5min, 為探針大小 200 nm，距離 300nm

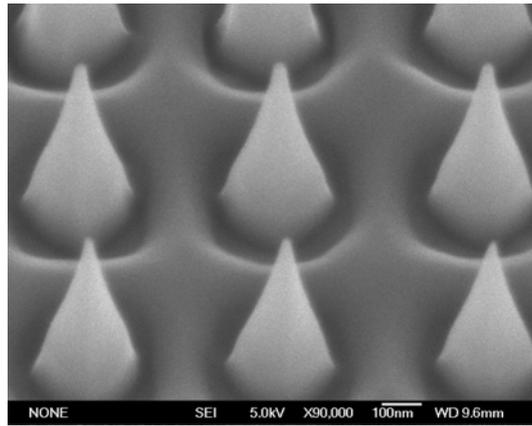


圖 3-2-16：蝕刻 6min，為探針大小 200 nm，距離 300nm

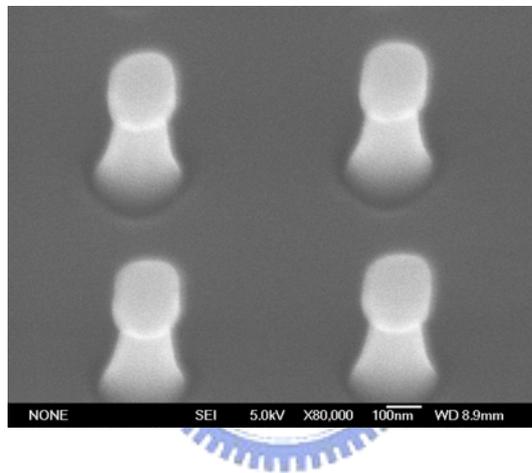


圖 3-2-17：蝕刻 3min，為探針大小 200 nm，距離 500nm

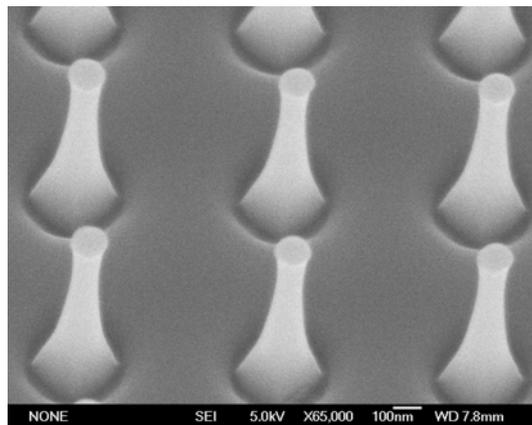


圖 3-2-18：蝕刻 4min，為探針大小 200 nm，距離 500nm

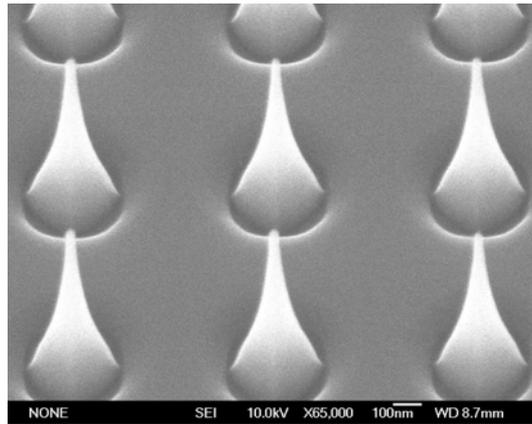


圖 3-2-19：蝕刻 5min，為探針大小 200 nm，距離 500nm

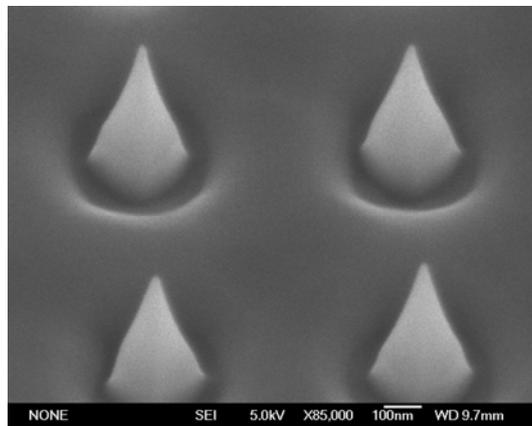


圖 3-2-20：蝕刻 6min，為探針大小 200 nm，距離 500nm

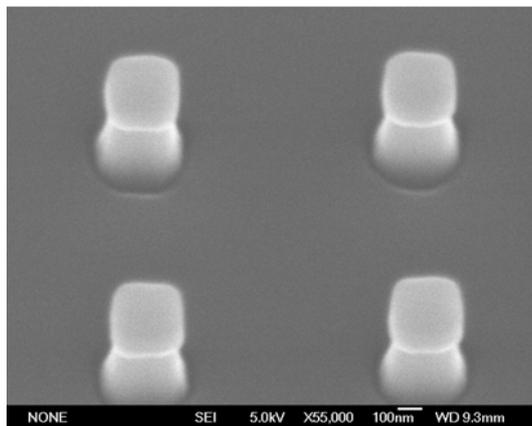


圖 3-2-21：蝕刻 3min，為探針大小 300 nm，距離 800nm

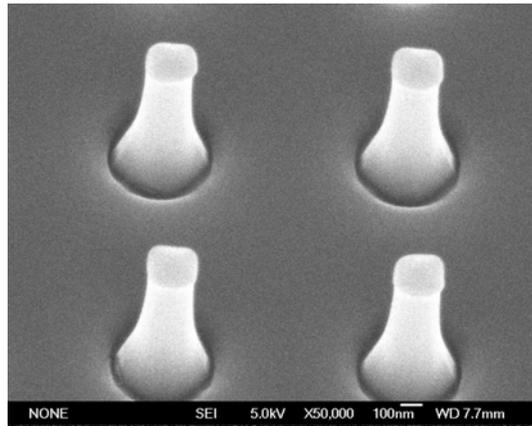


圖 3-2-22：蝕刻 4min，為探針大小 300 nm，距離 800nm

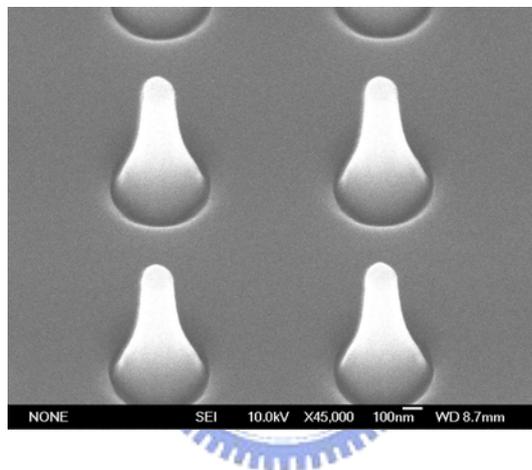


圖 3-2-23：蝕刻 5min，為探針大小 300 nm，距離 800nm

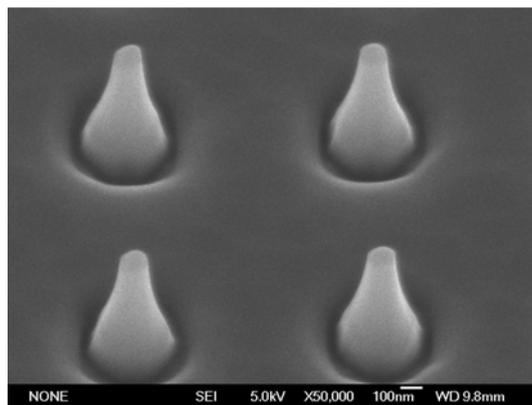


圖 3-2-24：蝕刻 6min，為探針大小 300 nm，距離 800nm

3.3 蝕刻機制

如圖 3-3-1 為經由乾蝕刻製作之奈米探針之蝕刻機制，是配合 SEM 的平面照片，從圖 3-1-4 到圖 3-1-14 以及 cross-section 圖，如圖 3-2-1 到圖 3-2-2 所示，所推測出的蝕刻機制。其蝕刻的過程解說如前文所言，首先光阻塗附於矽基板上，開始乾蝕刻，隨著蝕刻時間的增加，光阻逐漸被消耗之下，探針形狀逐漸形成，之後光阻完全消耗完成後，蝕刻製程也就完成，而探針形狀的形成是一開始蝕刻時，就朝向菱形的圖形產生，無論光阻是方形還是方圓形，其最後的結果都是菱形。而從 cross-section 圖也可看到在蝕刻過程中，雖然光阻還在，其遮蔽的作用並不影響探針的形成，並有側向蝕刻的情形出現。

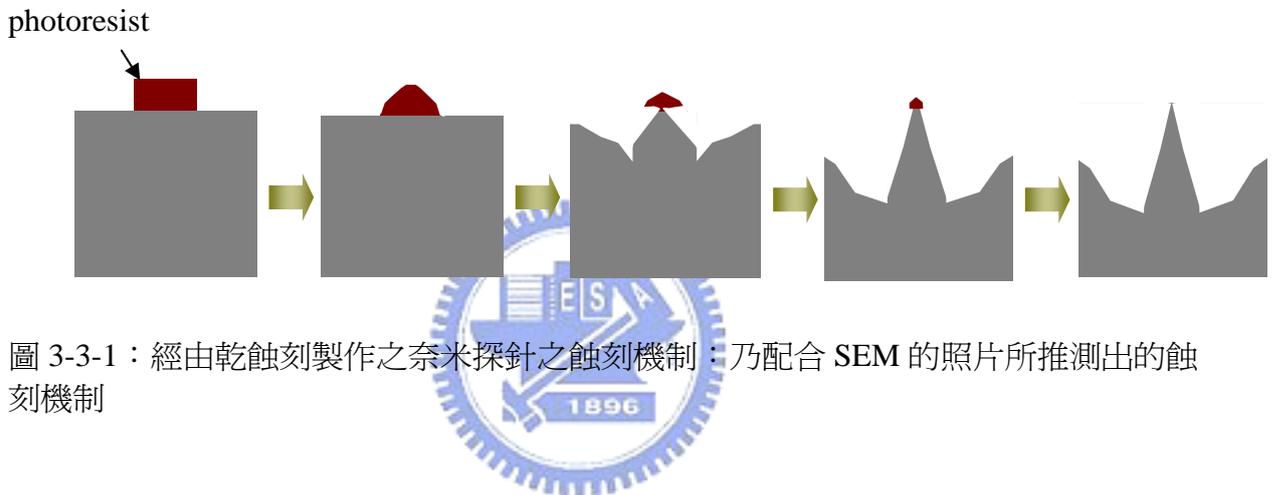


圖 3-3-1：經由乾蝕刻製作之奈米探針之蝕刻機制；乃配合 SEM 的照片所推測出的蝕刻機制

3.4 探針製程結果

3.4.1 探針影像

從圖 3-4-1-1~圖 3-4-1-7 為探針影像，經由各實驗步驟所成功完成的探針。其中圖 3-4-1-1 為探針大小 200nm，距離為 200nm 的 SEM cross-section 圖；圖 3-4-1-2 為探針大小 200nm，距離為 300nm 的 SEM cross-section 圖，而圖 3-4-1-3 為探針大小 300nm，距離為 500nm 的 SEM cross-section 圖，圖 3-4-1-4 則為探針大小 300nm，距離為 800nm 的 SEM cross-section 圖，圖 3-4-1-5 為探針大小 300nm，距離為 800nm 的 SEM cross-section 圖，以及圖 3-4-1-6 為探針大小 300nm，距離為 1000nm 的 SEM cross-section 圖。其中圖 3-4-1-4 為單一探針的放大圖，而圖 3-4-1-5 為數個探針的合照，可由圖 3-4-1-5 為知我們的實驗方式可一次製作出大面積而且符合條件的探針。

從圖 3-4-1-1 到圖 3-4-1-7 的七張圖中，我們選了條件為探針大小 200nm 和 300nm 兩種，探針大小 150nm 系列的探針無論其距離多少，由於太小而沒有做出外包氧化物的

探針，而我們也從實驗中得到最適合的條件為探針大小 300nm，距離 500nm 以及 800nm 的探針。從圖 3-4-1-1 到圖 3-4-1-7 的 cross-section 圖可以清楚的看到有包氧化物的探針結果以及沒有包氧化物，但是探針尖尖銳的圖形。

3.4.2 探針的針尖影像

除了前述的探針照外，我們也進一步的針對探針針尖加以照相，從圖 3-4-2-1a 到圖 3-4-2-10b 共有 10 組探針的針尖影像以及探針圖，是其中 a 表示尖端影像圖，而 b 則為探針圖。這些圖證明可製作出極為尖銳的探針針尖，a、b 作為互相比較對照之用。

圖 3-4-2-1a 為探針大小 200nm，距離為 200nm 的 SEM cross-section 圖，圖 3-4-2-1b 為探針大小 200nm，距離為 200nm 的 SEM cross-section 圖；圖 3-4-2-2a 為探針大小 200nm，距離為 200nm 的 SEM cross-section 圖，圖 3-4-2-2b 為探針大小 200nm，距離為 200nm 的 SEM cross-section 圖；圖 3-4-2-3a 為探針大小 200nm，距離為 200nm 的 SEM cross-section 圖，圖 3-4-2-3b 為探針大小 200nm，距離為 200nm 的 SEM cross-section 圖；圖 3-4-2-4a 為探針大小 200nm，距離為 300nm 的 SEM cross-section 圖，圖 3-4-2-4b 為探針大小 200nm，距離為 300nm 的 SEM cross-section 圖；圖 3-4-2-5a 為探針大小 200nm，距離為 300nm 的 SEM cross-section 圖，圖 3-4-2-5b 為探針大小 200nm，距離為 300nm 的 SEM cross-section 圖；圖 3-4-2-6a 為探針大小 200nm，距離為 300nm 的 SEM cross-section 圖，圖 3-4-2-6b 為探針大小 200nm，距離為 300nm 的 SEM cross-section 圖；圖 3-4-2-7a 為探針大小 300nm，距離為 800nm 的 SEM cross-section 圖，圖 3-4-2-7b 為探針大小 300nm，距離為 800nm 的 SEM cross-section 圖；圖 3-4-2-8a 為探針大小 300nm，距離為 1000nm 的 SEM cross-section 圖，圖 3-4-2-8b 為探針大小 300nm，距離為 1000nm 的 SEM cross-section 圖；圖 3-4-2-9a 為探針大小 300nm，距離為 1000nm 的 SEM cross-section 圖，圖 3-4-2-9b 為探針大小 300nm，距離為 1000nm 的 SEM cross-section 圖；圖 3-4-2-10a 為探針大小 300nm，距離為 1000nm 的 SEM cross-section 圖，圖 3-4-2-10b 為探針大小 300nm，距離為 1000nm 的 SEM cross-section 圖。

在本論文中，我們呈現了許多為探針大小 200nm 以及 300nm 的 cross-section 圖，雖然上述圖中有探針大小相同以及距離相同的，但由於實驗中泡去光阻液的時間不同，所以造成探針尖露出的大小不同，而我們在這一系列圖中，除了探針全貌外也放上了探針針尖 cross-section 圖，從高倍率的 SEM 照可以看到探針尖大小，a、b 互相比較對照下，不同探針、大小不同距離下可以得到的探針針尖情況，其探針尖甚至可達到 10nm 以下

的程度。此結果差異，使我們也藉由適當的條件改變得得到所要的探針，也可從系列的實驗中得到最適合的條件。

3.4.3 探針的尖銳化

從圖 3-4-3-1 到圖 3-4-3-6 是經熱氧化之後的探針差異 SEM 圖，可明顯看出經熱氧化法再浸泡酸液，適當條件時間下即可完美的將針尖尖銳化。可分析比較探針形狀與蝕刻時間的關係，針尖角度與有無泡 BOE 等變化的關係。經由計算可得其曲率半徑從約 12nm 降至尖銳化後的 3nm 以下。

圖 3-4-3-1 為探針未尖銳化前，探針大小 200nm，距離 200nm；圖 3-4-3-2 為探針未尖銳化前，探針大小 300nm，距離 500nm；圖 3-4-3-3 為探針未尖銳化前，探針大小 300nm，距離 1000nm；圖 3-4-3-4 為探針尖銳化後，探針大小 200nm，距離 200nm；圖 3-4-3-5 為探針尖銳化後，探針大小 300nm，距離 500nm；圖 3-4-3-6 為探針尖銳化後，探針大小 300nm，距離 1000nm。

在論文中可從圖 3-4-3-1 和圖 3-4-3-4、圖 3-4-3-2 和圖 3-4-3-5、圖 3-4-3-3 和圖 3-4-3-6 的泡 BOE 前後變化中，明顯看出尖銳化前後的差異。在探針泡 BOE 前後的變化中，浸泡前 500nm 高度大小的探針，探針尖曲率半徑 12 nm 的探針，經酸液浸泡後，變為探針尖曲率半徑 3 nm 的探針尖。其尖銳化的原理也相當簡單，是因為 BOE 酸液的浸泡，將氧化部分去除，同時削尖了探針的角度。

3.4.4 蝕刻時間變化與針尖角度的關係

針尖由蝕刻時間的變長而變尖，針尖小度變小，但是當光阻經由蝕刻而完全去除，沒有保護作用後，針尖在之後的蝕刻作用下，針尖角度變大。因此得知針尖角度和形成的探針深度，也就是最後探針的高度，與光阻能抵抗時間的時間有極大的關係。光阻被完全去除的那一點是探針高度的最大值，之後將隨著蝕刻時間增加而減小。

3.4.5 浸泡被稀釋後的去光阻液時間和探針尖露出的關係

浸泡被稀釋後的去光阻液的時間越長。露出的探針尖越多，最後所得的探針，其沒有被氧化物覆蓋的也越多。去光阻液被稀釋的比例是水：去光阻液=6:1，時間以秒計算。

探針理想製作參數；經由各項條件測量後，得出的最佳製作參數為探針大小 300nm，距離 500~1000nm。我們設計了探針大小 150,200,300nm 等三種，加上探針距離

space:100,200,300,500,800,1000,2000,3000,5000nm 等共九種。加上蝕刻時間從五到十分鐘，最後以八分鐘製作探針。

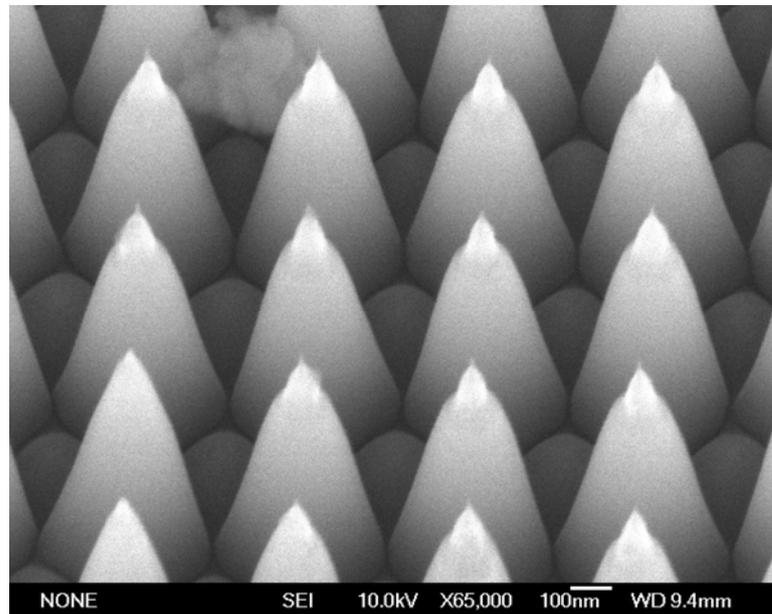


圖 3-4-1-1 為探針大小 200nm，距離為 200nm 的 SEM cross-section 圖

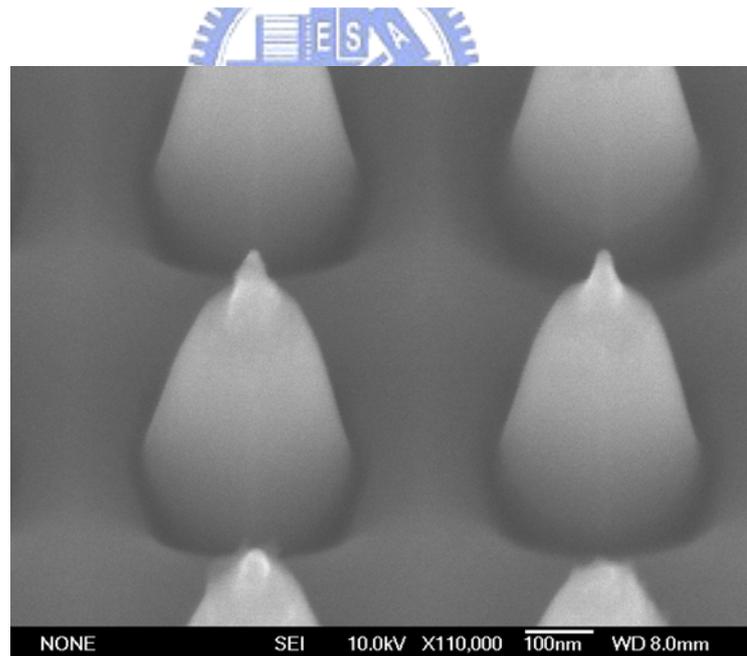


圖 3-4-1-2 為探針大小 200nm，距離為 300nm 的 SEM cross-section

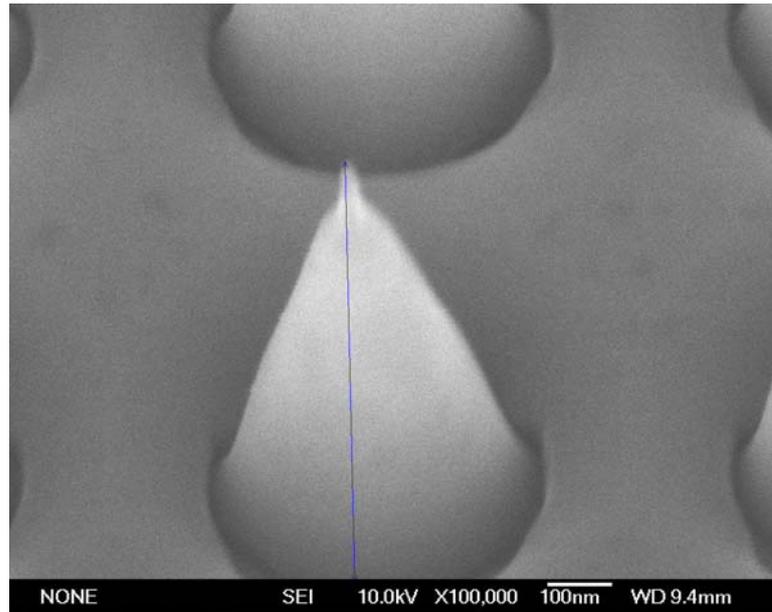


圖 3-4-1-3 為探針大小 300nm，距離為 500nm 的 SEM cross-section 圖

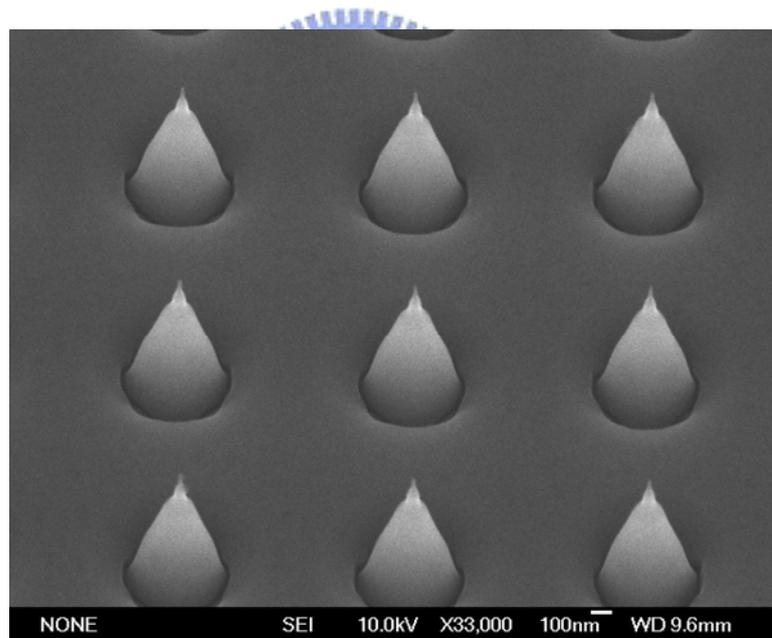


圖 3-4-1-4 為探針大小 300nm，距離為 800nm 的 SEM cross-section 圖

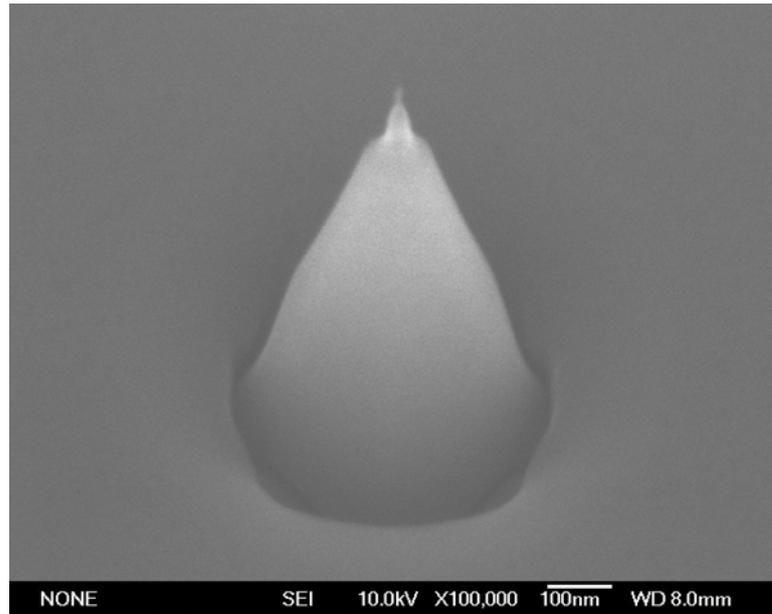


圖 3-4-1-5 為探針大小 300nm，距離為 800nm 的 SEM cross-section 圖

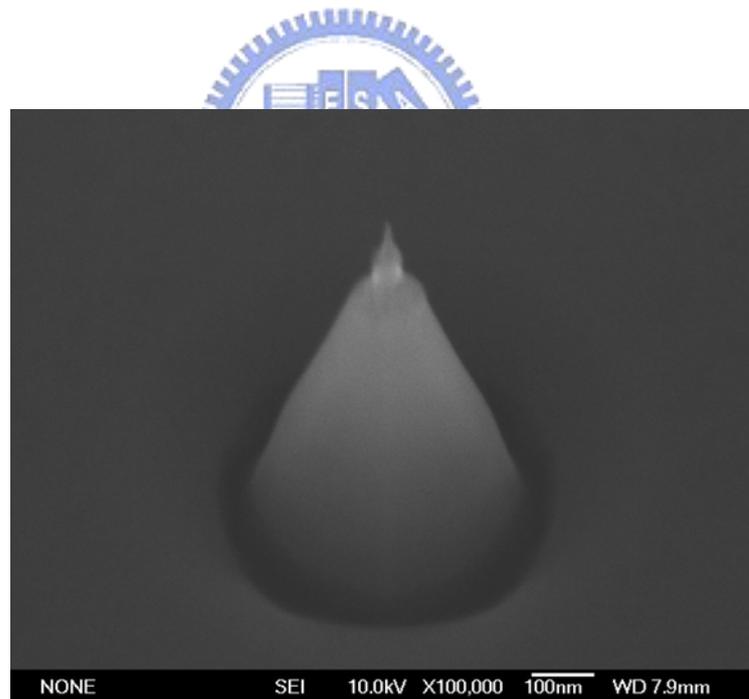


圖 3-4-1-6 為探針大小 300nm，距離為 1000nm 的 SEM cross-section 圖

3.4.2 探針尖端影像



圖 3-4-2-1a 為探針大小 200nm，距離為 200nm 的 SEM cross-section 尖端影像圖

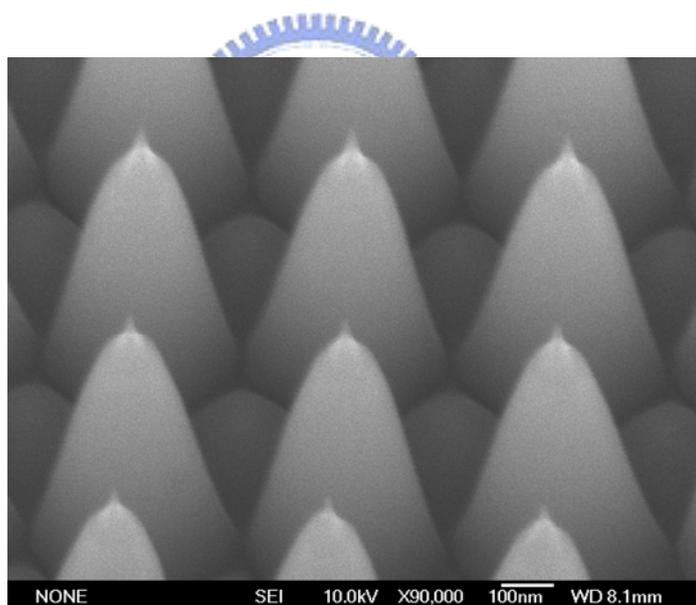


圖 3-4-2-1b 為探針大小 200nm，距離為 200nm 的 SEM cross-section 探針圖

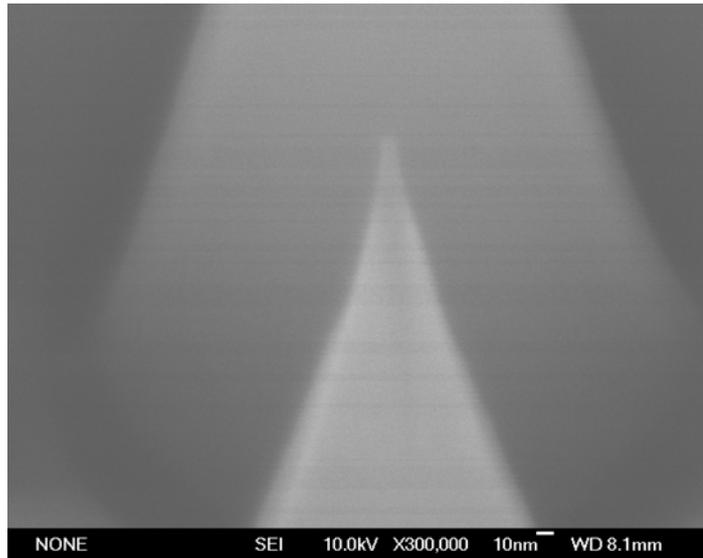


圖 3-4-2-2a 為探針大小 200nm，距離為 200nm 的 SEM cross-section 尖端影像圖

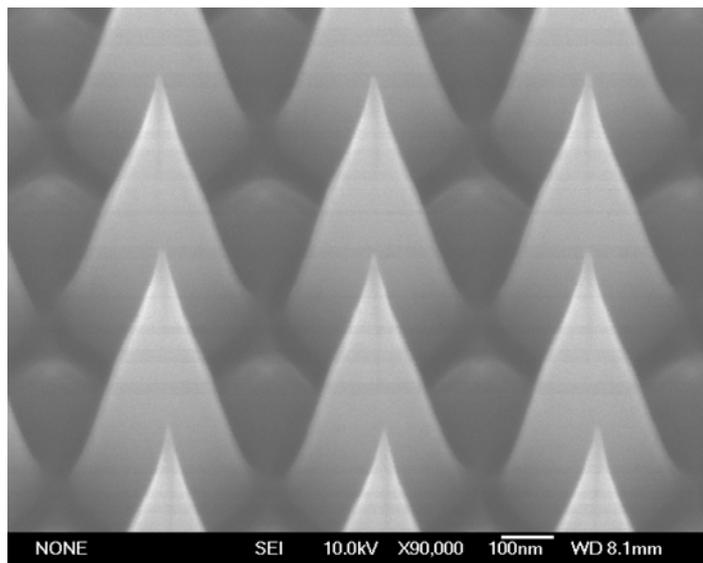


圖 3-4-2-2b 為探針大小 200nm，距離為 200nm 的 SEM cross-section 探針圖

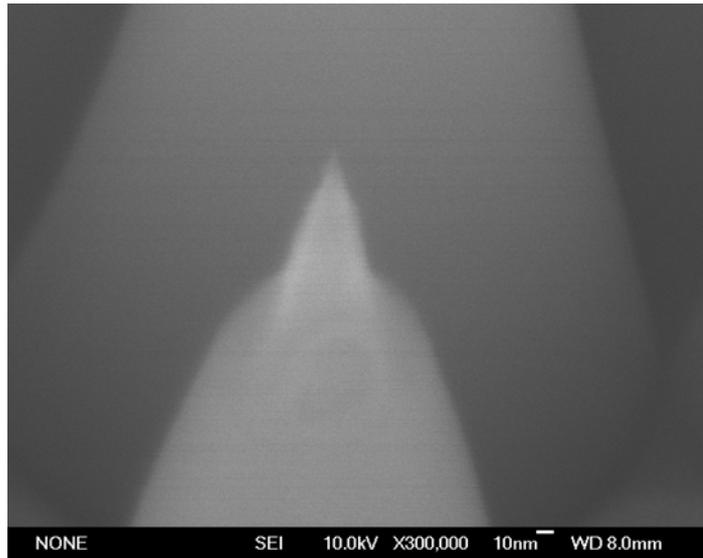


圖 3-4-2-3a 為探針大小 200nm，距離為 200nm 的 SEM cross-section 尖端影像圖

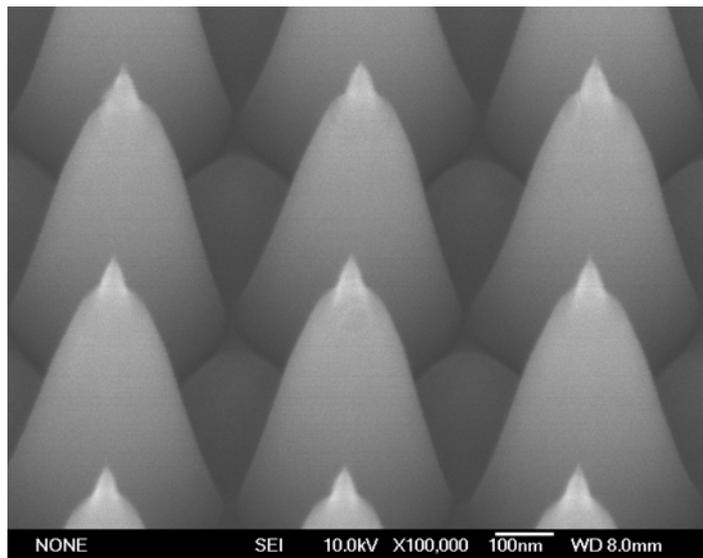


圖 3-4-2-3b 為探針大小 200nm，距離為 200nm 的 SEM cross-section 探針圖

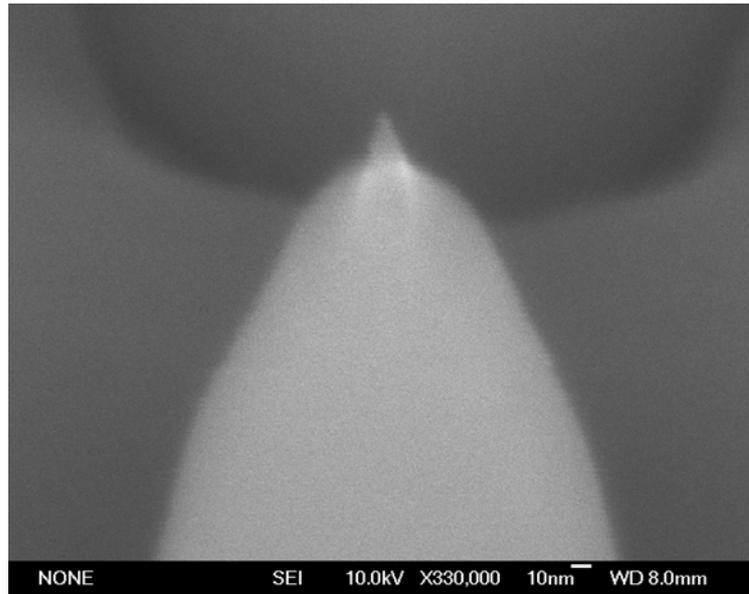


圖 3-4-2-4a 為探針大小 200nm，距離為 300nm 的 SEM cross-section 尖端影像圖

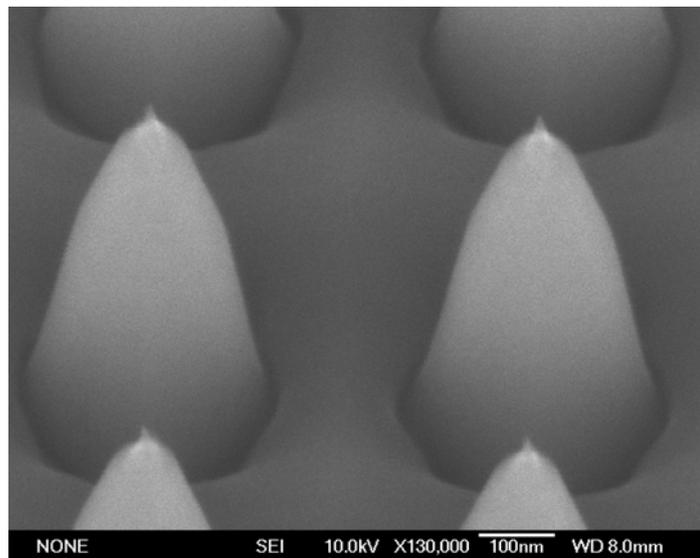


圖 3-4-2-4b 為探針大小 200nm，距離為 300nm 的 SEM cross-section 探針圖

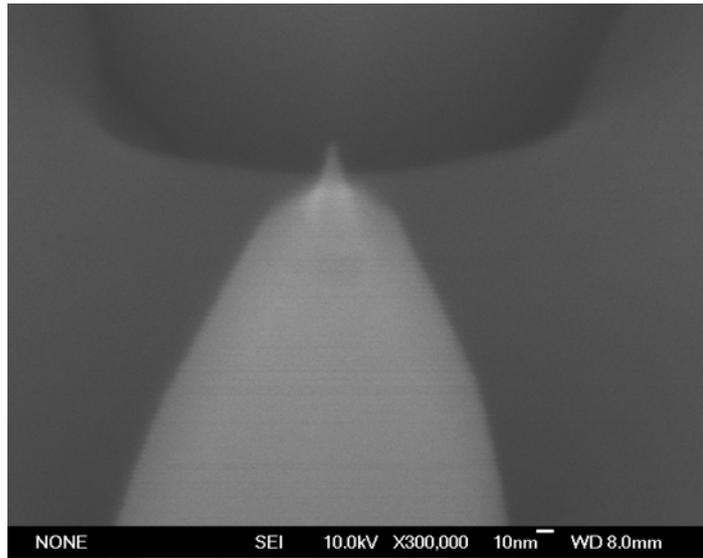


圖 3-4-2-5a 為探針大小 200nm，距離為 300nm 的 SEM cross-section 尖端影像圖

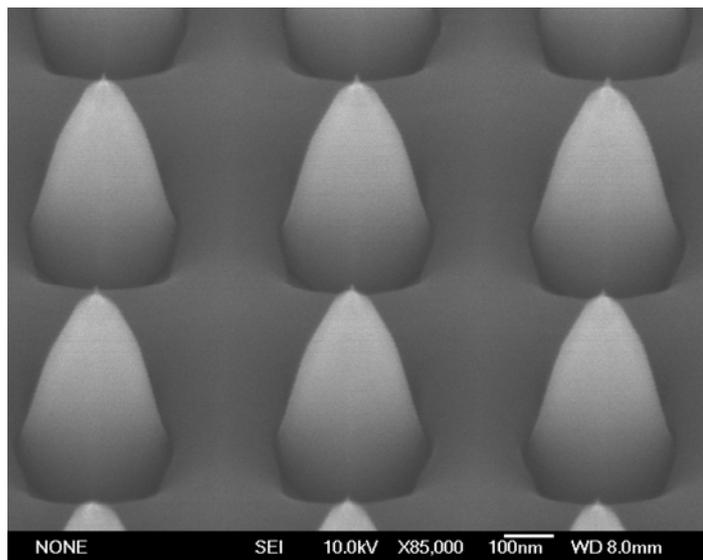


圖 3-4-2-5b 為探針大小 200nm，距離為 300nm 的 SEM cross-section 探針圖

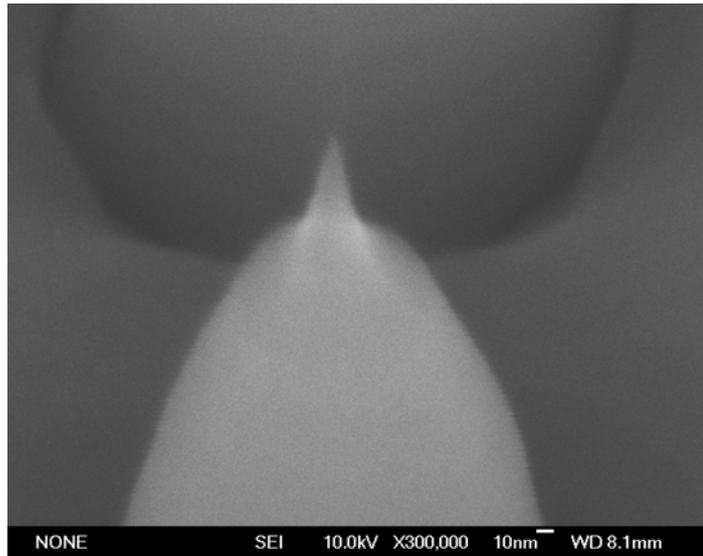


圖 3-4-2-6a 為探針大小 200nm，距離為 300nm 的 SEM cross-section 尖端影像圖

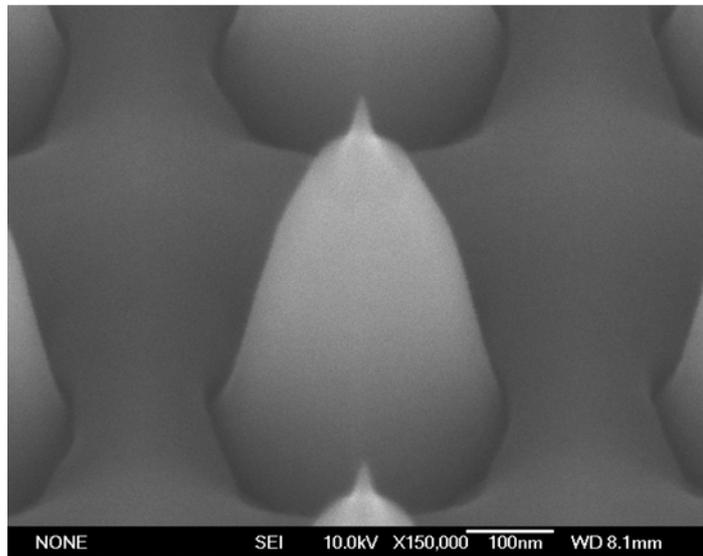


圖 3-4-2-6b 為探針大小 200nm，距離為 300nm 的 SEM cross-section 探針圖

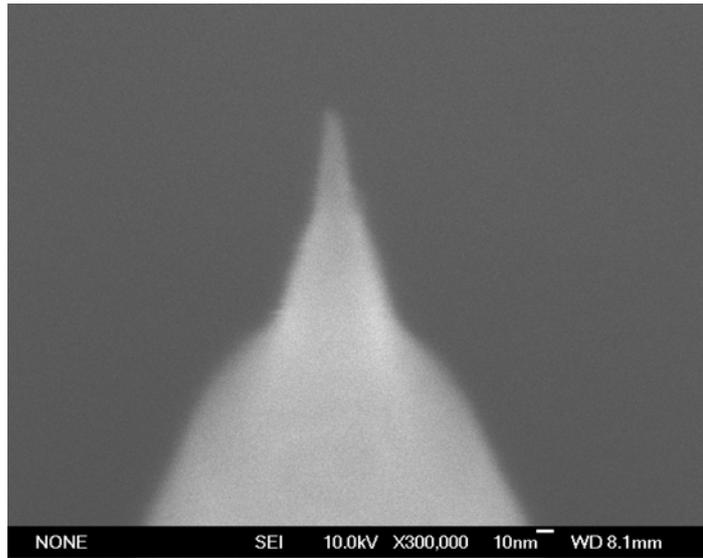


圖 3-4-2-7a 為探針大小 300nm，距離為 800nm 的 SEM cross-section 尖端影像圖

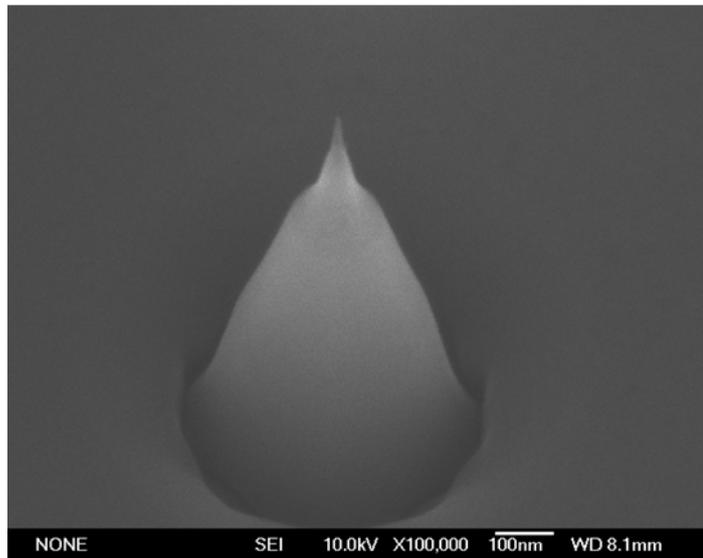


圖 3-4-2-7b 為探針大小 300nm，距離為 800nm 的 SEM cross-section 探針圖

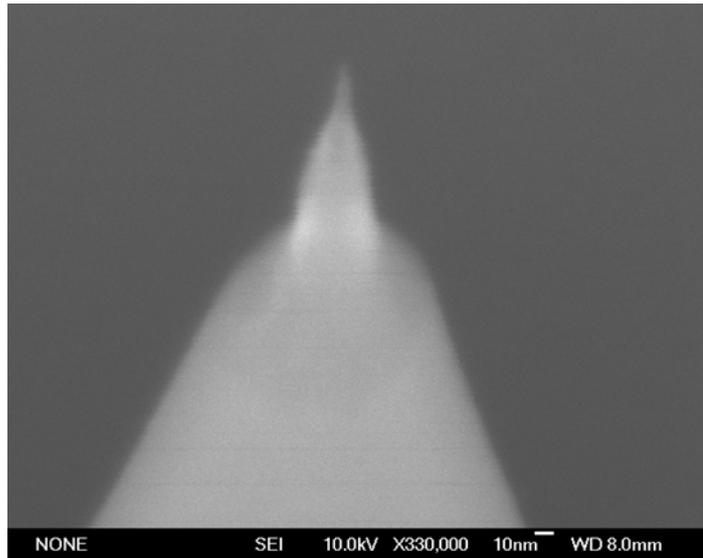


圖 3-4-2-8a 為探針大小 300nm，距離為 1000nm 的 SEM cross-section 尖端影像圖

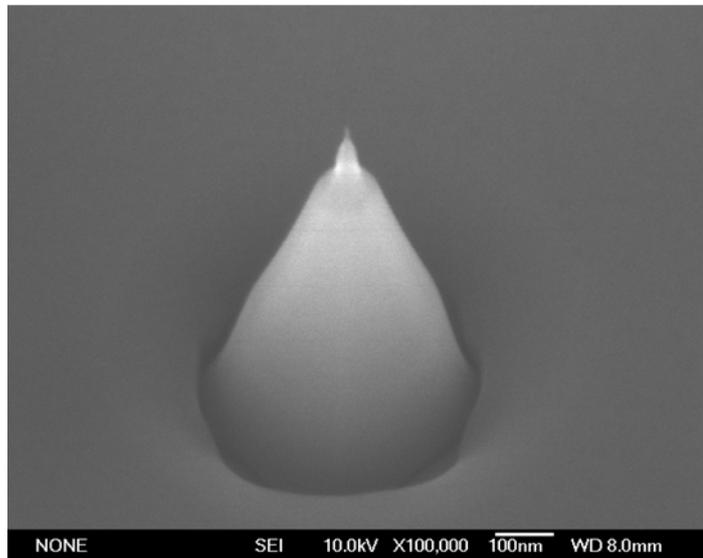


圖 3-4-2-8b 為探針大小 300nm，距離為 1000nm 的 SEM cross-section 探針圖

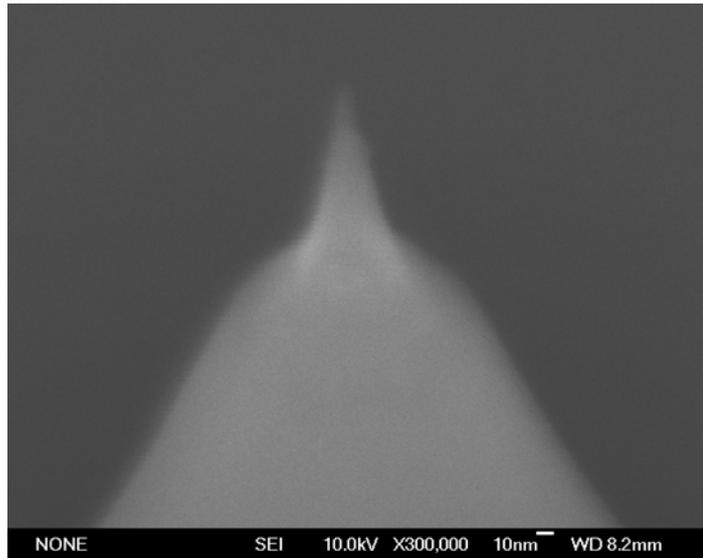


圖 3-4-2-9a 為探針大小 300nm，距離為 1000nm 的 SEM cross-section 尖端影像圖

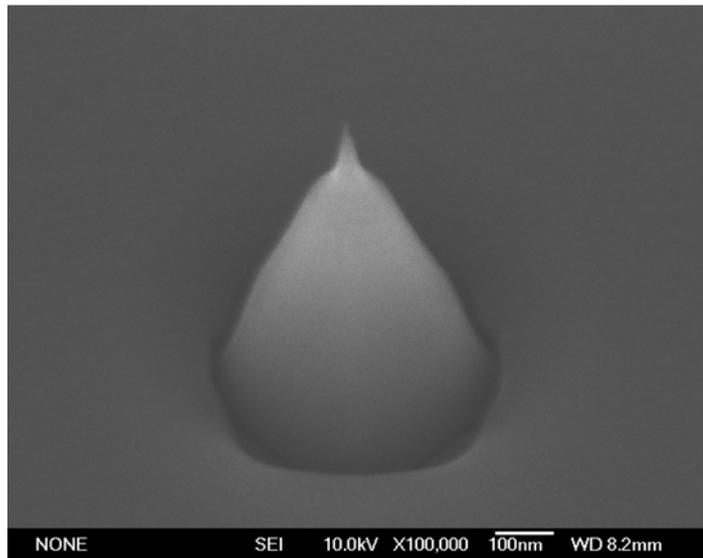


圖 3-4-2-9b 為探針大小 300nm，距離為 1000nm 的 SEM cross-section 探針圖

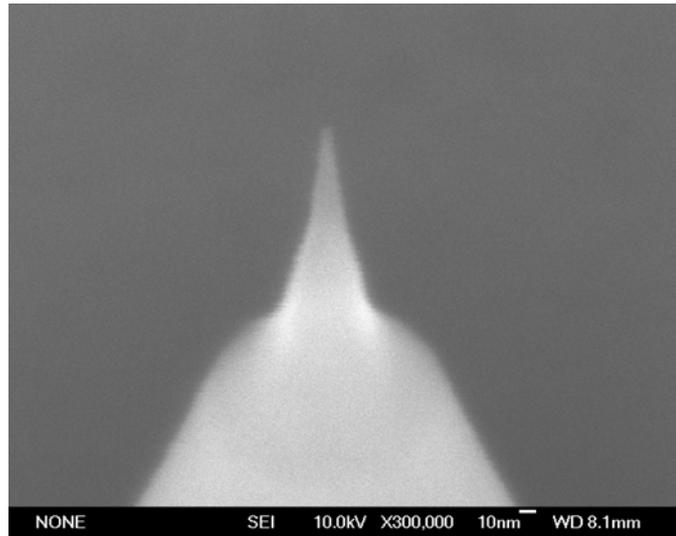


圖 3-4-2-10a 為探針大小 300nm，距離為 1000nm 的 SEM cross-section 尖端影像圖

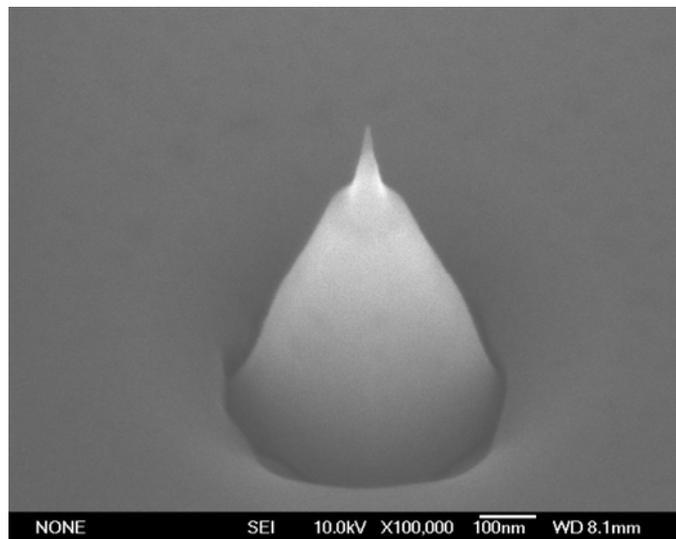


圖 3-4-2-10b 為探針大小 300nm，距離為 1000nm 的 SEM cross-section 探針

探針針尖尖銳化之 SEM 比較圖

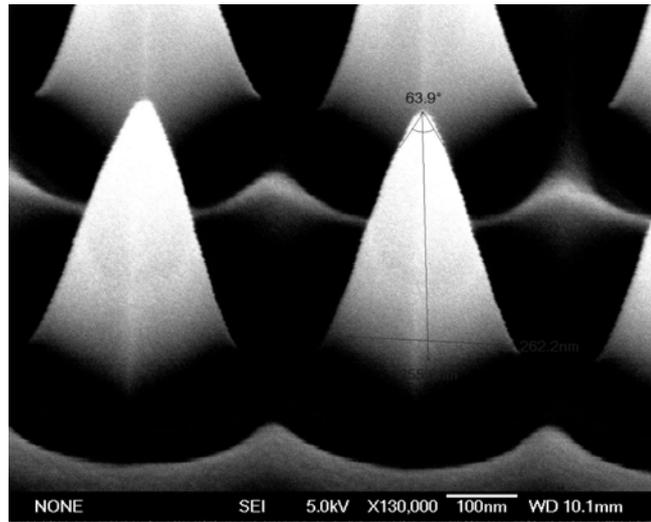


圖 3-4-3-1 探針未尖銳化前，探針大小 200nm，距離 200nm

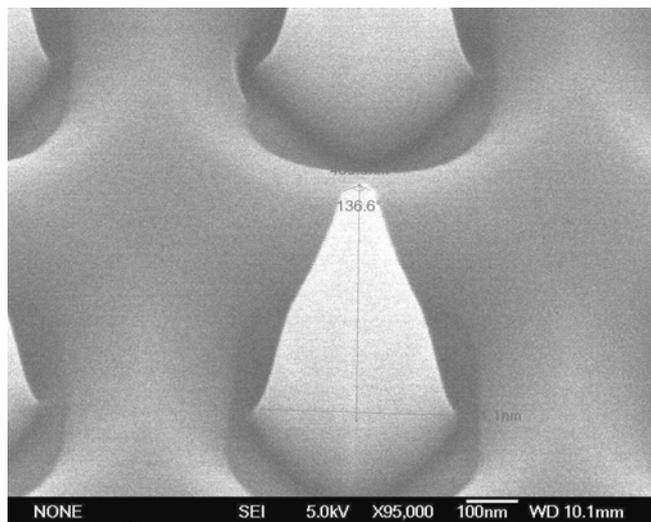


圖 3-4-3-2 探針未尖銳化前，探針大小 300nm，距離 500nm

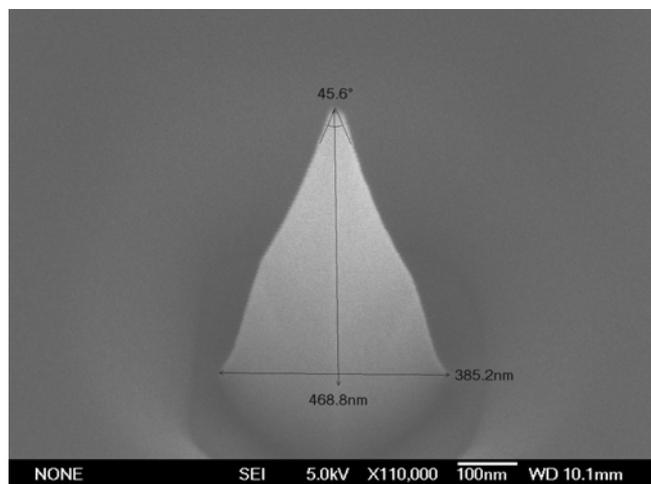


圖 3-4-3-3 探針未尖銳化前，探針大小 300nm，距離 1000nm

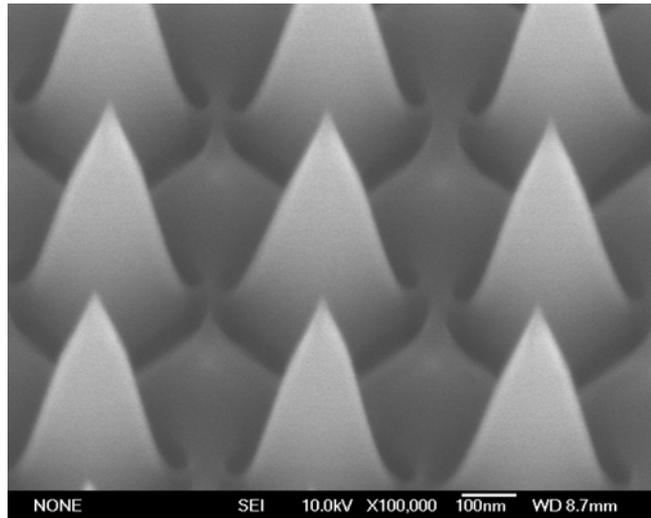


圖 3-4-3-4 探針尖銳化後，探針大小 200nm，距離 200nm

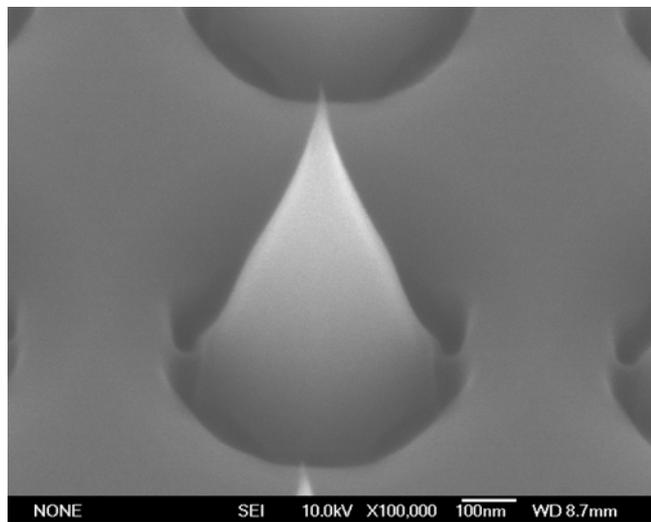


圖 3-4-3-5 探針尖銳化後，探針大小 300nm，距離 500nm

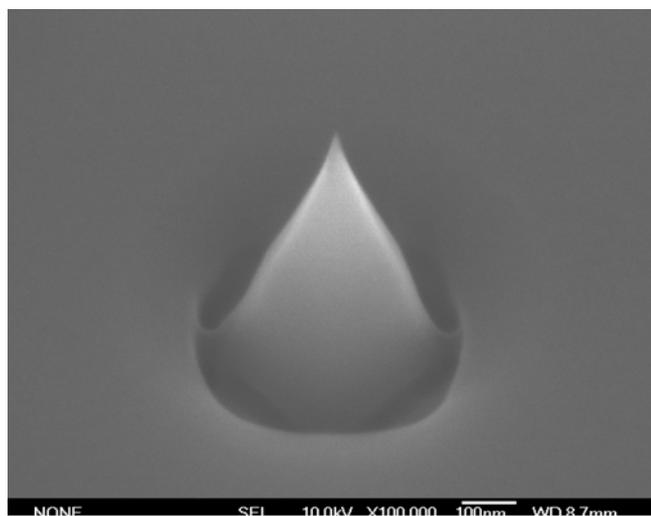


圖 3-4-3-6 探針尖銳化後，探針大小 300nm，距離 1000nm

第四章.奈米探針的應用

在製作完成奈米探針後，利用已有的探針結構進行各方面的應用，首先是探針在 field emission 的應用，另外則是在探針晶圓上長奈米碳管（CNT），並以 SEM 照出成果影像。

4.1 奈米探針之場發射應用

圖 4-1-1 到圖 4-1-5 為 field emission SEM 圖，其中圖 4-1-4 和圖 4-1-5 有明確的將場發射探針針尖和我們製作的探針距離量測出來，可藉由距離已知，電場電流等進一步資訊，計算得知結果。我們可從 SEM 圖知道圖 4-1-4 距離為 $0.101 \mu\text{m}$ ，而圖 4-1-5 距離為 326.9nm 。

field emission SEM 圖

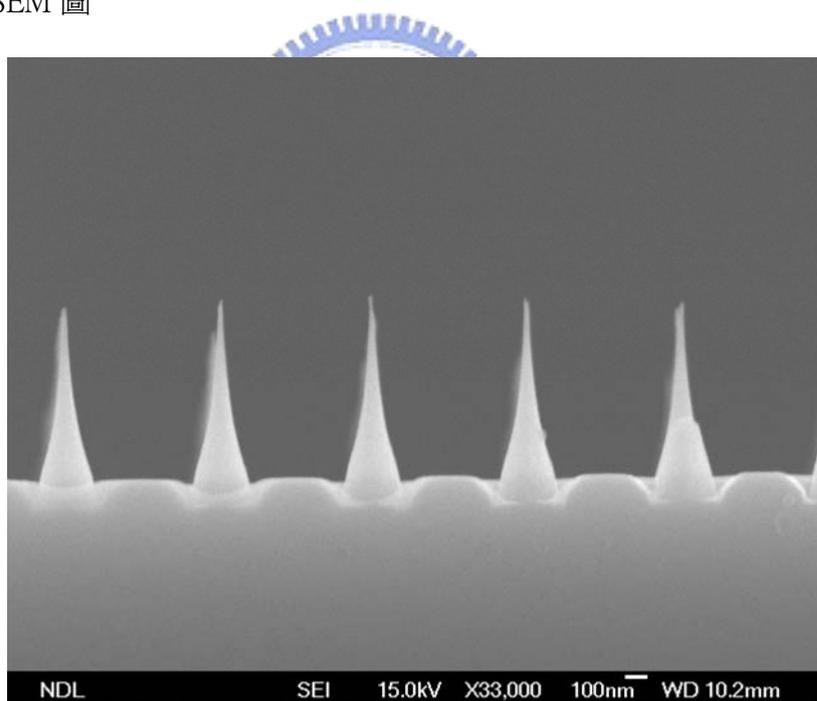


圖 4-1-1 field emission SEM 圖

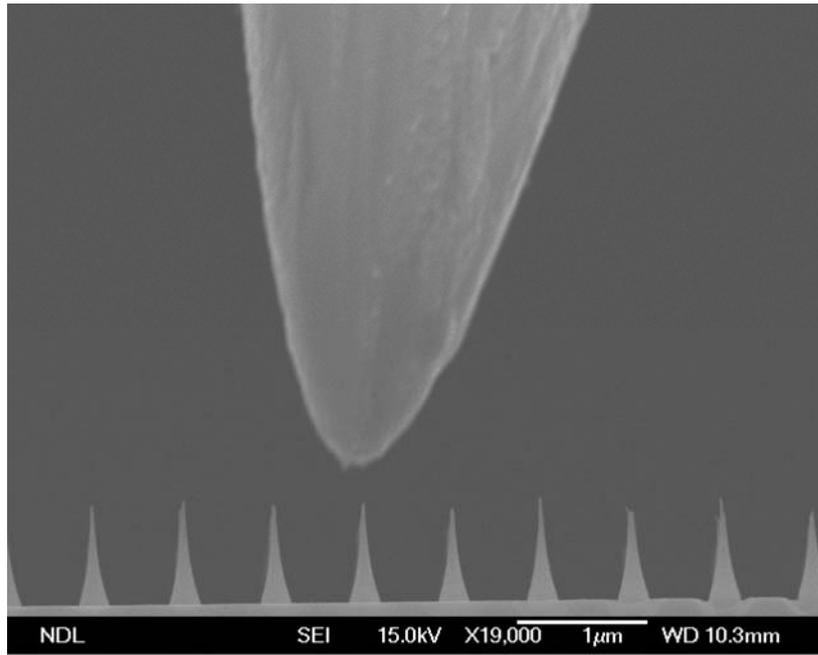


圖 4-1-2 field emission SEM 圖

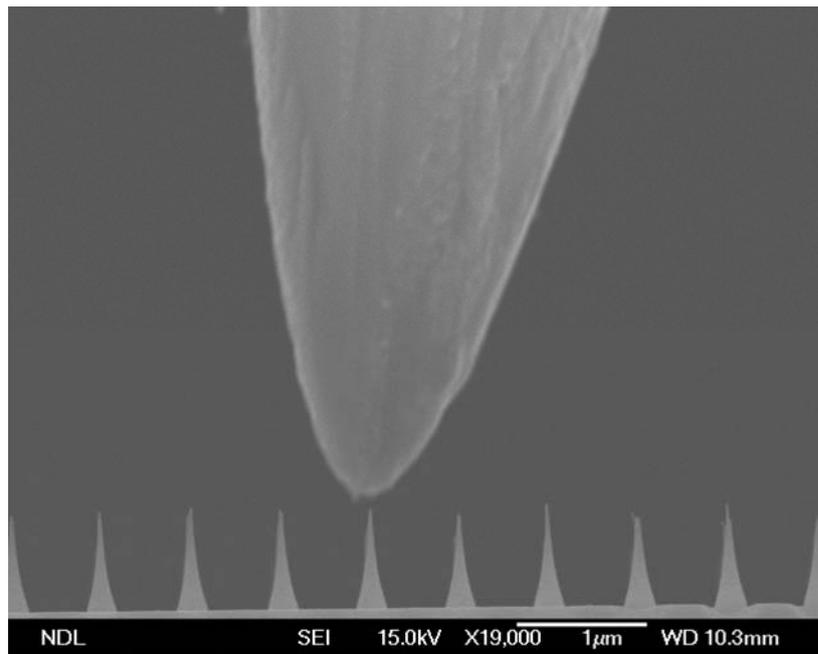


圖 4-1-3 field emission SEM 圖

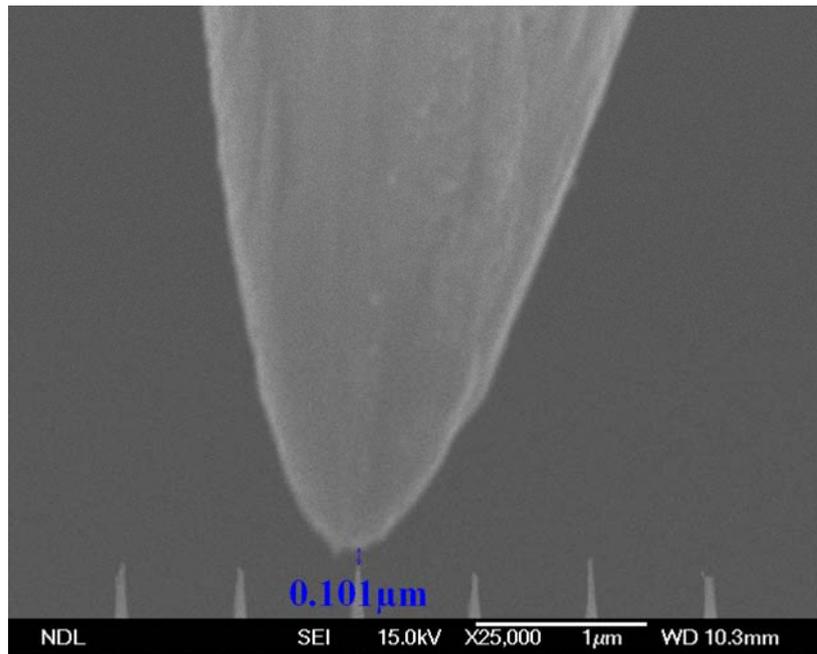


圖 4-1-4 field emission SEM 圖，距離 0.101 μ m

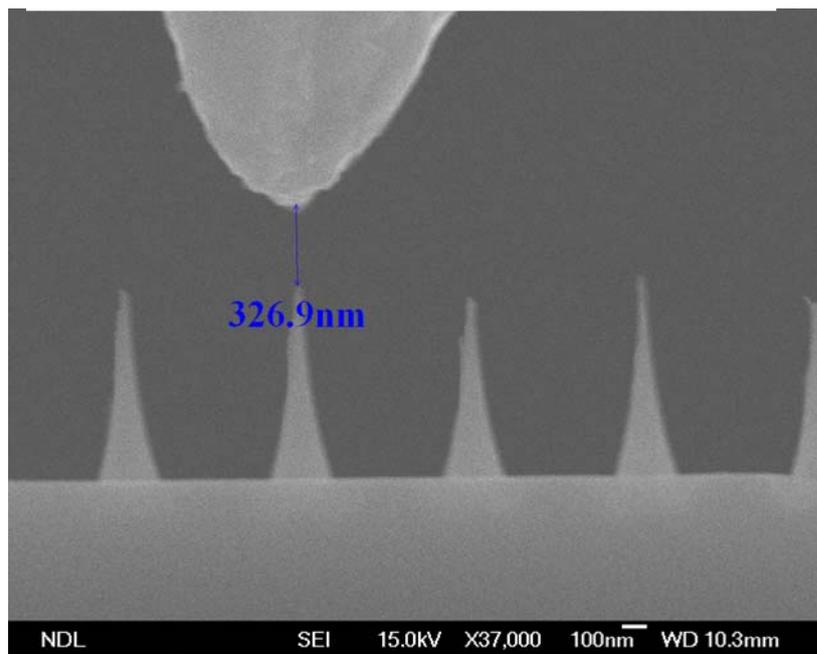


圖 4-1-5 field emission SEM 圖，距離 326.9 nm

4.1.1 量測結果

如圖 4-1-1-1 所示，為 field emission 量測結果，其中 76nm、119nm、291nm、327nm、分別為場發射探針與我們所研製之奈米探針針尖距離，由圖可知不同的距離會有不同的結果。電流隨著距離改變。

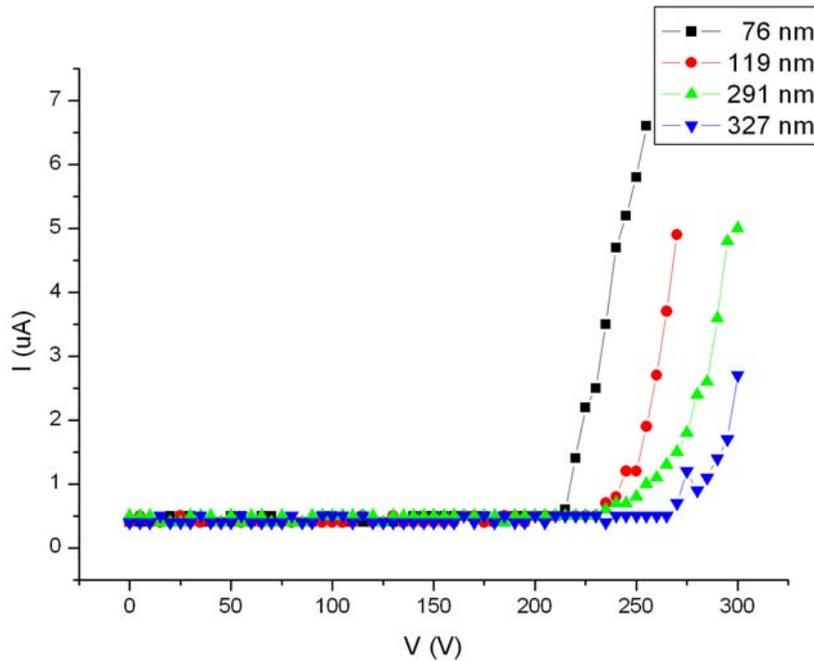


圖 4-1-1-1 field emission 量測結果圖

4.2 利用奈米探針結構自行對準成長奈米碳管

利用做出的探針結構，生長奈米碳管、奈米粒的結果。在成長奈米碳管方面，其結果如圖 4-2-1 探針針尖長 CNT 圖所示，從探針尖延伸長出去；如圖 4-2-2 探針針尖長 CNT 圖所示，勾勾狀；如圖 4-2-3 探針針尖長 CNT 圖所示，從探針尖延伸長出去；如圖 4-2-4 探針針尖長 CNT 圖所示，手勾狀；如圖 4-2-5 探針針尖長 CNT 圖所示，愛心狀；如圖 4-2-6 探針針尖長 CNT 圖所示，海龍狀；如圖 4-2-7 探針針尖長 CNT 圖所示，CNT 連接在各探針頂端；如圖 4-2-8 探針針尖長 CNT 圖所示，CNT 在探針頂端連成直線，並轉折好幾個彎；如圖 4-2-9 探針針尖長 CNT 圖所示，CNT 在探針頂端連成。

在本論文中可由 SEM 照片直接看出可用我們製作出的探針，成功的將奈米碳管成長於其上，並且圖形多樣有變化，包括愛心型、拐杖型、海龍狀等等，此外也發現奈米碳管在各探針針尖連結成直線狀。而其製作過程為首先經由本論文前述的製作流程，先將探針成功製作出來後，在其上鍍 Ni 金屬作為催化劑，然後成長奈米碳管，之後再利用 SEM 照出結果。

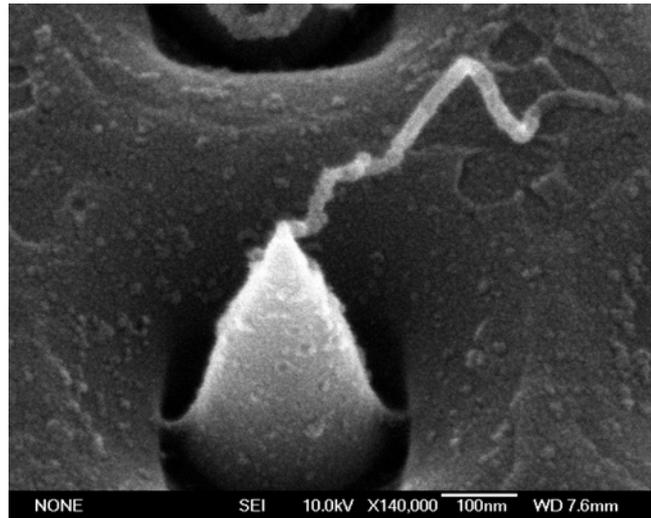


圖 4-2-1 探針針尖長 CNT 圖，從探針尖延伸長出去

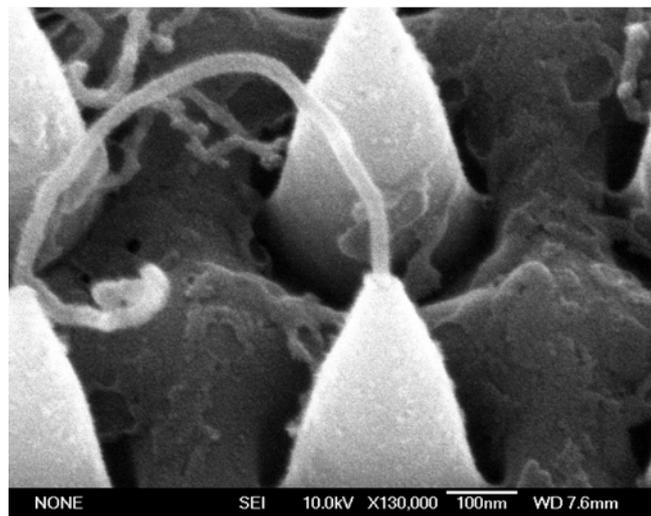


圖 4-2-2 探針針尖長 CNT 圖，勾勾狀

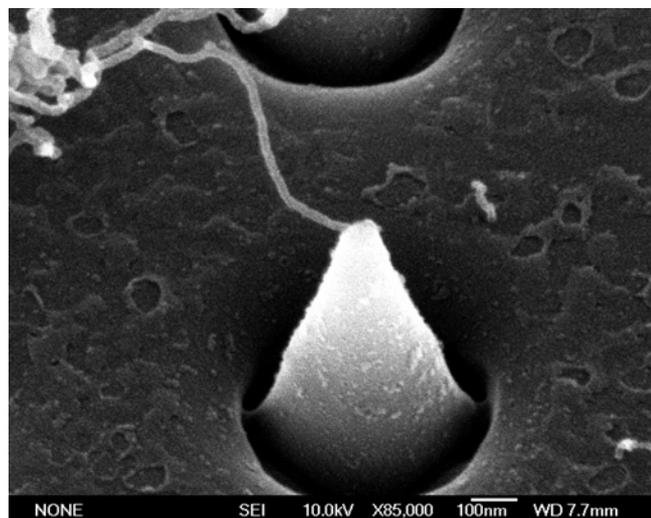


圖 4-2-3 探針針尖長 CNT 圖，從探針尖延伸長出去

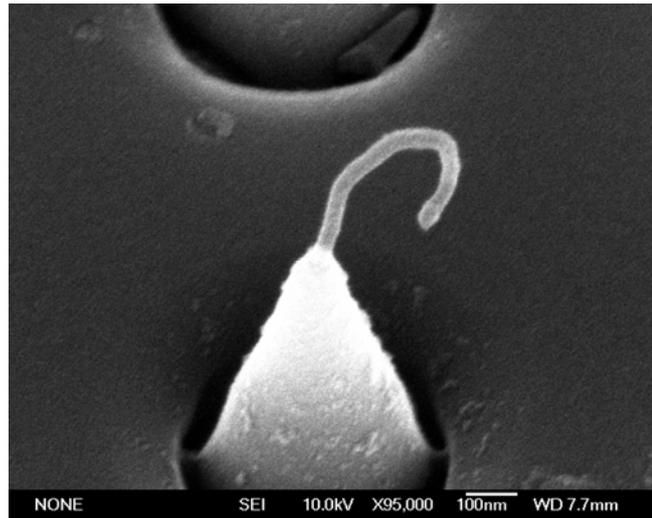


圖 4-2-4 探針針尖長 CNT 圖，手勾狀

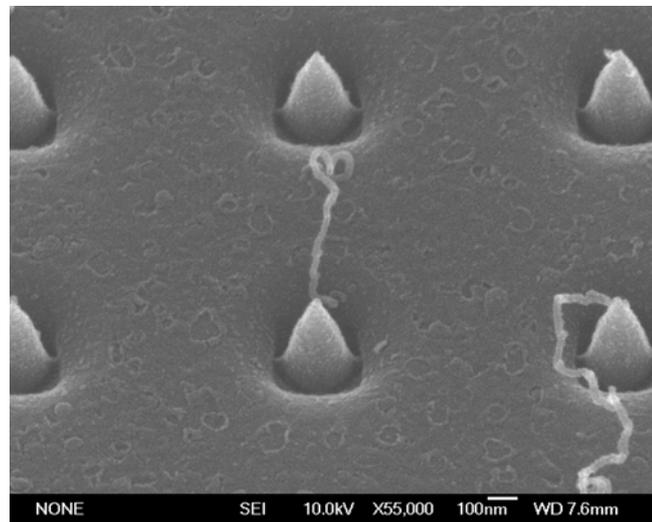


圖 4-2-5 探針針尖長 CNT 圖，愛心狀

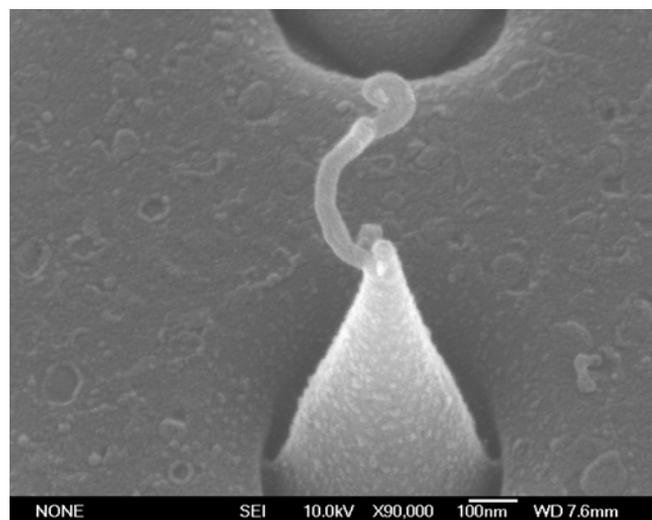


圖 4-2-6 探針針尖長 CNT 圖，海龍狀

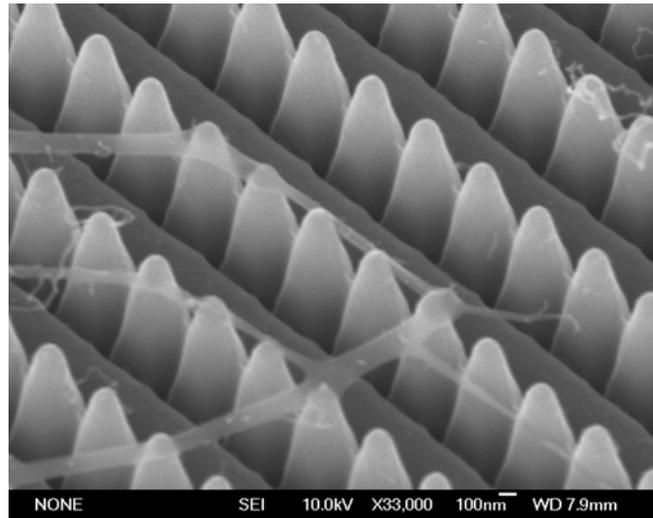


圖 4-2-7 探針針尖長 CNT 圖，CNT 連接在各探針頂端

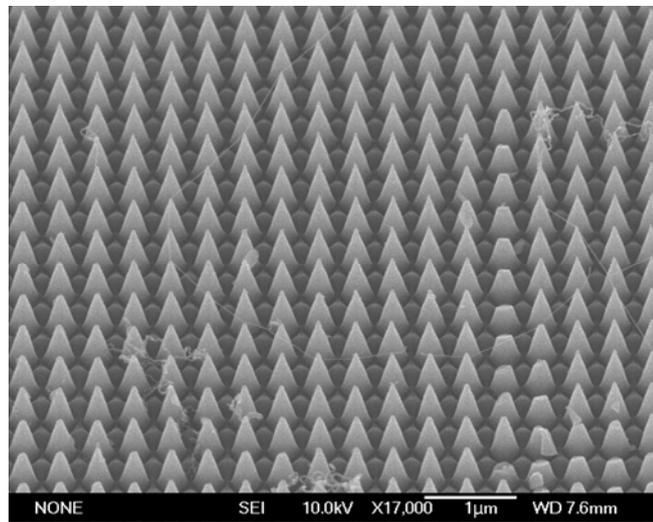


圖 4-2-8 探針針尖長 CNT 圖，CNT 在探針頂端連成直線，並轉折好幾個彎

第五章 結論與未來展望

5.1 結論

探針在整個 SPM 系統中扮演著非常重要的角色，根據所需的目標而設計各種探針，應用在系統中使量測更精密精確，在未來奈米科技結合生物技術的領域中，是非常重要的。本論文中我們成功的設計製作探針，它的內部為導電材料，本論文使用的是重摻雜的半導體，用來擷取生物細胞訊號。使用微影製程有效控制探針成長的位置。除了針尖(次微米等級)之外，為了將來運用到生化系統上，在刺穿細胞以及在讀取訊號同時，探針的尖端銳利，探針尖小於 30 度，奈米探針的外部用熱氧化法絕緣周遭環境，避免電雜訊干擾，降低誤差並提高操作的精確度。其優點為可以大量製作生產，簡便控制蝕刻條件並且藉此製作條件不同的探針，並分析探針形狀形成機構，此外我們和已發表的論文相比也簡化了實驗步驟（）等等優點。

5.2 未來展望

將製作成的外部絕緣的奈米探針應用到生化系統上，進行生物神經傳導研究，綜合上述可知，此一奈米探針，量測單一神經元細胞的奈伏至微伏訊號，預期將成爲一前瞻性研究生物細胞等級的工具，對往後生物醫學的研究與應用有突破性發展。

參考文獻

- (1) http://nanocenter.nchu.edu.tw/afm/afm_1.html
- (2) <http://www.phys.sinica.edu.tw/~nano/stm.htm>
- (3) <http://www.chemistry.adelaide.edu.au/external/soc-rel/content/nfom.htm>
- (4) http://en.wikipedia.org/wiki/Magnetic_force_microscope
- (5) C. H. Hsu, H. C. Lo, C. F. Chen, NANOLETTERS Vol. 4, No. 3, 471-475 (2004)
- (6) K. Seegera, R. E. Palmer, Appl. Phys. Lett. Vol. 74, No.11, 1627-1629 (1999)
- (7) H. Yoshida, T. Urushido, H. Miyake, K. Hiramatsu, J. Jpn., Appl. Phys. Vol. 40, 1301-1304 (2001)
- (8) P. A. Lewis, H. Ahmedb, T. J. Sato, Vac. Sci. Technol. B, Vol. 16, 2938-2941 (1998)
- (9) N. G. Shang, F. Y. Meng, F. C. K. Au, Q. Li, C. S. Lee, I. Bello, S. T. Lee, Adv. Mater,

- Vol. 14, 1308 -1311 (2002)
- (10) P. B. Fischer and S. Y. Chou, Appl. Phys. Lett. Vol. 62, 1414-1416 (1993)
- (11) E. Gogolides, S. Grigoropoulos, A. G. Nassiopoulos, Microelectron. Eng. Vol. 27, 449-452 (1995)
- (12) A. G. Nassiopoulos, S. Grigoropoulos, E. Gogolides, and D. Papadimitrou, Appl. Phys. Lett. Vol. 66, 1114-1116 (1995)
- (13) T. Tada, T. Kanayama, K. Koga, K. Seeger, S. J. Carroll, P. Weibel, R. E. Palmer, Microelectron. Eng. Vol. 41-42, 539-540 (1998)
- (14) T. Tada, T. Kanayama, K. Koga, P. Weibel, S. J. Carroll, K. Seeger, R. E. Palmer, J. Phys. D. Vol. 31, L21 (1998)
- (15) Inger Ekvall, Erik Wahlström, Dan Claesson, Håkan Olin , Eva Olsson. Meas. Sci. Technol. Printed in the UK ,Vol. 10, 11–18(1999)
- (16) A. K. Kar, S. Gangopadhyay , B. K. Mathur Meas. Sci. Technol. Printed in the UK ,Vol. 11, 1426–1431 (2000)
- (17) A.B. H. Tay, J. T. L. Thong. Appl. Phys. Lett. Vol. 84, No 25,5207-5209 (2004)
- (18) K. S. Yeong, C. B. Boothroyd , J. T. L Thong ,Nanotechnology ,Vol. 17, 3655–3661 (2006)
- (19) K. S. Yeong, C. B. Boothroyd , J. T. L Thong, Solid State Communications ,Vol. 125 ,185–188 (2003)
- (20) Q. M. Hudspeth, K. P. Nagle, Y. P. Zhao, T. Karabacak, C. V. Nguyen, M. Meyyappan, G. C. Wang, T.M. Lu, Surf. Sci. Vol. 515, 453-461 (2002)
- (21) J. T. L. Thong, C. H. Oon, M. Yeadon, W. D. Zhang. Appl. Phys. Lett. Vol. 81, 4823-4825,(2002).
- (22) C. H. Oon, J. T. L. Thong, Y. Lei, and W. K. Chim. Appl. Phys. Lett. Vol. 81, 3037-3039 (2002).
- (23) M. Bale, A. J. Turner , R. E. Palmer, J. Phys. D. Appl. Phys. Vol. 35, No 5, L11-L14 (2002)
- (24) K. Unno, Y. Kitamoto, T. Shibata , E. Makino. Smart Mater. Struct. Vol. 10 , 730–735 (2001)
- (25) C. L. Cheung, J. H. Hafner, T. W. Odom, K. Kim, C. M. Lieber, Appl. Phys. Lett. Vol.76, 3136-3138 (2000).
- (26) J. H. Hafner, C. L. Cheung, and C. M. Lieber, Nature (London). Vol. 398, 761-762 (1999).

- (27) N. W. Thibault, Am. Mineral. Vol. 29, 249 (1944)
- (28) R. F. Adamsky, K. M. Merz, Kristallog., Vol. 111, 350 (1959)
- (29) W. H. Lee, J. C. Lin, C. Lee, H. C. Cheng, T. R. Yew, Diamond Relat. Mater Vol. 10, 2075-2083 (2001)
- (30) S. E. Huq, G. H. Grayer, S. W. Moon, P. D. Prewett, Mater. Sci. Eng., B Vol. 51, 150-153 (1998)
- (31) H. S. Uh, S. J. Kwon, J. D. Lee, J. Vac. Sci. Technol. B Vol. 15, 472-476 (1997)
- (32) J. H. Je, T. S. Kang, and D. Y. Noh, J. Appl. Phys. Vol. 10, 6716-6722 (1997)
- (33) K. Tsujimoto, S. Okudaira, S. Tachachi, Jpn. J. Appl. Phys., Part 1 Vol. 30, 3319-3326 (1991)
- (34) S. Grigoropoulos, E. Gogolides, A. D. Tserepi, and A. G. Nassiopoulos, J. Vac. Sci. Technol. Vol. 15, 640-645 (1997)
- (35) J.P. Ibe, P.P. Bey, S. L. Brandow, R. A. B rizzolara, N.A. Burnham, D. P. Dilella, K.P Lee., C.R.K. Marrian , R.J. Colton , On the electrochemical etching of tips for scanning tunneling microscopy J. Vac. Sci. Technol. Vol. A 8, 3570-3575 (1990)
- (36) O. Albrektsen, H. W. M. Salemink, K. A. Morch, A. R. Tholen ,Reliable tip preparation for high resolution scanning tunneling microscopy J. Vac. Sci. Technol. Vol. B12, 3187-3190 (1994)
- (37) D. K. Biegelsen, S. M. Koch, F. A. Ponce , J. Tramontana .Clon milled tips for scanning tunneling microscopy, Appl. Phys. Lett. Vol. 50, 696-698 (1987)
- (38) M. Fotino, Tip sharpening by normal and reverse electrochemical etching Rev. Sci. Instrum .Vol. 64 ,159-167 (1993)
- (39) L. A. Hockett , S. E. Creager , A convenient method for removing surface oxides from tungsten STM tips Rev. Sci. Instrum., Vol. 64 ,263-264 (1993)
- (40) J. A. Meyer, S. J. Stranick, J.B. Wang, P.S. Weiss, Field-emission current voltage curves as a diagnostic for scanning tunneling microscope tips ultramicroscopy, Vol. 42, 1538-1541 (1992)
- (41) A. H. Sørensen, U. Hvid, M. W. Mortensen , K. Mørch , A Preparation of platinum/iridium scanning probe microscopy tips Rev. Sci. Instrum .Vol. 70 ,3059–3067 (1999)
- (42) A. I. Oliva, G. A. Romero, J. L. Peña, E. Anguiano, M. Aguilar, Electrochemical preparation of tungsten tips for a scanning tunneling microscope Rev. Sci. Instrum .Vol.

67 ,1917–1921 (1996)

- (43) L. Libioulle, Y. Houbion , J-M. Gilles. Very sharp probes for scanning tunneling microscopy *Physicalia Mag*, Vol. 16, 215–225 (1994)
- (44) J. T. L. Thong, C. H. Oon, M. Yeadon, W. D. Zhang, *Appl. Phys. Lett.* Vol. 81, 4823-4825 (2002)
- (45) C. H. Oon, J. T. L. Thong, Y. Lei, W. K. Chim, *Appl. Phys. Lett.* Vol. 81, 3037 -3039 (2002).
- (46) J.T.L Thong, C.H. Oon, M. Yeadon, W.D. Zhang, *Appl. Phys. Lett*, Vol. 81, 4823-4825 (2002)
- (47) C. H. Oon, S. H. Khong, C.B. Boothroyd, J.T.L Thong , *J. Appl. Phys.* Vol. 99,064309 (2006)
- (48) X. D. Bai, J. D. Guo, J. Yu, E.G. Wang, J. Yuan, W. Zhou, *Appl. Phys. Lett.* Vol. 76,2624-2626 (2000)
- (49) Y. Chen, L. P. Guo, E. G. Wang, *Philos. Mag. Lett.* Vol. 75 , 155-162 (1997)
- (50) Y. Chen, L. Guo, D.T. Shaw, *J. Cryst. Growth* , Vol. 210, 527-531 (2000)
- (51) K. Seeger , R. E. Palmer. *Appl. Phys. Lett.* Vol. 74 ,1627-1629 (1999)
- (52) J. C. Hulteen, D. A. Treichel, M. T. Smith, M. L. Duval, T. R. Jensen, R. P. J .van Duyne, *Phys. Chem. Vol. B* 103, 3854-3863 (1999)
- (53) H. W. Deckman, J .H. Dunsmuir, *Appl. Phys. Lett.* Vol. 41, 377-379 (1982)
- (54) K. Seeger, R. E. Palmer. *D. J. Phys, Appl. Phys.* Vol. 32, L129-L132 (1999)
- (55) A. Wellner, P. R. Preece, J. C. Fowler, R .E. Palmer, *Microelectron. Engng.* Vol. 57, 8919 (2001)
- (56) P .A. Lewis, H. Ahmed, T. Sato. *J. Vac. Sci. Technol.* Vol. B16, 2938-2941 (1998)
- (57) H. W. Deckman, J. H. Dunsmuir, S. Goroff, J. A. McHenry , D.G. Peiffer *J. Vac. Sci. Technol.* Vol. 6,333-336 (1988)
- (58) F. Burmeister, C. Schafle, B. Keilhofer, C. Bechinger, J. Boneberg , P. Leiderer. *Adv. Mat.* Vol.10, 495-497 (1998)
- (59) M. A. R. Alves, D. F. Takeuti, E. S. Braga, *Microelec. J.* Vol. 36, 51-54. (2005)
- (60) R. B. Marcus, T. S. Ravi, T. Gmitter, K. Chin, D. Liu, W. J. Orvis, D. R. Ciarlo, C. E. Hunt, J. Trujillo, *Appl. Phys. Lett.* Vol. 56 ,236–238 (1990)
- (61) D. Temple, *Mat. Sci. Eng. R* , Vol. 24 ,185–239 (1999)
- (62) J. B. Price, *Semiconductor silicon*, in H.R. Huff, R.R. Burgess (Eds.), *The*

- Electrochemical Society, Soft Bound Proceedings Series, Princeton, NJ, 339 (1973)
- (63) K. E. Bean, IEEE Trans. Electron Devices, ED-25, 1185–1193 (1978)
- (64) N. Cade, R.A. Lee, C. Patel, IEEE Trans. Electron Devices. Vol. 36,2709–2714(1989)
- (65) <http://nano.nchc.org.tw/dictionary/eb1.html>
- (66) <http://www.ee.udel.edu/~dprather/research/fabrication/>
- (67) <http://dot.che.gatech.edu/henderson/index.htm>
- (68) <http://marcuslab.harvard.edu/res.php>
- (69) http://www.ndl.org.tw/ndlcomm/P5_4/28.htm
- (70) http://www.ndl.org.tw/ndlcomm/P7_2/36.htm
- (71) http://elearning.stut.edu.tw/m_facture/ch9.htm
- (72) 龍伯華,何孝恆. 乾蝕刻製程暨機台原理簡介,光連雙月刊, 9 ,53期 (2004)
- (73) 黃俊凱,楊忠諺,奈米通訊第九卷第三期,33-37 (2002)
- (74) T. Debski, B. Volland, W. Barth, F. Shi, P. Hudeh, I. W. Nangelau, Field emission arrays by silicon micromachining, J. Vac. Sci. Technol., Vol. B 18 (2) ,896–899 (2000)
- (75) O. Wolter, Th. Bayer, J. Creschner, Micromachined silicon sensors for scanning force microscopy, J. Vac. Sci. Technol., Vol. B 9 (2) 1353–1357. (1991)
- (76) <http://cbme.mc.ntu.edu.tw/MMS/Docs/BioMEMS/bulk/wetetch.htm>
- (77) http://elearning.stut.edu.tw/m_facture/Nanotech/Web/ch4.htm
- (78) http://en.wikipedia.org/wiki/Scanning_electron_microscope
- (79) http://www.ndl.org.tw/ndl2006/department/cfteam/device_02.html
- (80) http://www.ndl.org.tw/ndl2006/department/cfteam/device_01.html
- (81) http://www.ndl.org.tw/ndl2006/department/cfteam/device_06.html
- (82) http://www.ndl.org.tw/ndl2006/department/cfteam/device_03.html
- (83) http://www.ndl.org.tw/ndl2006/department/cfteam/device_04.html

自傳

我目前就讀於國立交通大學奈米科技研究所，碩士論文的題目為“前瞻性奈米探針陣列之製作與應用”。在這篇論文中，我們試著製作出想要的探針，並且將其應用在各方面。此研究的困難之處在於如何只對探針尖端之外的地方作隔離，並且針尖的角度需改進到小於 30 度。因此，在研究的過程中，不僅搜集和閱讀獻的能力增加了，找出問題、簡化問題和解決問題的能力也都有所成長。

我大學期間籌辦多屆「全國法輪大法營」，多次參與社團成果展籌劃、演出。隨著不同的活動職務，我必須扮演不同的角色，但這些活動同樣都是需要藉由和其他工作人員的合作來完成。社團活動的經歷讓我結交到志同道合的朋友，也令我深刻體會到團體合作及人際關係的重要性，這使我在待人處世方面皆有成長。

大學時唸交大材料，在大學四年的時間裡，材料系的課程教導我許多材料基礎知識和原理。就讀交大奈米所期間，在柯富祥副教授的指導下，進入了探針製作的領域。碩士期間主要是研究探針製作，並且學習了各項儀器。研究所的經驗讓我對整合的概念有很大的幫助，學習如何針對題目，如何收集資料，設定目標並一一達成，在過程中遇到的困難如何解決。

從國中時接觸了法輪功。法輪大法的真、善、忍法理開啟了我的新的生命。透過學習法輪大法，我能夠事事都對照真、善、忍，心理及身體都產生相當大的改變，身心都越來越健康愉快。不會和別人爭吵，凡是都能夠用正確的想法去對待。法輪大法教導我們，不僅要成為好人，還要成為更好的人。因為自己親身體驗到法輪大法的好，所以也希望大家都能來了解法輪功，體會到法輪大法的美好，擁有更健康的身心。