

學術期刊
第 009 期
~憧憬~

本期內容：張純志老師訪問
常見真空泵浦介紹
薄膜製成法簡介

張純志 副教授

學歷：高雄中學
成功大學物理學系 學士
美國田納西大學物理學 博士
美國橡樹嶺國家實驗室
(Oak Ridge National Laboratory)
(博士後研究)

研究領域：薄膜物理
近代光學



受訪者張純志老師與訪問者吳國豪同學

以下訪問內容為吳國豪同學(以下簡稱 Q)訪問張純志老師(以下簡稱 A)

Q:

什麼是薄膜物理?

A:

一般薄膜是在玻璃板上蒸鍍一金屬或介電質的薄膜，薄膜有分光學用途跟電子的用途。

薄膜物理就是要學一些蒸鍍的技巧，另外蒸鍍的環境需要接近真空，所以要學習各種抽真空的技巧。

在蒸鍍的時候需要將壓力抽到 10^{-6} torr 以下，蒸鍍時用一很小的金屬片做成船的形狀，把要蒸鍍的物質放在裡面，加熱到其蒸發，使其原子飛出，飛到玻璃版上凝結，或是用電子束打在要蒸鍍的物質上，原子也會蒸發出來，叫做離子蒸鍍法。

蒸鍍好後要觀察薄膜的厚度、光學性質。例如厚度的測量可以用蒸鍍後金屬薄片振動頻率的改變可以量出，但這方法的誤差不小，30、40%的誤差是常見的。比較好的方法是觀察蒸鍍後的物質各個方向對光的反射。紀錄後就分析其反射強度對角度的關係，代進光學的公式去計算，準確度可以到 5% 以內。而測量蒸鍍後光學性質的變化，可以使我們應用在光學上面，如反射膜及抗反射膜、或是濾光片等等許多可以應用的地方。

還可以應用在電子上面，像平常我們所用的電器用品中電晶體、二極體，用久了會發熱，需要散熱的裝置，但也可以利用薄膜去做一阻止擴散的障礙層，像一般積體電路的損壞都是因為溫度升高後，原子之間互相擴散，使得原子產生變質，所以若加一擴散障礙層，使其可以導電但不能擴散，這樣積體電路的壽命就可以很長。

所以學薄膜的用途很廣，其實我們在做研究的時候，往往會有機會看到前所未見的效應，這時候就要用物理的觀念去想辦法解釋它，說不定可以發現尚未被人找到過的東西，尤其是學薄膜更是有這機會，因為薄膜是非常多變的。

Q:

為什麼會選擇研究薄膜這條路?

A:

因為以前在國外唸研究所時，剛好有老師在研究薄膜，那時也沒有特別想要做什麼，所以剛好有老師在做薄膜的研究就跟著去做了。

Q:

如果未來對薄膜有興趣，現在大學時該如何準備? 哪些方面要特別加強呢?

A:

看是要做光學還是電子方面的，光學的話光學要好好學，而電子方面的話，半導體相關的理論要清楚，另外我們學校有電子系，可以考慮去輔修一些課程，另外電腦程式方面的能力也要具備一些，最後可以多看看相關的課外書，多了解相關的儀器的操作方法及使用原理。

Q:

請問老師以你在國外讀書的經驗來看，去國外讀書跟留在國內讀書有什麼差別?

A:

國外有很多好的大學程度很高，但是進入那些好的大學，比較困難且費用很高，而國內的好大學在國外來說也有中等的程度，所以說不用特別跑到國外去唸研究所。國外老師在分數方面很嚴格，學生也不會抱怨，而國內這方面一些還有加強的空間。

Q：

以老師你的觀點現在的大學生最缺乏什麼？

A：

對中國古代的優良傳統，尊師重道不放在心上，對老師的教導就不重視。還有對公權力的尊重也不夠，守法的精神不好，這些都是需要改善加強的。

Q：

老師你覺得大學四年內最重要的一件事？

A：

重要的事有很多，很難說哪一件事是最重要的，要進德修業、培養品格，要訓練自己成為社會的領導者，有號召能力，待人處世要處的好，修業就是要把物理的專業唸好，唸好不是指唸很多書，是指要有獨立思考能力，遇到難題時，要能不靠解答，靠自己的能力解決，這個能力是很重要的，但現在人都比較沒有注重。

Q：

最後總結的話老師有要給我們大學生什麼建議嗎？

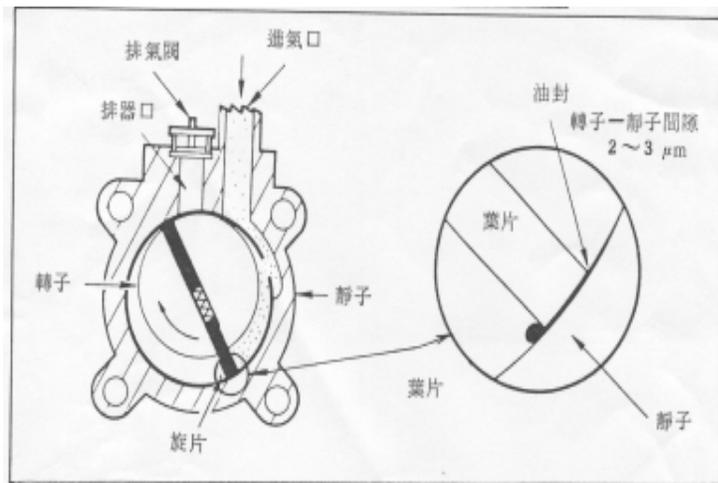
A：

我覺得大學生在哲學方面要多加油，要能夠去看比較遠的東西，就算沒辦法很清楚的了解，但是要能大略知道是怎麼一回事。這哲學的觀念在處世跟研究科學方面都很有幫助，很多科學新發現，都是由哲學開始，等到人們掌握了許多證據，了解了其原理，就成為了科學，科學應用在生活上就成了工程。所以哲學可以說是人類知識的先鋒，大學生在哲學方面可以多加努力。

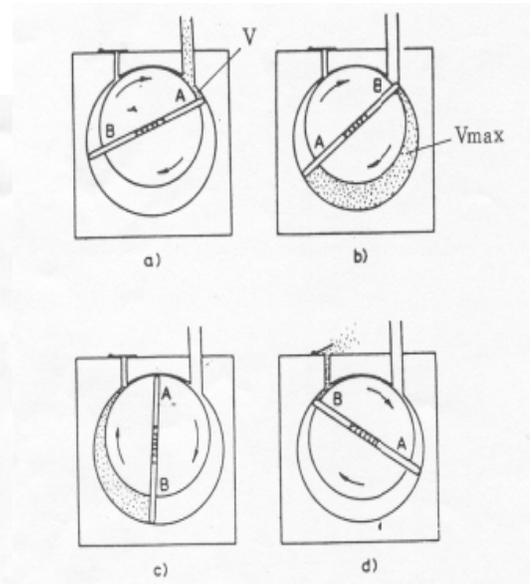
前面老師提到要做薄膜蒸鍍，必須在真空的環境底下進行，所以為大家介紹幾種較常使用的真空泵浦及其運作原理。

一、機械泵浦

常見的機械泵浦有迴轉式跟活塞式兩種，其運作原理相似，因版面所限，僅介紹迴轉式作為代表。迴轉式機械泵浦如下圖 1 所示，其主要結構為一圓柱殼，內含一直徑略小且離心的轉子，依轉子的直徑線上有兩個刮片，緊貼圓柱殼的內壁。當轉子旋轉時，刮片依進氣、轉送、壓縮、出氣四個步驟(如圖 2)，抽排氣體。幫浦內含有泵油，具有密封、潤滑、冷卻與防蝕等功能。而機械幫浦的抽真空上限約在 10^{-3} 毫巴左右。

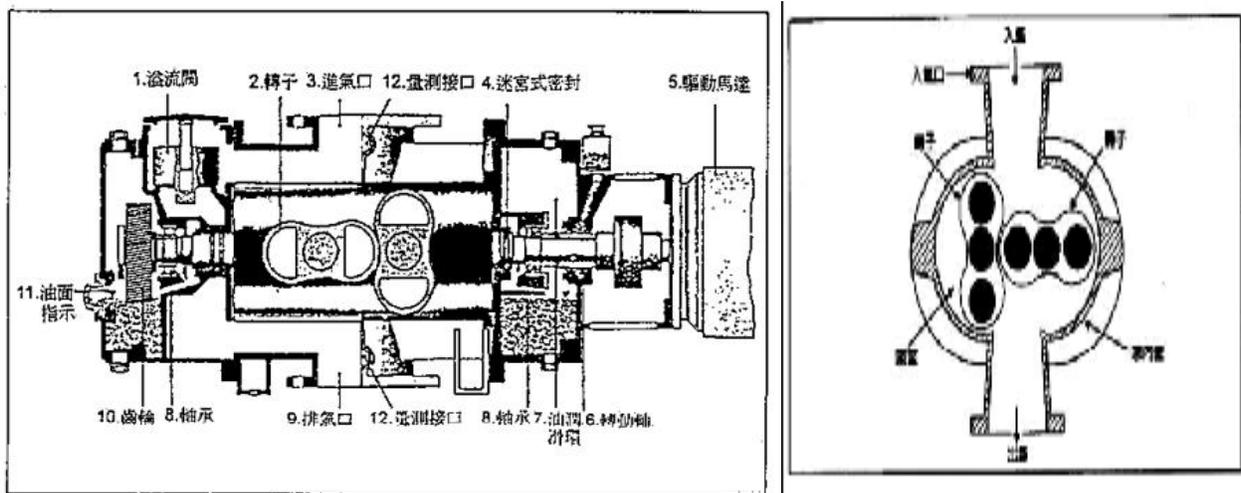


〈圖 1〉迴轉式機械泵浦的內部結構。



〈圖 2〉迴轉式機械泵浦抽排氣過程。

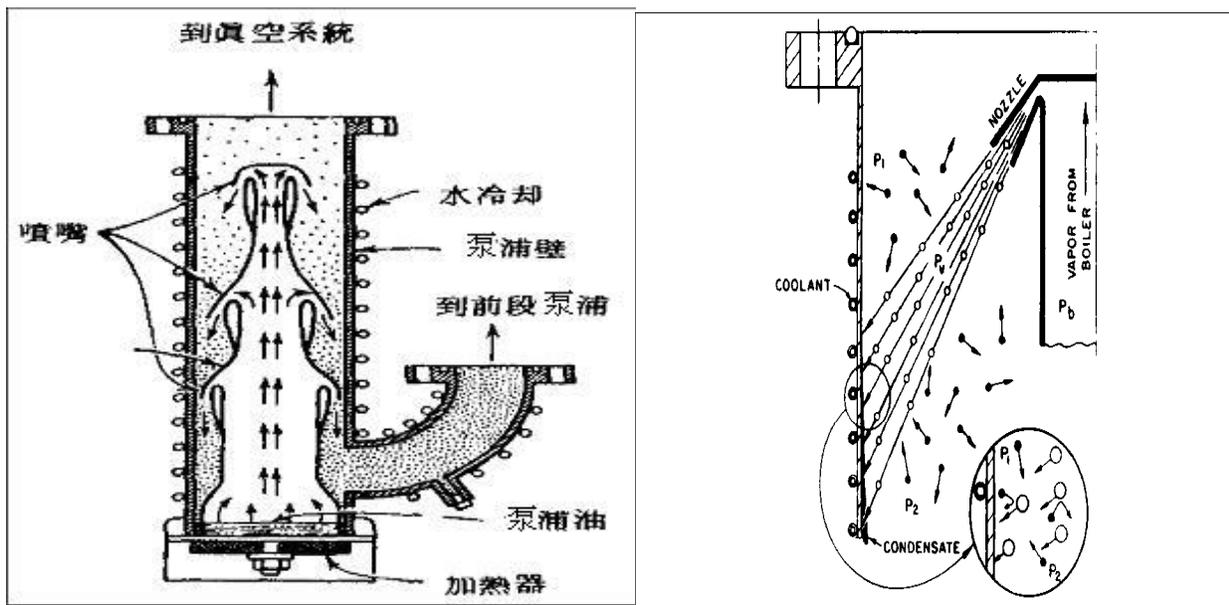
另外，常與機械式泵浦串聯使用的路茲(亦可翻為魯式)泵浦(Roots pump)，是由兩個相互平行的軸承(shaft)上的轉子所構成(如圖 3)，這兩個轉子在運轉時彼此方向相反，轉子與固定子之間維持約 0.1mm 的間隙，從進氣端來的氣體分子經由此間隙排出。另外此泵浦不用泵油，轉速可高達 3000rpm，而不會造成機械摩擦，故此泵浦的抽氣速率可以很快，但壓縮比較低。



〈圖 3〉路茲泵浦的機械圖及示意圖

二、擴散泵浦

高度真空中最常用的擴散泵浦(圖 4)，其原理是將泵油加熱後，其蒸氣流就由碰撞將動量轉移到待抽氣體，賦予待抽氣體單一方向的動量(圖 5)，將其帶往排氣口，再經由機械泵浦排出。



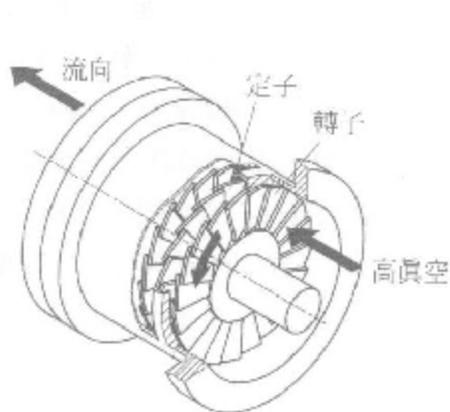
〈圖 4〉擴散泵浦簡易結構圖

〈圖 5〉蒸氣流與待測氣體碰撞之情形

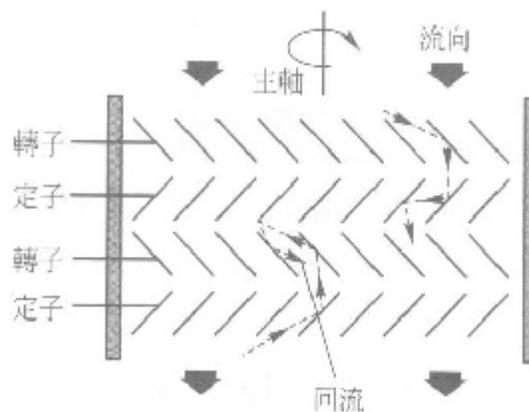
擴散泵浦的一大缺點是油氣回流(back streaming)的問題，油氣回流是指部份蒸氣分子與被排的氣體分子碰撞而散回到真空系統中的現象，解決方法是於擴散泵浦入口部前加裝冷凝阻擋(cooling baffle)或蒸氣捕捉陷阱(trap)，但前二裝置會影響排氣速率。

三、渦輪分子泵浦

渦輪分子泵浦構造頗似渦輪機(圖6)，由附有葉片的轉子及定子交錯組成，氣體分子經轉子葉片撞擊至定子葉片，經其轉向後再轉往下一轉子葉片(圖7)，不斷循環而發生氣體流。此泵浦圓盤轉速很高，約24,000-60,000rpm，運作於分子流領域(10^{-2} torr以下)，最終壓力可達 10^{-9} 到 10^{-10} torr。



〈圖 6〉渦輪分子泵浦之構造



〈圖 7〉渦輪分子泵浦之運轉原理圖解

四、貯氣式泵浦：

此類泵浦其抽氣原理與上述泵浦完全不同，被抽的氣體被泵浦抽到其中，永久或暫時貯藏在泵浦中而不排出。通常被抽的氣體分子在泵浦進氣口的附近受高電壓離子化後，被泵浦中的一種特殊物質物理吸附或結合成化合物（化學吸附）。另一種情形是待抽氣體分子受到正離子、電子甚至放射線的作用使氣體分子電離，然後再在高壓電或磁場的作用下被某些物質吸收，亦有靠低溫將這些氣體分子（通常為空氣），冷凍而貯在泵浦內。貯氣式泵浦近年來發展迅速，幾乎所有高真空及超高真空均採用此類泵浦，新式的種類頗多，現僅就常用者分為下列三類介紹：

A. 化學吸附泵浦：

此類泵浦的作用原理係利用一種活性物質，稱之為結拖者，與所要抽的氣體分子化合變成固體或化學吸附貯留在泵浦內不再放出，此種結拖物質通常為薄膜、細絲、或粉狀。利用加熱昇華、離子撞濺、或燃燒等方法使結拖物質與所要抽的氣體分子結合，散佈在泵浦的內面。

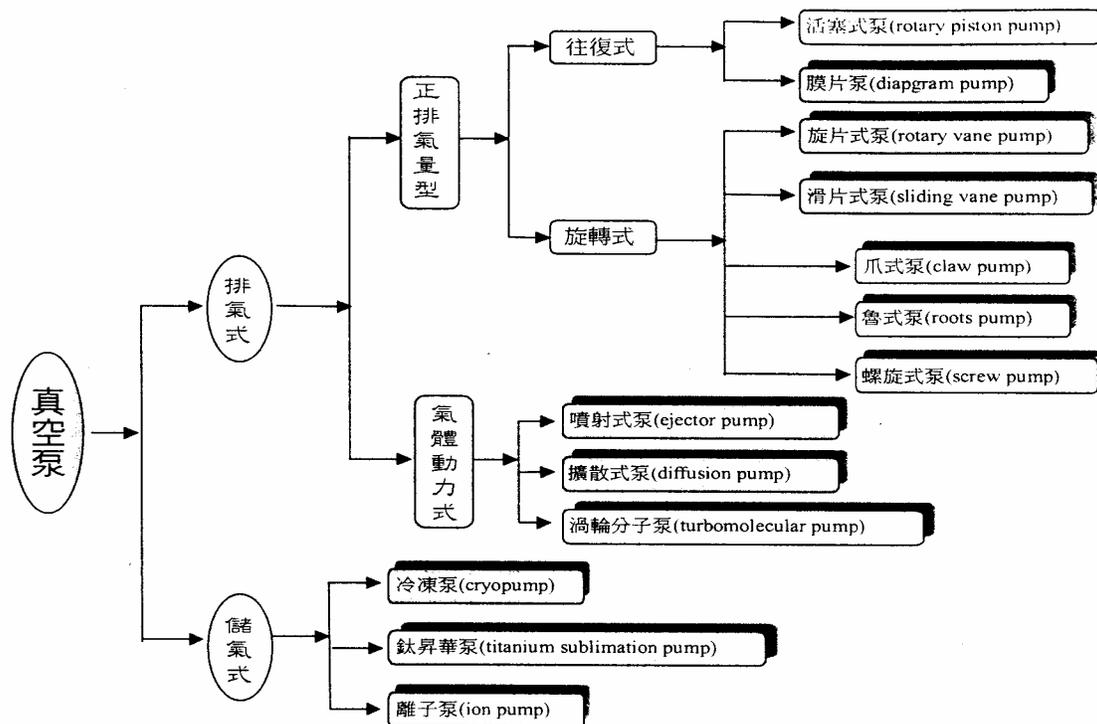
B. 吸附泵浦：

此類泵浦操作原理為物理吸附，亦即利用某一些吸附力很強的物質如活性碳或沸石等，將所欲抽的氣體吸附在其表面上。此類泵浦通常需保持低溫，故常與冷凍泵浦聯合使用。因其吸收氣體為物理作用，故仍有再放出被吸收的空氣的可能，在使用時應盡量保持一定溫度或低溫。

C. 冷凍泵浦：

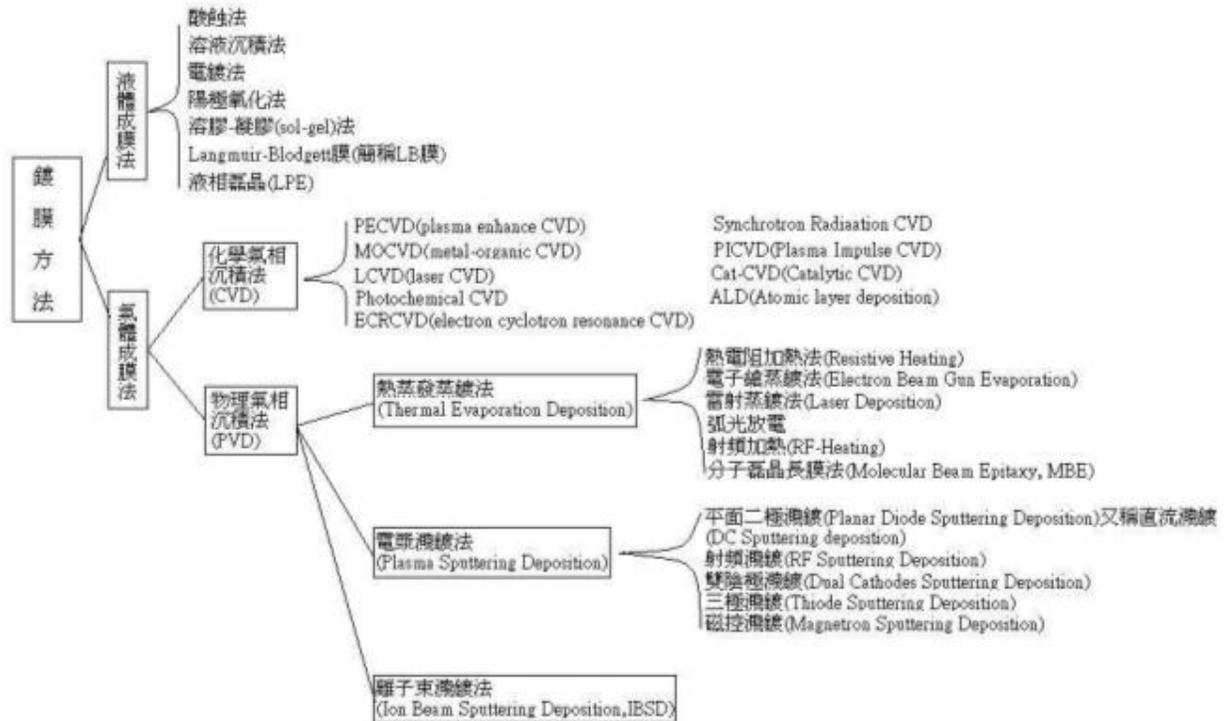
亦即利用非活性金屬，使其在急冷的狀況下將欲抽的氣體冷凍成固體而貯於泵浦內。一般所採用的冷凍劑均為液態氦或超冷的氦氣，因為通常所抽的氣體多為空氣，而空氣在液態氦溫度下可凝結成固體。此種泵浦使用氫、氦、氖等稀有氣體，通常效果良好，並可用作高真空泵浦。

最後附上一張真空泵浦的詳細分類圖。



〈圖8〉真空泵浦分類圖

介紹完真空泵浦，接下來進入重點薄膜生成的介紹，鍍膜技術有許多種，但大體上可分為利用液體成膜及氣體成膜兩種方法，前者大多涉及化學變化，後者則分成化學及物理兩種作用。以下只對物理作用薄膜生長做詳細的介紹，對化學作用成膜法有興趣的同學可自行查詢相關資料。



〈圖9〉 鍍膜方法分類圖

所謂物理氣相沉積法是指利用物理方法將固體材料變成氣體而沉積在基板上，其成膜過程大約可分為三步驟。

1. 將薄膜材料由固體變成氣態。
2. 薄膜的氣態原子或分子或離子穿過真空抵達基板表面。
3. 薄膜材料沉積在基板上漸漸成膜。

其中第一步驟依使用方法的物理作用可分為三大類，即熱蒸發蒸鍍法(Thermal Evaporation Deposition)、電漿濺鍍法(Plasma Sputtering Deposition)、離子束濺鍍法(Ion Beam Sputtering Deposition)。

而步驟二之所以要求要真空的原因有三，其一是因為要保持薄膜材料的純度，令其沒機會遇到其他物質而改變材料純度(反應式鍍膜例外)；其二是保持薄膜材料氣體分子的動能，使其有力地飛向基板以增加薄膜與基板的結合力；其三是避免薄膜材料層層堆疊時，中間摻雜到其他物質，使其堆疊出的薄膜不夠穩定。

接下來就逐一詳細介紹第一步驟中的三大類方法。

一、熱蒸發蒸鍍法(Thermal Evaporation Deposition)

利用升高薄膜材料的溫度使之溶解然後氣化(或者直接昇華)，使氣態薄膜材料的原子或分子具有加溫後的動能而飛向基板沉積成薄膜。依不同的加熱方法又可分為下述幾種方法：

1. 熱電阻加熱法(Resistive Heating)

原理為利用電流通過一電阻器時會產生之熱能來加熱薄膜材料，方法為選用高熔點材料做電阻器(蒸發源)，將欲鍍的薄膜材料放在其上，然後在電阻器兩端加高電壓，以產生高電流、高功率。另外若需蒸發兩種以上不同的混合材料時，可使用閃燃法(flash evaporation)來處理。方法為先將蒸發源加熱到高溫(超過任一材料的蒸發溫度)，再將混合材料分多次少量的加入蒸發源，使材料一碰到蒸發源就立即蒸發鍍上基板。

熱電阻加熱法的好處是方便、設備簡單便宜、蒸發源形狀可配合需求做成任意形狀。但也具有下列缺點：a. 電阻器可能會與薄膜材料產生反應，或產生雜質。b. 電阻加熱的溫度有限，無法使用在高熔點的薄膜材料。c. 蒸鍍速率有限。d. 材料若為化合物有分解的可能(閃燃法可蒸鍍部分此類材料的薄膜)。e. 鍍出的薄膜強度不夠，密度不高。

2. 電子鎗蒸鍍法(Electron Beam Gun Evaporation)

原理為利用加熱高熔點金屬至高溫，使其表面電子獲得大於束縛能的動能，而得以逸出，或自輝光放電的電漿中取出電子(因效益與方便性前者較常使用)。再利用電場加速電子，使高速電子撞擊到欲鍍薄膜材料，使動能轉為熱能而把材料蒸發。

優點為因為電子束直接加熱在薄膜材料上，比起熱電阻加熱法污染較少，鍍出膜品質較高，且因電子可加速到極高能量，故高熔點薄膜材料亦可鍍膜。而且可搭配特殊材料座(多個坩鍋排成一圈，有點類似烤紅豆餅的轉盤)使鍍多層膜變成相當方便。

而缺點有a. 電子束若控制不當會引起材料分解或游離。b. 不同材料所需的電子束大小不同，若使用不同材料鍍膜須不時調整。c. 對於昇華材料或稍微溶解即會蒸發之材料，須把電子束大小、振幅、頻率都需加大，或把材料壓制成塊，否則其蒸發速率會分佈不穩定，對薄膜之均勻度影響很大。

3. 雷射蒸鍍法(Laser Deposition)

原理：A. 熱效應：利用薄膜材料對雷射光能的吸收產生高熱而熔解蒸發。

B. 光解離效應：利用高功率脈衝雷射光束，經聚焦後導入真空腔內之靶材，當雷射光束照射靶材表面，使得靶材表面吸收高能量，而瞬間氣化形成一團具有高動能的電漿氣體，噴射至待鍍基板上形成薄膜。由於是脈衝能量引起的蒸發，故只有材料表面會受熱蒸發，且能保持材料成分，為一非熱平衡氧化，故可蒸鍍多元素化合物而不破壞組織成分。脈衝越短，膜的品質越佳。

優點為a. 因為真空室內無電器設備及熱源，故污染極低，膜質較純。b. 可搭配特殊材料座方便鍍多層膜。c. 蒸鍍速率快。d. 若材料會污染，可將材料擺至遠處避免污染(因雷射不易散開)。

而缺點為a. 設備昂貴。b. 有些材料對雷射光吸收不佳。c. 蒸鍍速率太高反而不易鍍極薄的膜。

4. 弧光放電

原理為利用薄膜材料本身當電極，通以大電流。因高電阻可產生弧光放電而蒸發。

優點為設備簡單，蒸發速率大。

缺點為膜厚不易控制，難鍍多層膜。

5. 射頻加熱(RF-Heating)

原理為利用高頻率電磁波，使金屬薄膜材料產生渦電流，升高溫度而蒸發。

6. 分子磊晶長膜法(Molecular Beam Epitaxy, MBE)

原理為利用多個噴射爐(Knudsen cell)裝不同材料，在超高真空下於晶體基板上按一定的方向生長某種單晶膜。

二、電漿濺鍍法(Sputtering Deposition in Plasma Environment)

在低真空(一般為真空中充氬氣)及高電壓環境下，產生輝光放電形成電漿，再利用正離子在電場加速下衝撞陰極的薄膜材料。與熱蒸發蒸鍍法靠熱能蒸發出氣態原子不同，電漿濺鍍法藉由正離子如撞球的撞擊，將原子或分子撞出材料表面飛向基板沉積成膜。

1. 平面二極濺鍍 (Planar Diode Sputtering Deposition)/ 直流濺鍍 (DC Supttering Deposition)

以薄膜材料為陰極，基板為陽極，抽真空到 10^{-3} Pa以上，再充入惰性氣體至數Pa，然後施加數百至數千伏特的高電壓產生輝光放電，形成電漿。此時電漿中的正離子在數百伏特電壓加速下去衝撞薄膜材料，經由動量轉換將材料原子撞出，沉積在陽極的基板上。

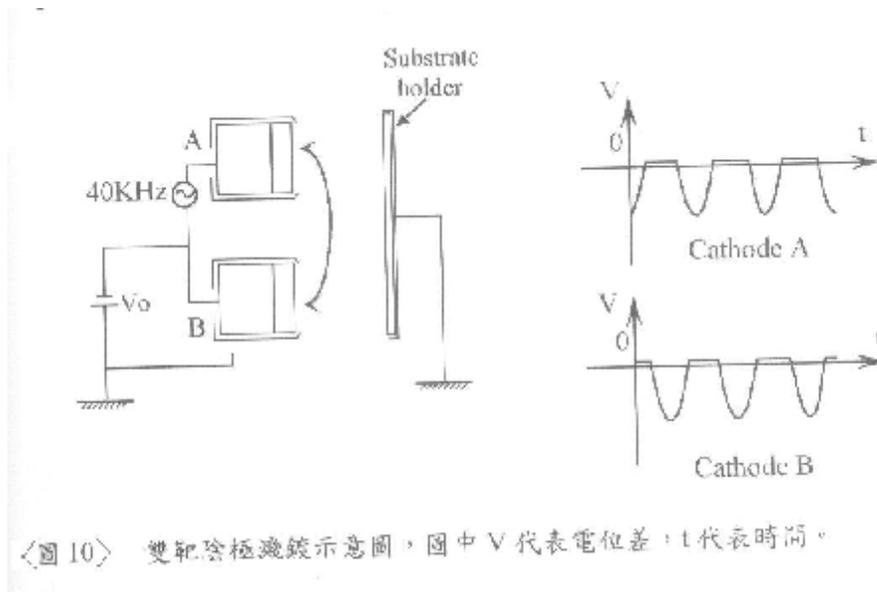
2. 射頻濺鍍(RF Sputtering Deposition)

直流濺鍍不能用來濺鍍介電質材料(絕緣體)，因為正電荷會累積在材料上而阻止正離子靠近，但用射頻(RF)濺鍍則可避免這個問題。此時可在介電質靶材背面加一金屬電極且改用射頻交流電(13.56 MHz)。因為電子比正離子跑得快，在射頻的正半週期已飛向靶面中和了負半週期所累積的正電荷，由於頻率相當快，正離子一直留在電漿區，對靶材(陰極)仍維持相當高的正電位，因此濺射得以繼續進行。

所以射頻濺鍍法不僅可以濺鍍金屬，也可以濺鍍絕緣體材料，其鍍膜速率較直流濺鍍快、成膜均勻、緻密度高、成分與靶材差異小且與基板附著性佳。但直流濺鍍及射頻濺鍍，產生的電漿游離率並不高，大多數的氣體原子都是不帶電的，此種不帶電的原子無法被加速而產生濺鍍，導致濺鍍效率降低。為了提高氣體的游離率及濺鍍效率，一般會在靶材上加裝磁場，形成所謂的磁控濺鍍。

3. 雙陰極濺鍍(Dual Cathodes Sputtering Deposition)

為了加快濺鍍速率，可用脈衝式直流電或是雙陰極濺鍍靶，在雙靶間加一中頻交流(40KHz)交換正負電壓(圖10)，如此頻率快到可以中和累積在材料上之電荷，但頻率又不會太高，雙靶相對於基板(陽極)，仍然維持低電位，故濺鍍可以持續進行，整個濺鍍過程等效為直流濺鍍。



〈圖10〉 雙陰極濺鍍示意圖

4. 三極濺鍍(Triode Sputtering Deposition)

在直流或射頻濺鍍系統中，加入可加熱產生電子束之第三極。產出的電子受電場加速飛向陽極，增加惰性氣體分子離子化的機會，因此可使濺鍍速率提高。而且因為離子化機率高，可降低所需的惰性氣體數量，降低工作氣壓，因此鍍出之膜質可望比二極濺鍍密。但因加熱燈絲在濺鍍系統中，使得薄膜的雜質亦有可能增加。

5. 磁控濺鍍(Magnetron Sputtering Deposition)

在濺鍍系統中加一磁場，則電子將會沿磁力線前進，因此可以增加電子移動路徑長度，使離子化機率高，增加濺鍍速率。

而因離子化機率高，使系統可在較低的工作氣壓中濺鍍，膜質可因此提升。而由於磁場會把電子偏離基板，因此基板溫度不會昇得太高，所以可濺鍍些不耐高溫的基板。而磁控濺鍍的最大優點是可做成一連續鍍膜系統，從基板進入轉接間，到濺鍍室，再到出口轉接間，再出大氣，鍍膜過程中不用打開濺鍍室，可24小時持續工作提高生產效率。

但磁控濺鍍對強磁性靶材無效。又由於磁場的影響，正離子幾乎都打在固定的點，靶材表面將漸漸不平整，以至於靶材的利用率低(一般低於40%)，對於薄膜的品質也有所影響，此時需改變空間磁場配置，或是將靶材做成圓柱形，濺鍍時轉動圓柱靶，如此可使靶材的使用率提高到80%。

三、離子束濺鍍法(Ion Beam Sputtering Deposition, IBSD)

離子束濺鍍法與電漿濺鍍法一樣都是以加速後的高速離子去撞擊靶材，利用動量轉換讓被鍍原子或分子獲得動量，再沉積到基板上。但不同的是離子束濺鍍法中，惰性氣體離子化和離子加速之過程，都是在獨立的離子發射源中完成的，因此離子束濺鍍法可在高度真空中進行，濺鍍出的薄膜結構整齊且密度高，因此散射很小，可利用來做高級之鏡片。

參考資料：

薄膜光學與鍍膜技術(第五版) 李正中編著 藝軒圖書出版社
表面與薄膜處理技術(修訂版) 柯賢文編著 全華科技圖書股份有限公司
薄膜科技與應用(修訂版) 羅吉宗編著 全華科技圖書股份有限公司

網路資料：

<http://www.me.tnu.edu.tw/study/proj/proj90/90-10%20AEg%20COW%20q%20C1%E1%BE%F7%A4%A7%BBs%B5%7B%BBP%B3%5D%B3%6%AA%EC%A8B%A7%DE%B3N%B9%EA%B2%DF.pdf>

<http://140.127.111.62/8/GTL%20meeting-1.pdf>

<http://www.me.tnu.edu.tw/study/proj/proj90/90-68%A5b%BE%C9%C5%E9%AFu%AA%C5%CO%B0%AE%FA%C2%E0%A4I%A4%A7.pdf>

<http://www.lightfc.com/PDF/guangxuedumo/%E7%9C%9F%E7%A9%BA%E6%8A%80%E6%9C%AF.pdf>

<http://www.itrc.org.tw/Bulletin/Newinfo/pld.php>

http://www.ntut.edu.tw/~wwwemo/instrument_manual/sputter.htm

<http://etdncku.lib.ncku.edu.tw/theses/available/etd-0710103-140922/withheld/etd-0710103-140922.pdf>

特別感謝：

張純志老師接受訪問以及對於期刊的校正與指導

李孟恩老師對於期刊的校正與指導

蕭博文同學提供照片

指導老師：張純志 老師、李孟恩 老師

監 製：謝旻錡

主 編：吳國豪

發 行：國立高雄師範大學 物理學系 學術組

日 期：2008年12月 初版