

中華大學
碩士論文

微型掃描式電子顯微鏡的光學性質：理論與實驗
The Theory and Experiment of Optical Properties
of Miniature Scanning Electron Microscope



系所別：機械工程學系碩士班
學號姓名：M10108009 方建閔
指導教授：林育立 博士
共同指導教授：陳福榮 博士 (清華大學)

中華民國 103 年 08 月

摘要

在不久的將來，微型化已經是掃描式電子顯微鏡的發展趨勢，本研究是基於一個微型掃描式電子顯微鏡的基本架構，此微型掃描式電子顯微鏡系統中，將設計一個電子源、一個靜電透鏡與一個靜電偏轉器。在這樣的設計下，電子光學系統將不再需要更多的電磁透鏡去聚焦電子束，使系統能節省大量的空間，以至減小整個儀器的體積，將使掃描式電子顯微鏡變得更加輕便，更加實用。更進一步，將此微型掃描式電子顯微鏡結合陣列式微型場發射電子槍，形成一多電子束掃描式電子顯微鏡，可使用軟體將影像拼接，大幅度減少掃描時間。若再整合刀具切割樣品，將可建構樣品之三次元立體架構，對各領域的研究將具有更多的應用，例：生物學、神經科學。

微型掃描式電子顯微鏡的微米尺度電子槍、微米尺度靜電透鏡與微米尺度靜電偏轉器，將透過微機電系統中的面型與體型微加工技術完成，靠著目前半導體製程的精度，每一個元件與微型掃描式電子顯微鏡可以有很好的對準機制，電子光源與淬取電極的距離也將更近，使淬取電壓可以降低。在現階段的模擬階段下，淬取電壓可以降至 50V 以下，並設計聚焦電極調控微米尺度電子槍的特性。微米尺度靜電透鏡在機械結構的參數調整下，達到安全的壓差比(100 V/ μm)並具有足夠的聚焦能力。微米尺度靜電偏轉器在調整偏轉電極的內徑與長度等幾何參數後，達到足夠的偏轉量。

本研究以電子光學模擬為主，並以微機電製程可行的參數做調整，製程也在模擬完成後開始製作，未來研究方向將專注於驗證模擬與實驗的契合度。

關鍵字：電子顯微鏡、掃描式電子顯微鏡、電子光學、微機電系統。

ABSTRACT

It is a modern trend towards small sizes in the scanning electron microscope (SEM) development in near future. In this research, we propose and design a miniature SEM system composed of an electron gun and an electrostatic lens in micro-scale. In this design, we can focus the electron beam without magnetic lens to reduce the volume of the instrument. In this way, we can make the SEM more portable and been widely used. Future more, we will turn this micro-scale SEM to a multi-beam SEM by integrating with the microarray field-emission sources. By stitching the parallel-captured images to one whole-field image we can reduce the scanning time effectively, especially in a large-sample examination. If we install an automated diamond knife to slice samples in the multi-beam SEM, we can construct the three-dimensional structures of huge specimens. It will be powerful in many application fields, for example, the research in biology and neuroscience.

The micro-scale electron gun, the micro-scale electrostatic lens and the micro-scale electrostatic deflector of a miniature SEM will be achieved by the surface machining and bulk machining in Micro Electron Mechanical Systems (MEMS) technology. Because of the precision alignment in the semiconductor fabrication process, the assembly errors between every component can be well controlled in the miniature SEM. The distance between electron source and extraction electrode can be minimized to decrease the required extractor voltage. The extractor voltage can be lower than 50V in our preliminary simulation works. And the designed properties of focal extractor will be used to optimum the performance of the micro-scale electron gun. The micro-scale electrostatic lens will have proper focusing capability and enough dielectric strength ($100 \text{ V}/\mu\text{m}$) by adjusting the structure parameters. The micro-scale electrostatic deflector will induce enough electron deflection amounts by tuning the geometrical parameters, including the inside diameter and the length of deflection electrodes.

This research is achieved by the electron optics simulation, and the fabrication parameters in MEMS process. The MEMS fabrication experiments will be processed as the simulation completion. The topics of future research will be focused on the cross-verification between experiments and computational approaches.

Keywords: Electron Microscope (EM), Scanning Electron Microscope (SEM), Electron Optics, Microelectromechanical Systems (MEMS).

序言

碩士論文的完成，承蒙清華大學恩師 陳福榮教授與中華大學 林育立教授在建
閔感到能力不足時，適時的給予鼓勵、方向及協助，指導論文寫作方向與方法，終能
突破層層瓶頸，最後順利完成。此外，也感謝中華大學馬廣仁副教授，在百忙之中撥
冗參加碩士論文審查，豐富的學術經驗分享，使建閔的碩士論文能夠臻於完備。

不忘感謝的還有家人的支持，使我能專致於學業與工作的研究，還有台灣電鏡儀
器股份有限公司的各位成員，黃祖緯博士的論文寫作指導、涂清鎮博士的微機電製程
經驗、陳志瑋博士的軟體撰寫指導、曾英碩的機台組裝實務、黃鈺珊的繪圖軟體協助、
楊麗巧的電子電路支援與維修、顏存濱的電路指導與操作流程指導、林信余的操作經
驗分享、徐金良的韌體協助等人所提供的電子顯微鏡資源與實驗過程中的諸多協助，
使模擬參數與實驗分析可以得到驗證，以及清華大學博士班學生張維祐在電子光學領
域以及模擬軟體上的研討與砥礪。

還有國家同步輻射研究中心的殷廣鈐博士所給予的電子顯微鏡相關理論與實驗
指導，Robert 所提供的整體電路設計與觀念傳授，以及給予各種實驗幫助的清華大學
大學部及碩博班的教職員與學生們、提供各種空間資源與各專業領域協助的工研院同
仁，請容我在最後一併感謝之，謝謝您們！

建閔

2014 年 08 月 01 日

目 錄

摘 要	i
ABSTRACT	ii
序 言	iii
目 錄	iv
表 格 目 錄	vi
圖 目 錄	vii
第一章 緒論	1
1.1. 電子顯微鏡簡介	1
1.1.1. 解析度(resolution).....	1
1.1.2. 電子波長(electron wave)	2
1.1.3. 電子顯微鏡的發展與種類	3
1.1.4. 電子顯微鏡原理	4
1.2. 微米尺度陣列型光源掃描式電子顯微鏡之應用與重要性	5
1.2.1. 掃描式電子顯微鏡在腦神經科學的應用	5
1.2.2. 陣列型掃描式電子顯微鏡之應用	6
1.3. 微米尺度電子顯微鏡的基本結構設計	8
1.3.1. 微米尺度電子槍	9
1.3.2. 微米尺度電子透鏡	12
1.3.3. 微米尺度電子偏轉器	13
1.4. 研究流程	14
第二章 電子光學基本理論	16
2.1. 電子光學(electron optics)	16
2.2. 電子槍(electron gun).....	16
2.2.1. 參數介紹	16
2.2.2. 微米尺度電子槍(micro-scale electron source).....	18
2.3. 電子透鏡(electron lens)	20
2.3.1. 靜電透鏡理論[16].....	20
2.4. 電子偏轉器(electron deflector)	24

2.4.1. 電磁偏轉器(electromagnetic deflector).....	24
2.4.2. 靜電偏轉器(electrostatic deflector).....	25
第三章 電子光學模擬	26
3.1. 模擬軟體	26
3.2. 電子槍(electron gun).....	26
3.2.1. 微米尺度電子槍模擬	26
3.2.2. 微米尺度電子槍優化設計	29
3.3. 電子透鏡(electron lens)	32
3.3.1. 靜電透鏡模擬	32
3.4. 電子偏轉器(electron deflector)	36
3.4.1. 靜電偏轉器模擬	36
第四章 電子光學模擬結果討論	39
4.1. 電子槍	39
4.1.1. 微米尺度電子槍	39
4.2. 電子透鏡	40
4.2.1. 微米尺度電子透鏡	40
4.3. 電子偏轉器	41
4.3.1. 微米尺度電子偏轉器	41
第五章 結論	43
5.1. 研究結論	43
5.2. 未來研究方向	43
參考文獻	45
附錄	47

表格目錄

表格 1-1. 電子能量與波長對照表[1]	3
表格 2-1. 電子顯微鏡特性比較表[4]	18
表格 3-1. 微米尺度場發射電子槍輝度比較表	29
表格 3-2. 微米尺度場發射電子槍虛光源大小比較表	29
表格 3-3. 輝度比較表	31
表格 3-4. 虛光源大小比較表	32
表格 3-5. 孔徑大小與電極間壓差比關係表	34
表格 3-6. 絕緣層厚度與電極間壓差比關係表	35
表格 3-7. 透鏡位置與電極間壓差比關係表	35
表格 3-8. 不同偏轉器長度與偏轉器內徑之偏轉量	38



圖目錄

圖 1-1. 埃式光環(Airy disk)[2]	2
圖 1-2. 高速運動的電子與物質作用所產生之各種訊號[5]	4
圖 1-3. 樣品切割示意圖。[6]	6
圖 1-4. Zeiss 陣列型多電子束顯微鏡原型，及影像拼接示意圖。[7]	7
圖 1-5. Zeiss 陣列型多電子束顯微鏡樣品台理想設計示意圖。[7]	7
圖 1-6. 掃描式電子顯微鏡示意圖	8
圖 1-7. 微型掃描式電子顯微鏡架構示意圖	9
圖 1-8. 場發射電子槍基本架構示意圖	10
圖 1-9. 微米尺度場發射電子槍結構示意圖	11
圖 1-10. 微米尺度場發射電子槍 SEM 圖[11]	11
圖 1-11. 微米尺度場發射電子槍聚焦電極設計圖[12]	12
圖 1-12. 靜電透鏡電極示意圖	12
圖 1-13. 兩極靜電透鏡示意圖	13
圖 1-14. 三極靜電透鏡示意圖(Eizel lens)	13
圖 1-15. 陰極射線管基本結構示意圖	14
圖 1-16. 研究流程圖	15
圖 2-1. 輝度定義示意圖[14]	17
圖 2-2. 輝度計算示意圖	17
圖 2-3. 透鏡成像示意圖	18
圖 2-4. 福勒-諾德漢(Fowler-Nordheim)穿隧效應線性關係圖(理論)	19
圖 2-5. 電場與電子束軌跡作用示意圖[16]	22
圖 2-6. 近軸電子束軌跡示意圖[16]	23
圖 2-7. 電磁偏轉器示意圖	24
圖 2-8. 靜電偏轉器示意圖	25
圖 3-1. 微米尺度場發射電子槍模擬檔案建構圖	27
圖 3-2. 微米尺度場發射電子槍電位設定	28
圖 3-3. 淬取電壓與場發射電流關係圖	28
圖 3-4. 微機電系統場發射電子槍結構圖	30

圖 3-5. 微機電系統場發射電子槍模擬架構圖	31
圖 3-6. 靜電透鏡結構示意圖	33
圖 3-7. 單透鏡(einzel lens)電位分布示意圖	34
圖 3-8. 靜電偏轉器示意圖[17]	37
圖 3-9. 靜電偏轉器位置示意圖	37
圖 4-1. 福勒-諾德漢(Fowler-Nordheim)穿隧效應線性關係圖(模擬)	40
圖 4-2. 不同長度下，偏轉器內徑對偏轉量的影響	42
圖 4-3. 不同內徑下，偏轉器長度對偏轉量的影響	42
圖 5-1. TEMIC(台灣)- 桌上型電子顯微鏡 EM-100	44



第一章 緒論

1.1. 電子顯微鏡簡介

1.1.1. 解析度(resolution)

光學顯微鏡的最高解析度之所以只有 0.2 μm ，與光的特性有關。光是一種波動(wave motion)，當兩個光波相遇時會有干涉(interference)的現象產生，換句話說，光波的波峰(crest)與波谷(trough)相遇時的位置會造成累加的或相互抵消的狀況。另外，當光波與到障礙物時，尤其是在穿過小孔洞的時候，會有繞射的現象發生。由於干涉與繞射(diffraction)的作用，使得光線在經過一小孔徑(aperture)而成像時，我們所見到的不是一個光點，而是一個個同心的圓環，稱之為埃式光環(Airy disk)，埃式光環之大小與孔徑大小、波長長短均有關聯，此即影響解析度之主要原因。理論上，根據數學公式的推算，光學顯微鏡的解析度只能達到所使用的光線波長的一半。[1]

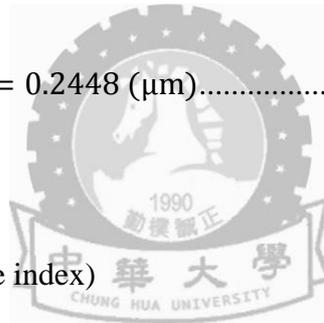
$$R = \frac{0.612\lambda}{n \sin \alpha} = \frac{0.612 \times 0.4}{1} = 0.2448 (\mu\text{m}) \dots \dots \dots (1-1)$$

R：解析度(resolution)

λ ：波長(wavelength)

n：介質折射率(refractive index)

α ：透鏡之半角(angular aperture)



顯見解析度正比於光源的波長，而可見光之波長由紅至紫約為 0.4 μm 至 0.7 μm ，因此，光學顯微鏡的最高解析度僅為 0.2 μm 。而利用較短波長之光源來作為顯微鏡之照明技術，成為提升解析度最有效的途徑，本研就所使用的電子光源，即是因為其波長可隨電子能量提升而降低，可降至奈米等級甚至更低。[1]

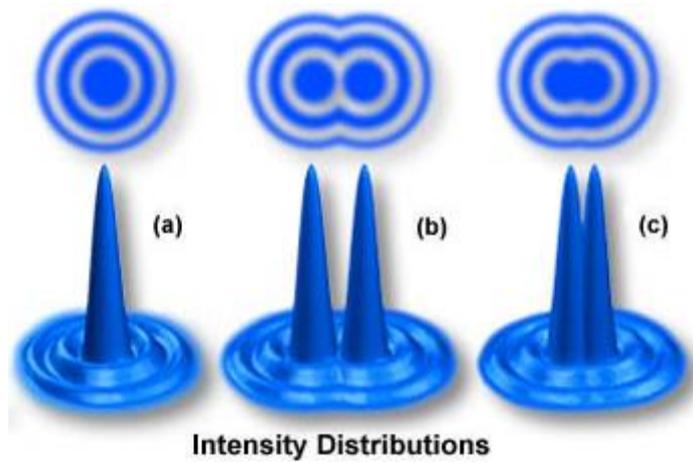


圖 1-1. 埃式光環(Airy disk)[2]

1.1.2. 電子波長(electron wave)

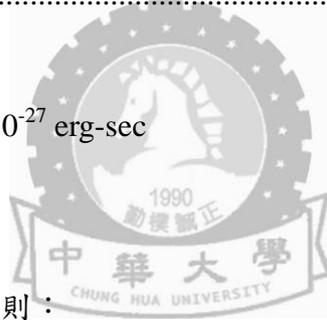
電子具備粒子與波的雙重特性，由 de Broglie 波長與動量的關係：

$$\lambda = \frac{h}{p} \dots\dots\dots (1-2)$$

λ ：電子波長

h ：plank 常數 = 6.625×10^{-27} erg-sec

p ：電子動量



在不考慮相對論的效應，則：

$$\frac{1}{2}mv^2 = eE \dots\dots\dots (1-3)$$

$$\lambda_0 = \frac{h}{p} = \frac{h}{\sqrt{2meE}} \dots\dots\dots (1-4)$$

以一般電子顯微鏡之 E 為 100kV，則 $\lambda_0 = 0.039 \text{ \AA}$ 。

若考慮相對論的效應，則

$$mc^2 = m_0c^2 + eE \dots\dots\dots (1-5)$$

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}} \dots\dots\dots (1-6)$$

$$m^2c^2 = p^2 + m_0c^2 \quad (p = mv) \dots\dots\dots (1-7)$$

$$p^2 = 2m_0eE + \frac{e^2E^2}{c^2} \dots\dots\dots (1-8)$$

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{\sqrt{2m_0eE + \frac{e^2E^2}{c^2}}} = \frac{h}{\sqrt{2m_0eE} \sqrt{1 + \frac{eE}{2m_0c^2}}} = \frac{\lambda_0}{\sqrt{1 + \frac{eE}{2m_0c^2}}} \dots\dots\dots (1-9)$$

此處 λ_0 表不考慮相對論之電子波長， $m_0c^2 = 0.511 \times 10^6$ 電子伏特。

如電子 $E = 10^5$ V 代入上式，則考慮相對論效應之電子波長

$$\lambda \sim \frac{\lambda_0}{\sqrt{1+\frac{1}{10}}} \sim \frac{\lambda_0}{1.05} \dots\dots\dots (1-10)$$

所以不考慮相對論之電子波長須作 5% 的修正。

若 $E = 10^6$ V，則

$$\lambda \sim \frac{\lambda_0}{\sqrt{1+1}} \sim \frac{\lambda_0}{1.4} \dots\dots\dots (1-11)$$

從分母項數值可得知，電子波長須作 40% 的修正。藉此由可以推導出不同電子能量所產生的波長，如表格 1-1 所示。[1]

表格 1-1. 電子能量與波長對照表[1]

能量 (電子伏特)	波長 (Å)	能量 (電子伏特)	波長 (Å)
1	12.26	2×10^4	0.0859
10	3.878	4×10^4	0.0602
100	1.226	1×10^5	0.0370
500	0.5483	4×10^5	0.0164
1,000	0.3876	1×10^6	0.0087
5,000	0.1730	4×10^6	0.0028
10,000	0.1220	1×10^7	0.0012

1.1.3. 電子顯微鏡的發展與種類

光學顯微鏡技術從十六世紀開始，經過數百年來不斷的革新與改進，到了十九世紀時已達到其解析度的極限，要突破此一限制，必須選用波長更短的光線作為照明光源，因而紫外光顯微鏡、X 光顯微鏡相繼產生，但由於彼等所提升的效率有限，並無重大成。好在當時物理學家發現，一個高速運動的微小粒子可產生波的型式，此即所謂物質波(matter wave)。當電子被強大的電場加速時，其電子波(electron wave)之波長可短至 Å (埃)以下，而且在磁場的作用下，電子會因受力而偏折，利用纏繞的線圈通入電流所產生的強力磁場可使穿過其中的電子產生偏轉，與光經過玻璃透鏡時被偏折

的情形相似，因此立用電子作為照明光源，便可突破光學顯微鏡解析度的極限。[3]

第一台真正的電子顯微鏡(electron microscope, EM)是在 1933 年由 Ruska 所發明的，當時雖然只能達到 400\AA 的解析度(比光學顯微鏡提高 5 倍)，卻是一項重大的突破，不但使科學研究的領域提升至超顯微的世界，也使他終於在 1986 年得到諾貝爾物理獎。[1]

1.1.4. 電子顯微鏡原理

電子顯微鏡的原理主要為利用電磁場去偏折、聚焦電子及電子與物質作用所產生的散射來研究樣品構造及細微結構的精密度測儀器。近年來，由於電子光學的理論及應用發展迅速，故重新定義電子顯微鏡為一項藉由電子與物質交互作用後所產生之訊號來鑑定微區域晶體結構、微細組織、化學成份、化學鍵結和電子分佈情況的電子光學裝置。綜合以上所述，電子顯微鏡的技術進展將是未來奈米科技向上突破的重要關鍵之一。[4]

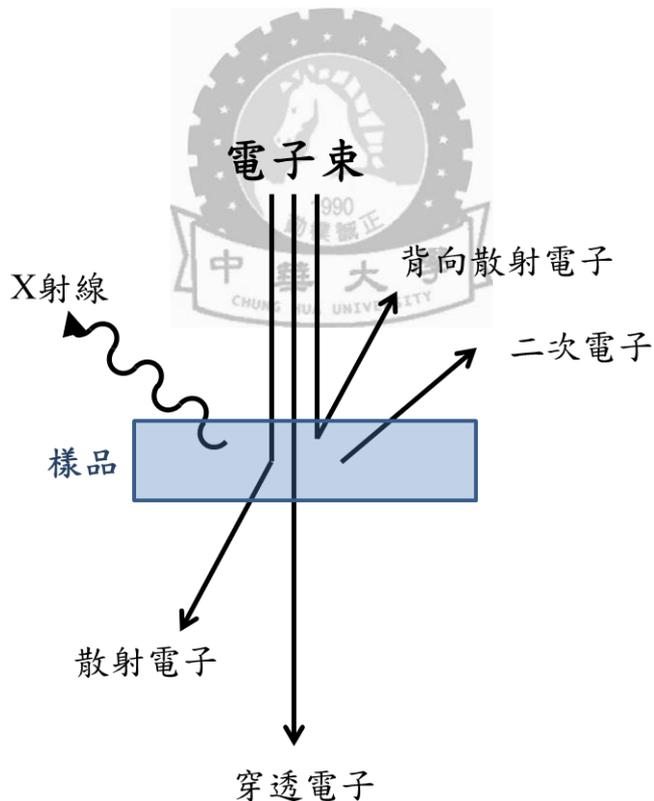


圖 1-2. 高速運動的電子與物質作用所產生之各種訊號[5]

1.2.微米尺度陣列型光源掃描式電子顯微鏡之應用與重要性

1.2.1.掃描式電子顯微鏡在腦神經科學的應用

在腦神經科學領域，腦神經組織的 3D(three-dimensional)結構訊息在生物研究方面具有高度的重要性，而為了觀察原子級的影像，勢必需要使用電子顯微鏡。由於神經系統間的神經元與突觸為一個三次元的立體架構，現有的電子顯微鏡系統主要為觀察一個面的影像，勢必要再加入新的機制，使電子顯微鏡能做 3D 影像的建構。

Denk W. (2004)的文獻[6]中指出一項新的設計，在樣品台邊加入一具可精密移動的切割刀，如圖 1-3 所示，由左至右，電子顯微鏡之動作依序為，(A)掃描影像；(B)(C)移動切割刀切割樣品表面；(D)切割刀回到原位並掃描下一張影像，如此反覆循環此動作，即可取得此樣品不同厚度之影像，將其排列後，將可建構出樣品的 3D 結構訊息，在腦神經科學領域，稱為全腦神經網路圖譜(brain mapping)。而由此技術顯示，樣品勢必會具有一定的厚度，使得樣品需研磨至 100nm 厚度的穿透式電子顯微鏡較不適合加入此設計，必須以掃描式電子顯微鏡為主要設計對象。

在觀察腦神經組織的影像中，電子束在掃描每個立體像素(voxel)的停留時間為 16 μ s，以一個邊長為 200 μ m 的腦神經組織立方體及影像解析度為 10nm \times 10nm \times 50nm 的定義下，要完成架構此腦神經組織立方體的 3D 結構訊息，需要取得 1.6 兆立體像素(teravoxels = 10¹² voxels)，所需之總掃描時間為 25,600,000 秒(約 296.3 天)，相當於以年作為掃描樣品時間的基數，此數據還是建立在電子顯微鏡機台在不間斷地掃描及不考慮刀具移動時間的基礎上。

由以上訊息及數據可知，建構全腦神經網路圖譜(brain mapping)，有助於研究人員了解大腦如何感知周遭環境及學習記憶的關係，日後若能建立完整的全腦神經網路圖譜，在醫療方面，將可協助治療腦部疾病等相關技術的研發，但在目前的電子顯微鏡技術下，一個邊長為 200 μ m 的腦神經組織立方體最少將會花上以年為單位的掃描時間來建構完整的 3D 結構訊息。

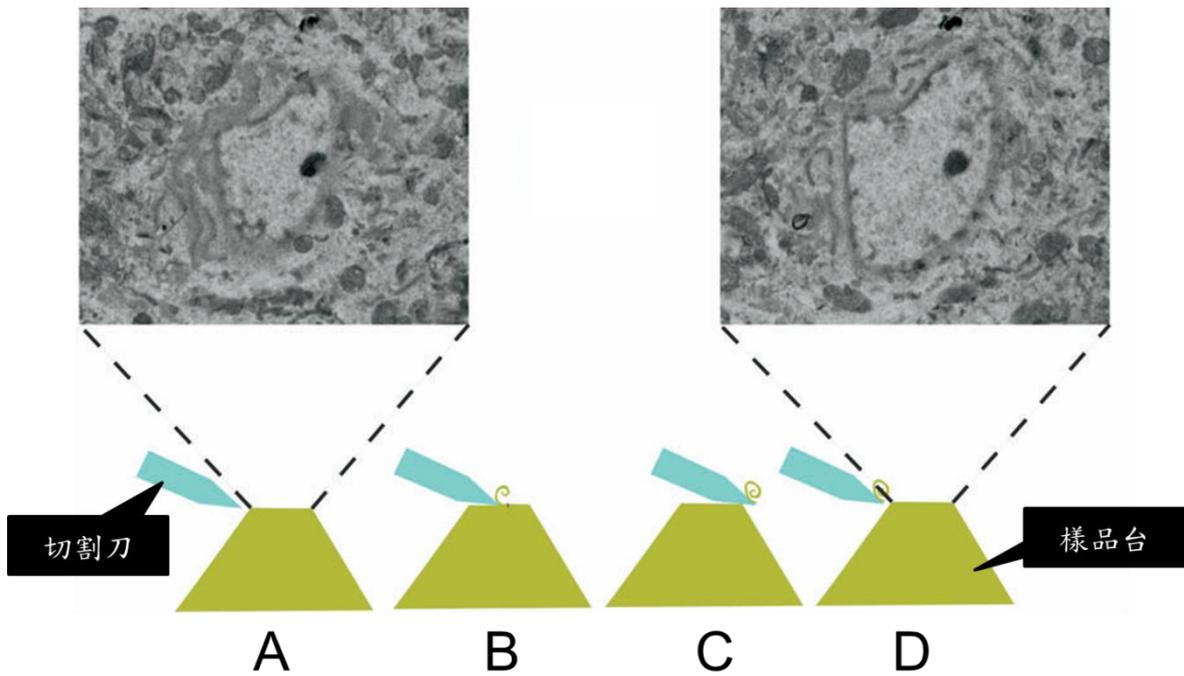


圖 1-3. 樣品切割示意圖。[6]

1.2.2.陣列型掃描式電子顯微鏡之應用

Marx V. (2013)的文獻[7]中提出了一個新的設計，用以解決過長的掃描時間(以年為單位)，更有 Zeiss、Gatan、Diatom 等電子顯微鏡相關儀器公司，共同開發出陣列型的多電子束顯微鏡，使用 61 個電子源，以蜂巢式陣列做最密排布，如圖 1-4 所示，可將多電子束之掃描影像拼接，使掃描時間大幅度地減少，以一個邊長為 200 μ m 的腦神經組織立方體之掃描時間約需 300 天為例，使用此陣列型多電子束架構下，掃描時間將會縮短至約 5 天左右，可見此一設計將在腦神經科學領域有大量的應用。而其理想刀具設計為刀面寬度 1cm、切割厚度為 4nm，如圖 1-5 所示，而目前 Zeiss 已開發出的原型機刀具設計為刀面寬度 1mm，切割厚度尚未達到 4nm，在刀具的研磨與拋光上還是具有挑戰的空間。

隨著腦神經科學的發展，建構人類大腦的全腦神經網路圖譜(brain mapping)的難度相當於建構出比紐約大上 10,000 倍的 3D 城市地圖，並且需定位出每一位居民在每一個建築物、街道、樓層之間。相信在腦神經科學領域最終可以找到一種方法，使研究人員取得所需要得資訊，這些資訊在解讀腦神經科學領域的各種研究結果將是不可或缺的，目前陣列式掃描式電子顯微鏡是可採用的方法之一。

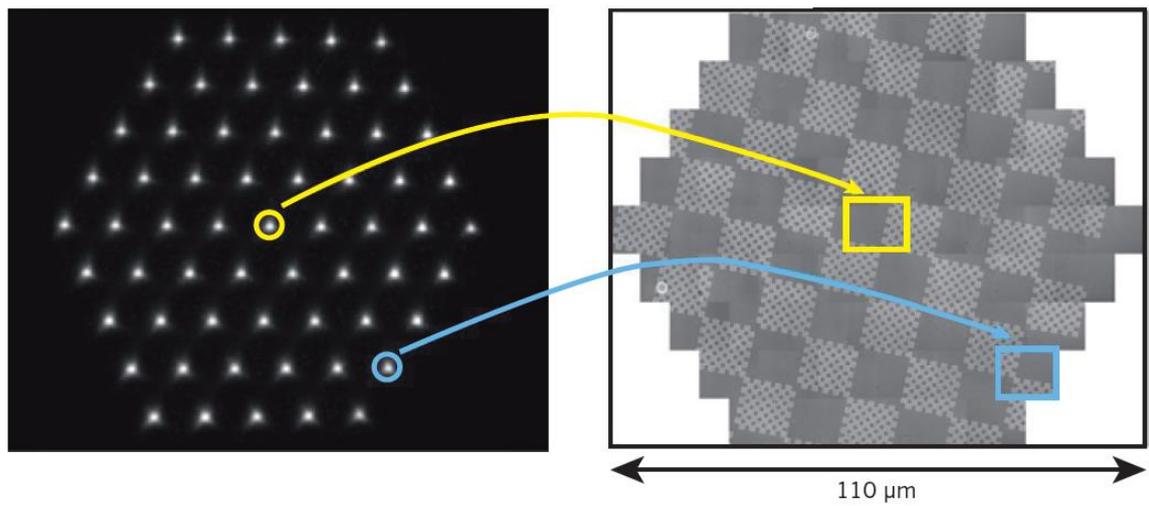


圖 1-4. Zeiss 陣列型多電子束顯微鏡原型，及影像拼接示意圖。[7]

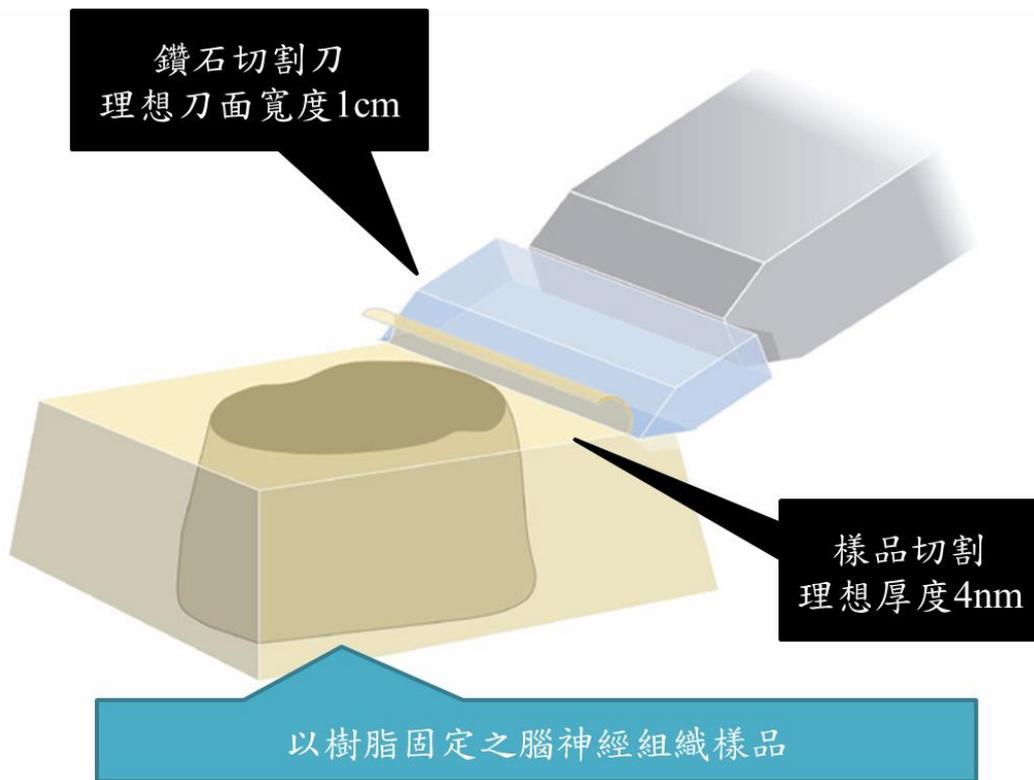


圖 1-5. Zeiss 陣列型多電子束顯微鏡樣品台理想設計示意圖。[7]

1.3.微米尺度電子顯微鏡的基本結構設計

本研究設計之微型掃描式電子顯微鏡可做陣列式排放，同時掃描大面積並將所偵測之影像拼接，將會大幅度降低掃描時間，對日後各種研究領域都是明顯的助力。

以掃描式電子顯微鏡為例，其基本架構包含電子槍、多個聚光鏡、一個物鏡、一組掃描線圈等。電子槍主要作用為產生電子束，聚光鏡與物鏡則以聚焦電子束為主要工作，掃描線圈則是在掃描式電子顯微鏡中負責影像成像的重要元件，如圖 1-6 所示。

本研究設計單一微型掃描式電子顯微鏡，其系統之基本架構將簡化為一個電子槍、一個電子透鏡、一個電子偏轉器，如圖 1-7 所示。因此以掃描式電子顯微鏡架構為基礎，分別就電子槍、電子透鏡、電子偏轉線圈等，各別探討與模擬驗證。

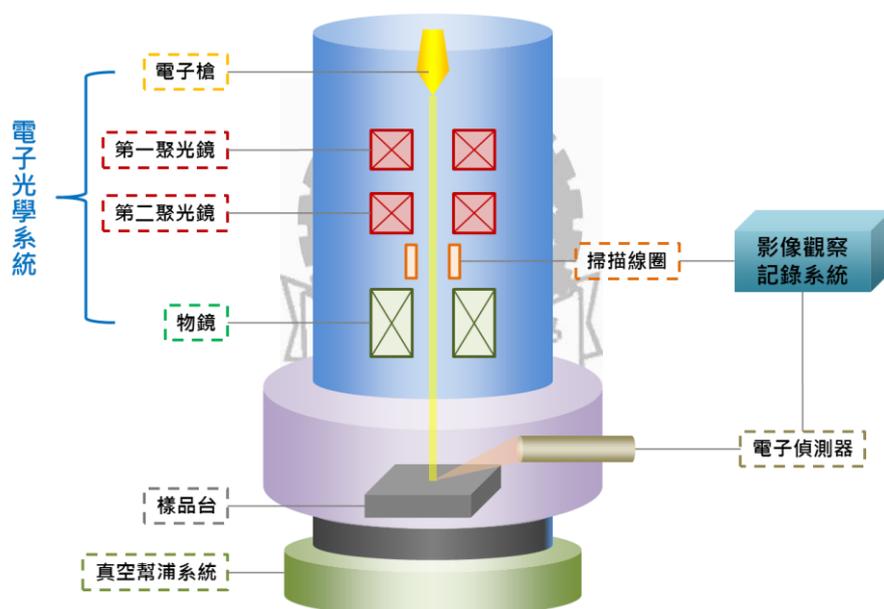


圖 1-6. 掃描式電子顯微鏡示意圖

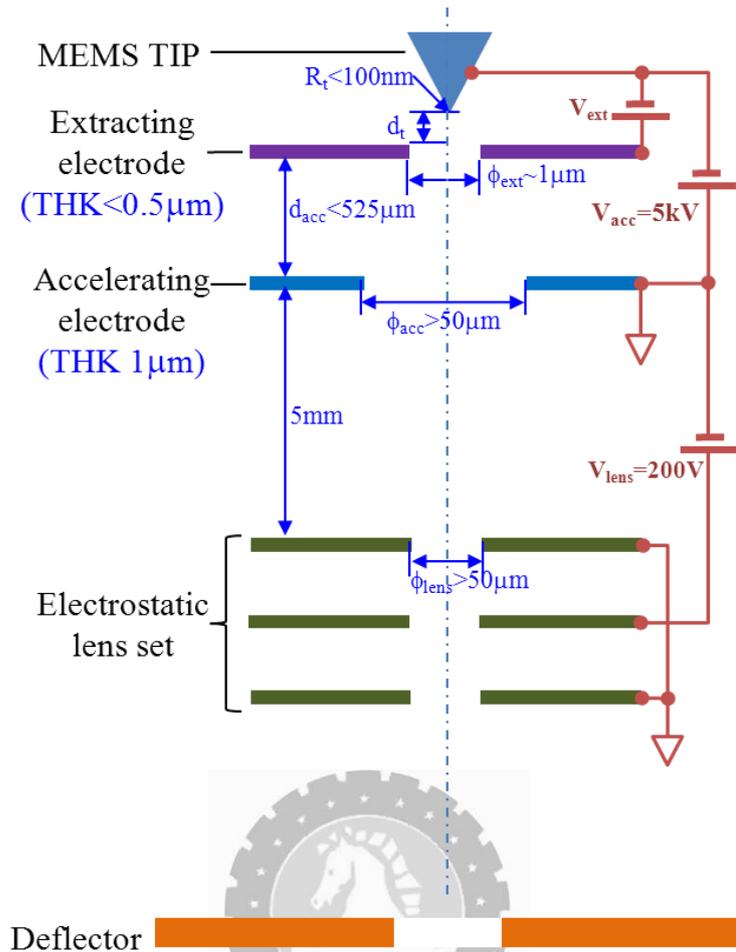


圖 1-7. 微型掃描式電子顯微鏡架構示意圖

1.3.1. 微米尺度電子槍

電子槍將以冷場發射電子槍為主，並輔以熱游離式鎢絲與熱游離式六硼化鎢燈絲等研究資料作為參考，並且設計出微機電製程技術內可完成的簡易微調系統。基本的場發射電子槍架構，至少包含針尖、第一陽極(淬取電極)、第二陽極(加速電極)等[8]，如圖 1-8、圖 1-9 所示。並參考，設計的重點參數在於針尖的曲率、針尖與電極的距離、電極的孔徑等。

在微米尺度設計方面，將考慮使用微機電系統(Microelectromechanical Systems, MEMS)中的表面微機械加工技術(surface micromachining)，將以矽(silicon)與氮化矽(silicon nitride)作為微米尺度下的電子槍材料[9]，其中在針尖曲率上靠目前的微機電系統可達到 5nm ，此針尖曲率在對電子束的特性將會有顯著的影響，基本架構將採 Baylor L. R. 的文獻[10][11]，如圖 1-10 所示之架構，並與微機電系統工程師討論現有技術可行的尺寸設計。在功函數(work function)的考量，功函數為一粒電子要從固體

表面逸出所需的最低能量，其中矽的功函數為 4.85eV，與現有電子顯微鏡系統主流之鎢絲功函數為 4.55eV，在模擬數據的校正上需做細部參數的調整。

並根據 Neo Y. (2009)的文獻[12]中三種不同電子槍模組設計，如圖 1-11 所示，重新架構電極形狀與可調控之形狀變化之模擬檔案。一般電子顯微鏡，可用機械結構及物件去微調電子束的性質，而微米尺度電子槍在完成初步設計後，其結構已固定無法做可控制的變動，因此為了調控微米尺度電子源產生之電子束性質，在場發射電子槍之淬取電極與加速電極間增加一個可微調之聚焦電極，此設計預計可藉由調控聚焦電極之電壓，以達到優化電子槍之輝度與虛光源大小等性質。

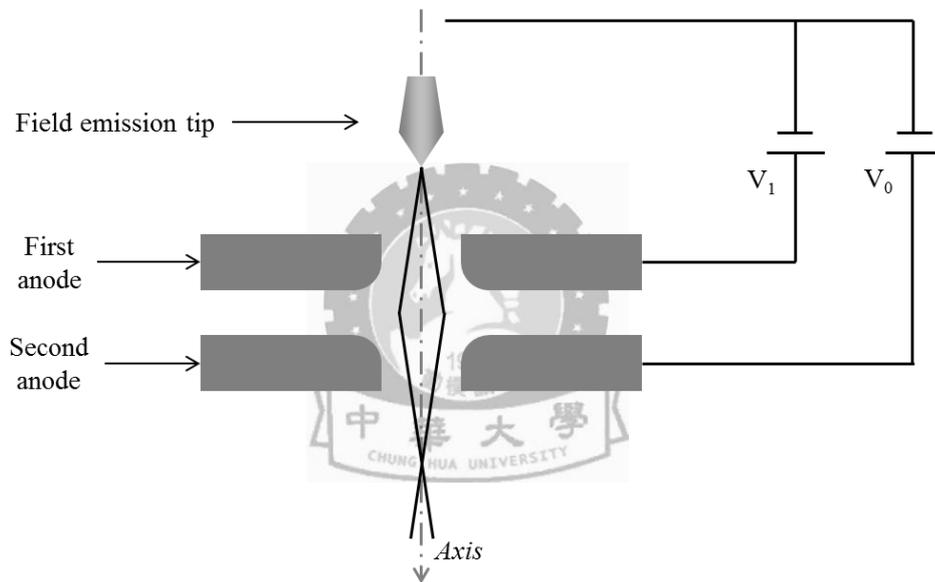


圖 1-8. 場發射電子槍基本架構示意圖

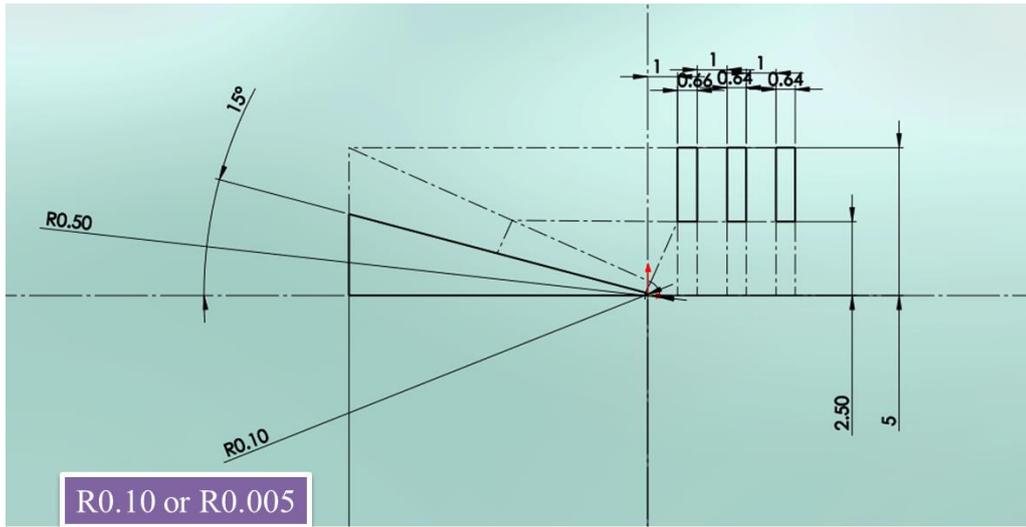


圖 1-9. 微米尺度場發射電子槍結構示意圖

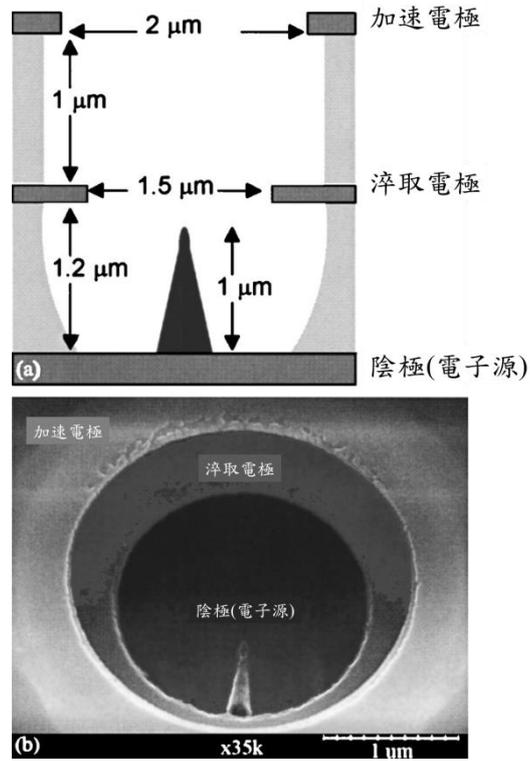


圖 1-10. 微米尺度場發射電子槍 SEM 圖[11]

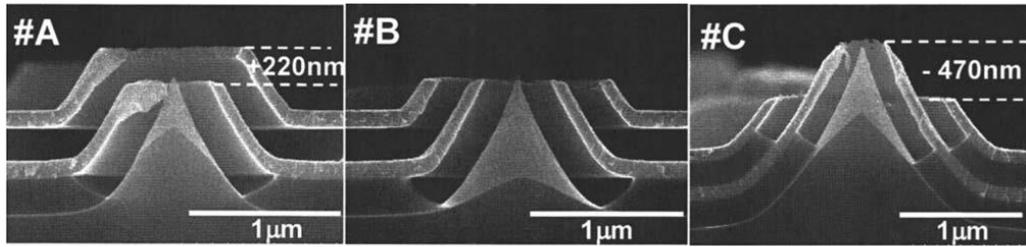


圖 1-11. 微米尺度場發射電子槍聚焦電極設計圖[12]

1.3.2.微米尺度電子透鏡

電子透鏡系統方面，以靜電透鏡為主，探討在微米尺度下的製程所需考量的因素，最主要為電極間的壓差比，用以設計在確定電子束能量的情況下，設計合宜的靜電透鏡。

以靜電透鏡為例，在模擬軟體中，電極設為一方型區域，延電子束軸向軌跡旋轉對稱，成一圓型碟片，如圖 1-12 所示。故靜電透鏡之電場為軸向對稱，並且電極間的電位差將影響靜電透鏡的聚焦強度。基本上靜電透鏡可概略分為兩種設計，一種為電子束通過靜電透鏡後，電子束能量有所變化，基本設計如圖 1-13 所示，重點為第一個電極與最後一個電極電位不同，藉此使電子束能量在通過靜電透鏡後產生變化；一種為電子束通過靜電透鏡後，電子束能量不會有所變化，稱為單透鏡(Eizel lens)，基本設計如圖 1-14 所示，重點為第一個電極與最後一個電極電位相同，藉此使電子束能量在通過靜電透鏡後不產生變化。本研究將以單透鏡(Eizel lens)為基本設計，並調整參數以了解在不同設計下，電極間的壓差比變化。

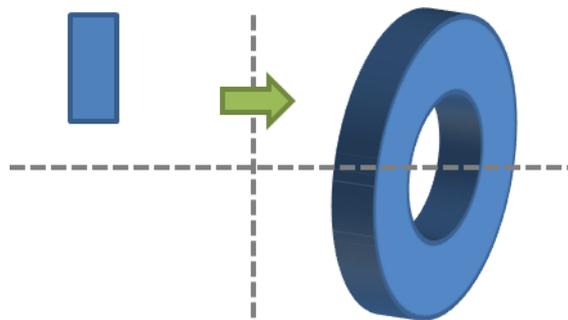


圖 1-12. 靜電透鏡電極示意圖

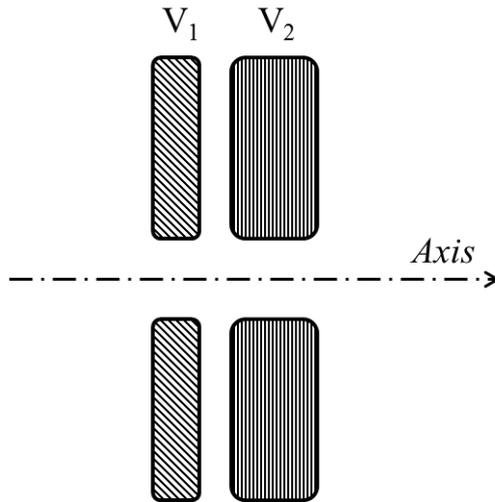


圖 1-13. 兩極靜電透鏡示意圖

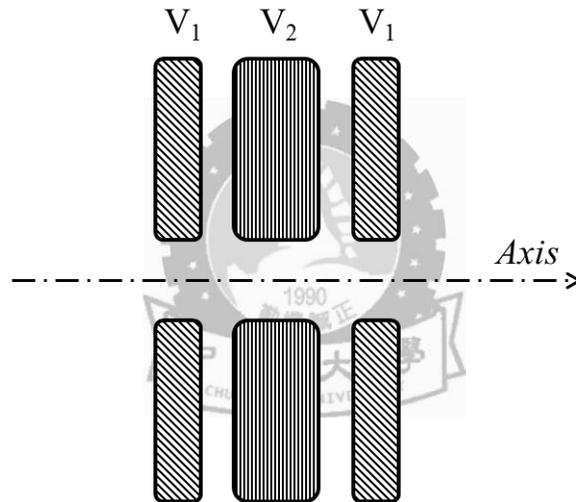


圖 1-14. 三極靜電透鏡示意圖(Eizel lens)

1.3.3. 微米尺度電子偏轉器

電子偏轉器主要原理如陰極射線管(cathode ray tube)之基本原理，如圖 1-15 所示，電子由電子槍(圖 1-15 A)產生後向右移動，在電子移動的途中，有水平偏折板(圖 1-15 B)與垂直偏折板(圖 1-15 C)各一組，如果兩組偏折板都不加以偏折電場，則電子將做直線運動(圖 1-15 D)，最後在螢光屏(圖 1-15 E)上產生亮點。若在偏折板上加以一固定電位差，則偏折板會產生電場，當電子從偏折板中經過時，將受電場作用而產生水平與垂直方向的偏折，最後在螢光屏的位置上將會產生偏移。

除了以電場對電子束產生偏移，使用電磁場亦可得到同樣的效果，然而在微米尺

度下考慮到微機電製程的限制，電磁偏轉器中線圈纏繞將是個極高的門檻，故將以靜電偏轉器為主作為本研究之標的，但不排除未來在微米尺度下使用電磁偏轉器的可能性。

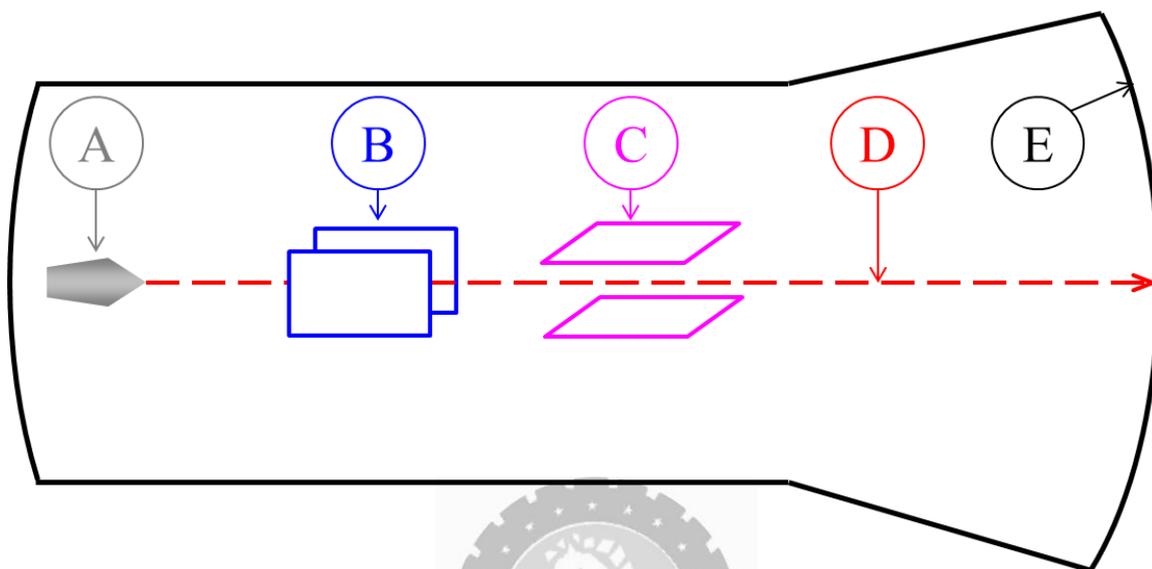


圖 1-15. 陰極射線管基本結構示意圖

A: 電子槍。B: 水平偏折板。C: 垂直偏折板。D: 電子束。E: 螢光屏。

1.4. 研究流程

研究過程將會先確立研究的主題內容，閱讀相關的文獻與原理，並設計出研究主題各元件的模組，首先對模擬檔案做基本的驗證，再對模擬結果做一系統性的整理與討論，設計時也會與微機電系統工程師討論製程的可行性，整體研究流程如圖 1-16 所示。

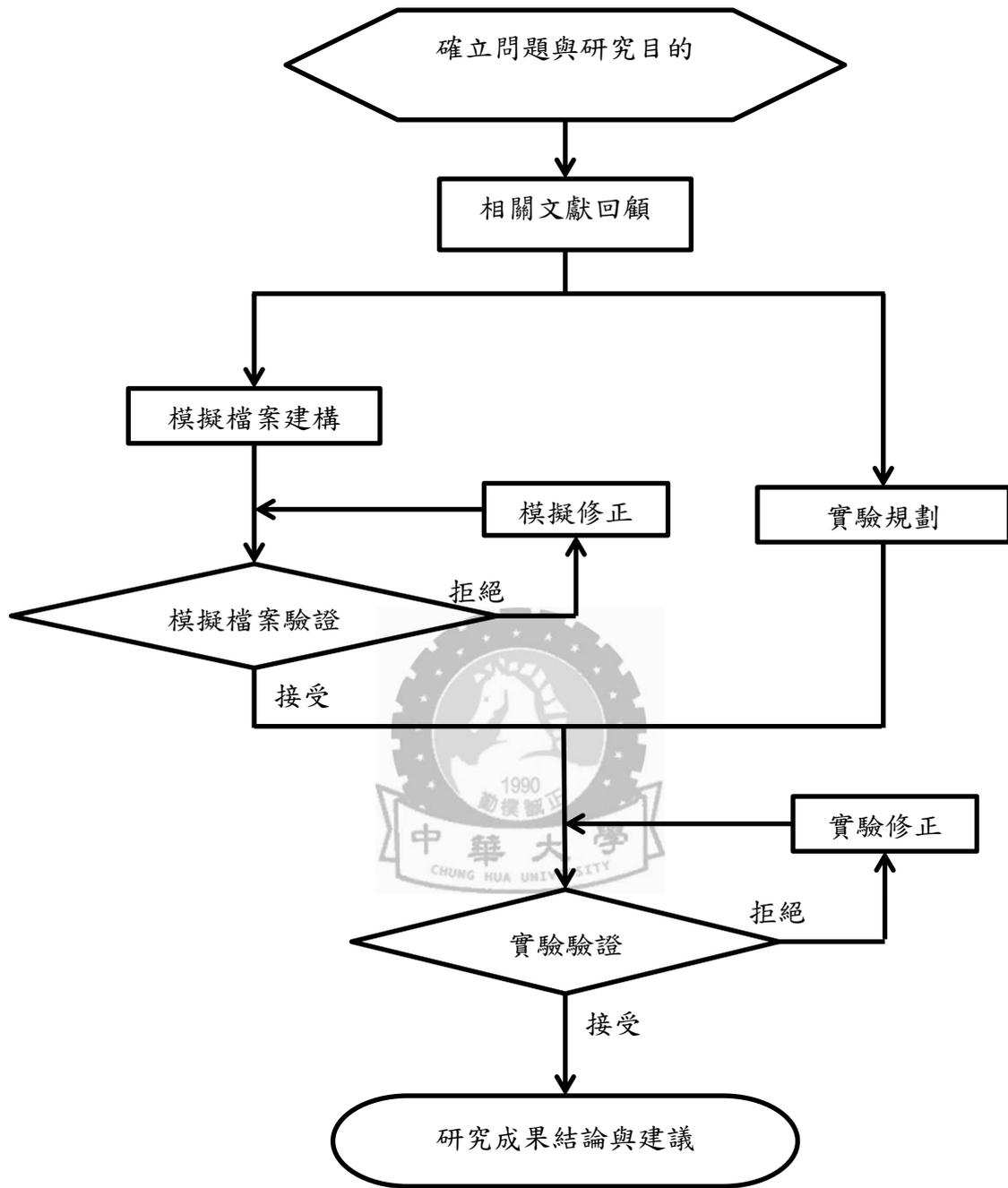


圖 1-16. 研究流程圖

第二章 電子光學基本理論

2.1. 電子光學(electron optics)

電子光學是在研究帶電粒子在電場和磁場中運動的一門學科。許多科學技術的發展，都利用帶電粒子束。期中電子光學就是把電子作為主要的帶電粒子，研究利用電場或磁場控制電子的運動軌跡，期望藉此得到系統所需求的電子束性質。[13]

電子光學理論在科學技術和工業生產中得到了廣泛的應用。例如，用於各種電子束器件及各種超高頻電真空器件中；用於高能粒子加速器及受控熱核反應中；用於原子能工業廣泛採用的光電倍增器及各種粒子譜儀中；用於觀察物質結構的高分辨本領的電子顯微鏡中、用於電子束光刻、電子束冶煉、電子束焊接等新型工藝中。[13]

2.2. 電子槍(electron gun)

2.2.1. 參數介紹

輝度(brightness)，是決定電子槍優劣的重要參數，意義為單位立體角度單位面積內的電子數，如圖 2-1 所示，單位為庫倫/平方公尺。輝度越高，代表電子源的性質越好，在相同的透鏡系統下，可達到更好的解析度，進而影響整體電子顯微鏡成像的品質。



在電子槍的設計下，輝度計算各參數如圖 2-2 所示，公式表示為：

$$\beta = \frac{4i_e}{\pi^2 \alpha_0^2 \left(\frac{d_1}{2}\right)^2} \dots\dots\dots (2-1)$$

i_e ：電子數

α_0 ：角度

d_0 、 d_1 ：光源直徑

π ：常數

可知輝度 β 與光源直徑 d_1 呈正比關係：

$$\beta \propto d_1 \dots\dots\dots (2-2)$$

而 d_1 為電子源所產生之虛光源，假定機構不變，即物距相同情況下根據一般光學特性，如圖 2-3 所示，可得：

$$d_1 \propto d_0 \dots\dots\dots (2-3)$$

因 d_0 為實光源大小，降低 d_0 即為使用曲率較低之燈絲，燈絲曲率由小至大，依序為，場發射電子槍(FEG)為100nm，熱游離六硼化鏷電子槍(LaB₆)為10 μ m，熱游離鎢絲電子槍(W)為100 μ m，反應在解析度跟輝度上，由優至劣依序為，場發射電子槍(FEG)、熱游離六硼化鏷電子槍(LaB₆)、熱游離鎢絲電子槍(W)，如表格 2-1 所示。

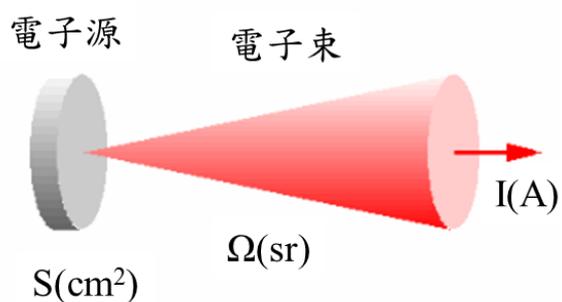


圖 2-1. 輝度定義示意圖[14]

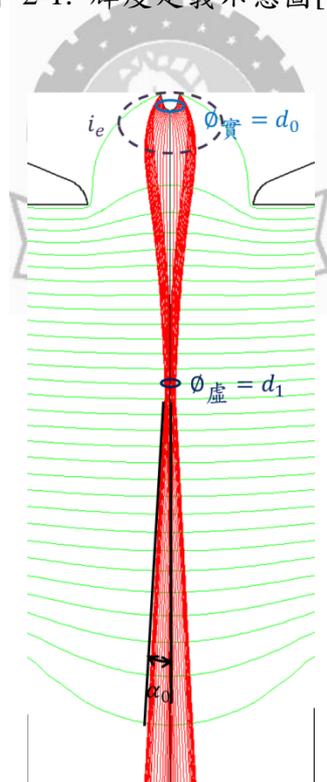


圖 2-2. 輝度計算示意圖

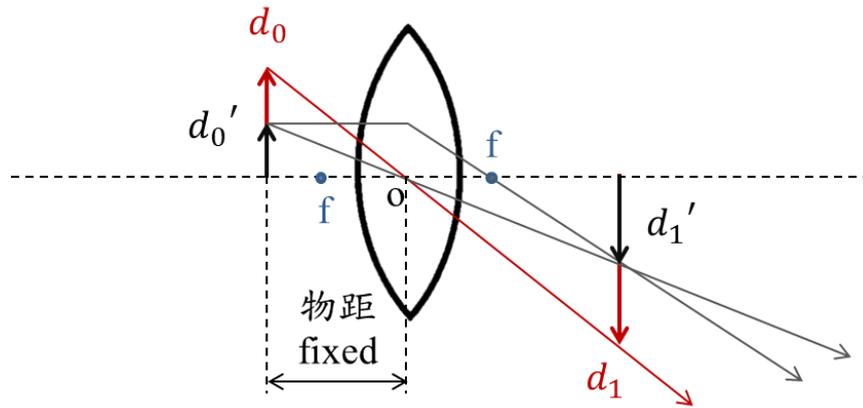


圖 2-3. 透鏡成像示意圖

表格 2-1. 電子顯微鏡特性比較表[4]

Operating at 100kV	Units	Thermionic Guns		Field Emission
		Tungsten	LaB ₆	
Work function, Φ	eV	4.5	2.4	4.5
Richardson's constant	A/m^2K^2	6×10^5	4×10^5	
Operating temperature	K	2700	1700	300
Current density	A/m^2	5×10^4	10^6	10^{10}
Crossover size	μm	50	10	<0.01
Brightness	A/m^2sr	10^9	5×10^{10}	10^{13}
Energy spread	eV	3	1.5	0.3
Emission current stability	%/hr	<1	<1	5
Vacuum	Pa	10^{-2}	10^{-4}	10^{-8}
Lifetime	hr	100	500	>1000

2.2.2. 微米尺度電子槍(micro-scale electron source)

以場發射電子槍為基礎所建構的微米尺度場發射電子槍，根據福勒-諾德漢穿隧 (Fowler-Nordheim tunneling)[15]，其穿隧電流可簡化為下式：

$$J = BE^2 \exp \left\{ \frac{-6.8 \times 10^7 \phi^3}{E} \right\} \dots \dots \dots (2-4)$$

J：穿隧電流密度 (A/cm^2)

B：穿隧電場尺寸常數 (A/V^2)

E：淬取電極與針尖的壓差比 (V/cm)

ϕ ：功函數 (work function)

由於 B 與 φ 等在結構設計完成時，已成為常數，因此對 J 與 E 做移項後可得下式：

$$-\ln\left(\frac{J}{E^2}\right) \propto \frac{1}{E} \dots\dots\dots (2-5)$$

將 J 改為模擬軟體中的場發射電流 i_e ，E 則固定淬取電極與針尖的距離，固僅剩下淬取電壓 V_{ext} 為變數，並將其改寫為下式：

$$-\ln\left(\frac{i_e}{V_{ext}^2}\right) \propto \frac{1}{V_{ext}} \dots\dots\dots (2-6)$$

i_e ：場發射電流 (nA)

V_{ext} ：淬取電壓 (V)

由此式中可知，在模擬軟體中調整淬取電壓 V_{ext} ，取得場發射電流值 i_e 後，依上式代換後，取半對數作圖可得福勒-諾德漢(Fowler-Nordheim)穿隧效應線性關係圖，如圖 2-4 所示。藉此可驗證微米尺度的場發射電子槍模擬檔案是否符合此一穿隧效應線性關係。

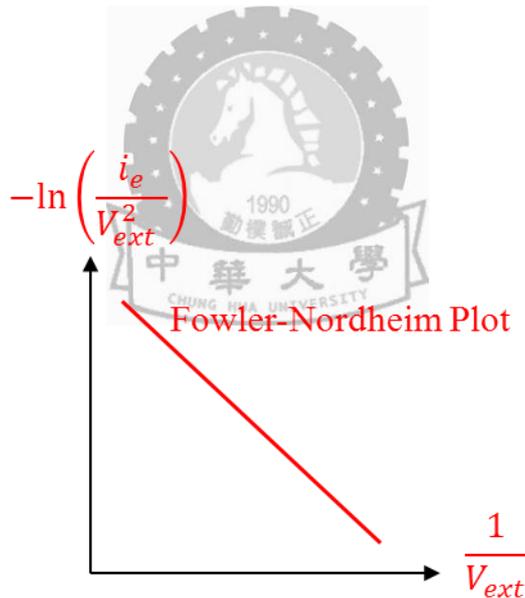


圖 2-4. 福勒-諾德漢(Fowler-Nordheim)穿隧效應線性關係圖(理論)

2.3. 電子透鏡(electron lens)

2.3.1. 靜電透鏡理論[16]

電子束在經過靜電透鏡時，將受到電場影響，而徑向電場分量正比於離軸距離， $E_r \propto r$ ；徑向力正比於離軸距離， $F_r \propto r$ 。在同一個電場下，若要將同一個物聚焦於同一個像，條件為電子束能量必須相同，如圖 2-5 所示。電位 Φ 的梯度為：

$$\nabla\Phi(r) = -\nabla \int_{\infty}^r E(r') \cdot dl' = -E(r) \dots\dots\dots (2-7)$$

已知電場與電位的關係：

$$E(r) = -\nabla\Phi(r) \dots\dots\dots (2-8)$$

根據高斯定律得：

$$\Phi = \oint E \cdot da = \frac{Q}{\epsilon_0} \dots\dots\dots (2-9)$$

微分上式可得：

$$\nabla \cdot E = \frac{\rho}{\epsilon_0} \dots\dots\dots (2-10)$$

ρ ：電荷密度(C/m^3)。

ϵ_0 ：電常數。

所以電位 Φ 滿足 Poisson's equation：

$$\nabla^2\Phi = -\frac{\rho}{\epsilon_0} \dots\dots\dots (2-11)$$

令電荷密度 ρ 為零，方程式即變為 Laplace's equation：

$$\nabla^2\Phi = 0 \dots\dots\dots (2-12)$$

將 Laplace's equation 轉換為圓柱座標：

$$\nabla^2\Phi(r, \theta, z) = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial \Phi}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2} = 0 \dots\dots\dots (2-13)$$

基於模擬軟體為旋轉對稱，故不考慮，可將其簡化為：

$$\nabla^2\Phi(r, z) = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial \Phi}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2} = 0 \dots\dots\dots (2-14)$$

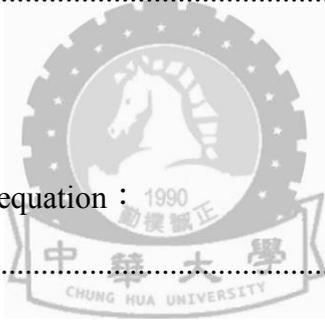
靜電場之近軸電位分佈為 $\Phi(r, z)$ ：

$$\Phi(r, z) = \Phi(z) + f_1(z)r + f_2(z)r^2 + f_3(z)r^3 + f_4(z)r^4 + \dots \dots\dots (2-15)$$

其中 $\Phi(z)$ 為沿著 z 軸方向之電位分佈，代入 Laplace's equation(3-12)，可解 $f_1(z)$ 、 $f_2(z)$...等，得：

$$f_1(z) = 0 \dots\dots\dots (2-16)$$

$$f_2(z) = -\frac{1}{4}\Phi''(z) \dots\dots\dots (2-17)$$



$$f_3(z) = -\frac{1}{9}f_1''(z) = 0 \dots\dots\dots (2-18)$$

$$f_4(z) = -\frac{1}{16}f_2''(z) = \frac{1}{64}\phi''''(z) \dots\dots\dots (2-19)$$

$$\Phi(r, z) = \phi(z) - \frac{1}{4}\phi''(z)r^2 + \frac{1}{64}\phi''''(z)r^4 - \dots \dots\dots (2-20)$$

可得知近軸電場 $\Phi(r, z)$ 完全依賴於軸向電位分佈 $\phi(z)$ ，亦即所有靜電場的光學性質可由軸向電位分佈 $\phi(z)$ 計算推導。接續推導近軸軌跡方程式，徑向電場分量(Radial Field Component)表示為：

$$E_r = -\frac{\partial\Phi}{\partial r} = \frac{1}{2}\phi''(z)r - \frac{1}{16}\phi''''(z)r^3 + \dots \dots\dots (2-21)$$

基於近軸近似(Paraxial Approximation)，可得：

$$E_r \approx \frac{1}{2}\phi''(z)r \dots\dots\dots (2-22)$$

可得知徑向電場分量正比於離軸距離。

$$E_r \propto r \dots\dots\dots (2-23)$$

接續推導軌跡運動方程式(Equation of Motion for Meridional Rays)：

$$\vec{F} = e\vec{E} \dots\dots\dots (2-24)$$

$$m\frac{d^2r}{dt^2} = -eE_r = -e\frac{1}{2}\phi''(z)r \dots\dots\dots (2-25)$$

可得知徑向力正比於離軸距離。 $F_r \propto r$

$$\frac{d^2r}{dt^2} = -\frac{e}{m}\frac{1}{2}\phi''(z)r \dots\dots\dots (2-26)$$

將其轉變為 t(時間)與 z(軸向位置)的關係式推導關係式：

$$\frac{1}{2}mv^2 = e\phi \text{ (動能=電位能)} \dots\dots\dots (2-27)$$

由於為近軸軌跡，將 $v \approx v_z$ ， $\phi \approx \phi(z)$ 代入：

$$\frac{1}{2}mv_z^2 = e\phi(z) \dots\dots\dots (2-28)$$

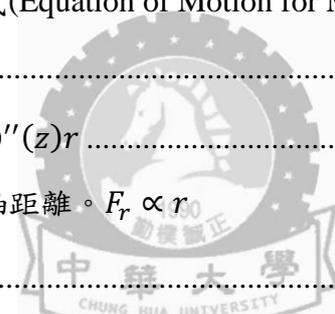
$$v_z = \frac{dz}{dt} = \sqrt{\frac{2e\phi(z)}{m}} \dots\dots\dots (2-29)$$

$$\frac{d}{dt} = \sqrt{\frac{2e\phi(z)}{m}} \frac{d}{dz} \dots\dots\dots (2-30)$$

將公式(3-28)代入公式(3-24)可得近軸軌跡方程式：

$$r''(z) + \frac{\phi'(z)}{2\phi(z)}r'(z) + \frac{\phi''(z)}{4\phi(z)}r(z) = 0 \dots\dots\dots (2-31)$$

最後是近軸影像公式的推導，基於近軸軌跡方程式為二階微分方程(3-29)，令 $r_a(z), r_b(z)$ 為初解，如圖 2-6 所示， $r_a(z)$ 為單位傾斜軌跡(於軸上)， $r_b(z)$ 為單位離



軸軌跡(水平射入)，可得初始條件為：

$$r_a(z_0) = 0 \text{ (軸上)} \dots\dots\dots (2-32)$$

$$r_a'(z_0) = 1 \text{ (單位傾斜角)} \dots\dots\dots (2-33)$$

$$r_b(z_0) = 1 \text{ (單位離軸距離)} \dots\dots\dots (2-34)$$

$$r_b'(z_0) = 0 \text{ (水平射入)} \dots\dots\dots (2-35)$$

令 $r_a(z)$ 在 z_i 再度交於軸上，可得：

$$r_a(z_i) = 0 \dots\dots\dots (2-36)$$

求得通解為：

$$r(z) = r_o r_b(z) + r_o' r_a(z) \dots\dots\dots (2-37)$$

所有入射電子束皆可分解為離軸 r_o 單位，傾斜 r_o' 單位，求得近軸影像公式為：

$$r_i = r(z_i) = r_o r_b(z_i) + r_o' r_a(z_i) = r_o r_b(z_i) \dots\dots\dots (2-38)$$

由近軸影像公式可知，只要離軸一樣遠，任何傾角的軌跡，將成像在同一點上。

而倍率(Magnification)的計算，則由像與物的大小比較得知：

$$\text{Magnification} = \frac{r_i}{r_o} = \frac{r_b(z_i)}{r_b(z_0)} = r_b(z_i) \dots\dots\dots (2-39)$$

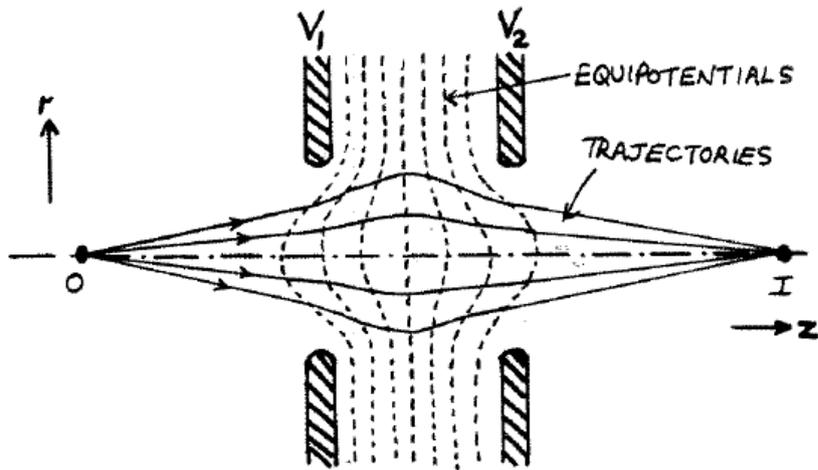


圖 2-5. 電場與電子束軌跡作用示意圖[16]

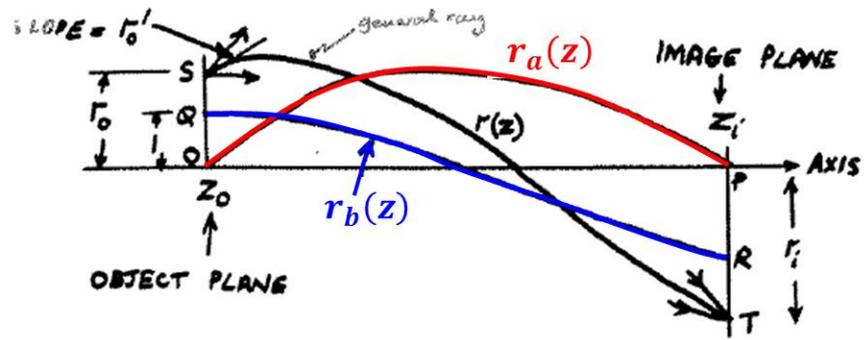


圖 2-6. 近軸電子束軌跡示意圖[16]



2.4. 電子偏轉器 (electron deflector)

2.4.1. 電磁偏轉器 (electromagnetic deflector)

電磁偏轉器之偏轉量公式如下，各項參數如圖 2-7 所示：

$$D = \frac{lB}{\sqrt{V_a}} \cdot \sqrt{\frac{e}{2m}} \text{ (meters)} \dots\dots\dots (2-40)$$

$$D \propto \frac{1}{\sqrt{V_a}} \dots\dots\dots (2-41)$$

D：偏轉量。(m)

l：電磁線圈的長度。(m)

L：從電磁偏轉器到屏幕的距離。(m)

B：磁通量密度。(Wb/m² or T)

V_a：被偏轉粒子束能量強度。(V)

m：被偏轉粒子質量。

e：被偏轉粒子帶電量。

從上式可知，電磁偏轉器之偏轉量與 $\frac{1}{\sqrt{V_a}}$ 成正比，與靜電偏轉器相比，在粒子束能量強度有所變化下，電磁偏轉器的磁場調整幅度較小。由於電磁偏轉器的偏轉量受粒子質量與帶電量影響，故用於質量小的電子束下可得到較好的效果。

在設計上，若不改變偏轉器與屏幕之間的距離，提高電磁偏轉器的磁場，可提升偏轉量，但由於需要增強電流產生磁場，電磁偏轉器會有較多的能量轉為熱能而損失。

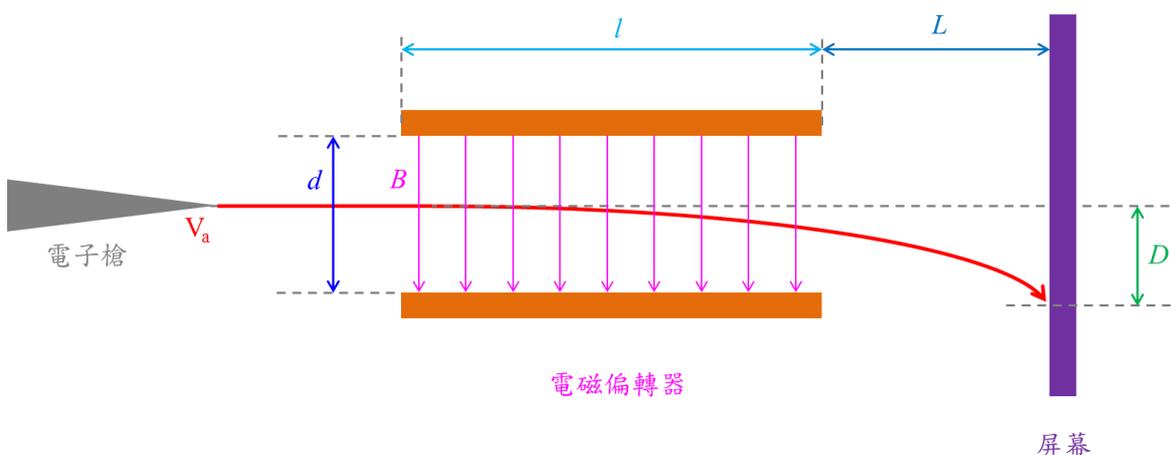


圖 2-7. 電磁偏轉器示意圖

2.4.2. 靜電偏轉器 (electrostatic deflector)

電磁偏轉器之偏轉量公式如下，各項參數如圖 2-8 所示：

$$D = \frac{lL V_d}{2dV_a} \text{ (meters)} \dots\dots\dots (2-42)$$

$$D \propto \frac{1}{V_a} \dots\dots\dots (2-43)$$

D：偏轉量。(m)

l：靜電板的長度。(m)

L：從電磁偏轉器到屏幕的距離。(m)

d：靜電板間距。(m)

V_d ：靜電板偏轉電壓。(V)

V_a ：被偏轉粒子束能量強度、電子速度。(V)

從公式可知，靜電偏轉器之偏轉量與 $\frac{1}{V_a}$ 呈正比，與電磁偏轉器相比，在粒子束能量強度有所變化下，靜電偏轉器的電壓調整幅度較大。在設計上，若不改變偏轉器與屏幕之間的距離，縮短靜電板之間的距離，可提升偏轉量。

靜電偏轉器的優勢在於偏轉速度快、不受粒子質量與帶電量影響，故可通用於電子束與離子束。

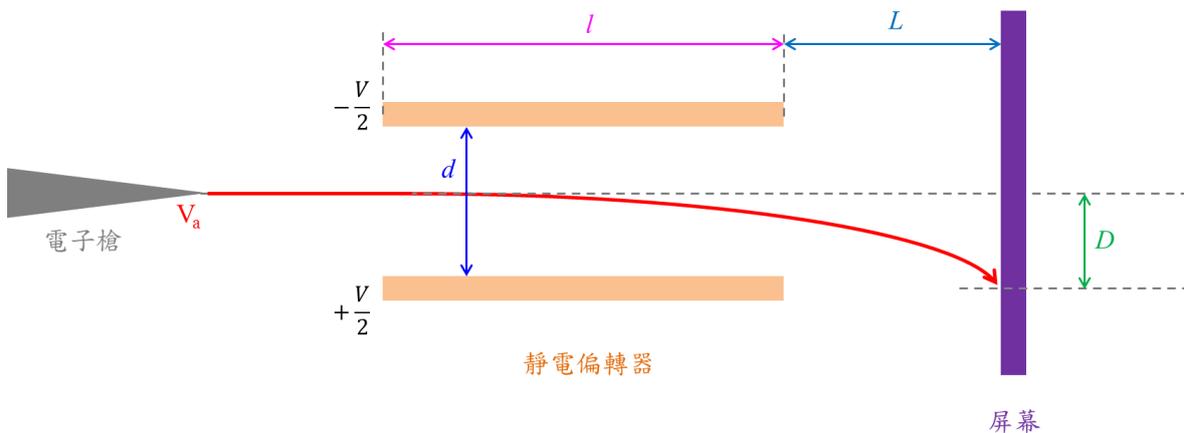


圖 2-8. 靜電偏轉器示意圖

第三章 電子光學模擬

3.1. 模擬軟體

本研所使用的軟體為英國公司 Munro's Electron Beam Software Ltd. (MEBS)所開發之軟體，該軟體主要用於計算電子與離子等帶電粒子在電場與磁場中的交互作用，輔助電子光學設計者完成設計。並與文獻內容做探討。其中在尺寸的規劃與模擬的數據分析為重點，並且將模擬結果與公式推導的結論，做初步的驗證。

3.2. 電子槍(electron gun)

3.2.1. 微米尺度電子槍模擬

將已完成的繪圖軟體資料轉移到模擬軟體中，如圖 3-1 所示，轉移的過程需注意網格(mesh)的切割方式務必與模擬軟體相符合，並且注意網格分布的平均性，以避免模擬誤差過大進而影響對電子束的特性。過程可利用模擬軟體的子程式檢測網格合理性，以此做初步的模擬檔案驗證。在模擬檔案建構完成，並檢測網格規劃無誤後，便賦予針尖與電極電位設定。

根據福勒-諾德漢(Fowler-Nordheim)穿隧效應，可推導出下式

$$-\ln\left(\frac{i_e}{V_{ext}^2}\right) \propto \frac{1}{V_{ext}} \dots\dots\dots (3-1)$$

i_e ：場發射電流 (nA)

V_{ext} ：淬取電壓 (V)

初步以考量將使用在生物樣品上，加速電壓設定為 5000V，考慮到整體機構的架設，以加速電極為接地極，針尖部分則為-5000V，如圖 3-2 所示，而加速電極則相對於場發射針尖為+80V 到+120V，每次增加 5V，並記錄模擬軟體所計算出之場發射電流，

將場發射電流 i_e 與淬取電壓 V_{ext} 記錄，如

圖 3-3 所示。

接著探討此微米尺度場發射電子槍與傳統冷場發射式電子槍，產生之電子束性質的優劣去做比較，在這兩種場發射電子槍中，最大的不同在於針尖曲率的參數，傳統冷場發射電子槍之針尖曲率需小於 100nm，而靠微機電系統所完成的微米尺度場發射

電子槍之針尖曲率範圍可由 5nm 至 100nm。藉由不同的針尖曲率所設計的微米尺度場發射電子槍，探討其對輝度(brightness)與虛光源大小(crossover size)的影響。由表格 2-1 可知傳統冷場發射式電子槍之輝度為 $1 \times 10^{13} \text{ A/m}^2\text{sr}$ ，從模擬結果可以發現，針尖曲率 100 nm 之微米尺度場發射電子槍輝度為 $5.06 \times 10^{14} \text{ A/m}^2\text{sr}$ ，而針尖曲率 5nm 的為 $1.76 \times 10^{18} \text{ A/m}^2\text{sr}$ ，如表格 3-1 所示。在虛光源大小方面，傳統冷場發射式電子槍為 $0.1 \mu\text{m}$ ，針尖曲率 100 nm 之微米尺度場發射電子槍為 3.717 nm，而針尖曲率 5nm 的為 0.262 nm，如表格 3-2 所示。

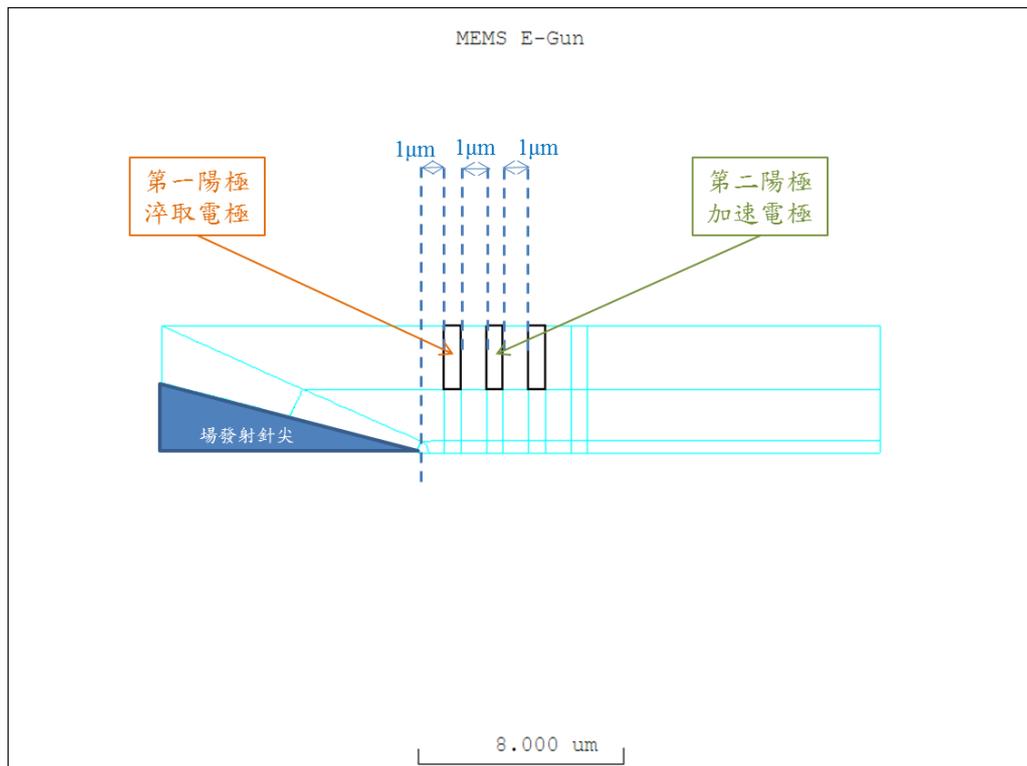


圖 3-1. 微米尺度場發射電子槍模擬檔案建構圖

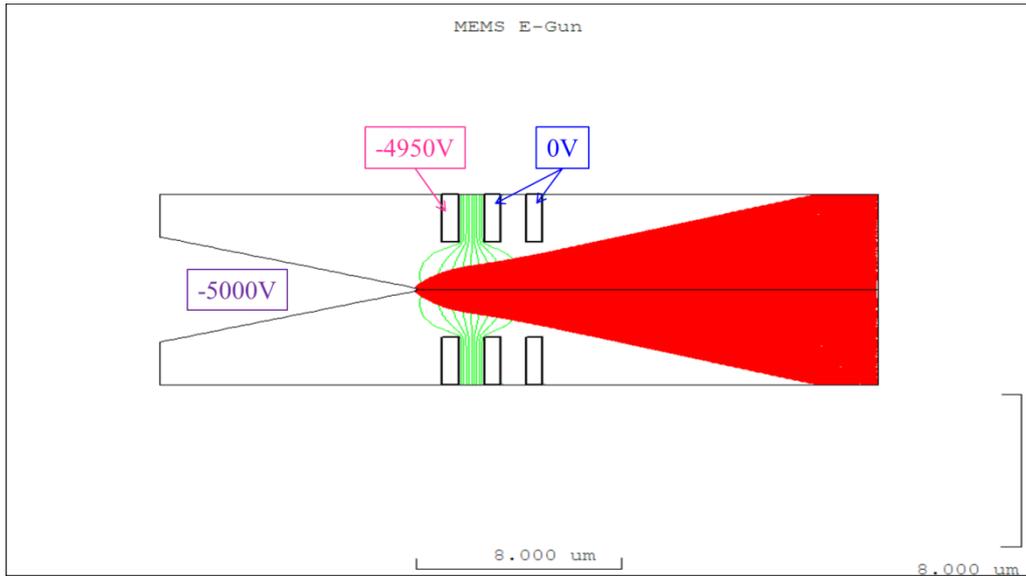


圖 3-2. 微米尺度場發射電子槍電位設定

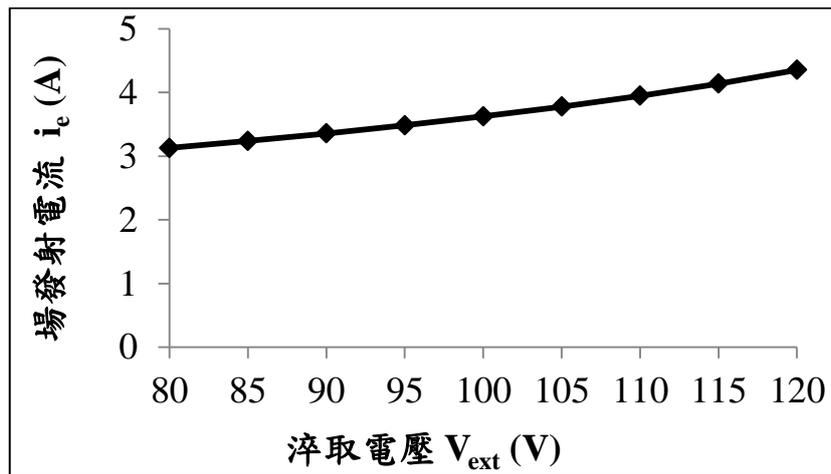
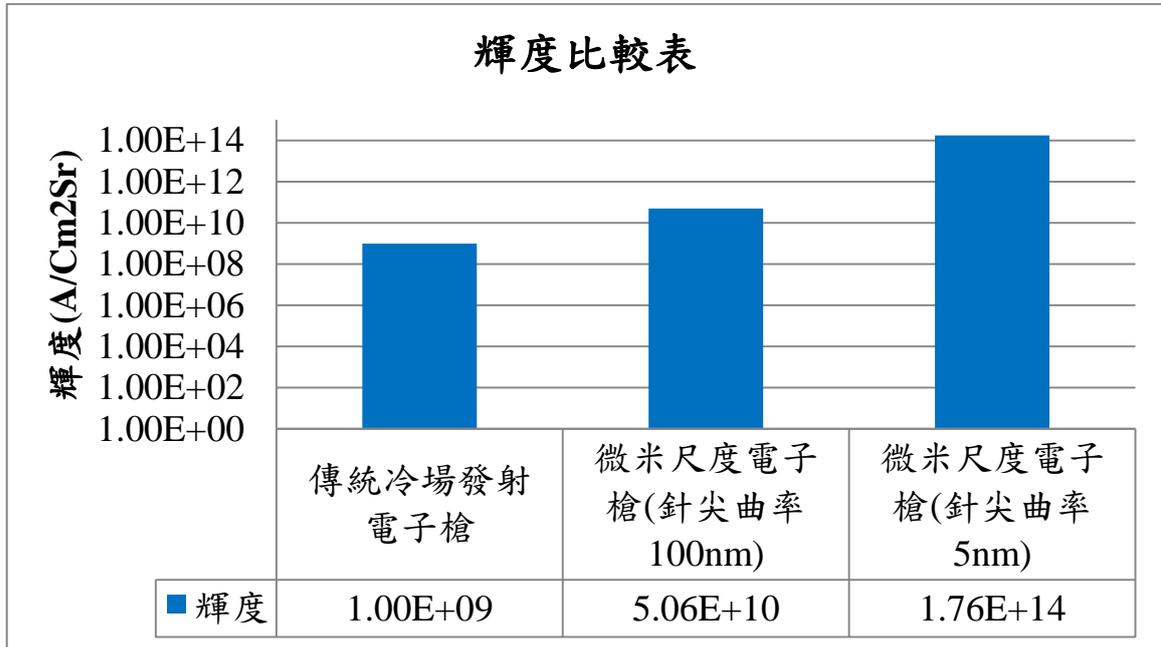
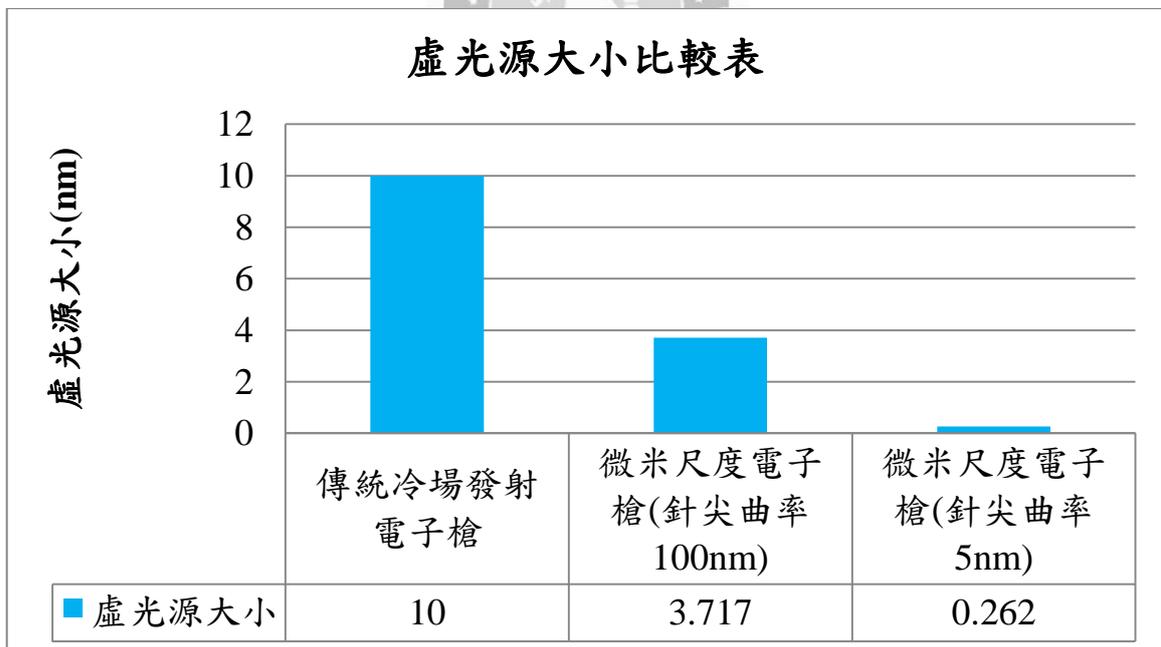


圖 3-3. 淬取電壓與場發射電流關係圖

表格 3-1. 微米尺度場發射電子槍輝度比較表



表格 3-2. 微米尺度場發射電子槍虛光源大小比較表



3.2.2. 微米尺度電子槍優化設計

有別於一般電子顯微鏡，可用機械結構及物件去微調電子束的性質，在完成微米

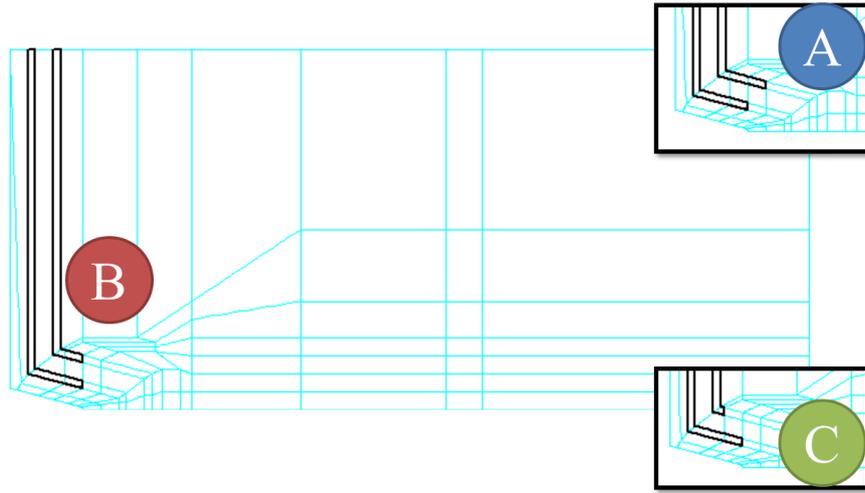
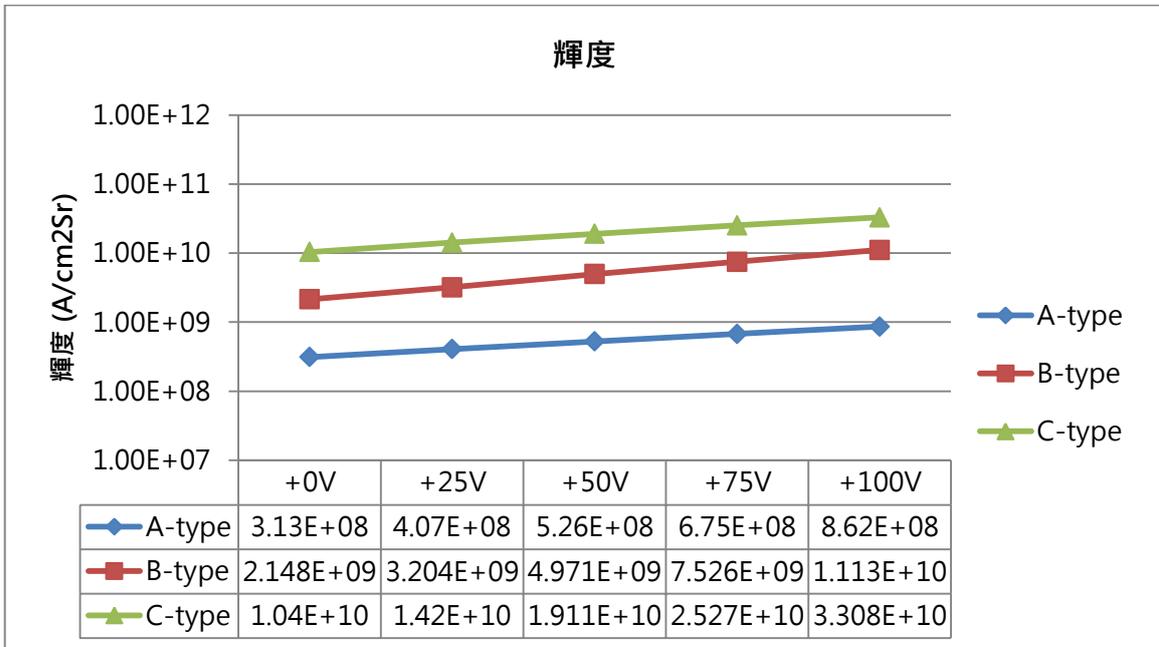
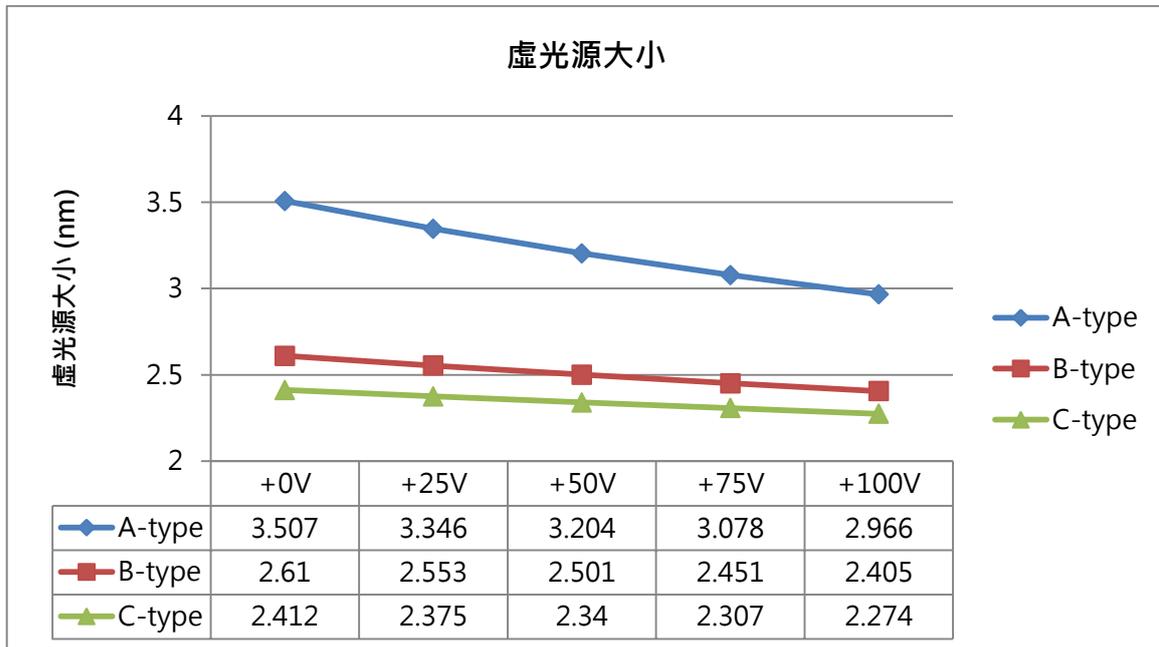


圖 3-5. 微機電系統場發射電子槍模擬架構圖

表格 3-3. 輝度比較表



表格 3-4. 虛光源大小比較表



3.3. 電子透鏡(electron lens)

3.3.1. 靜電透鏡模擬

在靜電透鏡的設計[21]，以單純的結構並考量到微機電系統製程，基本架構為三個平行電極，電極間以絕緣材料隔絕，如圖 3-6 所示。整體架構以單透鏡(Eizel lens)為基礎，單透鏡的特性是電子束在通過單透鏡，其電子束能量不會有所變化，故在電位的設定基礎，會將第一電極與最終電極設定為同電位，藉由中央電極的電位變化改變此靜電透鏡的聚焦能力，如圖 3-7 所示，電子束會在透鏡中先加速再減速，離開透鏡時的電子束能量將與進入透鏡前的電子束能量相同。

在此靜電透鏡研究中，將會固定透鏡與樣品平面間的距離，固定兩側電極的電位，並由模擬程式去自動調整中央電極的電位，以使電子束聚焦在樣品平面。而調整的變數有絕緣層的厚度、孔徑的大小與透鏡相對於電子源的距離，目的為使中央電極與兩側電極之間的壓差比($V/\mu\text{m}$)符合安全範圍，在目前考慮的材料與微機電系統技術上，希冀能降到 $100 V/\mu\text{m}$ 以下。以下分別對三個變數調整，共通設定為電子束能量 $5000V$ ，第一電極與最終電極同為接地，中央電極電位為反應變數，最後將討論中央電極與兩側電極之壓差比的變化。

對孔徑大小作調整，參數設定範圍為 $0.1\mu\text{m}$ 、 $0.25\mu\text{m}$ 、 $0.5\mu\text{m}$ 、 $1\mu\text{m}$ 等四個參數，絕緣層厚度固定為 $1\mu\text{m}$ ，靜電透鏡置於電子源後 0.5mm 處，固定成像於電子源後 18mm 處。結果如表格 3-5 所示，壓差比分別為 $133\text{V}/\mu\text{m}$ 、 $140\text{V}/\mu\text{m}$ 、 $157\text{V}/\mu\text{m}$ 、 $203\text{V}/\mu\text{m}$ ，可得知孔徑越小，可使壓差比降低。

對絕緣層厚度作調整，參數設定範圍為 $1\mu\text{m}$ 、 $2\mu\text{m}$ 、 $10\mu\text{m}$ 、 $50\mu\text{m}$ 、 $100\mu\text{m}$ 等五個參數，孔徑大小固定為 $1\mu\text{m}$ ，靜電透鏡置於電子源後 0.5mm 處，固定成像於電子源後 18mm 處。結果如表格 3-6 所示，壓差比分別為 $191\text{V}/\mu\text{m}$ 、 $111\text{V}/\mu\text{m}$ 、 $44.8\text{V}/\mu\text{m}$ 、 $21.08\text{V}/\mu\text{m}$ 、 $15.45\text{V}/\mu\text{m}$ ，可得知絕緣層越厚，可使壓差比明顯降低。

對靜電透鏡位置作調整，參數設定範圍為 0.1mm 、 0.5mm 、 1mm 、 5mm 、 10mm 等五個參數，絕緣層厚度固定為 $1\mu\text{m}$ ，孔徑大小固定為 $1\mu\text{m}$ ，固定成像於電子源後 18mm 處。結果如表格 3-7 所示，壓差比分別為 $1187\text{V}/\mu\text{m}$ 、 $532\text{V}/\mu\text{m}$ 、 $378\text{V}/\mu\text{m}$ 、 $191\text{V}/\mu\text{m}$ 、 $172\text{V}/\mu\text{m}$ ，可得知靜電透鏡距離電子源越遠，可使壓差比降低。

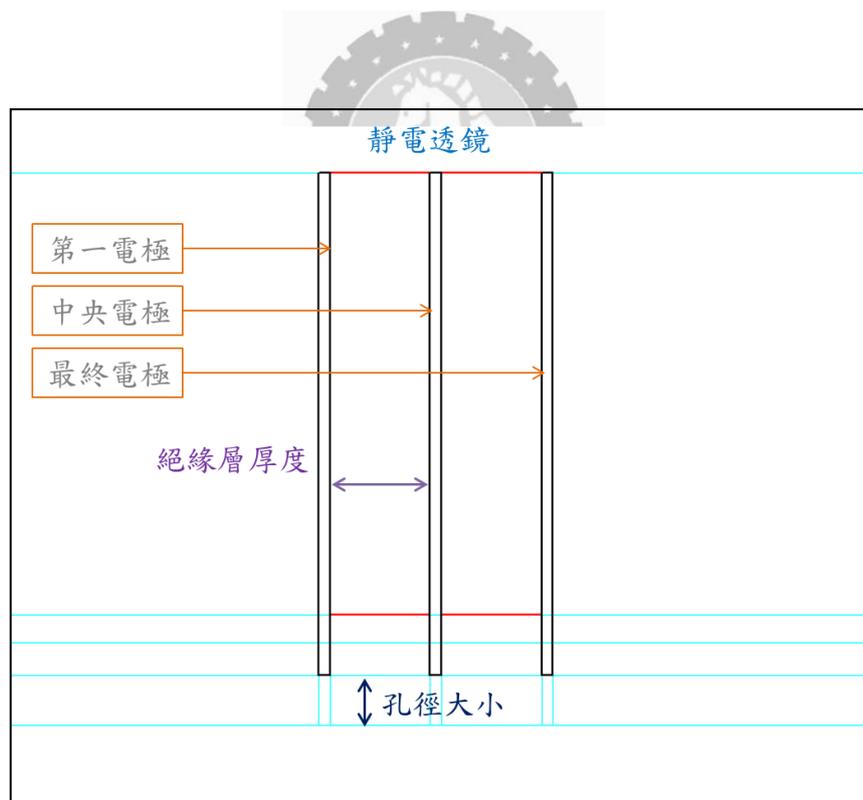


圖 3-6. 靜電透鏡結構示意圖

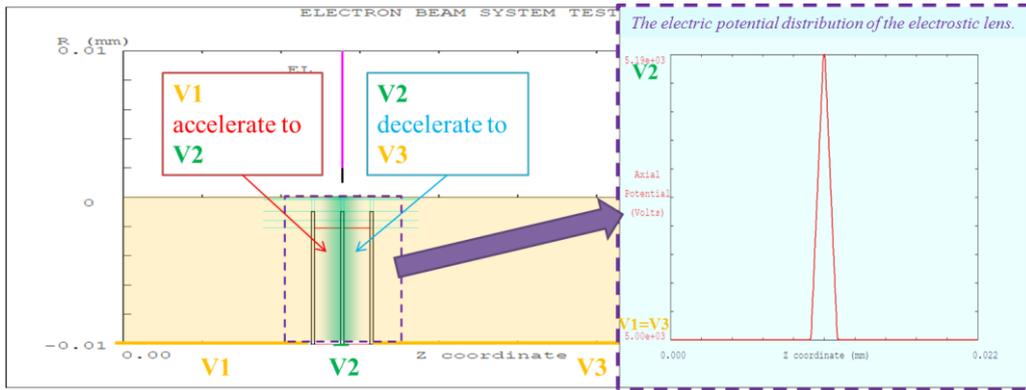
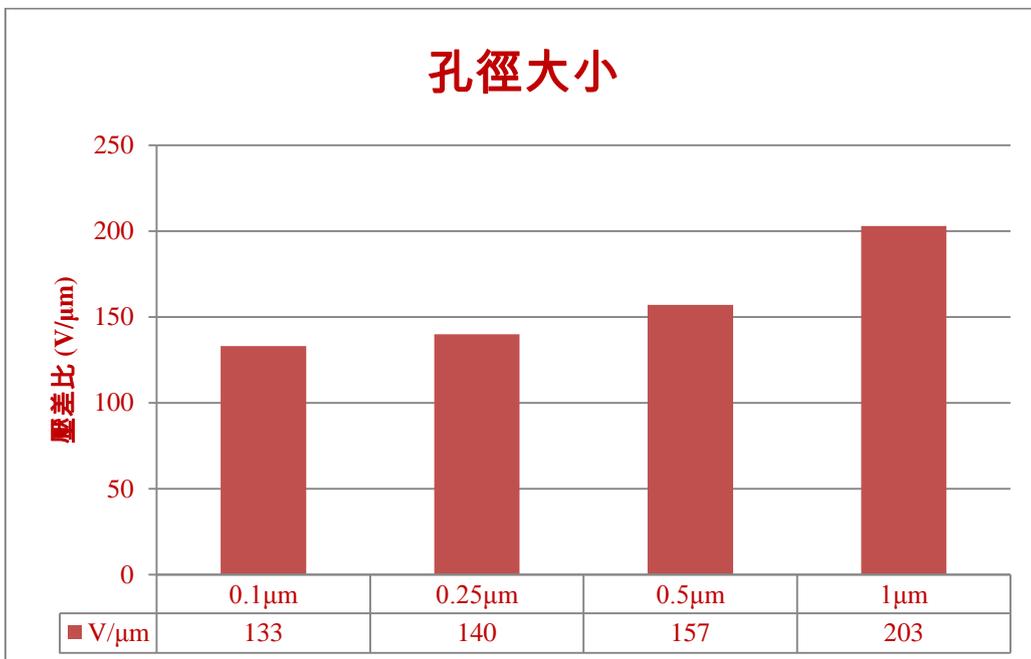
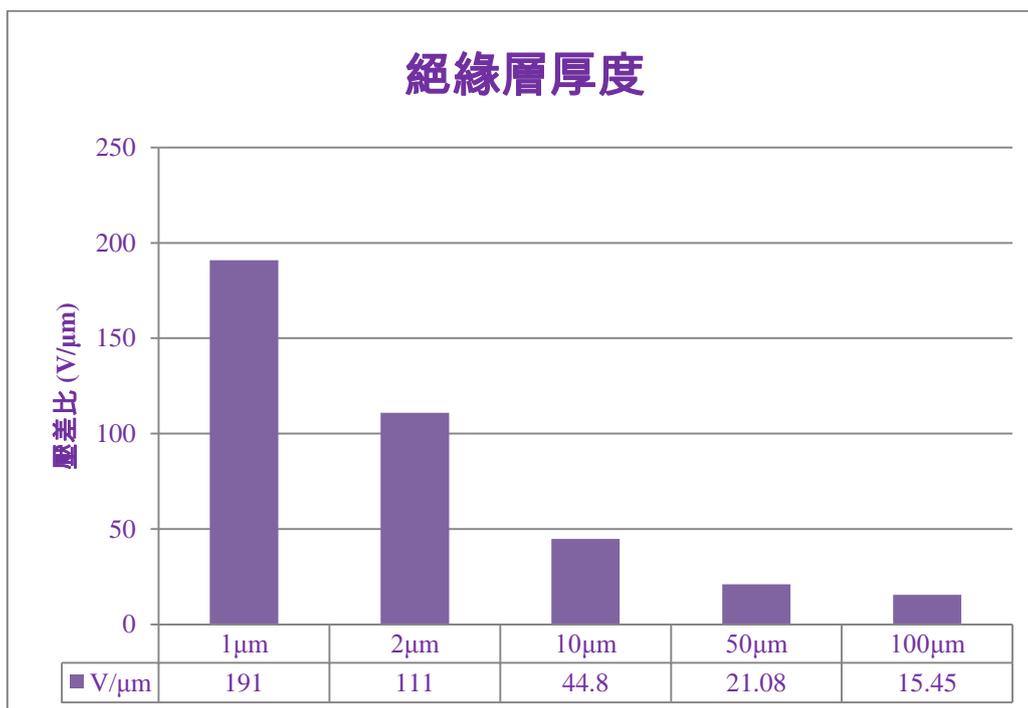


圖 3-7. 單透鏡(einzel lens)電位分布示意圖

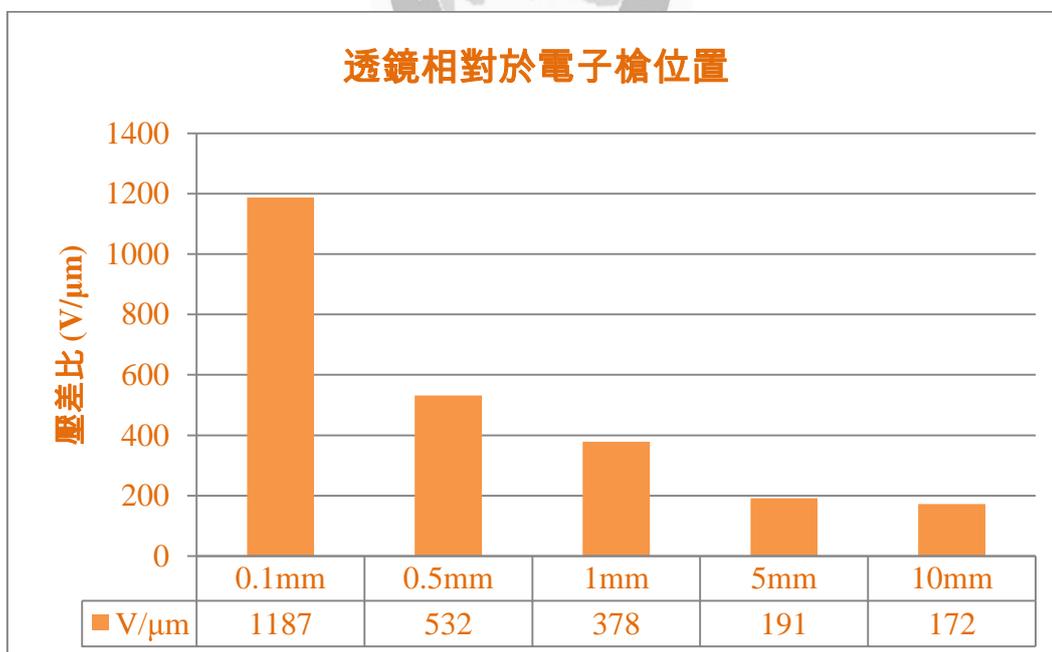
表格 3-5. 孔徑大小與電極間壓差比關係表



表格 3-6. 絕緣層厚度與電極間壓差比關係表



表格 3-7. 透鏡位置與電極間壓差比關係表



3.4. 電子偏轉器 (electron deflector)

3.4.1. 靜電偏轉器模擬

靜電偏轉器基本設計如圖 3-8 所示，由八片電極組成，靠電極電位設定 V_a 、 V_b 、 $-V_a$ 、 $-V_b$ 產生之電場對電子束產生偏移，而偏轉量主要受靜電偏轉器之長度、內徑與電壓等參數影響，靜電透鏡之偏轉量如下公式所示：

$$D = \frac{lV_d}{2dV_a} \text{ (meters)} \dots\dots\dots (3-2)$$

由公式可得：

$$D \propto l \dots\dots\dots (3-3)$$

$$D \propto \frac{1}{d} \dots\dots\dots (3-4)$$

可知靜電偏轉器之偏轉量 D 與靜電偏轉器的長度 l 成正比；而平行靜電板間距 d ，相當於在環型的靜電板中的半徑 r ，可得知偏轉量 D 將會與半徑 r 成反比，將針對此兩個參數特性做模擬驗證。

在模擬設定上，偏轉器內徑之半徑設定為 0.05mm、0.25mm、0.5mm、2.5mm、5mm，分別對偏轉器長度參數設定為 1mm、5mm、10mm、25mm，共二十組參數，使用 MEBS 中之 EDEF 與 ABER 兩程式做靜電偏轉器偏移量的計算，模擬架構如圖 3-9 所示，電子源產生電子束後，經過靜電偏轉器，再透過靜電透鏡聚焦，最後觀察靜電偏轉器每伏特之偏轉量，其模擬結果如表格 3-8 所示。

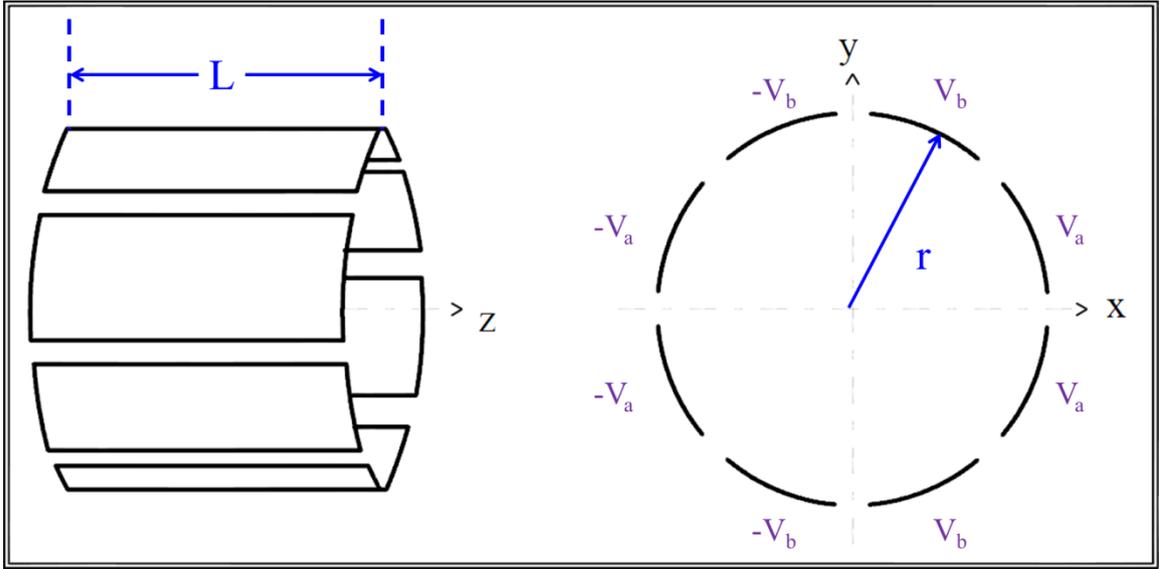


圖 3-8. 靜電偏轉器示意圖[17]

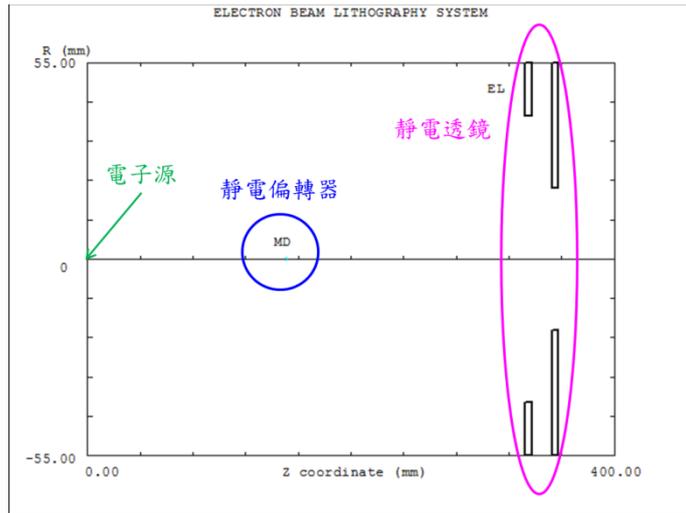


圖 3-9. 靜電偏轉器位置示意圖

表格 3-8. 不同偏轉器長度與偏轉器內徑之偏轉量

偏轉量(mm/volt)		偏轉器長度(mm)			
		1	5	10	25
(mm) 偏轉器內徑半徑	0.05	0.036453	0.204503	0.407010	1.056805
	0.25	0.009151	0.041726	0.081877	0.211590
	0.5	0.005325	0.021655	0.041547	0.106137
	2.5	0.002329	0.005717	0.009756	0.022520
	5	0.001808	0.003687	0.005785	0.012217



第四章 電子光學模擬結果討論

4.1. 電子槍

4.1.1. 微米尺度電子槍

由圖 3-3 所提供之場發射電流 i_e 與淬取電壓 V_{ext} ，依第二章之公式，分別轉換成 $-\ln\left(\frac{i_e}{V_{ext}^2}\right)$ 與 $\frac{1}{V_{ext}}$ ，並將其作圖，可得一線性結果如圖 4-1 所示，此結果與之公式推導結果與圖 2-4 一致，可知此模擬結果符合福勒-諾德漢(Fowler-Nordheim)穿隧效應，並可見本研究使用之模擬軟體在場發射電子槍之模擬結果確有可信度。

在聚焦電極的模擬結果中，可發現在聚焦電極除了本身電位的設定，在不同模組設計下，兩者皆會影響輝度與虛光源性質的優劣。從輝度來看，在聚焦電極相對於針尖電位的電位越高，則整體電子槍之輝度越高，在不同模組之影響幅度皆以 C 模組最佳，B 模組次之，A 模組優化幅度則較低，以聚焦電極相對於針尖電位+100V 時，A 模組為 $8.620 \times 10^8 \text{ A/cm}^2\text{sr}$ ，而 C 模組則可提高至 $3.31 \times 10^{10} \text{ A/cm}^2\text{sr}$ 。從虛光源大小來看，在聚焦電極相對於針尖電位的電位越高，則整體電子槍之虛光源越小，在不同模組之影響幅度皆以 C 模組最佳，B 模組次之，A 模組優化幅度則較低，以聚焦電極相對於針尖電位+100V 時，A 模組為 2.966 nm ，而 C 模組則可縮小至 2.274 nm 。

從電子槍的兩個重要參數，輝度與虛光源大小來看，輝度高與虛光源小的電子槍，其電子槍性能是較優秀的，而 C 模組在這兩項參數的表現上，是優於其它兩種模組設計。

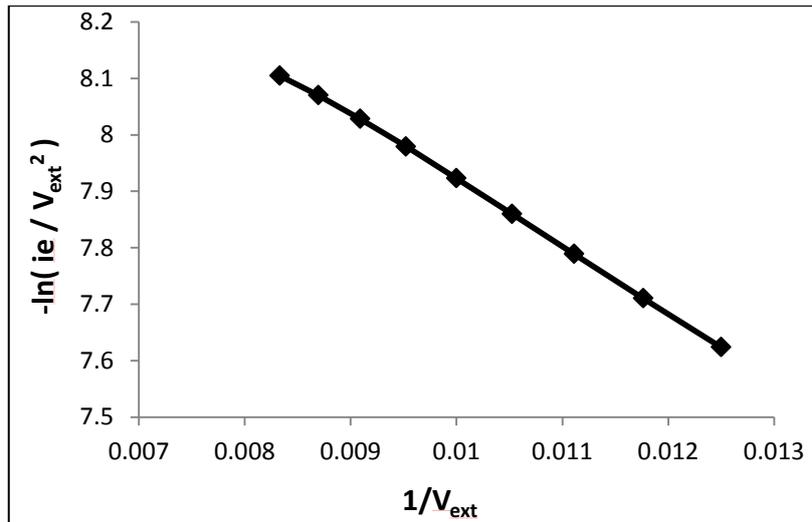


圖 4-1. 福勒-諾德漢(Fowler-Nordheim)穿隧效應線性關係圖(模擬)

4.2. 電子透鏡

4.2.1. 微米尺度電子透鏡

在對三個變數(孔徑大小、絕緣層厚度、靜電透鏡與電子槍之距離)調整，並整理其對中央電極的電位變化後。由表格 3-5 可看出調整孔徑大小從 $1 \mu\text{m}$ 縮小至 $0.1 \mu\text{m}$ ，電極間壓差比從 $203 \text{ V}/\mu\text{m}$ 降至 $133 \text{ V}/\mu\text{m}$ ，縮小幅度有 34.48%；由表格 3-6 可看出調整絕緣層厚度從 $1 \mu\text{m}$ 增加至 $100 \mu\text{m}$ ，電極間壓差比從 $191 \text{ V}/\mu\text{m}$ 降至 $15.45 \text{ V}/\mu\text{m}$ ，縮小幅度有 91.91%；由表格 3-7 可看出調整靜電透鏡與電子槍之距離從 0.1 mm 到 10 mm ，電極間壓差比從 $1187 \text{ V}/\mu\text{m}$ 降至 $172 \text{ V}/\mu\text{m}$ ，縮小幅度有 85.50%。

將影響結果相互比較後，可分別發現整理如下：

- (1) 調整孔徑大小對中央電極的電位影響幅度較小。(表格 3-5)
- (2) 增加絕緣層厚度雖會增加電極間的壓差，但由於厚度增加，整體壓差比有明顯的下降。(表格 3-6)
- (3) 增加透鏡與電子光源的相對距離也對降低電極間的壓差比有明顯的改變。(表格 3-7)

因此在後續的製程上，為了電極間的壓差比安全考量($100 \text{ V}/\mu\text{m}$)，將以調整絕緣層厚度與調整透鏡相對於電子光源的距離為主，並與微機電系統工程師討論在製程合

適的尺寸設計。

4.3. 電子偏轉器

4.3.1. 微米尺度電子偏轉器

電子偏轉器方面，本研究以靜電偏轉器為主，著重於偏轉量(mm/volt)的影響。在固定偏轉器長度，改變靜電偏轉器內徑，模擬結果如圖 4-2 所示，可發現靜電偏轉器偏轉量確實與靜電偏轉器內徑呈反比，內徑越小時，偏轉量越高，並且長度越長的靜電偏轉器下，效果越明顯。在固定靜電偏轉器內徑，改變靜電偏轉器長度，模擬結果如圖 4-3 所示，可發現靜電偏轉器偏轉量確實與靜電偏轉器長度呈正比，隨著長度增加，偏轉量穩定地線性增加，同時也可發現在孔徑越小的情況下，偏轉量變化的幅度有明顯地增加。根據第二章與第三章公式推導可知以下兩個關係，而從圖 4-2、圖 4-3 兩個模擬結果中亦符合此趨勢：

(1) $D \propto l$ ：靜電偏轉器之偏轉量 D 與靜電偏轉器的長度 l 成正比。

(2) $D \propto \frac{1}{r}$ ： r 為環型的靜電板中的半徑，偏轉量 D 與靜電偏轉器內徑半徑 r 成反比。

由於靜電偏轉器設計初期在物理結構上可針對靜電偏轉器的長度與內徑作調整，其中與長度的線性關係在本研究已可驗證，並且在內徑較小的情況下，長度的調整可較大幅度影響偏轉量。

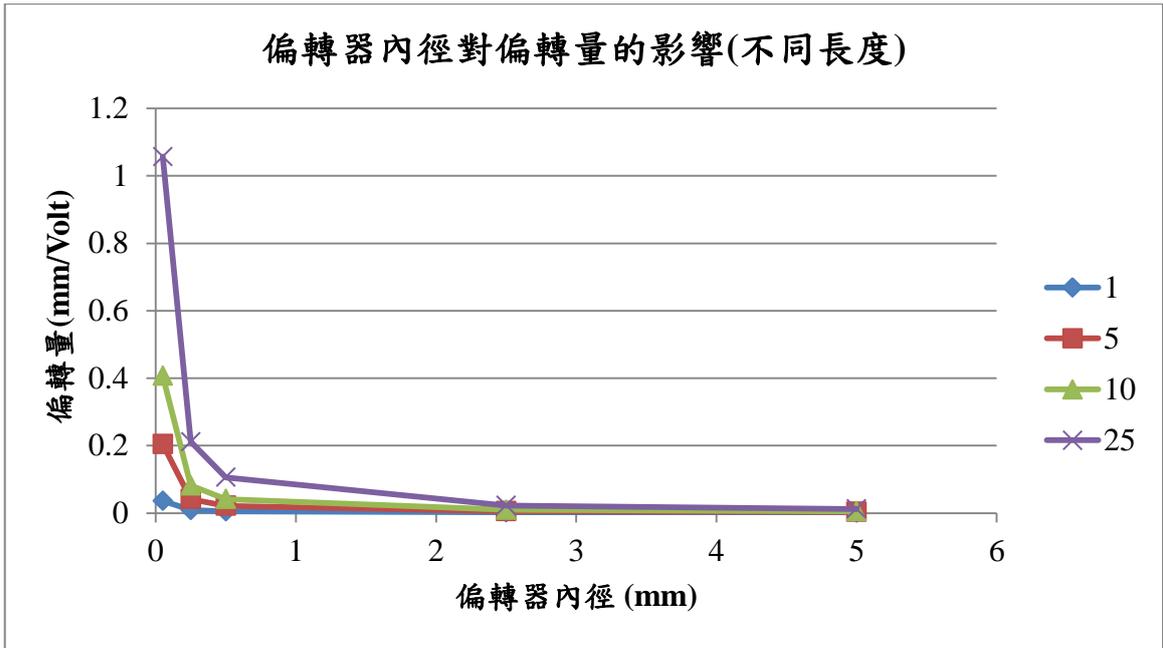


圖 4-2. 不同長度下，偏轉器內徑對偏轉量的影響

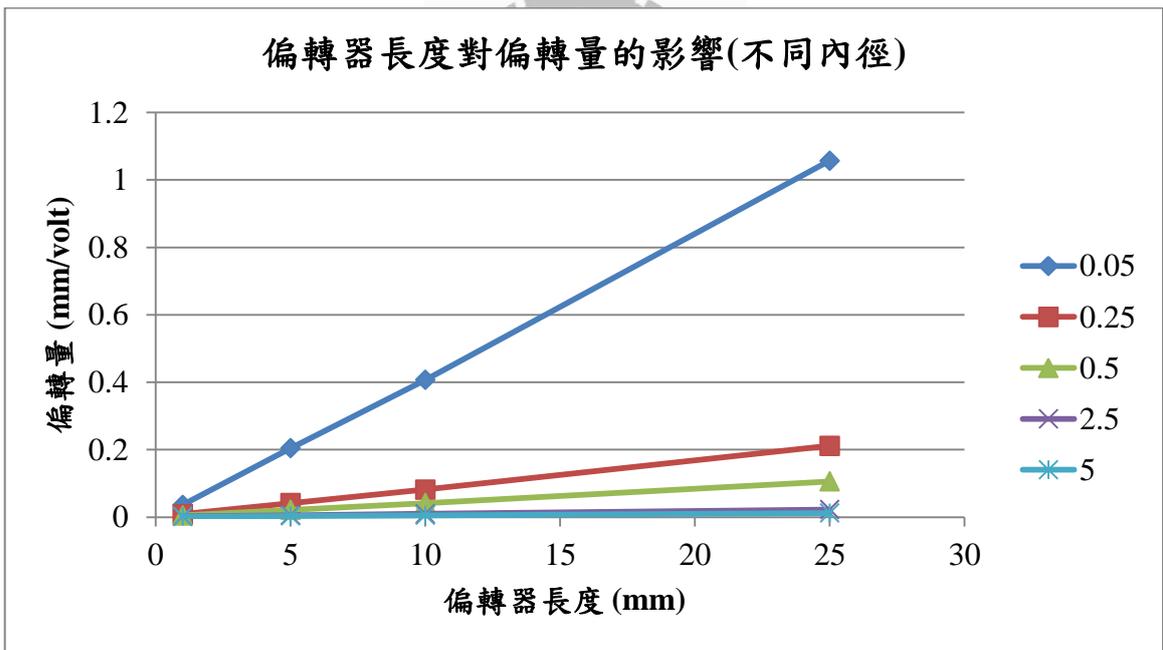


圖 4-3. 不同內徑下，偏轉器長度對偏轉量的影響

第五章 結論

5.1. 研究結論

在微米尺度電子槍方面，微米尺度電子槍檔案已建構完成，並已進入製程階段，後續的電子束微調設計也已完成，可在微型掃描式電子顯微鏡提供電子源的細部調控，以求達到當前設計下的最佳輝度。從本研究調整結果可知電子槍優化設計部分，在聚焦電極低於針尖與淬取電極時，聚焦電極對電子槍性質的優化可得到較高的輝度與較小的虛光源大小，進而使在高倍率的掃描下，取得高解析度的影像，提升電子顯微鏡的應用價值。

在微米尺度靜電透鏡方面，已完成微米尺度靜電透鏡的模擬建檔，考慮微機電製程下的材料特性，以安全為優先下注意電極之間的壓差比，本研究顯示，微米尺度靜電透鏡在孔徑大小的調控範圍較不如絕緣層厚度與透鏡位置等兩參數的調整，尤以絕緣層厚度的調整，較為明顯，且在製程上 400 μm 以上的絕緣材料也有規格品可供選擇，是一個較為合適的調整參數，其次便是在透鏡位置上作微調，從模擬結果顯示，在電子槍強度 5000V 的情況下，距離 0.5mm 以內時，壓差比會明顯提升，故在整合調整時，應注意靜電透鏡的設計勿與電子槍太過接近。

在微米尺度電子偏轉器下，已完成微米尺度靜電型偏轉器的模擬建檔，本研究結果顯示在考慮材料的安全壓差比範圍內，盡可能縮小偏轉器內徑與延伸偏轉電極長度設計，可提供較大的偏轉量，進而得到較好的控制。最後的設計參數將會影響到陣列式微米尺度電子顯微鏡中每組電子顯微鏡系統彼此之間的時間距，此一距離尚需考量到其他零組件的擺放，如電子偵測器、樣品載台、切割刀具等，在最終整合前需做最佳化調整。

5.2. 未來研究方向

近年來世界各家電子顯微鏡公司與相關儀器公司如 FEI(美國)、Zeiss(德國)、JOEL(日本)、Hitachi(日本)等，已經逐漸重視桌上型掃描式電子顯微鏡的商業價值，而亞洲的電子顯微鏡公司如 TEMIC-台灣電鏡儀器股份有限公司(台灣)[22]、KYKY-北京中科科儀股份有限公司(中國)、COXEM(韓國)等新創公司也進入桌上型掃描式電子顯微鏡市場的角逐。而 Zeiss、Gatan、Diatom 等電子顯微鏡相關儀器公司，也正在

共同開發陣列型的多電子束顯微鏡。

因此本研究所探討的微米尺度電子光源、微米尺度電子透鏡與微米尺度電子偏轉器，通過實驗與模擬的驗證後，將其整合成一微型掃描式電子顯微鏡並結合陣列式系統，在此研發過程中，除了本研究所重視的微機電製程的精度與校準機制外，尚需要各方面的技術支持，如切割刀具的精度、樣品載台的移動精度、電子偵測器的敏感度等，是陣列型微米尺度掃描式電子顯微鏡需要跨過的門檻，最後付諸於製程與產線，發展創意並賦予此儀器更高的附加價值，成為具有商業價值的精密儀器。



圖 5-1. TEMIC(台灣) - 桌上型電子顯微鏡 EM-100

參考文獻

- [1] 陳力俊(1994)。材料電子顯微鏡學，修訂再版。新竹市：行政院國家科學委員會精密儀器發展中心。
- [2] Olympus America Inc. (2012). *Numerical Aperture and Resolution*.
<http://www.olympusmicro.com/primer/anatomy/numaperture.html>
- [3] 章效鋒(2006)。清晰的奈米世界：初探電子顯微鏡，初版。台北市：五南圖書出版股份有限公司。
- [4] 陳家全、李家維、楊瑞森(1991)，生物電子顯微鏡學，初版。新竹市：國科會精密儀中心。
- [5] 陳福榮(2012)。電子顯微學上課講義。新竹市：國立清華大學。
- [6] Denk, W. and Horstmann, H. (2004). *Serial Block-Face Scanning Electron Microscopy to Reconstruct Three-Dimensional Tissue Nanostructure*. PLoS Biology (November 2004, Volume 2, Issue 11, e329): 1900-1909.
- [7] Marx V. (2013). *Brain mapping in high resolution*. Nature (Vol 503): 147-152.
- [8] Sazia A. E., Syed K. I., Touhidur R. et al. (2011). *A Precision Dose Control Circuit for Maskless E-Beam Lithography With Massively Parallel Vertically Aligned Carbon Nanofibers*. IEEE Transactions On Instrumentation And Measurement, Vol. 60, No. 4: 1132-1140.
- [9] Hak K., Changho H., Jinkwang K. et al. (2004). *Full MEMS monolithic microcolumn for wafer-level array*. J. Vac. Sci. Technol. B 22(6): 2912-2916.
- [10] Baylor L. R., Lowndes D. H., Simpson M. L., Thomas C. E., Guillorn M. A. et al. (2002). *Digital electrostatic electron-beam array lithography*. J. Vac. Sci. Technol. B 20(6) : 2646-2650.
- [11] Baylor L. R., Gardner W. L., Yang X., Kasica R. J., Guillorn M. A. et al. (2004). *Initial lithography results from the digital electrostatic e-beam array lithography concept*. J. Vac. Sci. Technol. B 22(6): 3021-3024.
- [12] Neo Y., Takeda M., and Soda T. (2009). *Emission and focusing characteristics of volcano-structured double-gated field emitter arrays*. J. Vac. Sci. Technol. B 27(2): 701-704.
- [13] 應根裕(1989)。電子光學，一版。台北市：亞東書局。
- [14] JEOL Ltd. (1996-2014). 走查電子顯微鏡 基本用語集。

http://www.jeol.co.jp/words/semterms/contents_list.html?category=51

- [15] University of Colorado. (2001). *Field emission - Fowler-Nordheim tunneling*.
<http://ecee.colorado.edu/~bart/book/msfield.htm>
- [16] Eric Munro. *Munro's Lecture Note*.
- [17] Munro's Electron Beam Software Manual.
- [18] Soda T., Nagao M., Yasumuro C. et al. (2008). *Fabrication of Volcano-Structured Double-Gate Field Emitter Array by Etch-Back Technique*. Japanese Journal of Applied Physics (Vol. 47, No. 6): 5252–5255.
- [19] Neo Y., Soda T., Takeda M., Nagao M. et al. (2008). *Focusing Characteristics of Double-Gated Field-Emitter Arrays with a Lower Height of the Focusing Electrode*. The Japan Society of Applied Physics (053001): 1-3.
- [20] Juliano Fujioka Mologni, Marco Antonio Robert Alves, Filipe Braumgratz et al. (2010). *Optimizing the e-beam profile of a single carbon nanotube field emission device for electric propulsion systems*. Journal of Aerospace Technology and Management, V. 2, n. 1: 9-15.
- [21] J. M. Fang, T. W. Huang, Y. L. Lin, F. R. Chen. (2013). Design of Micro-scale Electrostatic Lens for Miniature Scanning Electron Microscope. The First East-Asia Microscopy Conference: 191-192.
- [22] 張維祐、曾英碩、方建閔、陳福榮(2013)。新世代桌上型電子顯微鏡的設計與製作。科儀新知，第 34 卷五期：4-7。

附錄

m	米	長度單位。
cm	厘米	長度單位。1 cm = 10^{-2} m。
mm	毫米	長度單位。1 mm = 10^{-3} m。
μm	微米	長度單位。1 μm = 10^{-3} mm = 10^{-6} m。
nm	奈米	長度單位。1 nm = 10^{-3} μm = 10^{-6} mm = 10^{-9} m。
Å	埃	長度單位。1 Å = 0.1 nm = 10^{-10} m。
voxel		立體像素單位。
teravoxels		立體像素單位。(1 teravoxels = 10^{12} voxels)
A	安培	電流單位。
nA	奈安培	電流單位。1 nA = 10^{-9} A。
sr		立體角的國際單位。
A/cm ² sr		輝度單位。
V	伏特	電壓單位。
Tesla	特斯拉	磁通量密度單位(國際單位制)。
mTesla	毫特斯拉	磁通量密度單位(國際單位制)。1 mTesla = 10^{-3} Tesla
Gauss	高斯	磁通量密度單位(CGS 制)。1 Tesla = 10^4 Gauss