

第五章 討論與結論

在本章將說明實驗數據趨勢，並針對實驗數據趨勢現象嘗試找出合理的解釋。

5.1 實驗數據趨勢

電鍍鎳微結構材料楊氏係數實驗結果，如表 4.2、圖 4.1、圖 4.2 所示，電鍍鎳硬度實驗結果，如表 4.3、圖 4.3、圖 4.4 所示，電鍍鎳熱膨脹係數實驗結果，如表 4.4、圖 4.5、圖 4.6 所示，根據以上量測結果，整理出定性變化趨勢如表 5.1 所示而定量變化趨勢如表 5.2、表 5.3 所示。

表 5.1 實驗數據趨勢：在不同厚度及不同電鍍電流密度時，鍍層楊氏係數、硬度及熱膨脹係數的變化趨勢(定性)。

固定參數	變動參數	楊氏係數	硬度	熱膨脹係數
固定電鍍電流密度	電鍍層厚度 ↑	↓	↓	↑
固定電鍍層厚度	電鍍電流密度 ↑	↓	↓	↑

表 5.2 實驗數據趨勢：固定厚度時，在不同電鍍電流密度時，鍍層楊氏係數、硬度及熱膨脹係數的變化趨勢(定量)。

厚度 (μm)	電流密度 (mA/cm^2)	電流密度 5→20 楊氏係數差異(%)	電流密度 5→20 硬度差異(%)	電流密度 5→20 CTE 差異(%)
4	20 ↑ 5	↓ 14.5	↓ 5.8	
8		↓ 13.2	↓ 6.0	↑ 74.2
12		↓ 11.7	↓ 5.8	↑ 97.3
16		↓ 10.4	↓ 9.8	↑ 59.3

表 5.3 實驗數據趨勢：固定電鍍電流密度，在不同厚度時，鍍層楊氏係數、硬度及熱膨脹係數的變化趨勢(定量)。

電流密度 (mA/cm ²)	厚度 (μ m)	厚度4→16 楊氏係數差異(%)	厚度4→16 硬度差異(%)	厚度8→16 CTE差異(%)
5	16 ↑ 4	↓12.7	↓12.7	↑25.0
10		↓15.1	↓15.1	↑49.3
15		↓12.0	↓12.0	↑30.9
20		↓8.5	↓8.5	↑14.3

※因4 μ m微懸臂樑會翹曲，CTE測試只有8~16 μ m資料。

5.2 實驗趨勢解釋

針對實驗數據趨勢，個人嘗試由試片鍍層結晶組織晶粒尺寸大小變化來找出合理解釋。

電鍍層機械性質受結晶晶粒尺寸所影響，Fritz[4]研究電鍍鍍薄膜材料特性，發現受電鍍操作參數平均電流所影響，在不同的電鍍平均電流操作參數下會產生不同的結晶組織，進而有不同的機械特性，在低平均電流的電鍍操作參數下，結晶組織的晶粒尺寸小，薄膜材料特性為脆性、高楊氏係數、高強度和高硬度。在高平均電流的電鍍操作參數下，結晶組織的晶粒尺寸大，薄膜材料特性為延性、低楊氏係數、低強度和低硬度。王大倫[26]也指出鍍鍍層晶粒尺寸愈小則鍍層硬度愈高，且低電流密度的晶粒尺寸較高電流密度的晶粒尺寸較為細小。另根據蘇癸陽[5]指出鍍層愈厚，其鍍層結晶粗大且表面粗糙，多晶 (Polycrystalline) 材料[27]由於各個晶粒的結晶學方向不同，因此在兩晶粒相遇的區域存有某些原子的錯誤匹配，此區域稱為晶粒邊界 (Grain Boundary)，在多晶金屬中，晶粒尺寸會影響其機械性質。因晶界對差排移動其作用就像一障礙物，差排通過晶粒邊界進入另一個晶粒必須改變其移動方向；當結晶方位不同程度增加時，此種移動變得更困難。具有較小晶粒尺寸的材料比較大晶粒尺寸的材料更硬且強，因為前者具有較多的晶界面積以阻止差排的移動。金屬材料的強度隨晶粒尺寸的減小而提高，符合Hall-Petch關係，薄膜材料晶粒尺寸的變化，影響了材料的機械強度，另文獻[28]載明，同樣的薄膜，晶粒大者，其機械強度低，所呈現的熱應力變化及熱機械性質($d\sigma/dT$)均應較小。

根據上述可整理出兩項概念：(1).鍍層結晶組織的晶粒尺寸影響薄膜材料特性；(2).鍍層愈厚，其鍍層結晶粗大且表面粗糙。在本研究所提到在不同電鍍電流密度及不同厚度時楊氏係數、硬度及熱膨脹係數的變化趨勢可用上述兩項概念來解釋。

- (1).固定電鍍電流密度，鍍層厚度愈厚時，因鍍層晶粒尺寸變大，鍍層楊氏係數、硬度呈現出變小的趨勢，而熱膨脹係數因鍍層晶粒尺寸變大，晶粒邊界數量變少，呈現出熱膨脹係數變大的趨勢。鍍層厚度愈薄時，楊氏係數、硬度變大及熱膨脹係數變小。
- (2).固定電鍍厚度，電鍍電流密度愈大時，因鍍層晶粒尺寸愈大，鍍層楊氏係數、硬度呈現出變小的趨勢，而熱膨脹係數因鍍層晶粒尺寸變大，晶粒邊界數量愈少，呈現出熱膨脹係數變大的趨勢。電鍍電流密度愈小時，楊氏係數、硬度變大及熱膨脹係數變小。

根據上述結論整理出表 5.4 以解釋整個實驗數據趨勢，而圖 5.1 為試片表面組織 AFM 影像，顯示出隨著厚度及電流密度增加，試片表面粗糙現象隨之增加。

表 5.4 從試片表面組織粗糙現象及晶粒尺寸變化解釋實驗數據趨勢。

	試片表面 粗糙現象	Grain Size	Grain Boundary 數量	薄膜材料 機械強度	實驗數據趨勢		
					楊氏係數	硬度	熱膨脹係數
電鍍電流密度 或 電鍍厚度 ↑	↑	↑	↓	↓	↓	↓	↑
電鍍電流密度 或 電鍍厚度 ↓	↓	↓	↑	↑	↑	↑	↓

圖 5.1 試片表面組織 AFM 影像

