

II、雙層閘極：

雙層閘極為一對分離閘極，其上有一兩支指狀閘極，分離閘極跟指狀閘極之間隔著用 PMMA 所形成的絕緣層，使分離閘極跟指狀閘極可以獨立控制偏壓大小。

(1) 分離閘極 (split gate)：

分離閘極的作法及用意如串聯分離閘極，圖 3-6 為其示意圖。

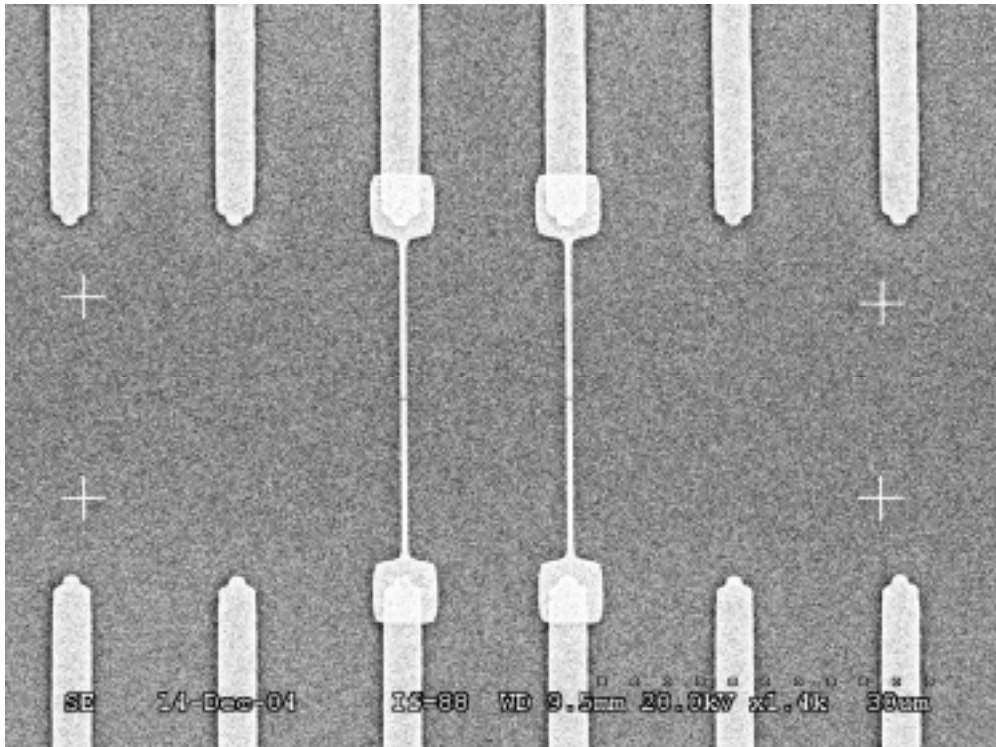


圖 3-6 分離閘極的電子顯微鏡圖像。四個十字為後續電子束微影所用來對準的對準點。

(2) 絕緣層 (insulator)：

當 PMMA 經過長時間的曝光之後，便會從正電子阻劑的特性轉變成負阻劑的特性，而不溶於丙酮，而形成一層絕緣層，使位在絕緣層下層跟上層的金屬閘極可以獨立加不同的訊號。絕緣層厚度由膜厚計 (Alpha step) 測得厚度約 80-90nm，厚度控制略有難度，因為在做長時間大電流曝光時，曝光的電流大小會衰減，使得劑量會有所不同，而測試厚度跟劑量的結果，劑量相差 1 cm/nC 時，厚度差約為 10-20nm(由 Alpha step 測得)。圖 3-7 為絕緣層示意圖。

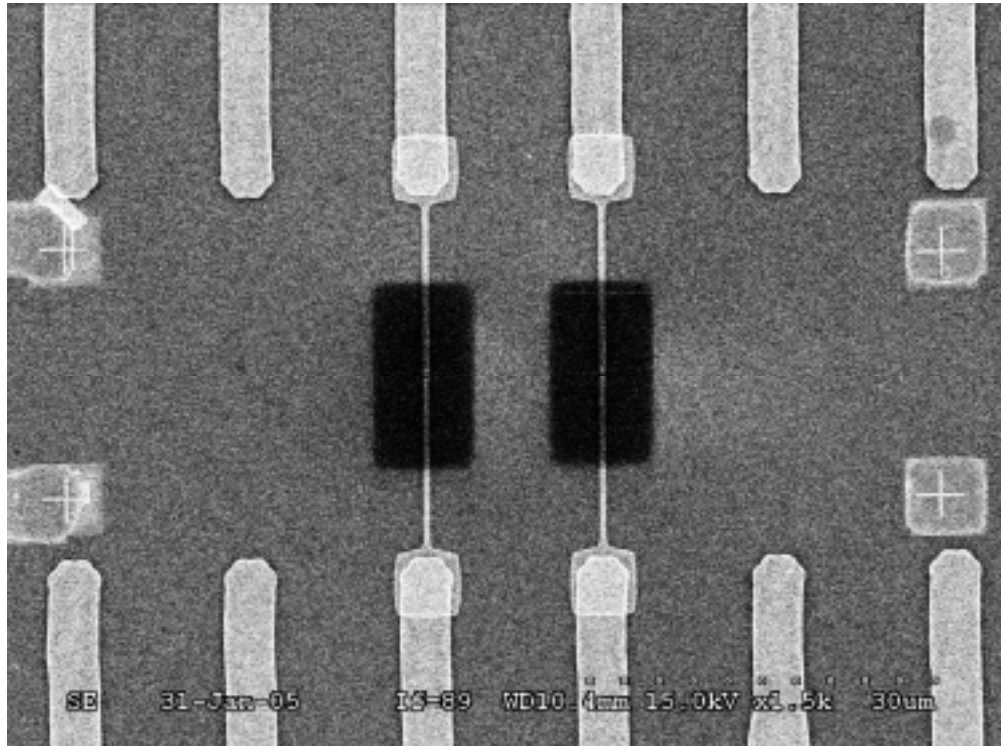
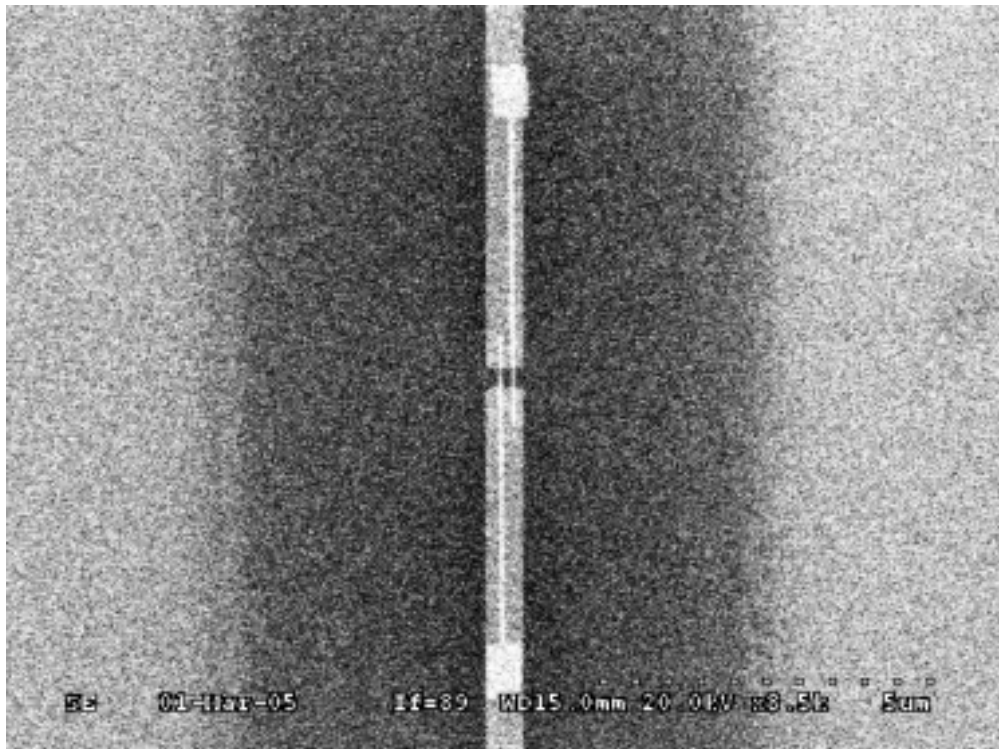


圖 3-7 絕緣層之電子顯微鏡照片。圖中黑色部份即為絕緣層，由於絕緣層無法反射二次電子束，因此在電子顯微鏡下所看到的圖像是無訊號的而呈現黑色。

(3) 指狀閘極 (finger gate):

指狀閘極的寬度大約 70-80nm，且一對指狀閘極需精確的跨接在分離閘極上，因此製作上難度也較高。在製作上，需考慮到鄰近效應 (proximity effect) 和電子散射 (scattering) 的影響，所以在電子阻劑的厚度比前幾道製程還薄 ($\sim 1000\text{\AA}$)，若要有更好的解析度，可以加大加速偏壓，但由於擔心破壞二維電子氣，所以不做加速偏壓的調整。在 NPGS 上的設定，line spacing 還是採用 50nm，而設計上線寬也是 50nm，所以電子束在曝光指狀閘極時，只曝一次即可，這也可以降低鄰近效應的影響，而在曝光劑量上，其容許度算大，從 0.8-1.05 cm/nC 皆可成功，但由於 beam blanker 在關切換成開時，有時電流無法馬上到達原本預設值，而指狀閘極的曝光時間很短 (不到一秒)，所以會有曝光不足的現象，因此可以在曝光指狀閘極時，先在閘極末端曝一個方塊，再去曝指狀閘極，降低因此曝光不足的現象。圖 3-8 (a) (b) 為指狀閘極電子顯微鏡下的圖片。

(a)



(b)

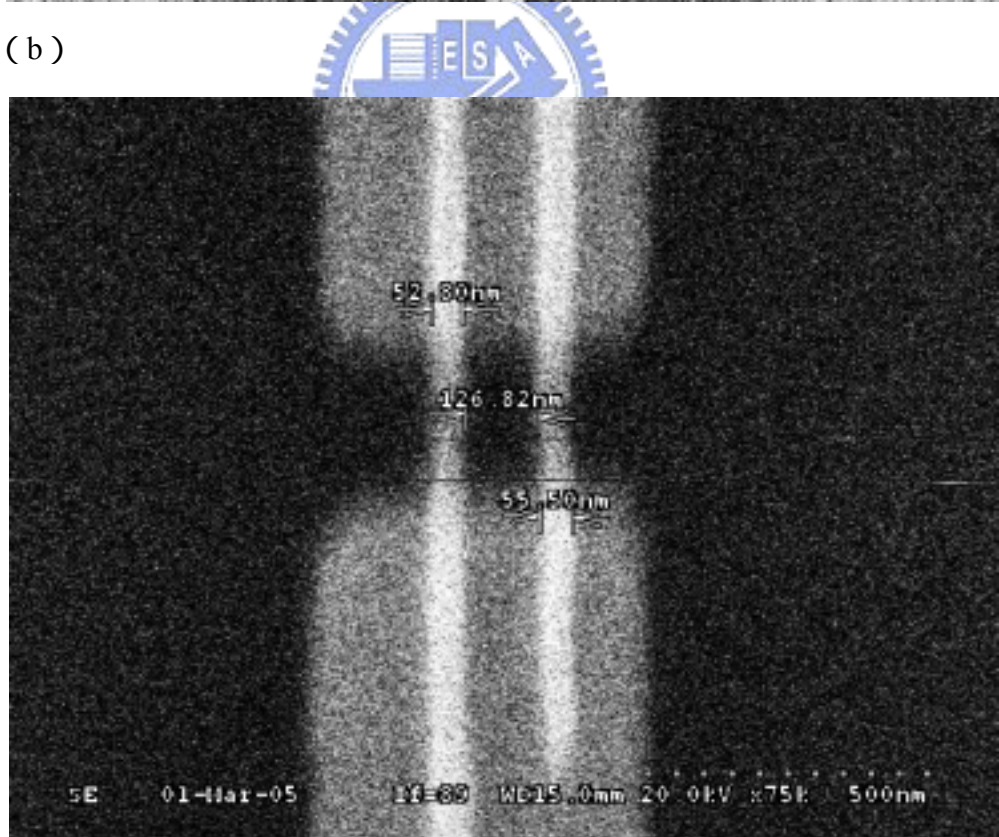


圖 3-8 (a) 指狀閘極的電子顯微鏡影像，放大倍率 8.5k。(b) 指狀閘極，閘極線寬約 50-70nm，間距約 120nm。

(4) 跨線閘極 (cross-gate):

此閘極是用來將電子束微影及光微影製作的金屬閘極給連接起來，使我們可以外加訊號到電子束微影所製作的閘極上。當跨線閘極完成後，電子束微影也告一段落。跨線閘極如圖 3-9 所示。

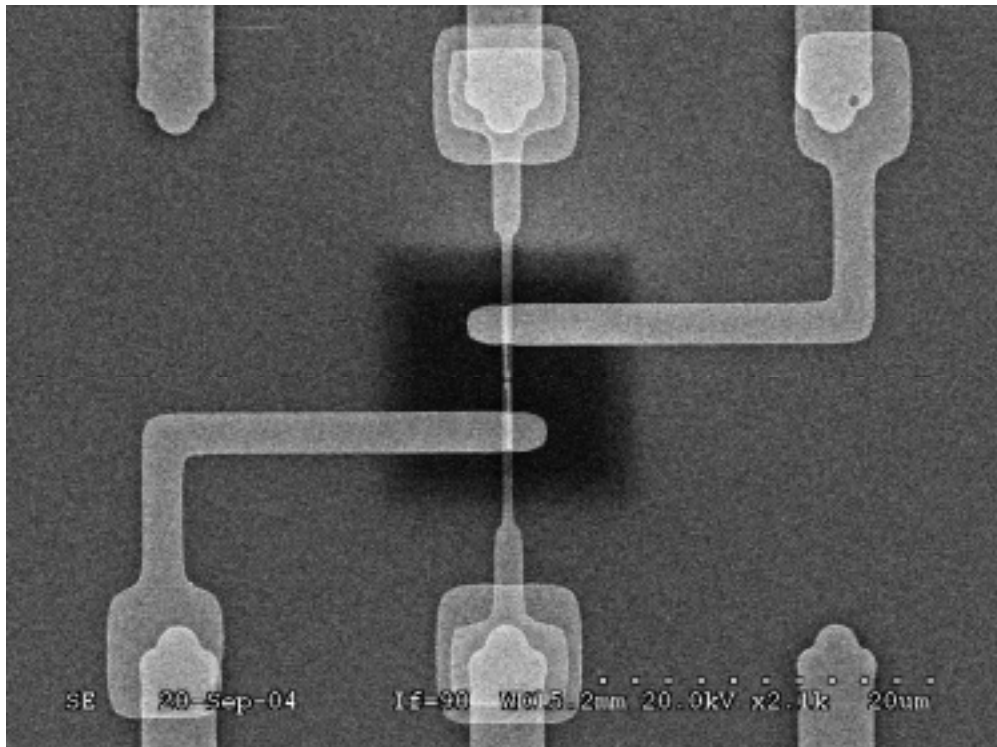


圖 3-9 跨線閘極的電子顯微鏡照片。

3-2 微影技術 (lithography)

微影技術是現今在製作奈米元件上一個非常重要的技術，在我們的樣品製作上，主要是利用光微影 (photolithography) 跟電子束微影 (e-beam lithography) 來製作樣品，光微影由於曝光的光源波長的關係，因此其解析度沒電子束微影好，但在製作大尺寸的元件，電子束微影會較耗時間，而光微影適合大面積的曝光，所以兩者技術配合使用，每一個製作環節都需小心注意。以下便分別介紹光微影跟電子束微影的原理以及實驗步驟。

I 光微影製程技術 (photolithography)

此技術是利用曝光機(mask aligner)將光罩上的幾何圖案給轉移至基板表面的光阻層上的一種方法。曝光機的光源大部分是紫外光，紫外光的波長約 200-400nm，所以其曝光的解析度約為 $2\mu\text{m}$ (受限於光源波長)，若要製作更細小的線寬，則可用較短波長的光源或是別的微影技術來製作(ex:電子束微影)。我們在光微影上所使用的曝光機是 Karl Suss MJB-3，屬於 i-line 光源，波長 320nm，光阻液是 AZ5214E，此光阻具有正光阻劑的特性，且經由反轉烤(reversal bake)以及全面曝光(flood exposure)的步驟，可將其特性轉為負光阻劑的特性，負光阻劑在顯影完之後，光阻層會有縱向內切的情形，這樣的結構較利於蒸鍍完的舉離(lift off)的進行。

以下介紹光微影的詳細製作流程：

- (a) **清洗基板(clean substrate)**：基板表面的乾淨度會直接影響樣品製作的好壞，所以這一步驟對製程而言，是非常重要的。首先將切割好的基板依序放置在丙酮(acetone)、酒精(ethanol)溶液中，以超音波震盪器震盪數分鐘至基板看起來無髒東西附著即可，然後以氮氣吹乾。
- (b) **塗佈(spin coating)**：利用光阻塗佈機，可以把基板上的光阻，利用旋轉離心力使光阻均勻分布於基板上，旋轉的速度與時間可以控制光阻塗佈的厚度。光阻上塗佈時除了要注意厚度外，也必須注意塗佈時光阻是否有均勻，且是否有髒東西附著在光阻表面，這些因素都會影響到製作樣品的良率。另外在作歐姆接觸與金屬閘極微影製程的時候，上光阻前，必須把基板浸泡在氫氧化銨與去離子水的混合溶液中 ($\text{NH}_4\text{OH}:\text{DI water} = 1: 15$)20 秒，再浸於去離子水數十秒後用氮氣吹乾，主要是為要去除基板表面的氧化物，可以提升歐姆接觸與閘極的品質。

塗佈條件為：

光阻液：AZ5214E

塗佈機轉速：10 sec - 1000 rpm：主要功能是將光阻能均勻分布在基板上。

40sec - 5000rpm：確定光阻厚度的轉速。

光阻厚度約為 $1.4\mu\text{m}$ (由 alpha steper 量測光阻膜厚)。

- (c) **預烤(pre bake)**：目的是為了讓光阻內殘餘的溶劑蒸發，並且可避免光阻太軟，而讓樣品吸附於光罩上影響曝光品質。一般烘烤大概有平台加熱器(hotplate)及封閉式烤箱(oven)這兩種。兩者不同處在於使用平台加熱器，光阻溶劑是由光阻底部逐漸蒸發；而使用封閉式烤箱，是由光阻表面開始加熱，底部的溶劑較不易蒸發。光阻烤的太乾會使得在顯影或舉離時不容易將光阻移除；太軟則會黏住光罩，這都是必須注意的。

預烤條件：

溫度： 90°C

時間：90 秒。

- (d) **曝光(exposure)**：在做好對準(alignment)的動作後，會進行曝光，此步驟是為了將光罩的圖形轉移至光阻上。我們採用的曝光方式為接觸式曝光(contact printing)，接觸式曝光指的是光罩直接貼附在光阻層上，其優點是解析度較高($\sim 1\mu\text{m}$)；缺點是因為光阻直接接觸光罩，會容易污染光罩，所以在曝光前也需注意光罩是否乾淨，並不定期以硫酸清洗光罩。圖形轉移的原理是因為曝光的區域會造成光阻內的化學感光劑感光，而溶於顯影液中，通常只要達到所需的曝光劑量(dosage)，就能使曝光區的光阻層進行光化學轉移。光阻的厚度、光源的能量大小、曝光的時間是影響曝光劑量的重要參數。除此之外，若在曝光時，光罩跟光阻層沒有接觸好，則轉移的圖形會有鋸齒狀或是邊緣不陡峭的情形。

曝光條件：

光波長：320nm

強度： $5\text{mW}/\text{cm}^2$

曝光時間：60 秒。

- (e) **反轉烤(reversal bake)**：將已曝光的光阻放在加熱平板上，讓已曝光的區域的光阻結構改變，而不會溶於顯影液之中，而未曝光的區域則不會有影響，使得在全曝光時，

先前未曝光的區域之光阻會做光化學變化。

反轉烤條件：

反轉烤溫度：120°C

時間：90 秒。

- (f) **全曝光(flood exposure)**：這步驟讓原本未曝光的區域接受曝光，使其溶於顯影液內，而移留原本圖形曝光的區域。這時的光阻已經變成負光阻的特性，具有縱向內切的特性。

曝光條件：

光波長：320nm

強度：5mW/cm²

曝光時間：98 秒。

- (g) **顯影(development)**：光阻在接受曝光後會比未曝光的區域較易溶於顯影液。因此將曝光後的樣品放於顯影液中，可以在光阻層上完成圖像的轉移。顯影液的濃度、顯影溫度都會影響顯影速率，我們使用的顯影液為的混合溶液，顯影時間為 30~40 秒。完成顯影步驟，須再浸於去離子水數十秒，避免顯影液殘留，然後以氮氣吹乾表面，即可得設計圖形。

顯影條件：

顯影液：AZ400K：DI Water =1：4

顯影溫度：~25°C。

顯影時間：35 秒。

以上便是光微影的製作步驟，顯影完的圖形，會依不同的需求再去做下一道製程。

II 電子束微影製程(E-Beam lithography process)

電子束微影技術是應用掃描式電子顯微鏡的概念發展而來的，其波長為深紫外線的數千分之一，因此解析度相對於光微影也較好，具有 $0.1\ \mu\text{m}$ 以下的解析度。電子束微影基本配備為一台掃描電子顯微鏡(Scanning Electron Microscopy, SEM)，掃描式電子顯微鏡的工作原理是利用鎢絲加熱產生電子，再利用高電壓(30KV)把電子往樣品台的方向加速，形成高能量的電子，經過一連串的电磁透鏡聚焦至樣品，再以二次電子偵測器收集反射的二次電子來形成影像。聚焦後的電子束，直徑極小，再搭配一套電腦介面控制軟體(Nanometer Pattern Generation System, NPGS)，用以控制電子束偏移位置與屏蔽板 (beam blanker，控制電子束開關)，如此便可以將電子束當作曝光源。至於要曝光的圖形則利用Design CAD(用來設計電子束微影圖案的輔助軟體)設計圖案，利用NPGS控制 beam blanker與線圈中的電場或磁場偏折掃描電子束在光阻(PMMA)上作區域選擇性曝光，經過顯影步驟後，便可得到轉移的電子束微影圖形。而它的缺點為樣品的製作速度慢，而且利用電子束曝光會有電荷效應(charge effect)與近接效應(proximity effect)，而使用的光阻PMMA蝕刻抵擋力差，必須改進製程才能克服這些問題。下面將介紹電子束微影製程步驟：

- (a) **清潔樣品表面(clean process)**：我們將完成好幾道製程的樣品放置於乾淨的燒杯，然後用丙酮、酒精以沖洗樣品表面，最後用氮氣吹乾，完成清潔。
- (b) **塗佈電子阻劑(PMMA priming)**：將清潔乾淨的樣品放置於塗佈機(spinner)，將電子阻劑(PMMA)滴於樣品上，並使用光阻塗佈機讓光阻均勻分布樣品表面。我們使用的950PMMA (A5)是 MicroChem 公司所配置固定濃度的 PMMA 電子阻劑(PMMA 本身是多分子塑化聚合物，為粉末狀，溶解於甲氧基苯中)，濃度的多寡影響電子阻塗劑塗佈的厚度曲線，另外塗佈機的轉速、外在環境的溫度、濕度，以及樣品的尺寸，也都會影響阻劑的厚度。電子阻劑的塗佈是一道很重要的步驟，厚度必須固定，且均勻，才不會影響曝光劑量，通常厚度可以用塗佈完的阻劑顏色來判斷。

(c) 預烤(pre-bake) :

此步驟是用來將塗佈在樣品上的電子阻劑烤乾，使其附著力更好，我們預烤的條件為平台加熱板設定為 180°C，烤的時間為 5 分鐘。

(d) 曝光 (exposure): 將 NPGS 上所設計的圖形，透過軟體去控制電子束，可使電子束在樣品上掃描出相對應的圖形，搭配所測得的曝光劑量，即可成功的將圖形轉移至電子阻劑上。

(e) 顯影 (develop):

將曝光的樣品放入顯影液(以 MIBK : IPA = 1 : 3 的比例調成，具有非常高解析度與低敏感度的特性)內，可以將被足夠曝光的 PMMA 給溶解，顯影液的濃度、溫度、以及顯影時間都會影響顯影完後的圖形。我們所測得到的顯影條件為溫度約為 25°C，顯影時間 75 秒。然後再放入 IPA(異丙醇)溶液內，約 25~30 秒，此步驟即定影，最後以氮氣吹乾，完成電子束微影製程。

理論上，當加速偏壓達 30KeV 至 40KeV 時，其電子束的尺寸 (beam size) 可被侷限至 3-4nm，因此解析度極高，但由於近接效應的限制，會使得在製作尺寸更小的元件時，會面臨圖像失真以及線寬不符的問題，近接效應產生主要是跟加速偏壓、樣品的材料以及光阻厚度有關，其中以加速偏壓的影響最大，但由於擔心過大的加速偏壓會破壞樣品，所以在製作較小的線寬時，會調整光阻厚度，以及曝光劑量參數，而不改變加速偏壓。電子束微影的每一環節步驟都很重要，要提高樣品的良率，每個步驟都需小心注意！

3-3 濕式蝕刻(wet etching)

在做完第一道光微影的顯影之後，會進行濕式蝕刻的步驟，此步驟是用來定義出二維電子氣的活動範圍，我們採用的是淺式蝕刻 (shallow etching)，所謂淺式蝕刻，指的是我們蝕刻掉樣品中的摻雜層(doping layer)深度即停止，深度約 50-60nm，當摻雜層被移除，底下就無法誘導電子形成二維電子氣，即可成功定義出二維電子氣的活動範圍，淺式蝕刻比起蝕刻深度超過二維電子氣深度(~100nm)的好處是較少有漏電流的情形，因

為超過二維電子氣的深度時，若是蝕刻的平台結構沒有縱向內切的外型時，很容易在跨接金屬閘極時，接觸到二維電子氣的介面，容易造成漏電流，使得量測的訊號變差。

我們使用的蝕刻液配方為硫酸 (H_2SO_4): 雙氧水 (H_2O_2): 去離子水 (DI water) = 1 : 8 : 160，為了要使蝕刻速率降低，增加蝕刻的均勻度，我們會將蝕刻液降溫至 4°C 左右，此時的蝕刻速率約 $1200\text{\AA}/\text{min}$ ，蝕刻時間相對增加，樣品的蝕刻也會較均勻。

3-4 熱蒸鍍技術 (thermal evaporation)

熱蒸鍍是屬於物理氣相沈積的一種，其原理即是在高真空 ($3 \times 10^{-6} \text{ torr}$ 左右) 的環境下，將固態狀的蒸鍍材料放置於鎢舟(tungsten boat)上，通一電流使鎢舟加熱升溫達到蒸鍍材料熔化或蒸發溫度，讓原子蒸發擴散並向上沉積於樣品表面上。

以下簡單介紹實驗步驟：

(a) **清潔欲蒸鍍之材料**：在將蒸鍍源(source)，放進真空腔之前，要先以丙酮、酒精清洗，並用氮氣吹乾，避免有雜質附著。

(b) **置放蒸鍍源及樣品**：將清洗好的蒸鍍源放在鎢舟中間，將樣品用碳膠或銅膠貼至樣品座上，盡量使蒸鍍源跟樣品的相對位置為一垂直水平方向的直線，並檢查石英震盪器擺放的位置是否恰當，盡量靠近樣品，讀到的值才會較正確。檢查完畢後再將擋板 (shutter) 隔開樣品台以及蒸鍍源，這是因為剛汽化的蒸鍍源的表面較易含雜質，所以必須先用擋板阻隔，等蒸鍍的速率穩定之後再打開。

(c) **抽真空**：一般的真空系統至少需要兩個在不同真空度工作的幫浦，一個負責在低真空度時粗抽真空腔；另一個則是使真空腔可以達到更高真空度。我們負責粗抽的是機械幫浦 (mechanical pump)；在高真空範圍工作的是渦輪幫浦(turbo pump)。由於渦輪幫浦在低真空運轉時，容易因為環境中的壓力過大造成葉片斷裂，所以必須先用機械幫浦將壓力抽至 $2 \times 10^{-2} \text{ torr}$ 左右，再打開高真空閘門，開啟渦輪幫浦，約過一小時左右，壓力可達 $3 \times 10^{-6} \text{ torr}$ 左右。

(d) **電漿蝕刻**：在蒸鍍之前，我們會先在真空腔中通入氧氣，壓力約 $8.5 \times 10^{-3} \text{ torr}$ ，以 800V 的高壓，游離氣體使之充滿腔體，打開遮蔽樣品的擋板，進行電漿蝕刻，去除顯影後殘留於樣品表面的光阻。

(e) **蒸鍍金屬**：做完電漿蝕刻後，會繼續讓渦輪幫浦抽至 $3 \times 10^{-6} \text{ torr}$ 以下，才開始蒸鍍金屬，首先打開膜厚計(crystal monitor)選取蒸鍍塊材之參數，開始加電流於鎢舟上讓塊材熔化，直到有蒸鍍速率出現。待蒸鍍速率穩定後(約 $1 \sim 2 \text{ \AA/sec}$)，再打開擋板，讓金屬沉積於樣品表面，等到沉積至我們需要的金屬厚度，即立即關上擋板，把電流降為零，完成蒸鍍。熱蒸鍍機示意圖如圖 3-10。

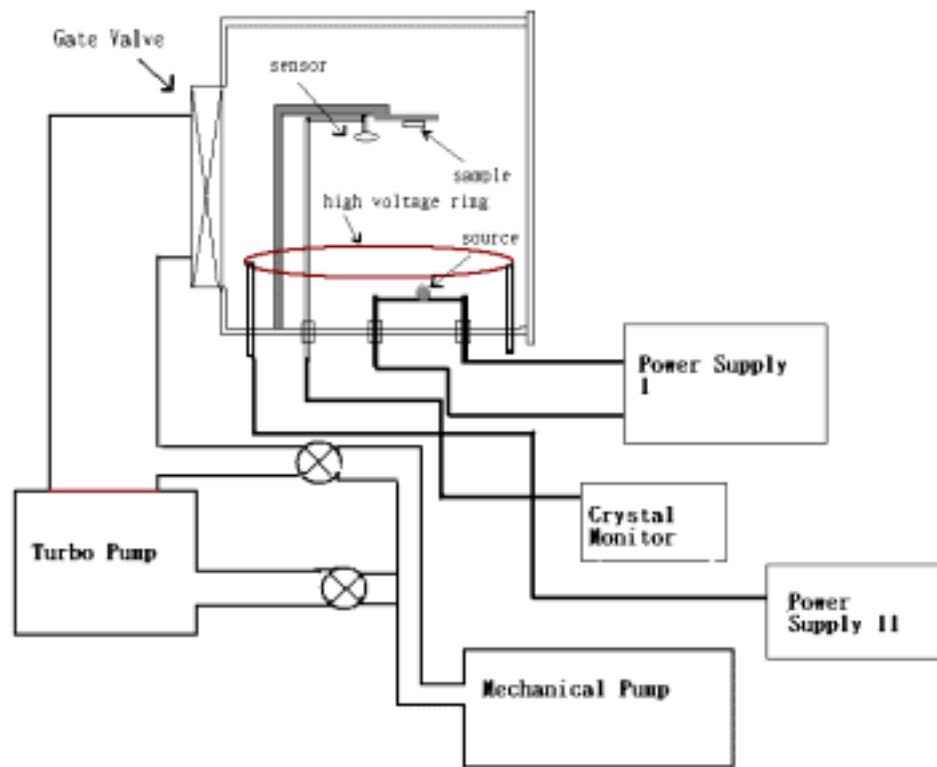


圖 3-10 熱蒸鍍機示意圖。

3-5 熱退火 (annealing)

熱退火(annealing)過程的目的是要讓第二道光微影的金屬膜滲透至二維電子氣的區域，形成一個良好的歐姆接處。我們的歐姆接觸金屬層由下至上為：鎳 (100Å)、金 (2000 Å)、銻 (1000 Å)、鎳 (700 Å)，銻 (Ge) 為主要的滲透物。而金 (Au) 在幫助鎵 (Ga) 於熱退火過程擴散至金屬，使得鎵在砷化鎵樣品內的位置得以被銻取代，鎳 (Ni) 可以幫助銻原子擴散到砷化鎵中。

熱退火步驟如下：將樣品放置於石英管(quartz tube)內可移動的石英舟(quartz boat)上，並把石英舟拉至接近管口處，再做管內氣體清理 (purge)。此步驟需重覆幾次，避免雜質及空氣殘留於石英管管壁。清理完之後，再通入氮氣與氫氣的混合氣體($N_2:H_2 = 9:1$)，然後設定控溫器(Watlow series 942)為 $450^\circ C$ ，待溫度穩定後，再將樣品推入置於石英管中央使之受熱均勻，經加熱時間約 13 分鐘後，把樣品拉出，即完成歐姆接觸熱退火。示意圖如 3-11。

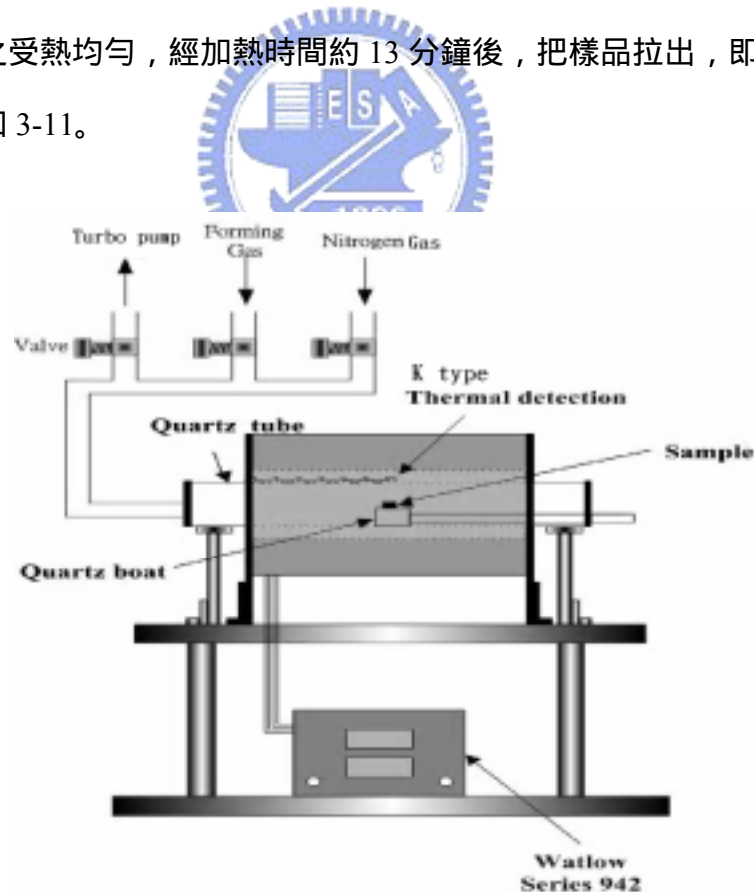


圖 3-11 熱退火裝置示意圖。

3-6 低溫系統 (cryostat system)

實驗室的低溫系統目前有三套，一套 ^4He 系統 (可量測的溫度 300K - 1.5K)，一套 ^3He (可量測的溫度 20K - 0.26K) 以及 dilution 系統 (可量測的溫度 20K - 25mK)，目前的量測是以 ^3He 系統為主，以下便對 ^3He 系統做一說明以及簡介：

(一) 利用機械幫浦 (MP) 抽此系統的樣品腔 (sample space)，放入少量氦氣作為交換氣體 (exchange gas)，為熱對流的媒介，300K - 77K 的降溫過程是靠液態氮 (LN_2) 的熱對流來降溫。在降溫之前，需特別注意樣品腔的密封度 (seal) 以及針閥 (needle valve) 跟 1K-pot 的管線是否有殘存的水氣或空氣，這些都會影響到降溫的成功率。若沒密封好，造成樣品腔的漏氣，使得低溫系統跟液氮達到熱平衡，便無法繼續降到 0.3K；而要是針閥跟 1K-pot 的管線有殘存的水氣或空氣，則會在下液氮的時候，水氣會凝結成冰，阻擋低溫時液氮的進出，亦會造成後續的降溫失敗。

(二) 當溫度達到 77K 時，此時便迅速將 ^3He 改放置液氦 (LHe)，此時也是利用熱對流的方式來降溫至 4.2K，此時 sorb 需用加熱器將其溫度控制在 40K 左右，作為後續凝結 ^3He 所用。

(三) 利用減壓降溫的原理，關閉通過針閥的氦氣，並改用機械幫浦連接 1K-pot，抽取液氦，利用針閥 (needle valve) 控制抽取液態氦量的多寡，以控制降溫的速率。將液態氦降溫，可讓樣品溫度降至 1.5K 以下。 ^3He 至 3K 以下便開始凝結，由於 sorb 溫度控制在 40K，溫度的梯度會使得原本在系統上方的 ^3He 氣體流經 1K-pot 至 ^3He -pot 凝結 (condense)，大約凝結 4-50 分後，關掉加熱器，sorb 的溫度便降低，使得 ^3He 蒸發回流至 sorb 以降低液態 ^3He 的蒸氣壓，利用蒸發再帶走熱量，使液態 ^3He 再持續降溫，此方法可將樣品附近的溫度最低降至 0.26K。圖 3-12 為 ^3He 低溫系統結構圖。

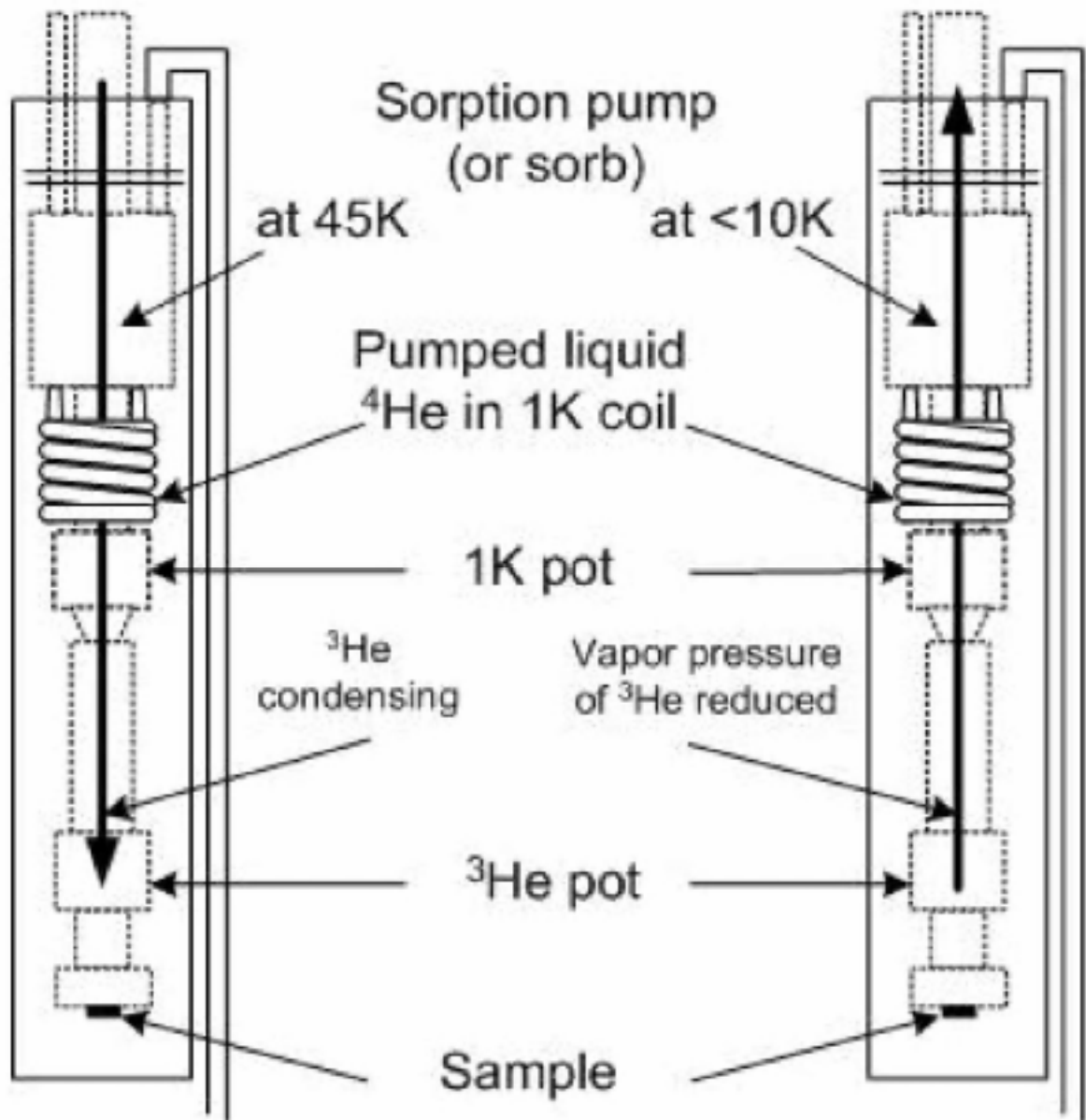


圖 3-12 ^3He 低溫系統結構圖。

3-7 實驗量測

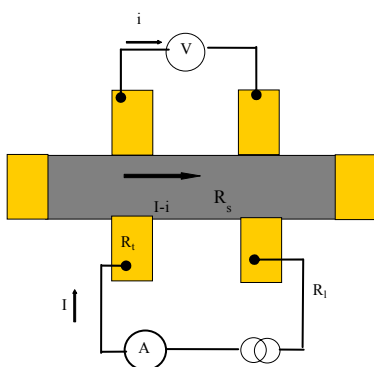
我們樣品在低溫做電性量測前，為了確保樣品的歐姆接點以及閘極間的電絕緣好壞，會在降溫過程中做樣品的四點及兩點的電阻量測，以及閘極間漏電流檢測，來判斷實驗是否可以繼續進行，以下便介紹電性傳輸的四點及兩點量測，以及漏電流檢測跟電性量測的電路。

3-7-1 歐姆接點檢測

在降溫的過程中，為了確定樣品的接點好壞，會依序在室溫、77K、以及 4.2K 時量測歐姆接點的電阻值，以 Keithley220 作為電流源，Keithley 182 作為電壓計來做四點以及兩點量測，其電路圖如圖 3-13 (a) (b)。兩點量測量到的電阻值除了樣品本身的電阻以外，亦包含了線電阻跟接點電阻，因此可用兩點量測確定接點的好壞。一般來說，兩點量測的電阻值在室溫時正常約在數個 $k\Omega$ 至 $10k\Omega$ ，77K 時電阻約數個 $k\Omega$ 至數百 Ω ，4.2K 時，其電阻值也差不多在數百 Ω 至 $1-2k\Omega$ ，且量到的電流 - 電壓曲線是線性的，可大約估計出歐姆接點跟線電阻的電阻值在 4.2K 左右約數百 Ω 。若在室溫量得的電阻值偏大（數十 $k\Omega$ 數百 $k\Omega$ ），則此接點可能會隨溫度降低而呈現開路狀態，可能打線接點不佳或歐姆接觸未滲入 2DEG。

至於四點量測，量到的電阻值即為樣品電阻值，樣品電阻值在降溫過程，若是正常的話，電阻值會變小。在室溫下，樣品的方塊電阻值約幾 $k\Omega$ ；在 77K 下，約幾百 Ω ；在 4.2K 下，會降到幾十 Ω 左右。

(a)



- I : 提供的電流
- V : 量測所得的電壓
- i : 流經電壓計的電流
- $I-i$: 流經樣品的電流
- R_s : 樣品電阻
- R_t : 接點電阻
- R_l : 線電阻
- R_m : 量測所得的電阻

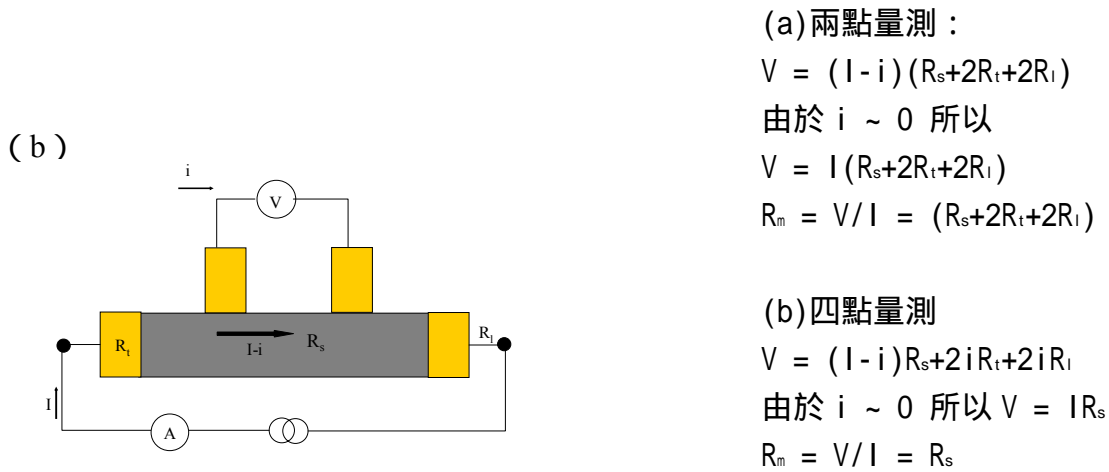


圖 3-13 (a)：兩點量測法。 (b) 四點量測法。

有時在量測通過閘極下的樣品電阻，其電阻值會很大且電流 - 電壓曲線呈現非線性，此時可在 77K 時，在金屬閘極上加約 0.1-0.2V 的正偏壓，加上正偏壓，可避免金屬閘極在降溫過程中，吸附了一些正負離子，形成一些位能障對底層的二維電子氣造成散射點 (scattering point)，金屬閘極再加了正偏壓後，通常可以有效的降低樣品量到的電阻值，雜訊也會較小。若要有良好的訊號，就必須減少在窄通道附近的一些缺陷，根據一些文獻，熱循環 (thermo-cycle) 與降溫的速度 (cooling rate) 都會影響樣品表面的電荷分佈。若加正偏壓後電阻值仍然過大，可以稍照光 (IR illumination)，可使載子的遷移率變高，使得平均自由路徑變長，可改善量測到的數據，對於照光的影響，也會在數據分析中提到。

3-7-2 漏電流檢測

樣品漏電流的檢測也是在做量測前的一個重要步驟，檢測的地方是光微影金屬閘極 (metal gate) 跟平台 (mesa) 之間的漏電情形，二維電子氣層跟閘極相距約 90nm，閘極跟平台之間為 GaAs/AlGaAs 的異質界面結構，有絕緣的特性，所以正常情況下，在閘極上外加偏壓 (1V-2V) 是不會產生漏電流的，但在平台製作有經過淺式蝕刻，使二維電子氣層跟光微影閘極之間的距離縮短，甚至造成二維電子氣層外露，金屬閘極直接接觸到二維電子氣層，因此便需要做漏電流檢測，確保樣品是否正常。

金屬閘極在隨著偏壓變大時，便會透過平台產生一漏電流，由於我們在做量測時，

閘極所加的負偏壓最大約為-1V 左右，給的電流源大小為 5nA，所以當閘極偏壓加至-1V 時，漏電流在 0.01nA 左右都是可容許範圍內，漏電的情形會隨著溫度越低而改善，若漏電太大，則會使得量測的訊號包含到漏電流而產生太多雜訊而無法解析。

漏電流檢測裝置圖，如圖 3-14，其電路上的安培計是利用檔位及電壓的換算（ampere per voltage）得知電流值，解析度最大可到 0.001nA（sensitivity 檔位至 10^{-9} A/Volt）。漏電流檢測會在 gate 加上正偏壓以及負偏壓分別檢測，正常情況下，正偏壓的漏電情形會較明顯，在 0.4V 左右，漏電流約 0.01nA。

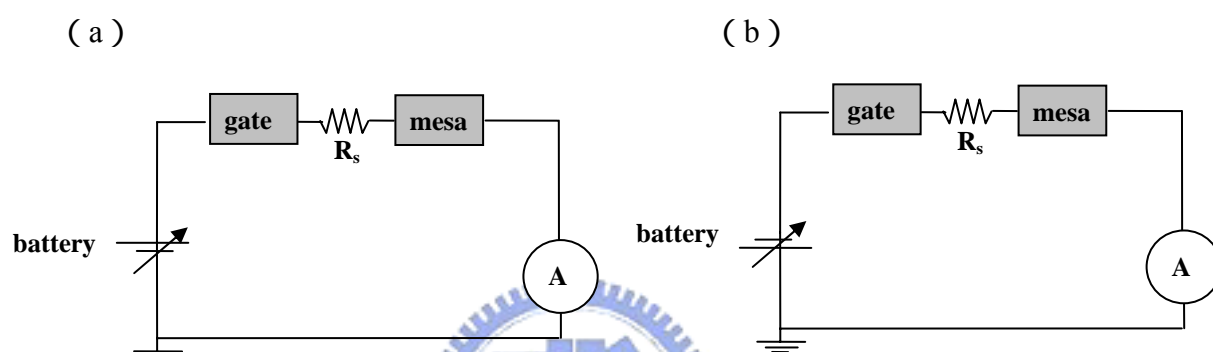


圖 3-14 漏電流檢測電路圖。(a) 閘極加正偏壓，(b) 閘極加負偏壓。 R_s 代表樣品的電阻值。

3-7-3 電性量測

我們在 0.3K 的電性量測上，共做了三種量測方法：(1) 固定電流，量測樣品兩端的電壓降(Constant current measurement)，(2) 固定電壓，量測其通過的電流值(Constant voltage measurement)，(3) AC 抽運電流量測 (AC pumping current measurement)。

以下便一一介紹其量測法：

(1) 定電流源 (AC constant current measurement)：

此量測法主要是用來量測量子化電導及串聯形式的分離閘極所採用的方法，我們利用交流電流(ac current source)當電流源，電流訊號是使用 EG&G 7265 鎖相放大器，提供一方均根為 1 伏特的交流電壓，經由串聯 200M Ω 的電阻，可提供源極 (source) 與汲

極 (drain) 間 5nA 的交流電流。然後量測跨過閘極兩端的其它兩個歐姆接觸的電壓降 (V), 最後經過電壓前置放大器(pre-amplifier)SR560 將電壓放大, 把電壓訊號回饋(feed back)到 EG&G 7265 鎖相放大器; 並同步以 Keithley 2000 電壓計讀取其值, 再透過電腦介面 GPIB 卡將數據存取, 換算成電阻。定電流源採用四點量測法, 即量測到的電阻值就是樣品本身的電阻值, 樣品的電阻值會隨加在金屬閘極上的負偏壓變化, 閘極上的負偏壓是利用電壓掃描器(voltage sweeper), 讓電壓的提供可以連續穩定地改變, 進而改變窄通道的寬度, 電壓的掃描速率以及掃描範圍都可以改變。定電流源電路圖如圖 3-15。

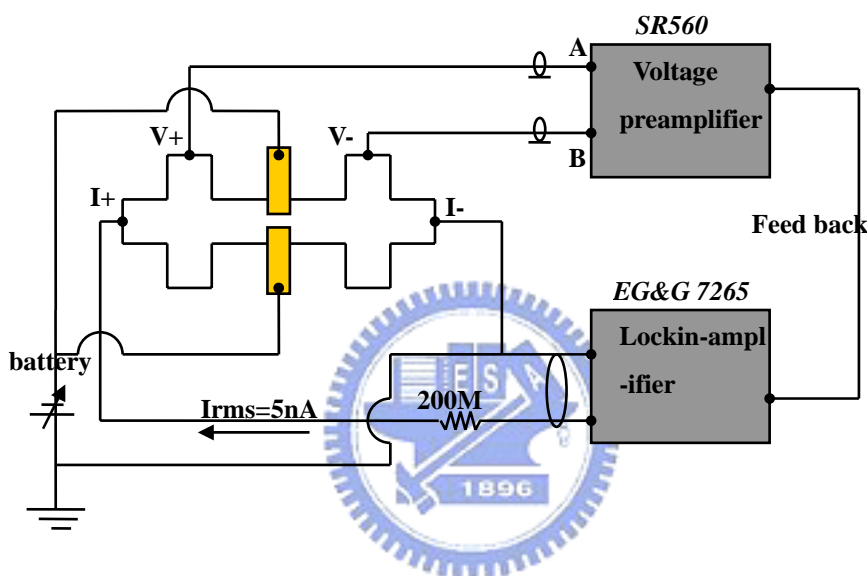


圖 3-15 定電流源的量測架構示意圖。

(2) 定電壓源 (AC constant voltage measurement) :

此量測電路是利用 EG&G 7265 鎖相放大器給一定固定電壓, 大小約為數十 μV , 因為樣品電阻在 $\text{k}\Omega$ 等級, 因此換算成電流約在 nA 左右, 可避免樣品電阻過小以致產生過大電流燒壞樣品。接至樣品兩端, 串聯電流前置放大器 1121, 透過放大器將電流轉換成電壓 (V/nA), 再回饋至鎖相放大器, 以 Keithley 2000 電壓計讀取其值, 換算成電阻值, 其解析度可由放大器跟鎖相放大器來調整。固定電壓源也可以量測窄通道的量子電導化, 但主要用來量測 Coulomb Oscillation, 由於是採用兩點量測, 所以包含了接點電阻值, 訊號在樣品電阻值較低時, 相對定電流源量法時解析度會較差, 故在量測量子化電導時, 通常還是採用定電流源量測。圖 3-16 為其電路圖。

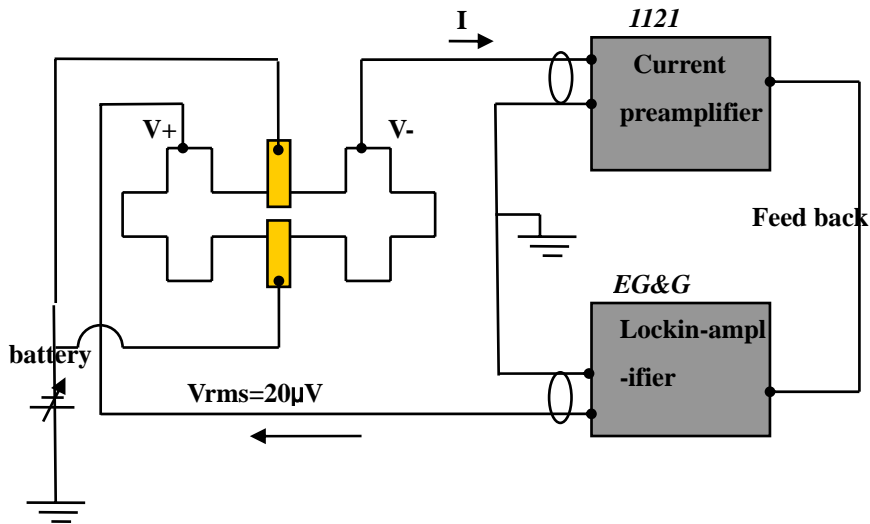


圖 3-16 定電壓源量測電路圖。

(3) AC 抽運電流量測 (AC pumping current measurement) :

在量測完窄通道量子化電導之後，便做 AC 抽運電流量測，量測主要原理是在外加的高頻訊號中耦合 (couple) 一低頻交流訊號 (91Hz)，此低頻訊號為供鎖相放大器抓取訊號用，耦合後的訊號如圖 3-17 所示，在有脈衝 (pulse) 的地方，即可產生 AC 抽運，沒有脈衝的地方便無訊號。使用 AC 低頻耦合量測的好處是可以避免在量測中額外的訊號摻雜，以致難以解析真正由 pumping 所產生的訊號。以下便簡略介紹 AC 量測的儀器架構以及實驗方法，本架構為實驗室博士班學長 劉凱銘所架設。

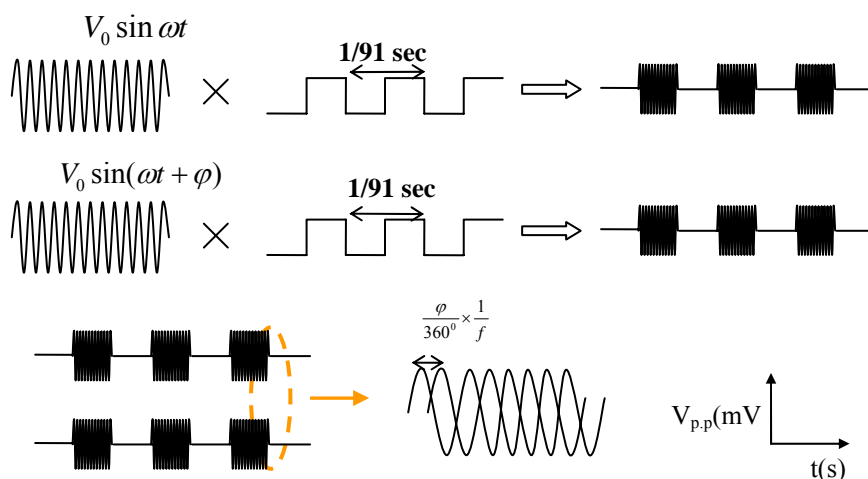
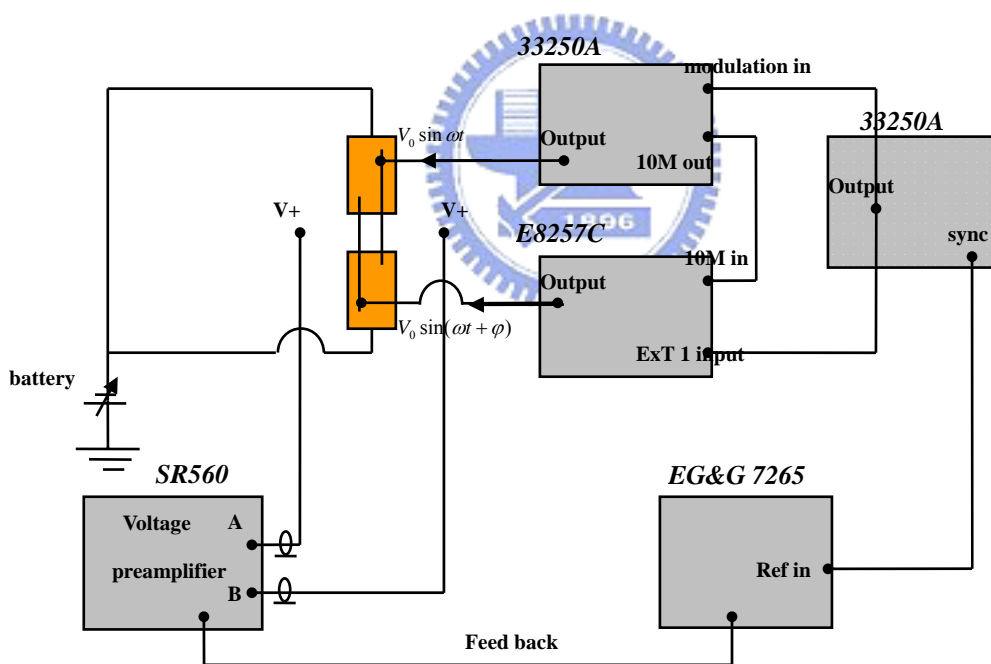


圖 3-17 低頻 AC 訊號耦合一高頻 AC 訊號示意圖。兩高頻訊號為同頻率及振幅但有一相位差 φ 。

訊號產生器方面，我們使用 Agilent 33250A 以及 Agilent technologies E8257C 來產生高頻訊號，33250A 最大可輸出頻率為 80MHz；E8257C 最高可產生 40GHz 的頻率。兩台使用 AM (amplitude modulation) 模式，使原先輸出的高頻訊號 $V_0 = V_0 \sin \omega t$ 轉換成 $V_0 = V_0(1 + m \sin \omega_m t) \sin \omega t$ ，其中 $m=1$ 、 -1 ， ω_m 為調整頻率 (modulation frequency)，將其調為 91Hz。

除了兩台輸出高頻訊號的訊號產生器之外，需再外加一台訊號產生器 (Agilent 33250A) 提供一低頻的 AC 訊號 (91Hz)，並做 AM 調變用，將此訊號產生器跟鎖相放大器的 Ref in 連接，鎖相放大器改為由外部抓取參考頻率。儀器的配接圖及量測的示意圖如圖 3-18、3-19 所示。



3-18 高頻訊號產生之儀器配接圖。

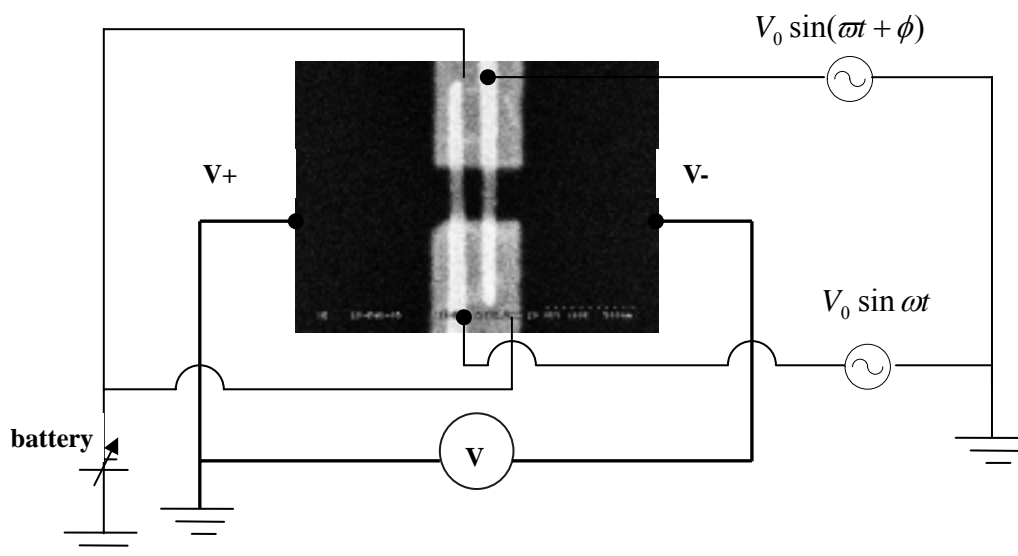


圖 3-19 AC 抽運電流量測示意圖。加一固定負偏壓在分離閘極上使窄通道寬度固定，兩支指狀閘極加一固定頻率但有一相位差的 AC 訊號。

量測方法則是先以一負偏壓來固定分離閘極的窄通道寬度，並在指狀閘極加上以高頻訊號產生器所產生的同步且有一相位差的高頻訊號，並量取樣品兩端的電位壓降，兩訊號的相位差調變以 labview 程式去控制，可控制相位差改變的時間以及改變的角度大小。量取樣品左右兩端的電壓方法跟定電流源的電壓方法一樣，但輸出電流設定為 0 ($I_{\text{bias}}=0$)，經過前置放大器將電壓訊號放大，再將電壓訊號回饋到鎖相放大器，同步以 Keithley 2000 電壓計讀取其值，再透過電腦介面 GPIB 卡將數據存取。關於電性量測所量得到的數據，會在第四章作一詳細的分析介紹。