

電鑄技術簡介

在微機電裡的微光刻電鑄技術(LIGA)中，可以完成結構之高深寬比及任意曲面加工的需求，其技術並可有非常高的精度而且可大量製造，對於應用在未來光電和光通訊產業上會有很大的幫助。傳統的車、銑、磨、鑽等機械加工方式已經無法滿足精密微結構模具的製造，故精密電鑄製程的應用已經日益受到重視。

電鑄(electroforming)製程就是把原型母模放在陰極上，利用電鍍(electroplating)原理沉積至適當的厚度，再使其與母模脫離，這種製程可以生產各種金屬模具和精密零組件。

其所適用的領域如下[1]：

1. 光學鏡面複製。
2. 表面複雜細紋複製。
3. 以傳統加工方式製作不易或製作成本太高之模具複製。
4. 以傳統加工方法製作不易掌握再現性者。
5. 工件壁薄，很難以傳統方法加工者。
6. 希望透過大量翻制，縮短製程時間者。
7. 工件內含複雜結構，以傳統方法加工困難者。
8. 微篩網、微過濾膜等微結構之複製量產。
9. 金屬箔之製造。

電鑄是一種高效率且精密的模具成形技術，今日廣泛應用於光碟片、全像片

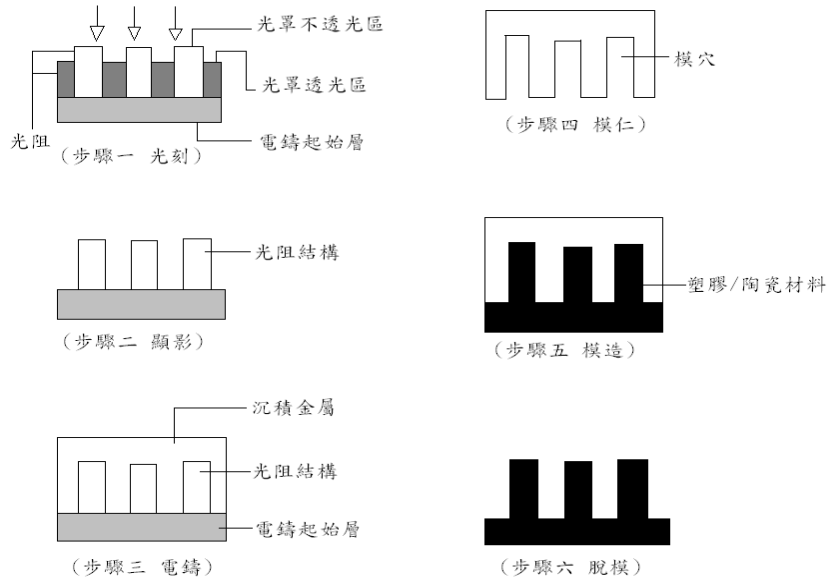
及光學模仁複製。

精密電鑄技術的特性為：

1. 只要一道加工程序，即可得形狀複雜工件。
2. 對母模複製性極佳，可複製量產用公模。
3. 複製精度高，適合做光學訊號複製。
4. 配合其他加工技術，可得多種特殊設計工件。

LIGA 為德文 Lithografie、Galvanoformung 和 Abformung 的縮寫，英文含意為：光刻術 (Lithography)，電鑄 (Electroforming)，微成形 (Micromolding)。發展的目標在製造具高深寬比 (High aspect ratio) 的元件結構，再搭配犧牲層 (sacrificial layer) 組合而成可活動的複雜機械元件或系統。

微機電製程領域之微光刻電鑄模造技術(LIGA)，結合了積體電路的光刻術、電化學的電鍍鑄模技術，可用以大量翻造高深寬比(high-aspect-ratio)或複雜的 3D 形狀微結構，支援元件強度及增加其電、磁致動特性[2]。如圖



圖、LIGA 製程示意圖

第一步驟是在基板上鋪上一層厚度數十至數百微米的高分子光阻材料，光源經由特殊設計與製作的光罩照射在光阻上。

第二步驟是將照設過光源的光阻顯影後，即可得到由光罩圖案轉移的光阻模板。

第三步驟是利用電鑄技術，將金屬沉積在此光阻模板內。

第四步驟是用蝕刻將光阻去除，即可得到所需微金屬結構。

第五步驟是以金屬微結構當做模仁，以熱壓法或射出成形等技術量產塑膠微結構。最後脫模得到微結構產品[3]。

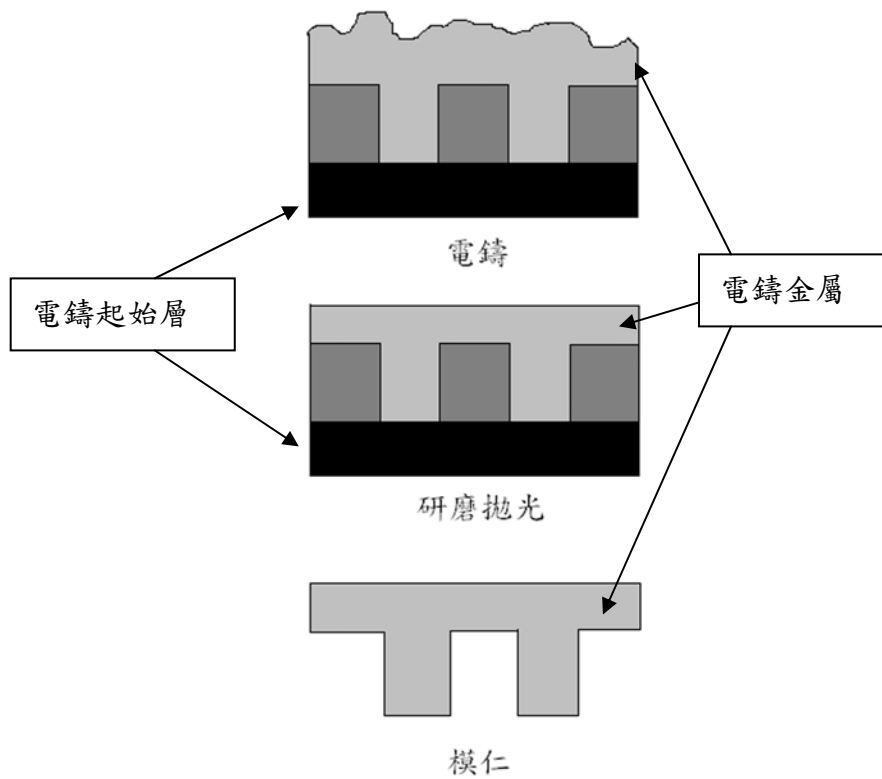
根據模仁的微結構尺寸、準確度需求與製造成本，LIGA 技術已呈現多樣發展，但其本質仍不脫離光刻、電鑄及模造三種主要製造程序。

電鑄原理

電鑄技術乃利用電鍍原理，將各類金屬沉積於特殊設計的母模上，等沉積到一定厚度的時候，跟母模脫離，就可以產生電鑄工件。

利用電鑄技術製作模仁，用以批量生產微系統元件，可降低成本、滿足工業市場需求，這也是 LIGA 製程的最大特色。模仁電鑄的技術層次相當高，因隨著電鑄層厚度增加電鑄層容易產生變形、表面暨內部針孔及平坦性等問題。利用電鑄參數與鑄液組成的控制，上述問題可以獲得改善。為了降低模仁內應力，常以低電流密度方式進行電鑄，亦即需耗費數週時間才能完成模仁電鑄。

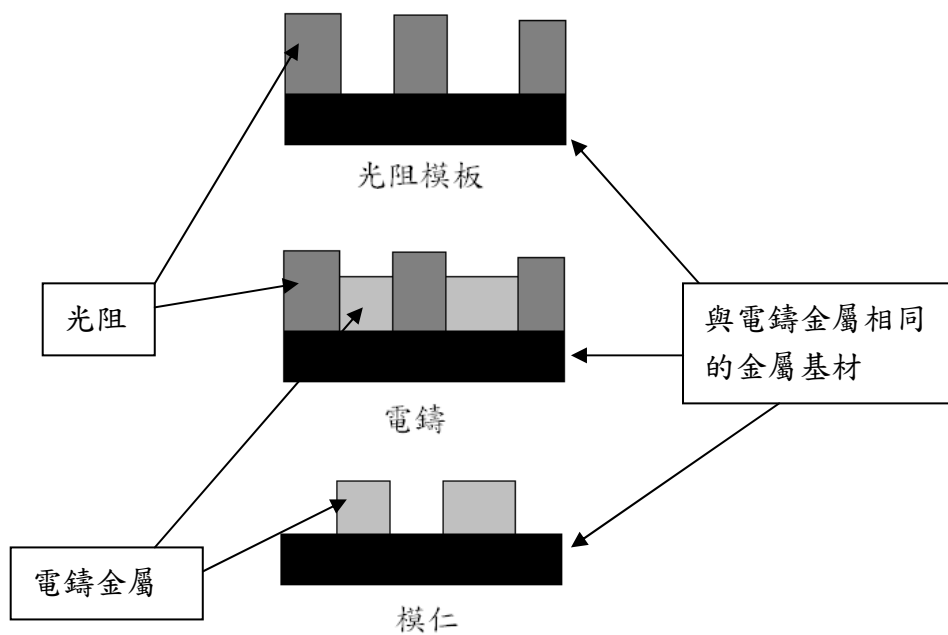
一般模仁電鑄的方式如下圖所示，先將鑄層變厚再經精密機械加工修整。



圖、電鑄模仁之程序(a)。

但這種電鑄方式必須將鑄層內應力控制到最小，耗費製程時間，且加工修整模仁

時易造成微結構破壞。為避免以上的缺點，模仁的製作方法改良如下圖所示，先將純鎳金屬(99.9%)材料修整成模仁基部形狀，接著以此作為基板形成光阻微結構，後續鎳電鑄至所需厚度，去除光阻後即形成所需模仁。



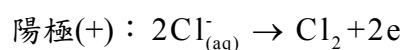
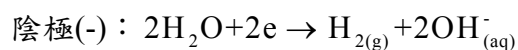
圖、電鑄製做模仁之程序(b)。

離子與電解

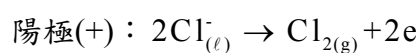
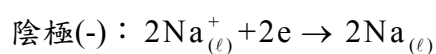
離子(ion)是一個帶電荷的粒子，是由一個原子或原子團失去或得到電子而形成。帶正電荷(positive charge)者稱為正離子或陽離子(positive ion or cation)，帶負

電荷(negative charge)者稱為負離子或陰離子(negative ion or anion)。正負離子是由電解質加熱熔化而產生可以自由移動的正負離子，或是由電解質溶於溶劑中，由於水的極性與電解質的組成離子產生水合作用(hydration)，而行成可自由移動的正負離子。

電解質在水溶液中解離成正負離子，其正負離子所代之總電量相等而使溶液保持電中性(electrical neutrality)。而正負離子在電解質溶液中可自由移動，若通入直流電流，則正離子向負極移動，而負離子向正極移動，並在二電極上發生電子授受的化學反應，此現象稱為電解(electrolysis)。例如：氯化鈉容易在電解槽中通入直流電流後，氯離子向陽極移動而在陽極表面上發生氧化反應形成氯氣，而鈉離子向陰電極移動而發生還原反應。其反應式如下：



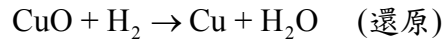
若電解熔化狀態的純氯化鈉，則其反應式如下所示：



氧化與還原

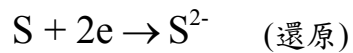
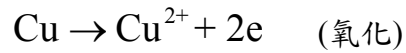
在狹義的觀念中，物質與氧化合的反應，稱為氧化(oxidation)。反之，一氧化物中拿走氧的反應稱為還原(reduction)。舉例如下：





但是在電化學中，氧化是物質失去電子的反應，還原是物質或得電子的反應。舉

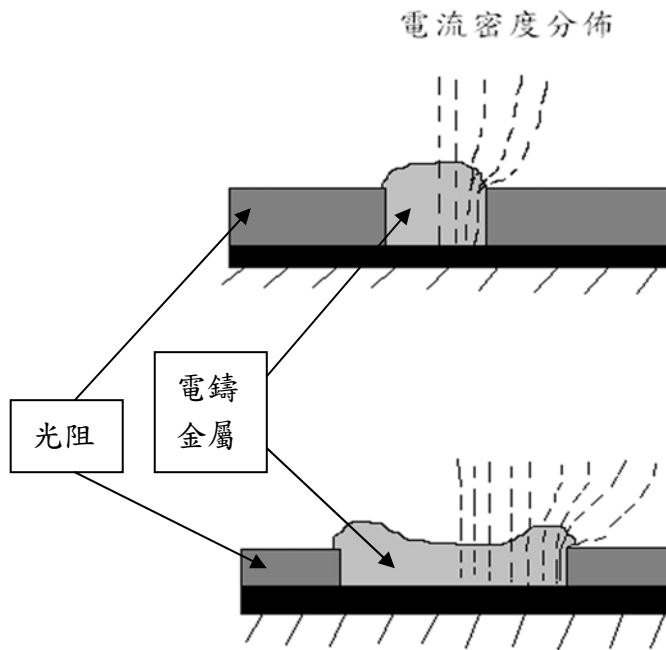
例如下：



電流密度

在電極上每單位面積所通過的電流，稱為電流密度，其單位為 A/cm^2 、 mA/m^2 、 A/dm^2 。電解時通常需要高電流密度，而電鍍(鑄)時通常需要低電流密度，因為這樣才可以得到比較均勻的鍍層。

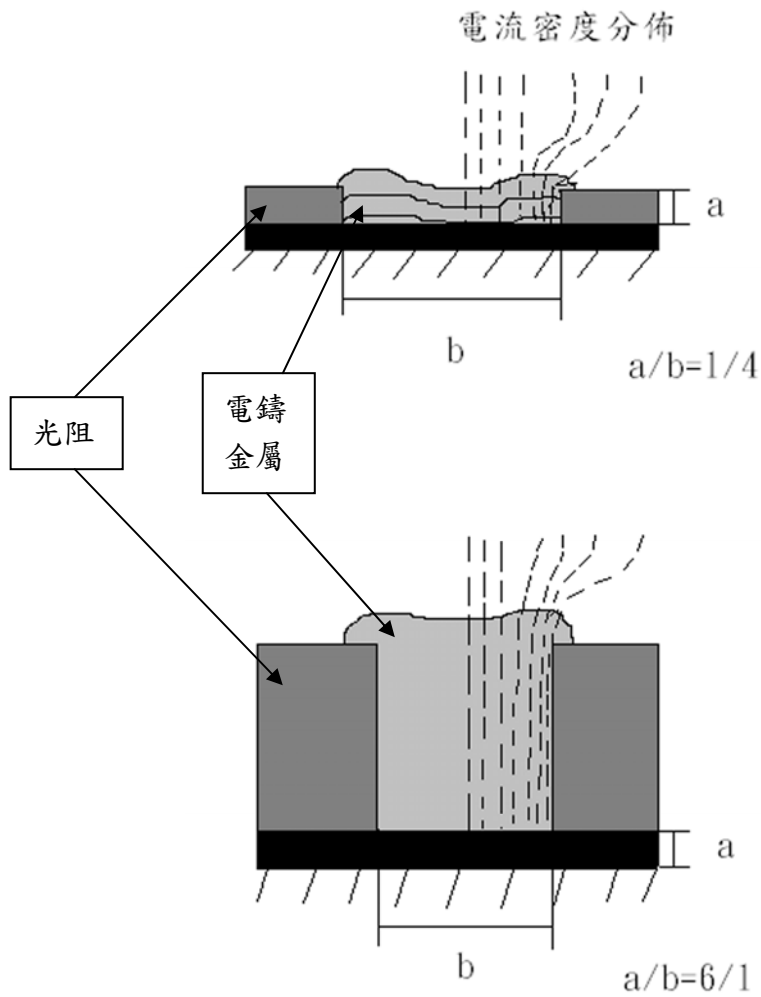
微結構電鑄的品質深受結構圖案設計、圖案密度、圖案分布位置、深寬比及電鑄液組成等因素影響。如下圖為薄光阻結構電鑄時，電流密佈分布不均勻及尺寸差異導致電鑄層厚度形成的差異。



圖、電流密度分布對薄光阻結構電鍍厚度的影響。

當密度均勻的陽極電流經過電鍍液接近陰極圖案結構，將在圖案接近光阻的外緣產生電流聚集(crowding)現象。當被鍍物的尺寸越小，周圍光阻的覆蓋面積越大，則電流聚集密度越大。電流聚集區域的金屬沉積速率較中間部位為快，因此此在橫向(lateral)尺寸較大的結構中，產生外緣電鍍層較內緣為厚的結果。

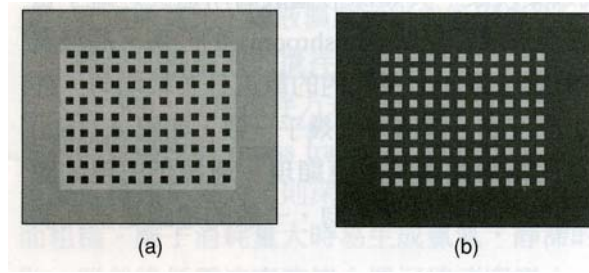
如下圖所示，為不同深寬比光阻結構電鍍時，鍍層表面輪廓曲線隨電鍍厚度變化所造成的差異。



圖、不同深寬比對電鑄輪廓曲線的影響。

低深寬比結構電鑄時，受到外緣電流聚集現象，與類球形擴散層所造成之離子質傳效果佳的雙重因素，使外緣電鑄層迅速沉積，終致型成香菇狀的凸塊。

改善微結構電鑄容易受電流聚集影響的方法，除了注意上述提及結構圖按設計及鑄液組成等因素外，陰極電鑄面積可設計虛設電鑄區(thieving area)或減小光阻覆蓋面積，如下圖所示。



圖、改善微結構電鑄易受電流聚集影響的方法：(a)增加虛設電鑄區；(b)減小光阻覆蓋面積。

虛設電鑄區仍可沉積金屬，但不用以製作為結構，存粹是吸收陰極外緣的高密度電流，並於微結構電鑄面積不足時增加電流密度。另外，減小陰極光阻覆蓋面積讓電鑄面積增大，有助於電流密度的均勻分布，亦可避免深孔電鑄時前處理費時、光阻殘留物不易去除、鑄層易形成缺陷等缺點。

導電度

電解液為一種離子導體，與電子導體一樣遵守歐姆定律。兩電極間電解液的

電阻可像一般金屬導體的電阻一樣定義為：

$$R = \rho \square \frac{l}{A}$$

ρ 是溶液的比電阻或電阻係數， l 是兩電極間的距離， A 是通電的容易截面積。

$\frac{1}{R}$ 是該溶液的電導，而比較重要的是 ρ 的倒數 $\frac{1}{\rho}$ ，被稱為電導係數， κ

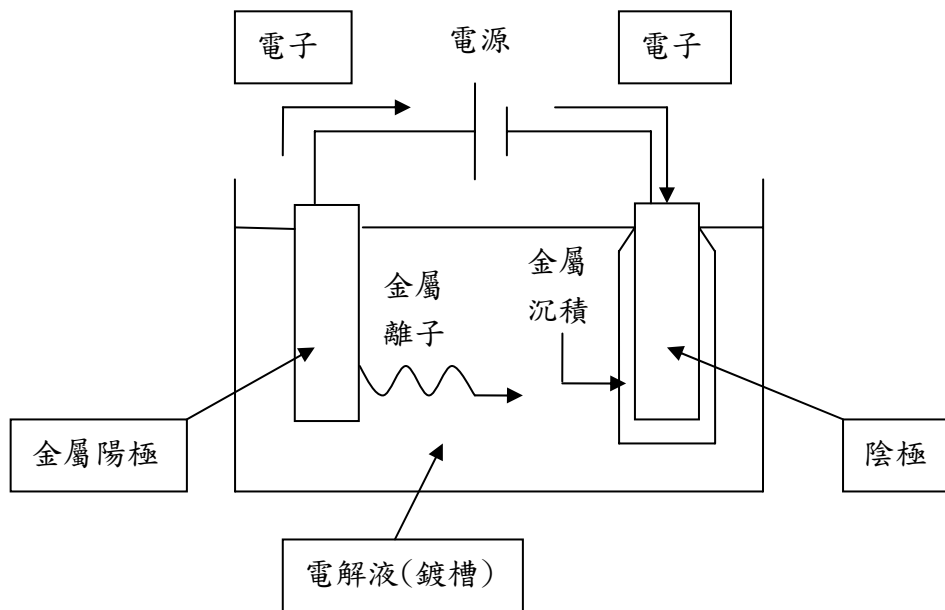
$$\kappa = \frac{1}{\rho} = \frac{l}{RA}$$

κ 的單位為 $\Omega^{-1}\text{m}^{-1}$ 或 mho/m

接下來介紹電鍍原理：

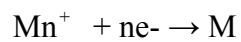
電鍍主要構成元素如下：

- (1)外部電路
- (2)陰極(欲鍍物品)
- (3)電鍍溶液
- (4)陽極(欲鍍上物品的金屬)



圖、電鍍系統概要

電沉積為電解液提供金屬離子給陰極，其在陰極發生電荷轉移：

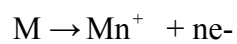


Mn^{+} ：金屬離子

n ：反應所需之電子數目

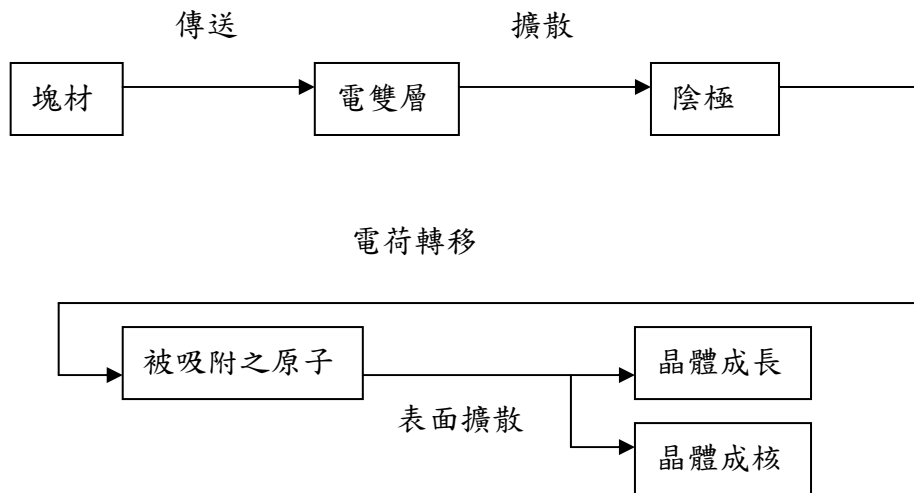
M ：沉積之金屬原子

金屬陽極排出金屬離子補充減少的金屬離子。



電源提供反應在陰極和陽極所需的電子能量。

電沉積過程：



圖、電沉積之連續步驟

當離子擴散至電極表面附近，可能會有兩種析鍍過程：

(a) 離子直接由其所在位置穿過電雙層(electrical double layer)，而達電極離子直接由其所在位置穿過電雙層(double layer)，而達電極表面，再藉由表面擴散移動至適當結晶位置。

(b) 離子在發現電極上有適合析鍍之位置後，直接穿透電雙層到達電極表面放電析出，不再移動。

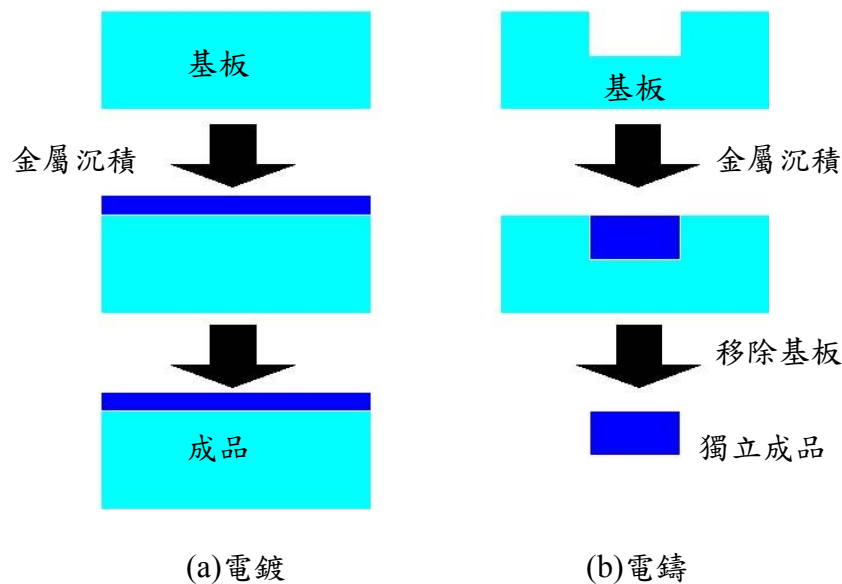
電鍍與電鑄差異：

1. 電鍍沉積層較薄(μm)且須與基材緊密結合，鍍層成為工件的一部分，而電

鑄層較厚($\mu\text{m}\sim\text{cm}$)且可以與母模完全脫離成一個獨立的成品。

2. 電鍍用的模具材料大多為導體，而電鑄用模具的選用則多樣化，導體、非導體和光阻製作的母模都是在選擇的範圍內。
3. 電鑄品強調機能性，因此拉伸強度、硬度等機械特性受到重視；電鑄注重光澤性、平滑性、抗磨性與耐腐蝕性等，所以兩者的鍍液成分及操作條件不同。

電鑄沉積過程是一個個原子堆積而成，所以可以完整的複製原本母模的形狀結構。由於電鑄層較厚，所以容易產生內應力、變形以及表面內部針孔等問題，必須將電鑄操作參數如鑄液成分、PH 值、溫度、添加劑及雜質等，在電鑄程序中控制管理。



圖、電鍍與電鑄之差異。

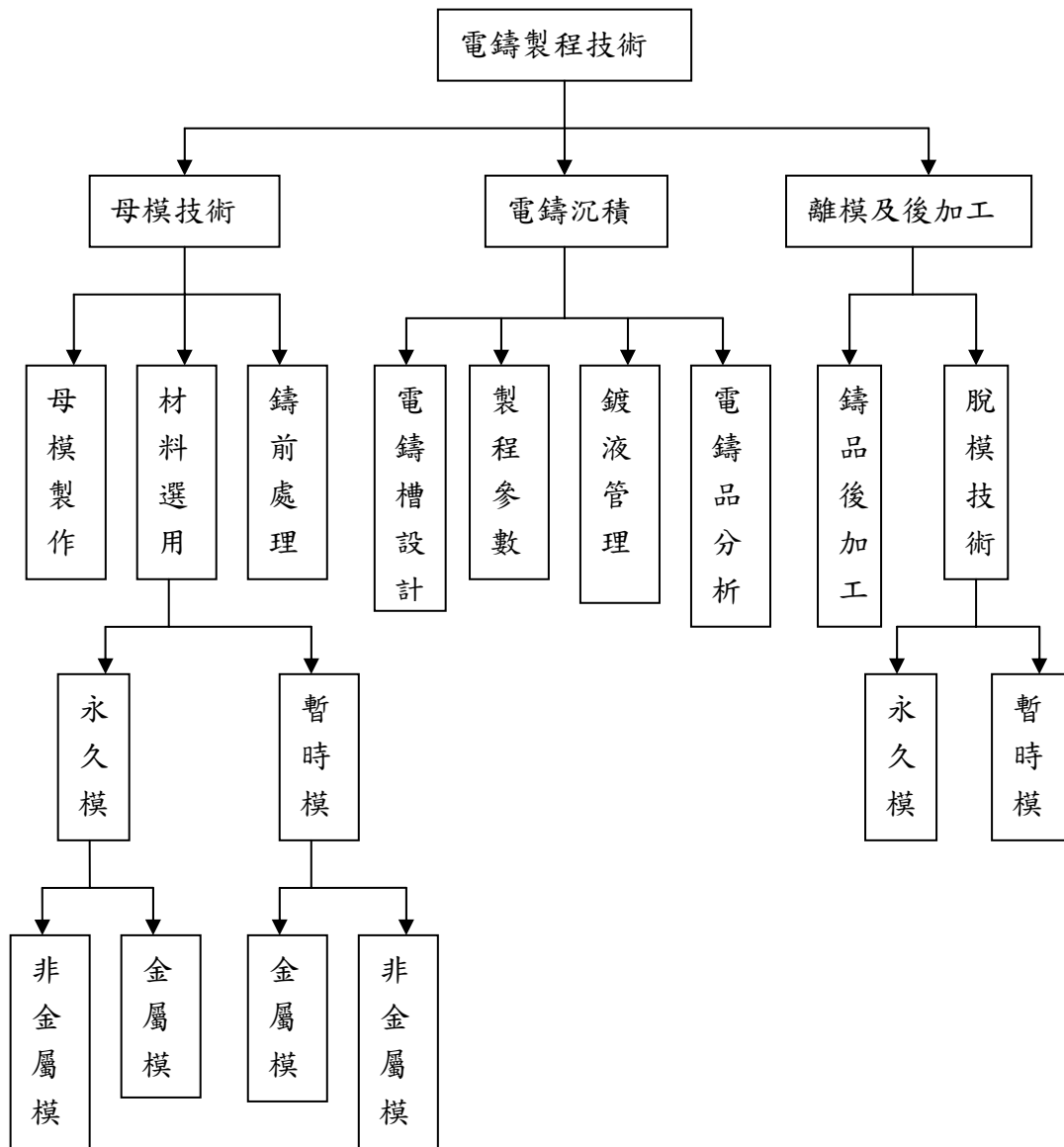
電鑄的分類有：

1. 金屬電鑄：如 Ni、Cu、Au、Ag 及 Pt 等。
2. 合金電鑄：如 Ni-Fe、Ni-Co、Ni-Mn 及 Ni-W 等。
3. 複合電鑄：如 Ni-SiC 及 Ni-diamond 等。

應用電鑄製程製作合金金屬模具的基本原則與步驟如下圖所示，其說明如下

[4]：

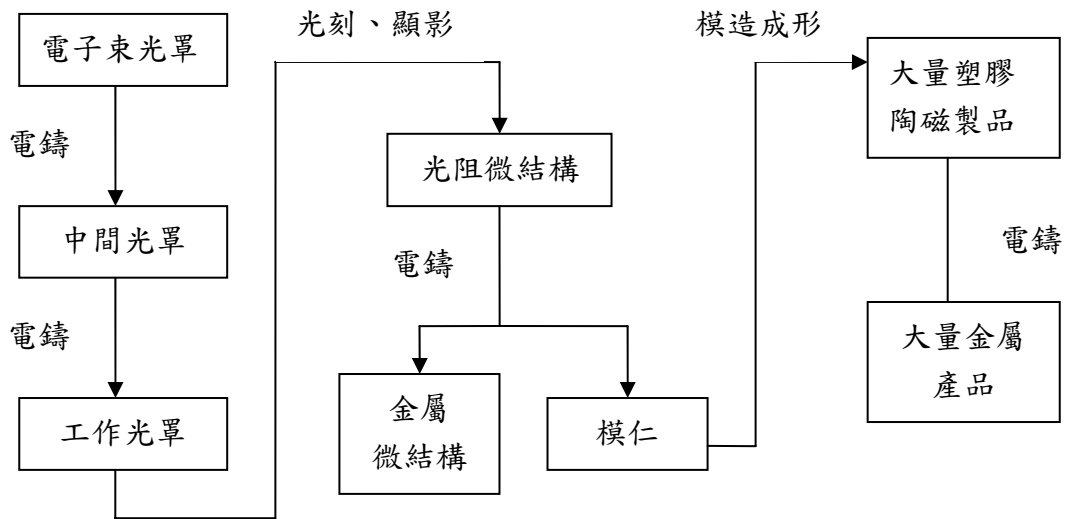
1. 製作合適的電鑄用原型母模，材料的選用如蠟、橡膠、塑膠、石膏或其他金屬皆可。
2. 原型母模必須先行表面處理，如清洗、脫脂、活化及導電等步驟，再放入專門設計與調配好電鑄容易之槽體中經直流或脈衝電源導通後，陽極的金屬便溶解沉積於陰極的原型母模上。
3. 等待達到所需的合金厚度，原型母模即可離開電鑄液，經過清洗與乾燥步驟，鑄層即可與原型母模剝離。
4. 最後進行鑄件檢視與品質測試。



圖、電鑄製程技術內容

在 LIGA 製程中電鑄程序所扮演的角色如下圖，其主要有三項功能：

1. 鍍金製作 X 光光罩之吸收層。
2. 以金屬、合金或複合電鑄方式，製作金屬微結構。
3. 以金屬、合金或複合電鑄方式製作模仁，大量生產塑膠或陶瓷為結構。



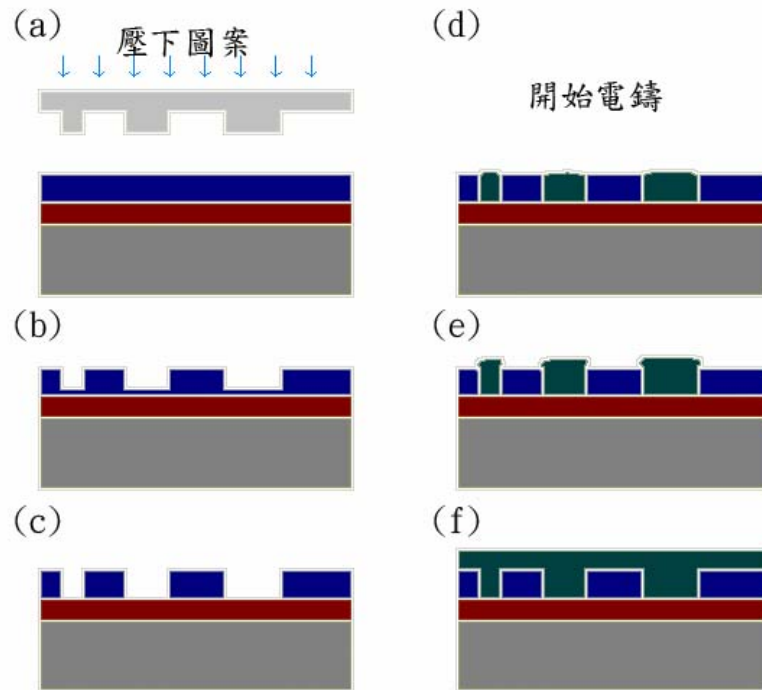
圖、LIGA 製程中電鑄程序所扮演的角色

電鑄應用實例

- 於熱塑性材料上壓出模型(Embossing)

熱壓成形技術(Hot Embossing Lithography HEL)與 LIGA 不同的地方是 HEL 於熱塑性材料薄膜在黏性的狀態下利用模版壓出圖形，而 LIGA 是利用製作好的光照用光顯影技術產生出想要的圖形。但此兩種技術都可使用電鑄來沉積金屬於模型上，可得到最後想要的結構模型。

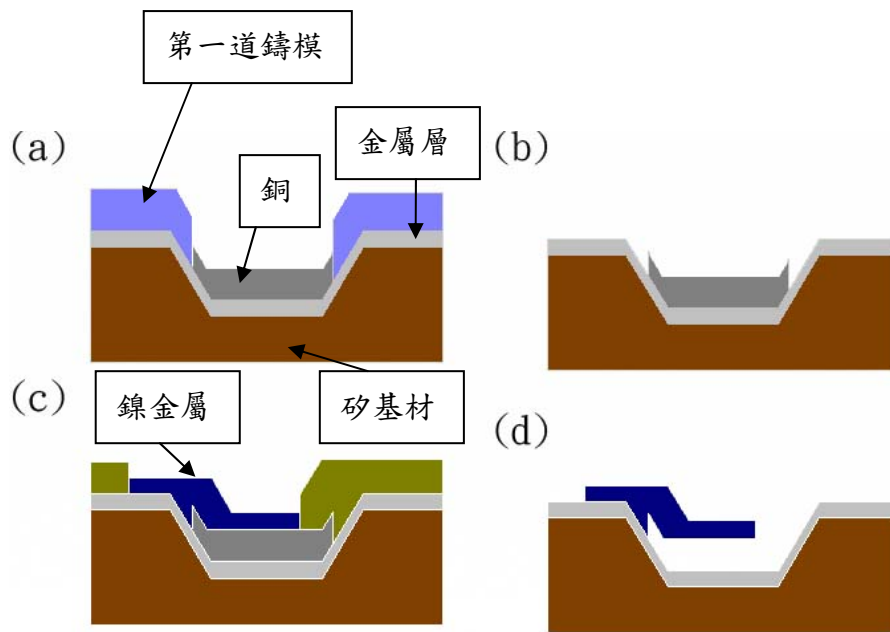
一熱塑性材料在黏稠的狀態下用一模子往下壓出與模子相同的圖形，當材料冷卻後即變堅固並和模子脫模，如下圖(a)、(b)所示。然後以濕式蝕刻將底部的熱塑性材料去除形成一個完整的孔洞，如圖(c)所示。接下來以電鑄的方式沉積金屬於孔洞中，即形成想要的金屬結構模型，它可承受反覆的使用以及極高的機械負荷，如下圖(d)、(e)、(f)。



圖、熱壓成形：熱塑性材料模型和圖案轉移。

- 微繼電器

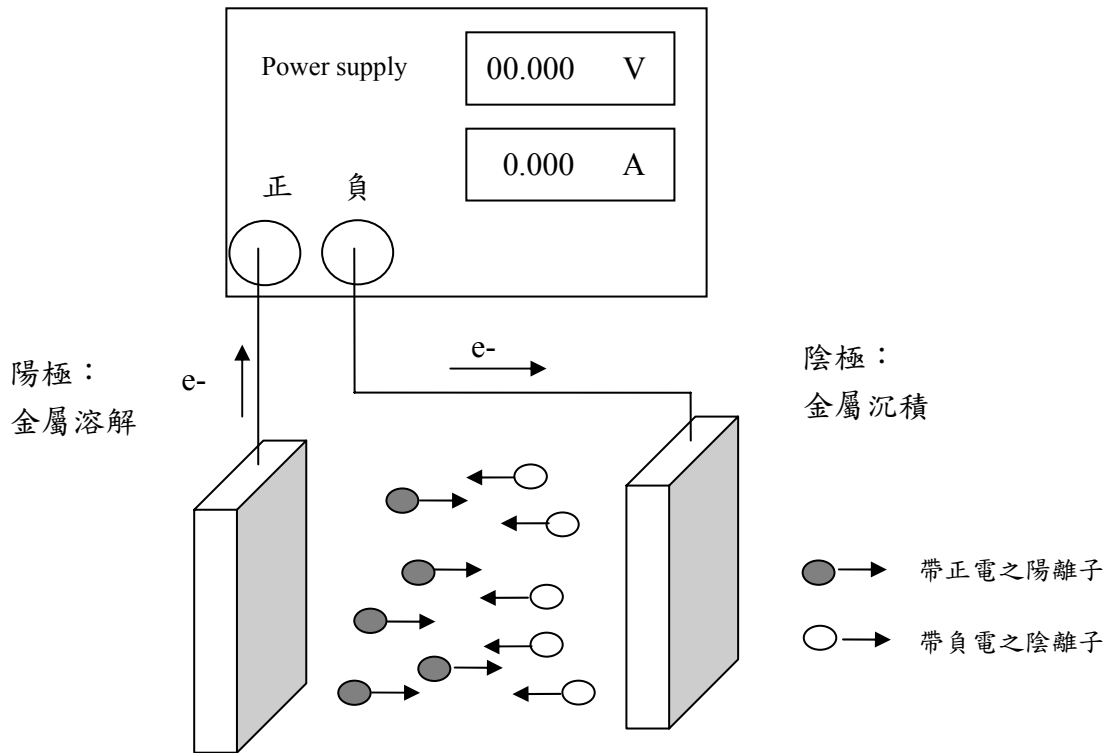
首先在矽基板(silicon)上用 KOH 蝕刻出深度 330um 深的溝槽，且在表面上蒸鍍一層金屬(seed layer)，然後電沉積(electrodeposited ED)一鑄模和一 4um 厚的低應力銅層如下圖(a)。接下來剝除鑄模，如下圖(b)。接下來再做一次電沉積鑄模且在中間鍍上一層 8um 厚和無殘留應力的鎳金屬層，如下圖(c)。撥除第二次的電沉積鑄模和蝕刻掉鎳層底下的銅層後，即出現如繼電器金屬接片的結構。



圖、鎳金屬懸臂結構的形成過程簡圖。

電鑄製程說明

如下圖所示為電鑄系統架構與陰、陽極作用示意圖。在電鑄過程中，接上外部直流電源使兩極間產生電壓，此時陽極金屬會溶解於鑄液中，形成金屬離子並放出電子，陰極則因為獲得電子而使金屬離子沉積於模板中。因導電起始層僅有數千埃(angstrom, 10^{-10}m)，所以在開始沉積時先以低電流密度為之較佳，等鑄層增厚後再加大電流密度，否則沉積層會呈現燒焦狀態。



圖、電鑄系統架構與陰、陽極作用。

電鑄前待鑄件必須經過適當之一般電鑄前處理步驟：

水洗→脫脂→水洗→酸洗活化→水洗→(浸漬離型劑→水洗)。

- 純水沖洗的目的在於去除待鑄件之微粒雜質，並清除各前處理程序之殘留藥劑，以避免污染鑄液。
- 脫脂與酸洗活化目的，分別是去除附著於電鑄起始層表面的油脂類污染與氧化層，以保持鍍液之潔淨及金屬沉積層能密著於電鑄起始層。
- 浸漬離型劑(重鉻酸鉀)的目的則是為了電鑄完成後，使電鑄層能與光阻模板順利分離所施行的步驟。

- 待鑄件經過前處理後露出活化的金屬起始層，電鑄金屬即由此起始層開始成長，最後形成與光阻型態互補的金屬結構。
- 電鑄進行中應該盡量避免拿出鑄件觀察，以免鑄層氧化致使後續沉積不易，或容易產生界面剝離現象。
- 電鑄完成後，鑄件必須進行純水沖洗並加以乾燥，以避免住件表面產生斑點、鏽及變色。

電鑄之實作：

1. 實驗室一覽

進入實驗室後雙手務必帶上手套，口帶口罩，由於此實驗室有較多化學藥品，有傷害人體之藥品，同學應該謹慎處理實驗步驟，不宜玩樂，並保持環境衛生。



圖、微電鑄實驗室。

2. 做實驗之前請先看過實驗規則與步驟、操作方法、與注意事項。



圖、排煙櫃操作說明及維護保養事項。

3. 電源供應器

電源供應器為供應電鑄的電壓與電流之來源，操作程序如下：

- (1) 按下電源供應器之 POWER 鈕。
- (2) 按下 V/A 鈕，切換欲輸入電壓或電流模式。

數字底下的底線為目前欲輸入的模式(電壓或電流)，此時可以輸入
該模式(電壓或電流)的數值。

- (3) 輸入(電壓或電流)數值。

做實驗時，一般都將電壓值固定，調整電流值。而電壓值通常只供
應些許數值(有數值即可)，電流值的輸入要看 ASD 值與電鍍面積
的情況，ASD 值、電鍍面積與電流值的關係如下：

$$ASD = \frac{\text{電流(A)}}{\text{面積(平方公吋)}}$$

ASD 值為 1~5，一般都調到 1，最大不超過 5；ASD 數值越小，電

流值越小，沉積越慢、品質越高。

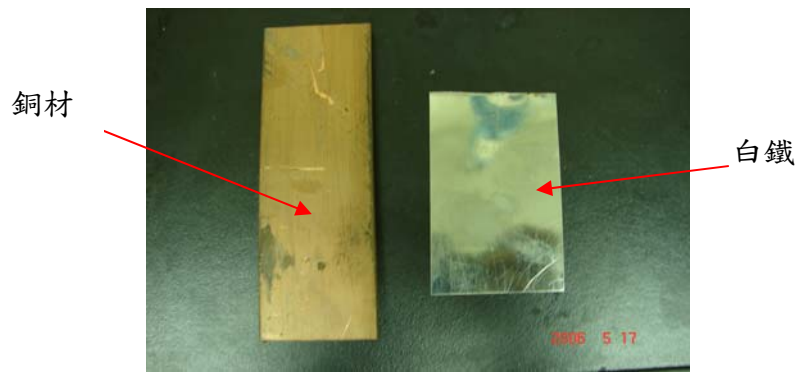
- (4) 每當輸入完電流或電壓值後，記得要按下電源供應器上的”ENTER”鍵。
- (5) 此時並還沒開始輸出電流，需按下 OPER/STBY 鍵才會真正輸出電流，但此時我們還不需要按下 OPER/STBY 鍵。
- (6) 將”鱷魚線夾”插入電壓”+”和”-”極，另一端夾上被鍍物與欲鍍物(例：正極夾上欲鍍之銅材，負極夾上被鍍之金屬)。



圖、實驗用電源供應器。

4. 欲鍍物與被鍍物

- (1) 準備好欲鍍物與被鍍物材料，一般我們準備欲鍍物為銅材，被鍍物為白鐵片(只要是金屬，都可當被鍍物)。
- (2) 將插在電源供應器正極的鱷魚線夾夾上銅材，負極的鱷魚夾線夾上白鐵片。



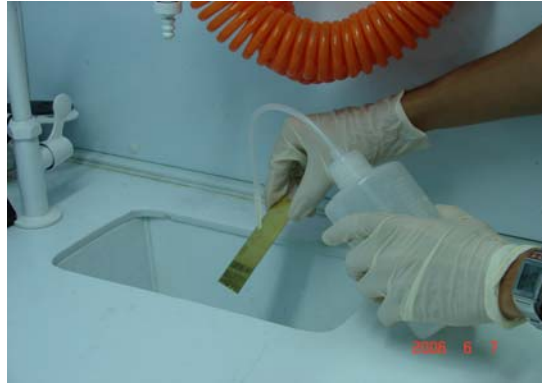
圖、實驗用之材料。(左邊為銅材，右邊為白鐵片)

5. 對被鍍物做電鑄前處理

- (1) 用水沖洗被鍍物。
- (2) 脫脂：以丙酮沖洗被鍍物。
- (3) 在一次用水沖洗被鍍物。
- (4) 酸洗活化：將被鍍物用鹽酸浸漬。
- (5) 在一次用水沖洗被鍍物。



圖、用水沖洗被鍍物。

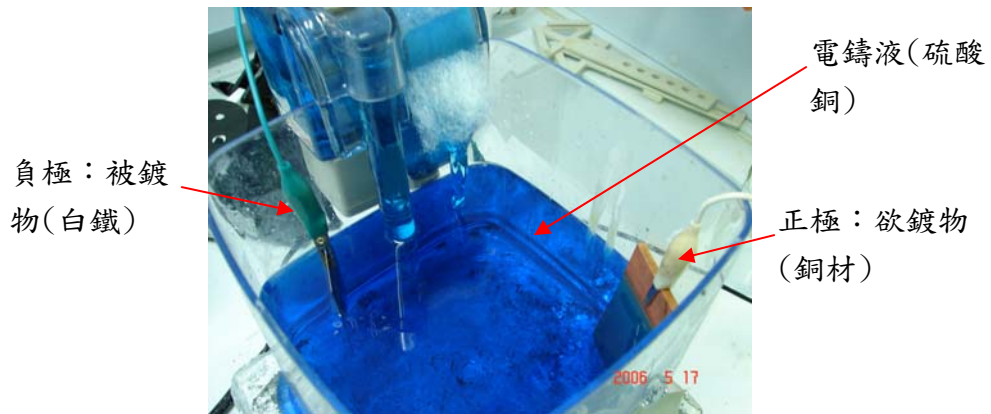


圖、用丙酮沖洗被鍍物。

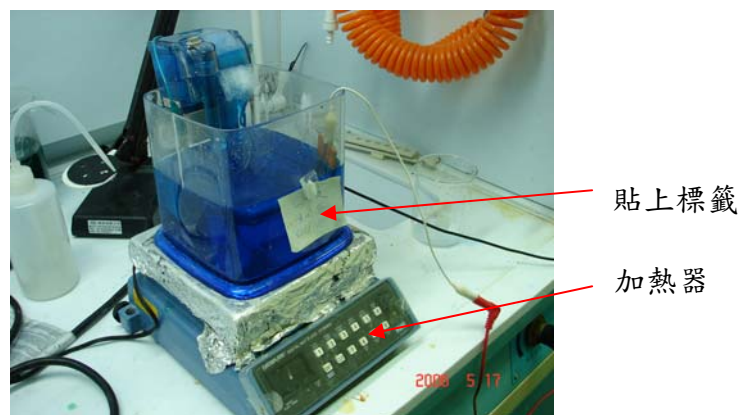
6. 準備電鍍液以及將欲鍍物和被鍍物放入鍍槽內。

有些電鍍液如”鎳”毒性較強，同學應謹慎使用。

- (1) 將電鍍液到入電鍍槽容器裡。
- (2) 不要將電鍍液倒滿整個電鍍槽，一般為 6~7 分滿。
- (3) 將欲鍍物和被鍍物放進槽內(先不要供應電流)。
- (4) 檢查夾上欲鍍物和被鍍物的鱷魚夾有無碰到鍍液，若是碰到鍍液的話應調整較高位置使其不碰到鍍液，不使鱷魚夾也鍍上金屬。
- (5) 將整個鍍槽放置加熱器上。
- (6) 使用者需在玻璃槽外貼上標籤，並註明：使用者姓名、使用時間、電流密度(ASD 值)。



圖、左邊為負極夾上白鐵片，右邊為正極夾上銅材。



圖、將度槽放至加熱器上。

7. 輸入加熱器數值

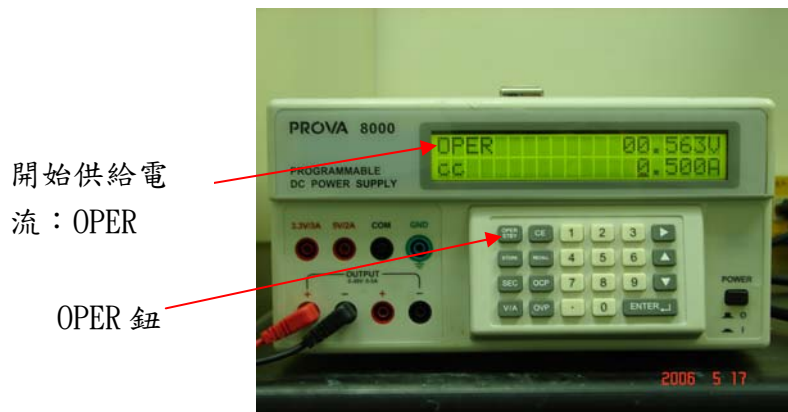
- (1) 插上加熱器電源線。
- (2) 打開加熱器 power 開關。
- (3) 輸入欲加熱溫度值(60°C)。
- (4) 按下”enter”鈕，開始加熱。



圖、實驗用加熱器。

8. 按下電源供應器之 OPER/STBY 鍵

按下此鍵後，才會開始對正負極之間產生電流。此時電源供應器顯示窗左方會顯示出”OPER”的字樣，即表示已開始對材料加工。



圖、此時需按下數字鍵盤左上方的 OPER/STBY 鍵。

9. 電鑄時間：20 分鐘。

10. 電鑄完成後取出欲度物與被鍍物，並先將電源供應器的 OPER/STBY 鈕切換至”STBY”模式。

11. 再將被鍍物以丙酮清洗一次。



圖、電鑄完成後再將被鍍物以丙酮清洗一次。

實驗規劃

參考文獻

1. 吳憲明，精密儀器電鑄技術市場應用，雷射加工暨精密電鑄技術研討會，台大慶齡工業研究中心，52，(1997).
2. The Technical Report of Institute fur Mikrotechnik Mainz (IMM), Mainz, Germany.
3. 楊啟榮，微系統 LIGA 製程技術，科儀新知，19(4)，4(1998)。
4. 陳建仁，精密電鑄製程之應用介紹，鑄造科技，154，4(2002)。
5. 楊啟榮，強玲英，黃奇聲，科儀新知，22(1)，15(2000)。
6. 田福助，電化學(原理與應用)，高立圖書，2001。

7. L. J. Heyderman, H. Schiff, C. David, B. Ketterer, M. Auf der Maur, J. Gobrecht, "Nanofabrication using hot embossing lithography and electroforming", *Microelectronic Engineering*, 375-380, (2001).
8. S. Y. Chou, P. R. Krauss, W. Zhang, L. Guo, L. Zhung, *J. Vac. Sci. Technol. B* 15 (6) 2897-2940 (1997).
9. W. Menz, J. Mohr, in: 2nd Edition, *Mikrosystemtechnik für Ingenieure*, VCH-Verlag, 1996.
10. L. S. Johansen, M. Ginnerup, "Electroforming of 3D microstructures on highly structured surfaces", *sensors and actuators* 83, 156-160, (2000).