

國立交通大學

工學院精密與自動化工程學程

碩士論文

半導體測試用高效能傳導元件之設計與製作

Design and Fabrication of Probes for IC Testing Systems



研究生：林源記

指導教授：陳宗麟 博士

中華民國九十六年十二月

半導體測試用高效能傳導元件之設計與製作

Design and Fabrication of Probes for IC Testing Systems

研究生：林源記

Student : Yuan-Chi Lin

指導教授：陳宗麟 博士

Advisor : Tsung-Lin Chen

國立交通大學

工學院精密與自動化工程學程

碩 士 論 文



Submitted to Department of Automation and Precision Engineering

College of Engineering

National Chiao Tung University

In Partial Fulfillment of the Requirements

For the Degree of

Master of Science

In

Automation and Precision Engineering

Dec 2007

Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國 九十六 年 十二 月

半導體測試用高效能傳導元件之設計與製作

研究生：林源記

指導教授：陳宗麟 博士

國立交通大學精密與自動化工程學程

摘要

本論文研製之電傳導界面元件(Contactor)，經證實可以利用高週波爐建立熔煉完成金基合金電接觸材料的技術。本研究之金基合金電接觸材料是以，金-銅-鉑-銀四元合金系統為主分別搭配，鋅(Zn)及鎳(Ni)等之強化相材料，其目的在於強化機械性質並保持高導電性。目前普遍被使用之電接觸材料為銅(Cu)基合金材料，此材料在測試環境溫度達 100°C 時表面易生成黑色氧化銅膜，測試環境溫度高於 300°C 時易生成紅色氧化亞銅膜，接觸電阻增加，嚴重時易導致接觸點燒熔。金(Au)俱有良好之抗蝕性、延展性、高導電率、不易氧化等優異特性，只要能提高其硬度並保持高導電性，便能拓展電接觸材料之應用尤其在高頻、高效能之半導體 IC 元件。

本研究重點係針對金基合金材料的製程控制，強化相材料之選擇與強化基礎，熱處理條件、程序為主要控制參數，探討合金組織結構及其機械性質與電性上之變化依據實際量測結果與分析，獲得最佳化之製程參數，實驗結果顯示在適當製程條件下，硬度可達 377Hv，電阻係數 15.68 $\mu\Omega\cdot\text{cm}$ ，達到實用之標準。

Design and Fabrication of Probes for IC Testing Systems

Student : Yuan-Chi Lin

Advisor : Tsung-Lin Chen

Degree Program of Automation and Precision Engineering

College of Engineering

National Chiao Tung University

Abstract

The purpose of this theses for develop gold matrix composites for electrical contact alloy with high strength and high electrical conductivity. Experimental results reveal that we can use the transistor induction heating machine manufacturing gold electrical contact alloy.

Widespread the electrical contact alloy been used currently get in touch with the material as the copper(Cu) alloy material, this material the surface is easily born a oxidize copper film, get in touch with electric resistance to increase, that will cause the contact burn out easily. The gold (Au) has good anti-eclipse, ductility, high conductivity and stability, as long as can enhance its hardness and keep high electrical conductivity, can expand gold electrical contact's application.

This research point is the manufacturing process control which aims at enhancing material and enhancing foundation, processing condition, procedure is main control parameters, Experimental results show at under appropriate manufacturing process condition, the hardness can reach to 377Hv, the electric resistance coefficient can reach to 15.68 $\mu\Omega$.cm, reach practical standard.

致謝

完成這份論文真是費盡千辛萬苦，國內少有這方面之研究，在有限之參考文獻與實驗數據下，歷經無數次的失敗後才得以完成。

首先要感謝我的指導老師 陳宗麟博士並致上最大的敬意，在這漫長的實驗過程中悉心的指導與關懷及潘漢宗學長之不吝賜教，著實獲益良多。期間也感謝公司長官 林殿方總經理之鼓勵與支持及公司同事的協助讓我能有充分的時間來完成研究，尤其是聖傑、家進等協助進行冶煉、試片處理、量測分析等真是感激不盡。

最後要感謝我親愛的老婆美蓉，有你在背後默默的支持，讓我在忙於課業及工作時無後顧之憂，以及兩個可愛的女兒詩涵及芷妘還有調皮的兒子楷文，你們的天真無邪及可愛的笑容，給予我精神上最大的支持，感謝大家，因為有你們的協助與參與使我的碩士生活更美好。

林源記 謹致

九十六年十二月

目錄

摘要	III
Abstract	IV
致謝	V
表目錄	X
圖目錄	XII
第一章 序論	1
1.1 前言	1
1.2 研究目的與動機	6
1.3 目前方法	9
1.4 金基合金材料標準 ASTM B541[16]	13
第二章文獻回顧與理論基礎	15
2.1 半導體測試用電接觸概要	15
2.2 影響金屬或合金材料導電的因素	15
2.3 導電合金的強化[22]	19
2.3.1 固溶強化[20,21]	19
2.3.2 時效強化	21
2.3.3 彌散強化	22
2.4 合金固溶溶解度的條件(Hume-Rothrey 法則)	22

2.5 相圖(Phase Diagrams).....	26
2.5.1 Au-Cu 二元相圖	27
2.5.2 Au-Ag 二元相圖	28
2.5.3 Au-Ni 二元相圖	29
2.5.4 Au-Pt 二元相圖	30
2.5.5 Cu-Zn 二元相圖	31
2.5.6 Ag-Cu 二元相圖	32
2.6 電接觸的型式	33
2.7 電接觸材料的分類	34
2.8 電接觸材料選用原則	35
第三章 實驗方法	46
3.1 商用電接觸材料組成分析	46
3.2 實驗流程	50
3.2.1 合金溶煉	50
3.2.2 材料熱處理	51
3.3 材料準備	52
3.3.1 實驗金屬材料及純度要求	52
3.3.2 設計合金組成	53
3.4 實驗設備	54

3.4.1 熔煉設備	54
3.4.2 導電率量測	56
3.4.3 熱分析(TGA,DSC)	57
3.4.3.1 熱重分析儀(Thermogravimetry Analyzer TGA)	57
3.4.3.2 示差掃描熱量分析(Differential Scanning Calorimetry DSC)	58
3.4.4 試片處理與金相觀察	60
3.4.4.1 試片處理	60
3.4.4.2 金相觀察	61
第四章 結果與討論	62
4.1 合金溶煉結果分析	62
4.1.1 合金設計組成比例	62
4.1.2 製造過程中可能遭遇之困難	63
4.1.4 合金溶煉製作程序	64
4.1.5 高週波合金溶煉結果	68
4.1.5.1 外觀及金相觀察	68
4.1.5.2 化學組成成份分析	70
4.2 熱處理分析	72
4.2.1 合金材料熱分析	72
4.2.1.1 Au-Pt-Ag-Cu 熱分析	72

4.2.1.2 Au-Pt-Ag-Cu-Zn 熱分析	73
4.2.1.3 Au-Pt-Ag-Cu-Ni 熱分析	74
4.2.2 熱處理步驟與條件	75
4.2.3 顯微組織及化學組成分析	76
4.2.3.1 試片 1 Au-Pt-Ag-Cu 金相及組成分析	76
4.2.3.2 試片 2 Au-Pt-Ag-Cu-Zn 金相及組成分析	81
4.2.3.3 試片 3 Au-Pt-Ag-Cu-Ni 金相及組成分析	86
4.3 合金材料硬度與導電率之量測結果分析	91
4.3.1 微硬度及電阻係數量測結果	91
4.3.2 量測結果分析	95
第五章 結論	97
參考文獻	99



表目錄

表 1-1 台灣 IC 產業重要指標[1].....	2
表 1-2 ASTM B541 材料化學成份規範 [16].....	13
表 1-3 ASTM B541 材料熱處理及加工成形規範[16].....	13
表 1-4 ASTM B541 材料機械性質規範[16].....	14
表 1-5 ASTM B541 材料物理性質規範[16].....	14
表 2-1 所示為在 20°C 時銅的添加元素與其影響[18,19]。.....	17
表 2-2 合金元素特性.....	24
表 2-3 合金元素結晶結構特性.....	25
表 2-4 常用輕負載電接觸材料種類、性能及用途[22].....	39
表 2-4 常用輕負載電接觸材料種類、性能及用途[22] (續).....	40
表 2-5 常用中負載電接觸材料種類、性能及用途[22].....	41
表 2-5 常用中負載電接觸材料種類、性能及用途[22] (續).....	42
表 2-6 常用重負載電接觸材料種類、性能及用途[22].....	43
表 2-6 常用重負載電接觸材料種類、性能及用途[22] (續).....	44
表 2-7 常用真空電接觸材料種類、性能及用途[22].....	45
表 3-1 商用探針 Johnstech PAD ROL200 化學組成成分表(A 區).....	47
表 3-2 商用探針 Johnstech PAD ROL200 化學組成成分表(B 區).....	48
表 3-3 商用探針 Johnstech PAD ROL200 化學組成成分表(C 區).....	49

表 3-4 所需純金屬材料及純度	52
表 3-5 合金設計組成比例	53
表 4-1 五元合金法合金化學組成成分表	66
表 4-2 合銅法+四元合金法合金化學組成成分表	67
表 4-3 試片 1,2,3 高週波溶煉後 EDS 化學組成成分表	71
表 4-4 試片 1,2,3 高週波溶煉後重量變化表	71
表 4-5 試片 1 Au-Pt-Ag-Cu 固溶後材料化學組成成分表	77
表 4-6 試片 1 Au-Pt-Ag-Cu 400°C 時效 4hr 化學組成成分表	80
表 4-7 試片 2 Au-Pt-Ag-Cu-Zn 固溶後材料化學組成成分表	82
表 4-8 試片 2 Au-Pt-Ag-Cu-Zn 400°C 時效 4hr 化學組成成分表	85
表 4-9 試片 3 Au-Pt-Ag-Cu-Ni 固溶後材料化學組成成分表	87
表 4-10 試片 3 Au-Pt-Ag-Cu-Ni 400°C 時效 5hr 化學組成成分表	90
表 4-11 固溶 800°C, 預時效(爐冷), 加工量 0%, 時效溫度 400°C 微硬度量測 ..	91
表 4-12 固溶 800°C, 預時效(爐冷), 加工量 0%, 時效溫度 400°C 電阻係數之量 測	92
表 4-13 固溶 800°C, 預時效(爐冷), 加工量 20%, 時效溫度 400°C 微硬度量測 ..	93
表 4-14 固溶 800°C, 預時效(爐冷), 加工量 20%, 時效溫度 400°C 電阻係數量 測	94
表 4-15 合金材料最佳硬度及電阻係數比較表	95

表 4-16 塑性加工及時效處理對硬度及電阻係數之影響	96
-----------------------------------	----

圖目錄

圖 1-1 2006~2010 年全球半導體市場預估[1]	2
圖 1-2 2004~2008 年台灣 IC 測試業產值[1]	3
圖 1-3 IC 測試系統.....	6
圖 1-4 IC 與 ATE 之傳導界面	7
圖 1-5 影響 IC 測試工程效能之因素[12].....	7
圖 1-6 IC 封裝材料與硬度[14].....	10
圖 1-7 無鉛 IC 與測試阻抗及測試壽命之影響[14].....	10
圖 1-8 彈簧穿破式(Spring Puncture)此為傳統作法.....	11
圖 1-9 彈簧穿破式(Spring Puncture)易造成測試介面之污染.....	11
圖 1-10 自潔刮除式(Self-cleaning Wipe), ROL200 Contactor.....	12
圖 1-11 二種不同方式在電性上之差異.....	12
圖 2-1 Au 電阻所受添加元素之影響[19]。	18
圖 2-2 (a)(b)藉著一較小置換原子使張力格子應變作用在母相原子上[20]。	19
圖 2-3 (a)(b)藉著一較大置換原子使得壓縮應變作用在母相原子上[20]。 .	20
圖 2-4 Au 硬度受合金元素之影響[27]。	20
圖 2-5 由時效引起之性質變化[23]。	21
圖 2-6 Au-Cu 二元相圖[25]。	27

圖 2-7 Au-Ag 二元相圖[26]。	28
圖 2-8 Au-Ni 二元相圖[28]。	29
圖 2-9 Au-Pt 二元相圖[29]。	30
圖 2-10 Cu-Zn 二元相圖[30]。	31
圖 2-11 Cu-Ag 二元相圖[31]。	32
圖 2-12 不同種類電接觸合金材料及其特性關係[22]。	38
圖 3-1 商用探針為 Johnstech PAD ROL200 系列外觀 [32]。	46
圖 3-2 商用探針 Johnstech PAD ROL200 在所劃分 A 區，經 SEM/EDS 所 分析的結果：(a) SEM 顯微型態圖，(b) EDX 光譜分析圖。	47
圖 3-3 商用探針 Johnstech PAD ROL200 在所劃分 B 區，經 SEM/EDS 所分 析的結果：(a) SEM 顯微型態圖，(b) EDS 光譜分析圖。	48
圖 3-4 商用探針 Johnstech PAD ROL200 在所劃分 C 區，利用 SEM/EDX 所分析的結果：(a) SEM 顯微型態圖，(b) EDX 光譜分析圖。	49
圖 3-5 合金溶煉流程	50
圖 3-6 材料熱處理流程	52
圖 3-7 高週波感應加熱合金溶煉配置圖	54
圖 3-8 (a)高週波熔煉實況,(b)合金實體,(c)合金直徑 20mm,(d)合金厚度 8mm。	55
圖 3-9 四點探針 NAP-RT-3000(NAPSON)。	56

圖 3-10 熱重分析儀內部結構示意圖[33]。	57
圖 3-11 熱重分析的反應測試結果[33]。	58
圖 3-12 示差掃描熱量分析儀內部結構示意圖[33]。	59
圖 3-13 DSC 分析反應時之結果(a)吸熱反應(b)放熱反應[33]。	59
圖 3-14 精密切割機.....	60
圖 3-15 研磨拋光機.....	60
圖 4-1 五元合金法製作流程	65
圖 4-2 合銅法+四元合金法製作流程	66
圖 4-3 五元合金法，利用 SEM/EDS 所分析的結果：(a) SEM 顯微型態圖 (mapping)，(b) EDS 光譜分析圖。	66
圖 4-4 合銅法+四元合金法，利用 SEM/EDS 所分析的結果：(a) SEM 顯微 型態圖(mapping)，(b) EDS 光譜分析圖。	67
圖 4-5 試片 2 溶煉後實體，左側表研磨後質地完整並無氣孔產生	68
圖 4-6 試片 1 高週波溶煉後金相_500X	69
圖 4-7 試片 2 高週波溶煉後金相_500X	69
圖 4-8 試片 3 高週波溶煉後金相_500X	69
圖 4-9 試片 1 Au-Pt-Ag-Cu 合金 TGA 熱重分析測試曲線	72
圖 4-10 試片 1 Au-Pt-Ag-Cu 合金 DSC 示差掃描熱量分析曲線.....	73
圖 4-11 試片 2 Au-Pt-Ag-Cu-Zn 合金 TGA 熱重分析測試曲線.....	73

圖 4-12 試片 2 Au-Pt-Ag-Cu-Zn 合金 DSC 示差掃描熱量分析曲線	74
圖 4-13 試片 3 Au-Pt-Ag-Cu-Ni 合金 TGA 熱重分析測試曲線	74
圖 4-14 試片 3 Au-Pt-Ag-Cu-Ni 合金 DSC 示差掃描熱量分析曲線	75
圖 4-15 試片 1 Au-Pt-Ag-Cu 固溶前後之金相(500X) (a) 固溶前(b)固溶 後。	77
圖 4-16 試片 1 Au-Pt-Ag-Cu 固溶後 SEM 顯微型態圖及 EDS 分析點。	77
圖 4-17 試片 1 Au-Pt-Ag-Cu 時效後之金相(100X)(a) 400°C 預時效.(b) 400 °C 時效 1hr. (c) 400°C 時效 4hr. (d) 400°C 時效 8hr。	78
圖 4-18 試片 1 Au-Pt-Ag-Cu 時效後之金相(500X)(a) 400°C 預時效.(b) 400 °C 時效 1hr.(c) 400°C 時效 4hr.(d) 400°C 時效 8hr。	79
圖 4-19 試片 1 Au-Pt-Ag-Cu 400°C 時效 4hr SEM 顯微型態圖及 EDS 分析 點。	80
圖 4-20 試片 2 Au-Pt-Ag-Cu-Zn 固溶前後之金相(500X)(a) 固溶前(b)固溶 後。	81
圖 4-21 試片 2 Au-Pt-Ag-Cu-Zn 固溶後 SEM 顯微型態圖及 EDS 分析點。	82
圖 4-22 試片 2 Au-Pt-Ag-Cu-Zn 時效後之金相(100X)(a) 400°C 預時效.(b) 400°C 時效 1hr. (c) 400°C 時效 4hr. (d) 400°C 時效 8hr。	83
圖 4-23 試片 2 Au-Pt-Ag-Cu-Zn 時效後之金相(500X)(a) 400°C 預時效.(b) 400°C 時效 1hr.(c) 400°C 時效 4hr.(d) 400°C 時效 8hr。	84

圖 4-24 試片 2 Au-Pt-Ag-Cu-Zn 400°C 時效 4hr SEM 顯微型態圖及 EDS 分析點。	85
圖 4-25 試片 3 Au-Pt-Ag-Cu-Ni 固溶前後之金相(500X)(a)固溶前(b)固溶後。	86
圖 4-26 試片 3 Au-Pt-Ag-Cu-Ni 固溶後 SEM 顯微型態圖及 EDS 分析點。	87
圖 4-27 試片 3 Au-Pt-Ag-Cu-Ni 時效後之金相(100X)(a) 400°C 預時效.(b) 400°C 時效 1hr. (c) 500°C 時效 5hr. (d) 400°C 時效 8hr。	88
圖 4-28 試片 3 Au-Pt-Ag-Cu-Ni 時效後之金相(500X)(a) 400°C 預時效.(b) 400°C 時效 1hr.(c) 400°C 時效 5hr.(d) 400°C 時效 8hr。	89
圖 4-29 試片 3 Au-Pt-Ag-Cu-Ni 400°C 時效 5hr SEM 顯微型態圖及 EDS 分析點。	90
圖 4-30 固溶 800°C,預時效(爐冷),加工量 0%,時效溫度 400°C 微硬度量測.	91
圖 4-31 固溶 800°C,預時效(爐冷),加工量 0%,時效溫度 400°C 電阻係數之量測.	92
圖 4-32 固溶 800°C,預時效(爐冷),加工量 20%,時效溫度 400°C 微硬度量測	93
圖 4-33 固溶 800°C,預時效(爐冷),加工量 20%,時效溫度 400°C 電阻係數量測.	94

第一章 序論

1.1 前言

跟據 Isuppli 統計，2006 年全球半導體產業市場銷售額預估達 2,585 億美元，較 2005 年成長 9%。半導體產業於 2004 年已發展成台灣一兆以上產值之產業，且逐年成長其對台灣競爭力之重要性不言可喻(如圖 1-1 表 1-1 所示)。2005 年台灣 IC 測試產業的整體表現，雖然較 2004 年顯得溫和許多，但仍是台灣半導體產業鏈中表現最好之次產業。主要除了持續供不應求的 DRAM 測試產能之外，由於國際整合元件製造廠(IDM)過去二年來沒有太積極擴充產能，晶圓代工廠也停止投資晶圓測試產能，究其原因為近年來半導體產業由於 IC 設計及製造技術之長足進步，及大量相關產官學研人才投入，IC 的設計及製造成本與時間均大幅下降。同時也使得產品的功能急速提昇及多元化朝高密度、高功率、高速度、輕、薄與微小化高精密度製程發展，IC 技術越複雜越需要整合大量資源，因此只專注於半導體測試的專業測試廠，就趁勢而起。整體而言，2005 年台灣半導體測試產業表現相當出色，總計 2005 年台灣測試產值為 675 億新台幣，較 2004 年成長 17%，未來三年更俱備 20%以上之高成長率(如圖 1-2 所示)。半導體測試產業之成長率未來將高於設計、製造、封裝等產業。[1]



圖 1-1 2006~2010 年全球半導體市場預估[1]

表 1-1 台灣 IC 產業重要指標[1]

	2001	2002	2003	2004	2005	05/04 成長率
產業產值	5,269	6,529	8,188	10,990	11,179	1.7%
IC 設計	1,220	1,478	1,902	2,608	2,850	9.3%
IC 製造	3,025	3,785	4,701	6,239	5,874	-5.9%
晶圓代工	2,048	2,467	3,090	3,985	3,735	-6.3%
IC 封裝	771	948	1,176	1,566	1,780	13.7%
國資封裝	660	788	976	1,312	1,490	13.6%
IC 測試	253	318	409	577	675	17.0%
產品產值	2,197	2,796	3,513	4,862	4,989	2.6%
內銷比例	54.1%	48.4%	47.9%	44.5%	43.2%	-
市場值	3,355	3,653	4,021	5,589	5,803	39.0%

單位:億新台幣

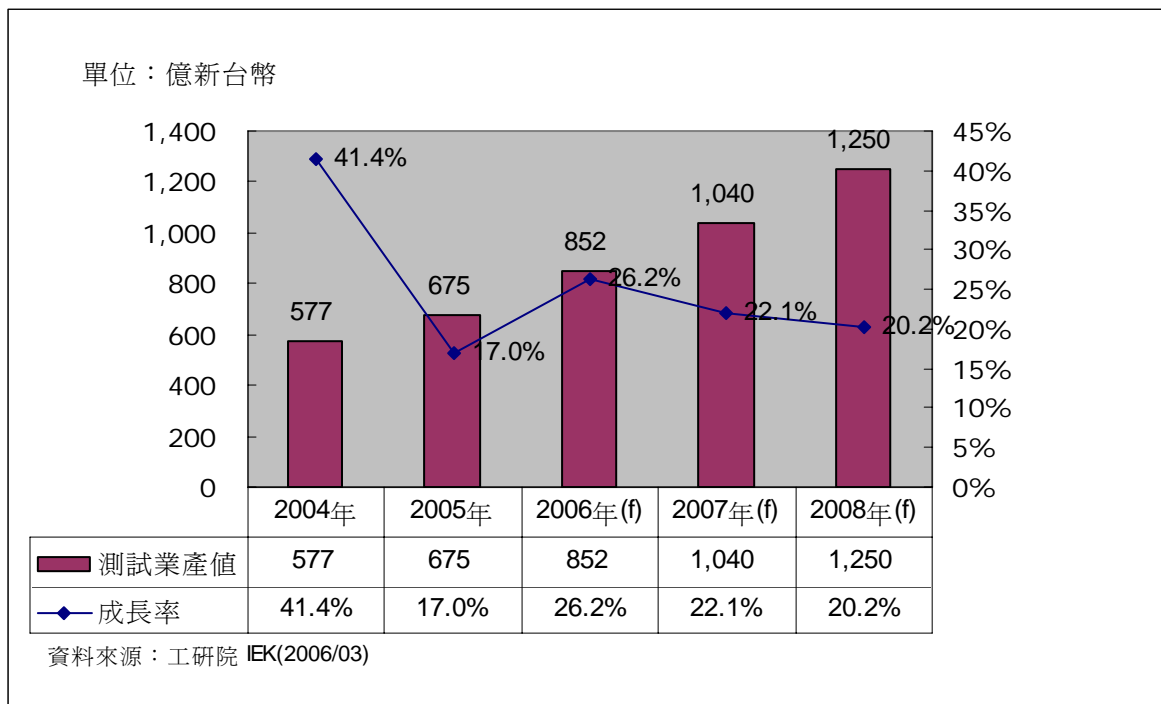



圖 1-2 2004~2008 年台灣 IC 測試業產值[1]

摩爾定律(Moore's Law)預言，每 18 個月左右，積體電路(IC)每單位面積電晶體數量就成長一倍。四十多年來一直如摩爾定律所預言以倍數方式進步，IC 功能也倍數加強，這種飛快的進步都加重 IC 測試所造成在 IC 產業之瓶頸，在成本、品質與上市時間等方面，過去 IC 簡單、密度較低，可測試性比較不成問題，但是現在如果 IC 設計與製造過程沒有考慮整體測試工程解決方案，會造成後段測試成本難以掌控、品質問題叢生甚至於產品上市時間延遲造成商機延誤。所以提昇 IC 測試工程開發能力，提高測試效能是目前 IC 產業發展中之重要課題。[2]

電接觸通常指二個電組件其點或面，因帶電接觸而產生的一種狀態。電接觸是所有電力或電子線路中非常重要的組成部分，其影響整個電路、

電能及訊號傳遞等品質，所以其性質的穩定及可靠性極為重要。影響電接觸的因素有負載的類型及大小、接觸的形式、環境狀態及所使用的材料等。目前的研究對電弧效應、力效應、環境效應、機械、電及熱等效應，引發電接觸材料在電接觸的表面其冶金、物理及化學等現象，所得到的結果尚未完備[3]。電接觸的接觸電阻與固體表面形狀(圓形、橢圓、方形及長方形等)[4]、表面塗層及表面狀況[5-7]有關。而電接觸升溫又與電接觸材料的物理性能如熱傳導率、電阻率、比熱及接觸尺寸、形貌等有關[7]。因此，在電子元件及電路越來越微小化，高穩定性的電接觸材料及器件其發展仍有很大的空間。



一般電接觸的形式，按照電路閉合及斷開兩種型式，可分為固定接觸、接插件、可分和接觸及滑動接觸。若依照接觸傳導時有無電弧產生，又可將電接觸分為無電弧接觸(nonarcing contact)、有電弧接觸(arcng contact)及滑動電接觸(sliding electrical contact)。而作為元件或器件相互接觸傳導電流、電能及訊號等材料通稱為電接觸材料(electrical contact materials)。電接觸材料，按材料分類可分為純金屬、合金、電鍍及複合電接觸材料；按工作電壓可分為低電壓電接觸材料和高電壓電接觸材料；按工作氣氛可分為真空電接觸材料和氣氛保護電接觸材料；按工作性質也可分為檢驗儀器用和功能元件器材用。電接觸材料的基本要求為良好的導電導熱性、低接觸電阻和溫升、抗熔銲和抗環境介質污染、抗腐蝕及良好的

機械性質等條件[3]。電接觸材料是一種的特殊功能材料，為了獲得適當及最佳的電接觸材料，則必須對所使用的材料成分、結構、電性及機械性質加以研究，以符合實際所使用的環境。

純金屬電接觸材料，以金(Gold, $\rho=2.4 \times 10^{-8} \Omega\text{-m}$)、銀(Silver, $\rho=1.586 \times 10^{-8} \Omega\text{-m}$)及銅(Copper, $\rho=1.678 \times 10^{-8} \Omega\text{-m}$)電阻率較低，但是化學安定性以金和銀較好。純金屬材料在機械性質方面並不能完全或符合實際需求，所以加入合金元素來改善其機械性質或提高化學穩定性。材料的導電率和其化學性質及結構有關，通常金屬材料導電率會隨所添加的元素而有所改變，甚至會影響到機械性質，所以合金元素的選用與添加的比例是一項值得研究的方向。

電接觸材料已經被廣泛應用在半導體及微電子產業上，是具有相當開發的潛力。電接觸材料中金(Au)合金材料，因為它具有良好的電性及化學穩定性而被廣泛的使用，所添加的合金元素依據使用的功能及目的而有所不同，其合金所添加的元素包括 Be, Ca, Sr, La, Na, Th, Zr, Hf, Sb, Ge, Mo, Si 等和其他稀有元素[9-11]。臺灣現今所使用的電接觸材料大都以進口為主，不但生產成本增加，主要技術及專利完全由國外廠商掌控，阻礙本國產業升級，如果可以發展出符合產業所需要電性及機械性質的合金成分，並且技術可以在本國生產為主要目標。

1.2 研究目的與動機

台灣 IC 產業結構中，IC 測試扮演良率把關之重責。過去 IC 測試其主要功能為篩選不良品，以提升成品良率。現在由於 IC 之複雜度提高，測試工程除了需要專業之測試平台 ATE(Automated Test Equipment)、測試程式之開發外，以往較不受重視之測試板與傳導界面之設計製造也逐漸受到重視，其理由為傳導界面之可靠度將直接影響測試之結果，良好穩定之傳導界面可以及早幫助 IC 設計與製造的錯誤改善，節省大量 IC 製造之成本與時間。[12]

影響整體 IC 測試工程效能包括測試機 ATE(Automated Test Equipment)，IC 與 ATE 間之傳導界面，及 IC Handler 自動取放設備，因測試機之成本昂貴許多業者與測試工程師往往只重視測試機之效能，甚至於誤認為只要是高速、高貴、新穎之測試機就能提高測試效能，而忽略價格相對較低之周邊界面，尤其是傳導元件(Contactor，Load board)。

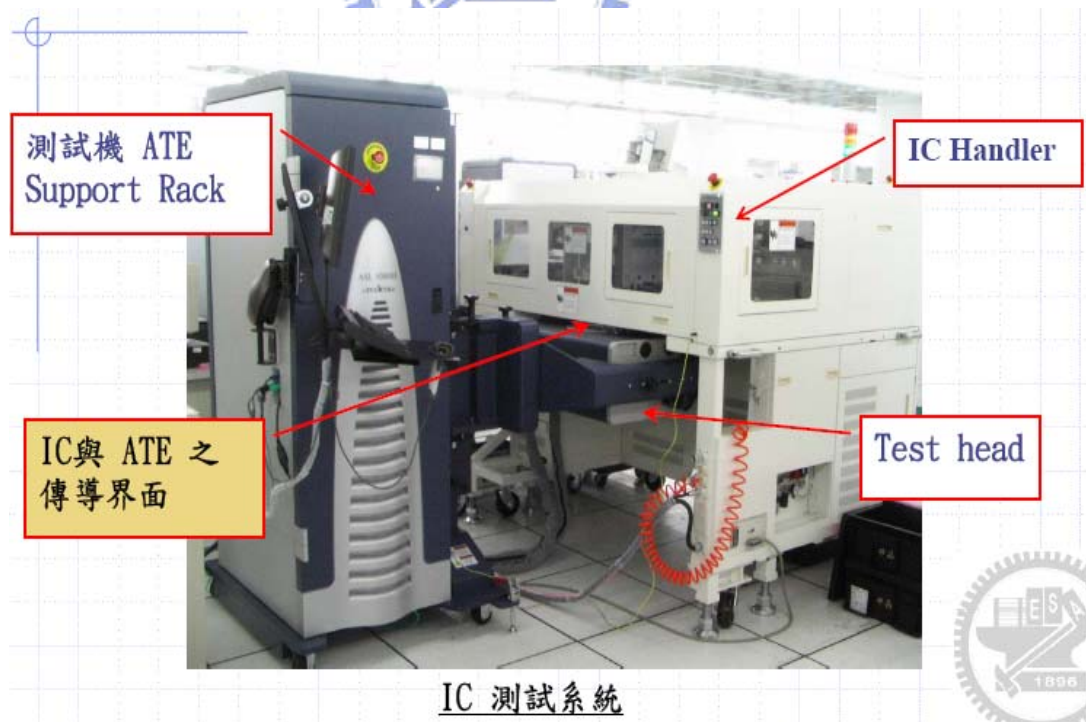


圖 1-3 IC 測試系統

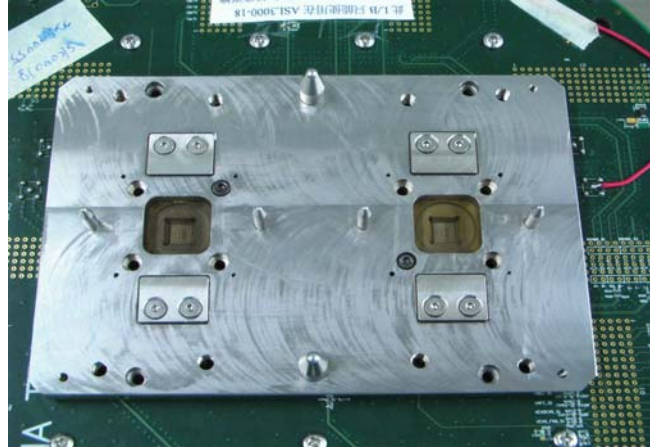


圖 1-4 IC 與 ATE 之傳導界面

傳導元件(Contactor)，影響 IC 測試工程效能之因素:[12]

1. 重現精度(Repeatability)
2. 材料氧化(Oxidation)
3. 錫沾粘(solder buildup)
4. 傳導阻抗(contact resistance)
5. 使用壽命(contact life time)

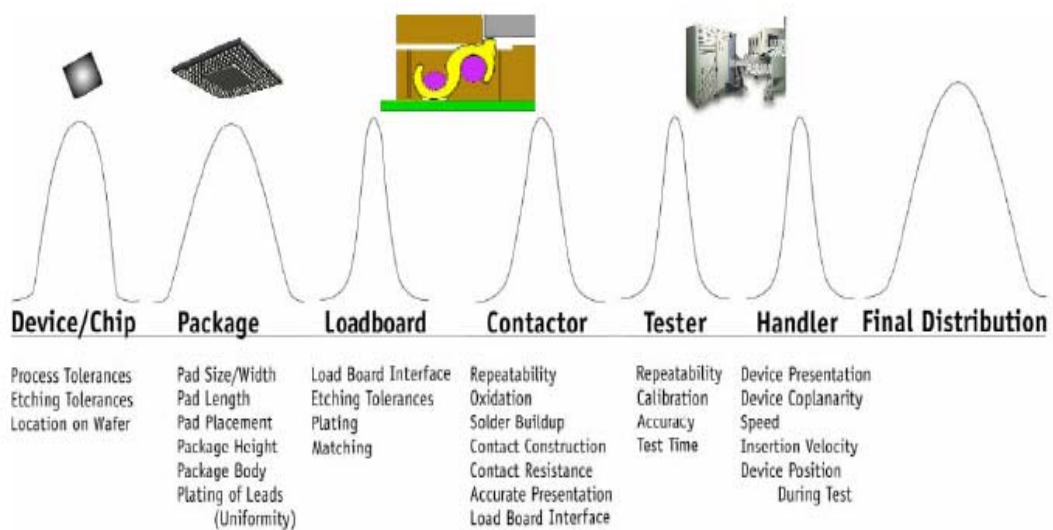


圖 1-5 影響 IC 測試工程效能之因素[12]

應用在半導體及微電子產業上的電接觸材料種類很多，本研究計畫以晶片電性量測用的電接觸材料為首要的研究開發方向。應用在晶片電性量測用的電接觸材料型態上大都為探針式，屬於輕負載、低電流及滑動式的電接觸材料。如何將晶片上的訊號正確的傳達與量測，取決於電接觸材料其接觸電阻和機械性質的高穩定性。因此對觸頭(探針)的表面狀態及材料的穩定性要特別重視，儘可能避免因吸附、氧化、腐蝕以及周圍氣氛等污染而形成表面膜，導致訊號傳輸及量測失誤。使用在這方面的電接觸材料有金基、鉑基、鈮基、銅基和銀基等材料，金基材料在化學穩定、機械性質及電性性質等相關條件整體考量上最具有潛力，已經被廣泛應用於晶片訊號檢測上。晶片電性量測用的電接觸材料必須具備低電阻、抗腐蝕、抗熔焊及耐磨耗等性質，其影響整個晶片電性量測的準確性，而且此材料為必須耗材。目前電性量測用的電接觸材料大都仰賴進口，所以相對的也讓生產成本提高，在這高度產業競爭的時代，如果能在任何製程中降低或節省成本，都是讓產業提升競爭力的方法。

本研究計畫以發展高效能晶片電性量測用的電接觸材料，能夠在臺灣本土生產並符合產業規範(ASTM)及自有專利合金成分為研究目的及最大的動機。

1.3 目前方法

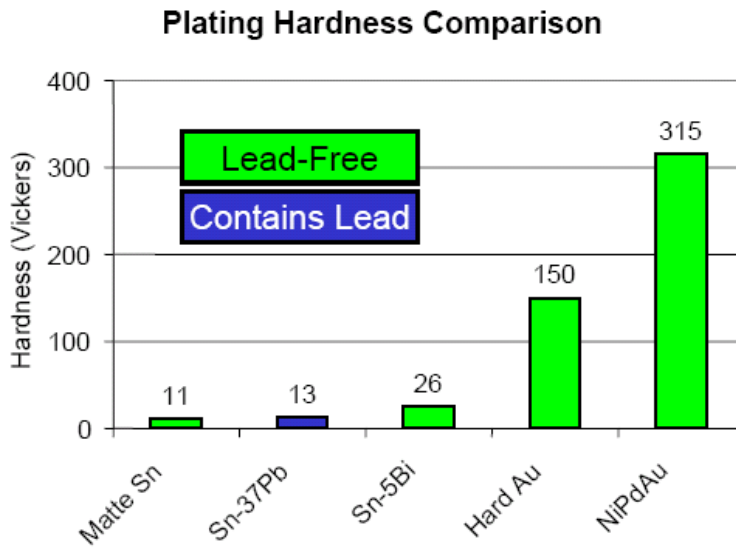
鉛俱備獨特較低熔點之物理性質，及良好熱疲勞可靠度(thermal fatigue reliability)，且成本低故自古以來被人們廣泛使用，尤其是電子相關產業，是電子產業中錫鉛鉛料(tin-lead solder)的主要成份之一。但鉛與其化合物名列 10 大有毒物質之一，歐盟 WEEE/RoHs 於 2006 年七月正式禁止使用，目前大部分電子同業工會均建議以錫銀銅(Sn-Ag-Cu，Tin-Silver-Copper, SAC)為標準之無鉛鉛料，比例各有不同，但其範圍大致上為錫 95.5~96.5%、銀 3~4%、銅 0.5~0.7%。[13]

無鉛製程在測試工程上之影響及挑戰為:[14]

1. IC 表面硬度提高，為去除表面氧化層需提高接觸力量，及接觸元件之表面硬度，如此一來變容易造成 IC 之損壞，縮短使用壽命及增加測試成本。(如圖 1-6)
2. 易產生沾錫現象，接觸元件之阻抗易隨測試次數之增加而快速提高，造成測試良率下降。(如圖 1-7)

如圖 1-8 所示，在測試錫鉛(Tin-Lead)元件時，連續使用 300K 時，其阻抗上升至約 40mΩ，但清潔後降至約 20mΩ，可再次使用。但在測試純錫(Matte Tin)元件時，每隔使用 20K 時便要清潔，使用至 300K 後如不再清潔，其阻抗將快速上升，如此將造成測試良率之下降。

- ◆ Hardness varies between different materials which affects contact performance

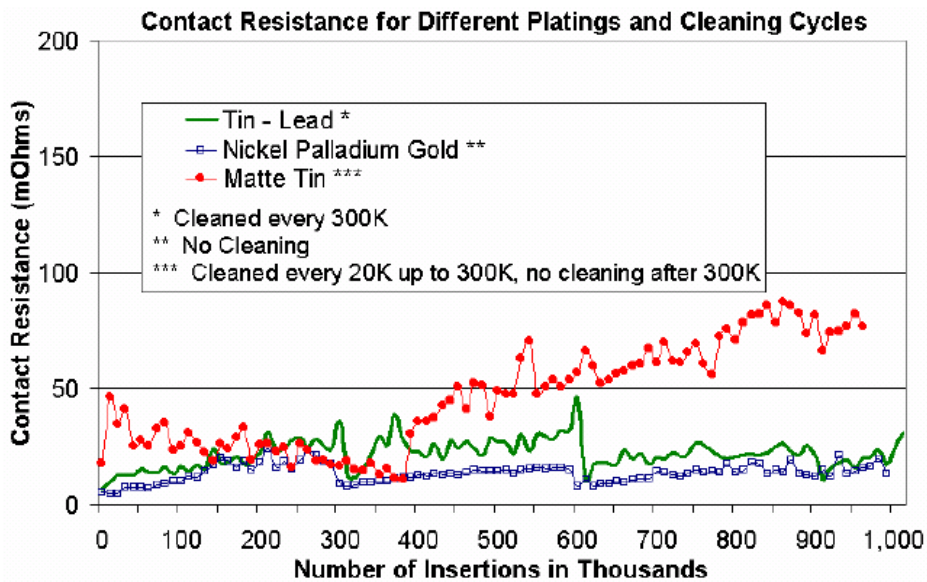


© 2006 Johntech International Corporation – BDA 7-1 Proprietary



圖 1-6 IC 封裝材料與硬度[14]

Effects of Lead-Free Device Plating



© 2006 Johntech International Corporation – BDA 7-1 Proprietary



圖 1-7 無鉛 IC 與測試阻抗及測試壽命之影響[14]

目前業界使用之接觸元件作動方式有二種: [15]

1. 彈簧穿破式(Spring Puncture)此為傳統作法，價格較低，客製化程度高，使用方便目前仍然是市場主流，其缺點為阻抗較高，使用壽命較低，測試訊號品質較差不適用於 1G 以上測試頻率之產品。

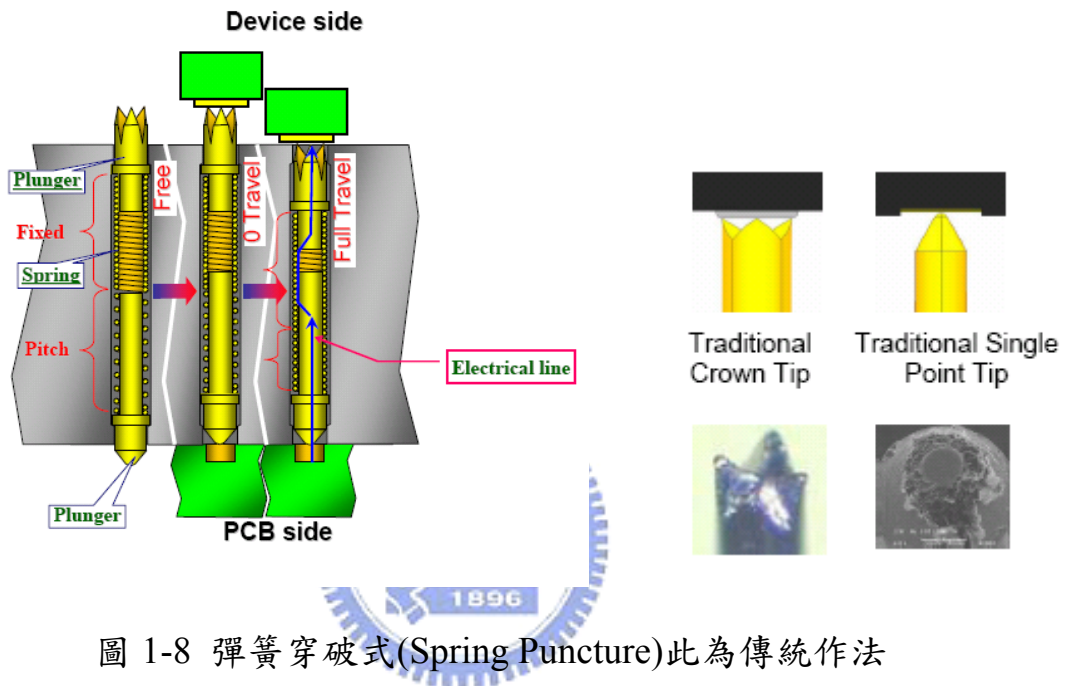


圖 1-8 彈簧穿破式(Spring Puncture)此為傳統作法

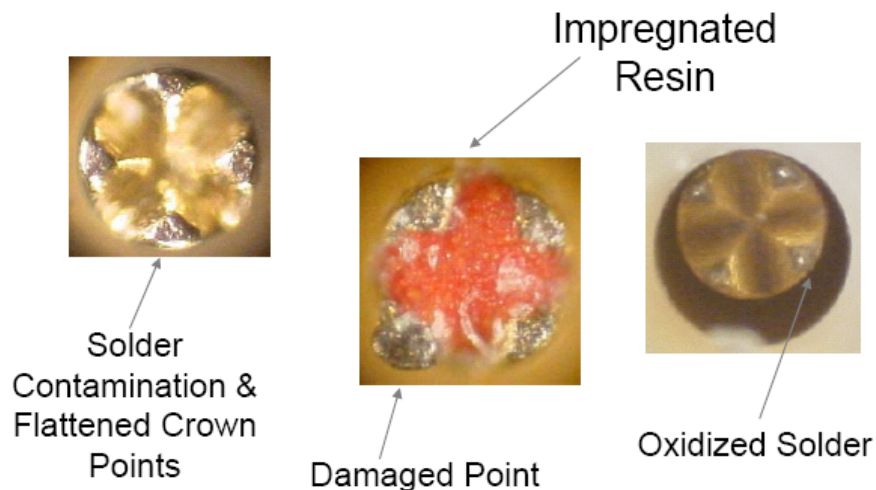


圖 1-9 彈簧穿破式(Spring Puncture)易造成測試介面之污染

2. 自潔刮除式(Self-cleaning Wipe)此為較先進之作法，最俱代表之產品為 Johnstech 公司近年來發表之 ROL200 Contactor，採貴金屬多元合金冶煉而成，機械與電性表現優異，有別於彈簧穿破式表面採電鍍處理。優點為使用壽命較高，阻抗低且穩定，測試訊號品質較佳，適用於 1G 以上測試頻率之高頻產品，其缺點為價格較高，客製化程度低，在高溫測試時，contact force 之表現有減少之現象。[15]

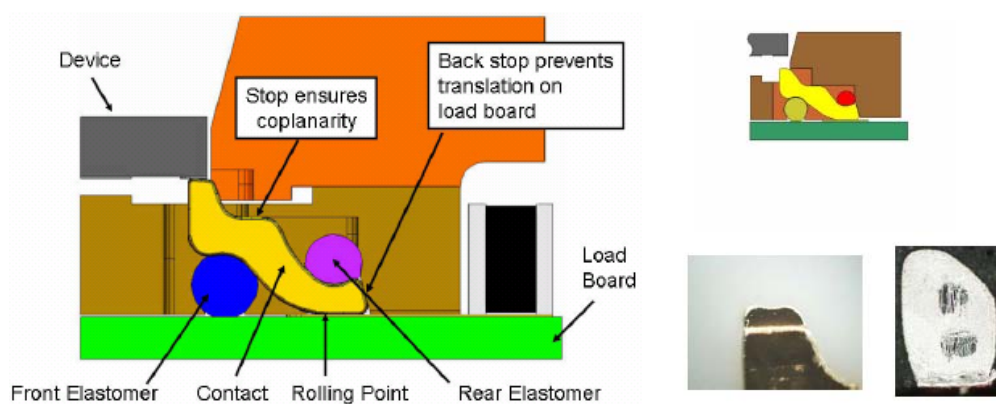


圖 1-10 自潔刮除式(Self-cleaning Wipe), ROL200 Contactor

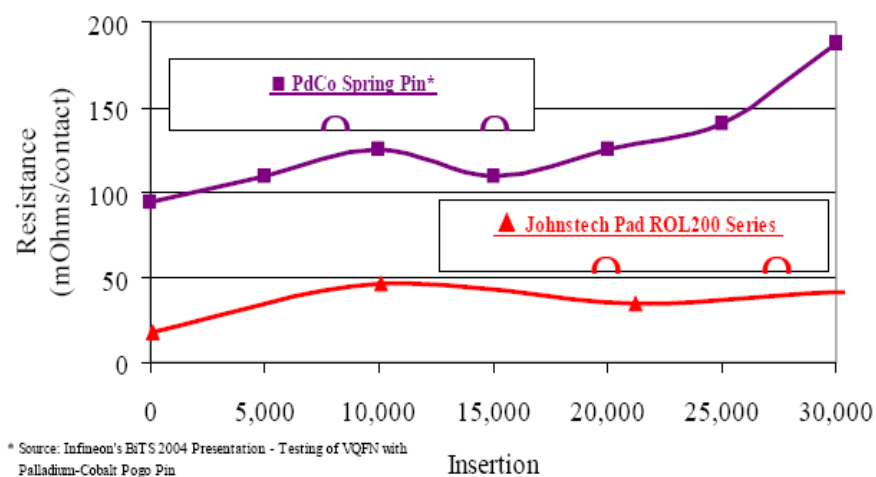


圖 1-11 二種不同方式在電性上之差異

1.4 金基合金材料標準 ASTM B541[16]

ASTM 標準 American Society for Testing and Materials, B541-01 Standard Specification for Gold Electrical Contact Alloy, 明確規範金基電接觸材料材料化學成份為金(Au)70.5wt%~72.5wt%、鉑(Pt)8wt%~9 wt%、銀(Ag)4 wt%~5 wt%、銅(Cu)13.5 wt%~15.5 wt%、鋅(Zn)0.7 wt%~1.3 wt%、五元合金熔煉而成如表 1-2 所示。機械性質如表 1-4、表 1-5 所示, 經熱處理及冷加工後其硬度需達 285~365Hv, 導電率 12.2%IACS。

表 1-2 ASTM B541 材料化學成份規範 [16]

Element	Composition, Nominal	Weight %	
		Range	
Gold	71.5	70.5~72.5	
Platinum	8.5	8.0~9.0	
Silver	4.5	4.0~5.0	
Copper	14.5	13.5~15.5	
Zinc	1.0	0.7~1.3	
Total base metal impurities	...	0.2 max	
Total platinum group metal impurities	...	0.2 max	

表 1-3 ASTM B541 材料熱處理及加工成形規範[16]

Process	Symbol	Form		
		Wire	Strip	Rod
Annealed	A	X	X	X
Stress relieved	S-R	X	X	
Age hardened from solution annealed condition	HT-A	X	X	X
Age hardened from solution annealed And cold-worked condition	HT-CW	X	X	X

表 1-4 ASTM B541 材料機械性質規範[16]

Mechanical Properties of Strip (0.003 to 0.020-in. (0.12 to 0.5-mm) thick)

Property	Condition			
	A	S-R	HT-A	HT-CW
Tensile strength, ksi	85-115	125-165	125-155	140-180
Tensile strength, Mpa	590-790	860-1140	860-1070	970-1240
Elongation, % in 2 in. or 50mm	12min	3-16	3-12	2-10
Hardness, Knoop, HK ₁₀₀ ^B	200-250	270-340	270-340	290-370
Hardness, Vickers, HV ₁₀₀ ^B	180-250	270-340	270-350	285-365

表 1-5 ASTM B541 材料物理性質規範[16]

Property	Units	Condition			
		A	S-R	HT-A	HT-CW
Resistivity	Ω.cmil/ft	135	125	87	87
	μΩ.cm	22.4	20.8	14.5	14.5
Conductivity	percent IACS	7.7	8.3	12.2	12.2
Density	g/cm ³	15.9	15.9	15.9	15.9
Thermal expansion ,	°F ⁻¹ x 10 ⁻⁶	7	7	7	7
Young's modulus	million psi	16	16	16	16
	Gpa	110	110	110	110
Shear modulus A	million psi	...	...	5.5	5.5
	Gpa	...	...	38	38
Proportional limit	ksi	70	120	115	130
	Mpa	480	830	790	900
Fatigue strength	ksi	35	...	...	30

第二章文獻回顧與理論基礎

2.1 半導體測試用電接觸概要

電接觸材料中金(Au)合金材料，因為它具有良好的電性及化學穩定性而被廣泛的使用於半導體及微電子產業上，本研究計畫以晶片電性量測用的電接觸材料為首要的研究開發方向。應用在晶片電性量測用的電接觸材料型態上大都為探針式，屬於輕負載、低電流及滑動式的電接觸材料。如何將晶片上的訊號正確的傳達與量測，取決於電接觸材料其接觸電阻和機械性質的高穩定性。因此對觸頭(探針)的表面狀態及材料的穩定性要特別重視，儘可能避免因吸附、氧化、腐蝕以及周圍氣氛等污染而形成表面膜，導致訊號傳輸及量測失誤。使用在這方面的電接觸材料有金基、鉑基、鈮基、銅基和銀基等材料，金基材料在化學穩定、機械及電性性質等相關條件整體考量上最具有潛力，目前雖已經被應用於晶片訊號檢測上，但國內少有此相關研究。[17]

目前普遍被使用之電接觸材料為銅(Cu)基合金材料，此材料在測試環境溫度達 100°C 時表面易生成黑色氧化銅膜，測試環境溫度高於 300°C 時易生成紅色氧化亞銅膜，接觸電阻增加，嚴重時易導致接觸點燒熔。金(Au)俱有良好之抗蝕性、延展性、高導電率、不易氧化等優異特性，只要能提高其硬度並保持高導電性，便能拓展電接觸材料之應用尤其在高頻、高效能之半導體 IC 元件。

2.2 影響金屬或合金材料導電的因素

導電是電荷流動所產生的現象。電荷可由離子或電子攜帶，其移動率(mobility)隨材料本身性質而異，而材料的導電性可分為離子性導電及電子性導電兩種。離子性導電時，電荷載體(carrier)可分為正或負離子(ion)。

電子性導電時，電荷載體(carrier)可分為電子(electron)或電洞(hole)。

導電率(conductivity) σ 與材料內電荷載體數目 n ，載體所帶的電荷 q 及載體的移動率 μ 有關，材料導電率計算如下：

$$\sigma = n q \mu \quad (2.1)$$

電阻率 ρ

$$\rho = 1/\sigma \quad (2.2)$$

但材料的導電率除了與材料內電荷載體數目 n ，載體所帶的電荷 q 及載體的移動率 μ 有關外，影響材料導電率或電阻率的因素有[18]：

(1) 溫度

溫度增加使晶體受熱擾動，晶格擾動使結構變得無秩序，增加電子的散射或繞射，而使得導電率降低或電阻率增加。電阻係數和溫度成線性關係。

$$\rho_T = \rho_{273K} [1 + \alpha_T(T-273)] \quad (2.3)$$

其中

ρ_{273K} 為 273K(或 0°C)之電阻係數

α_T 為電阻率溫度係數(temperature resistivity coefficient)，一般純金屬其值約為 0.005/K。

(2) 溶質

當他種元素溶入金屬中形成合金時，溶質原子周圍局部場應力和材料內其他部分不同，這種不規則的局部場應力會增加電子散射而提高電阻係

數。加入溶質 x 所形成的固溶體(Solid solution)之電阻係數可表示為：

$$\rho_x = Y_x * (1-X) \quad (2.4)$$

其中

X 為溶質 x 之摩爾分數(mole fraction)

Y_x 稱為溶體電阻係數(solution resistivity coefficient)

凡固溶體之分子、原子大小差異大者， Y_x 較大。在稀溶體中

$$\rho_x \cong Y_x X \quad (2.5)$$

表 2-1 所示為在 20°C 時銅的添加元素與其影響[18,19]。

元素	固溶度 [20°C, wt%]	$\frac{R_{solute} *}{R_{Cu}}$	電阻係數的增加 (溶體電阻係數) [10 ppm, $\mu\Omega - cm$]
Ag	0.1	113	0.00020
Al	9.4	112	0.00225
Be	0.2	89	0.00451
Cd	<0.5	122	0.00016
Cr	0.03	101	0.00481
Ni	100.0	99	0.00135
P	0.5	134	0.01323
Si	3.0	119	0.00687
Sn	1.2	132	0.00155
Zn	30.0	109	0.00034
Zr	$\cong 0$	124	-

*R: 原子半徑

圖 2-1 以電阻增加量表示添加元素對 Au 的影響，Ag、Cu、Ni、Pt 等的電阻增加量極小，V、Nb、Ti 等會顯著增大電阻。

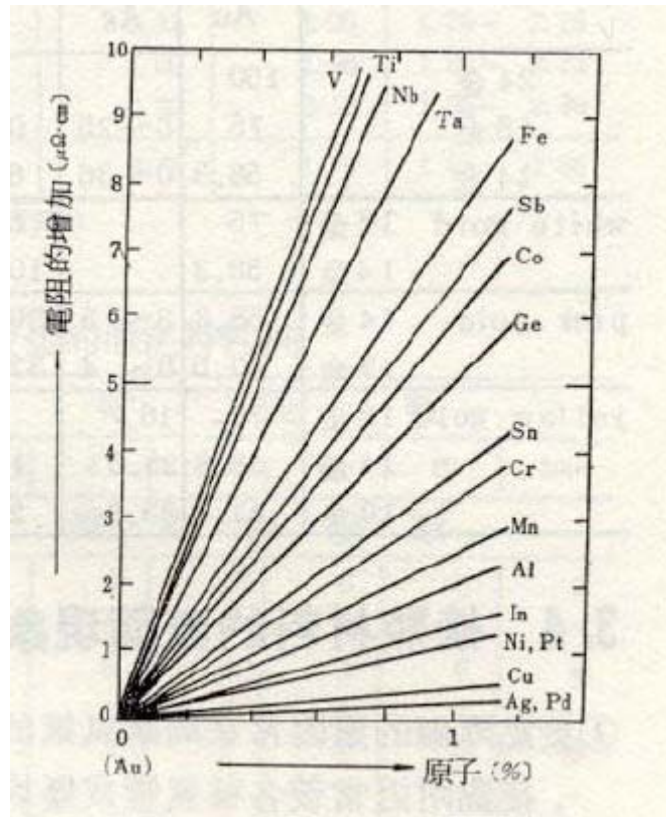


圖 2-1 Au 電阻所受添加元素的影響[19]。

(3) 應變硬化

晶體內缺陷如空位(vacancy)、差排(dislocation)或晶粒邊界(grain boundary)等，皆會造成反射電子之運動。若應變使差排增加且相互交纏則會使金屬硬化，此時電阻率會增加，相對地導電率降低。退火(annealing)處理可除去或減少缺陷，而降低導電率。由應變及材料內缺陷所引起之電阻率為 ρ_s 。

綜合以上，可知導體的總電阻率為

$$\rho = \rho_T + \rho_x + \rho_s = \rho_T + \rho_L \quad (2.6)$$

所以，在純金屬內加入其他元素(異類原子)，通常會使電阻增加，該情況電阻增加的原因，除了金屬內部晶格格(lattice)受熱振動所引起的電子散

射散亂外，由於異種原子的存在導致週期電位變化而使得電子散亂造成電阻增加。在(2.6)式中 ρ_T 係由於溫度存在，當溫度為絕對零度(0 K)時則 $\rho_T=0$ 。而 ρ_L 只與電子排列有關，而與溫度無關。

2.3 導電合金的強化[22]

導電合金的強化，以儘可能保持高的導電率為前提提高其強度和加工性。

2.3.1 固溶強化[20,21]

當合金元素(溶質)均勻地溶解在基體金屬(溶劑)中形成置換或插入固溶體時，合金保持溶劑金屬的晶格。由於溶質和溶劑金屬的原子半徑不同，造成晶格畸變，使金屬的硬度、強度和電阻升高，此為固溶強化，其強化程度隨溶質原子的溶解量、溶質與溶劑原子的半徑差、以及原子價之差等的增大而增加，但電導率隨之降低。為保持高的電導率，應選擇合適的合金元素及其含量，為進一步提高強度，必須配合冷作硬化。

圖 2-4 所示為 Au 硬度受合金元素之影響[27]。

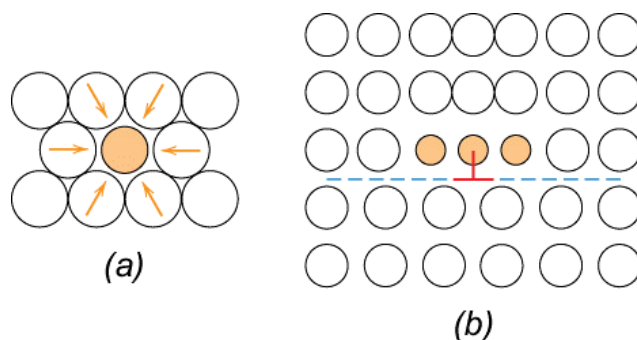


圖 2-2 (a)(b)藉著一較小置換原子使張力格子應變作用在母相原子上[20]。

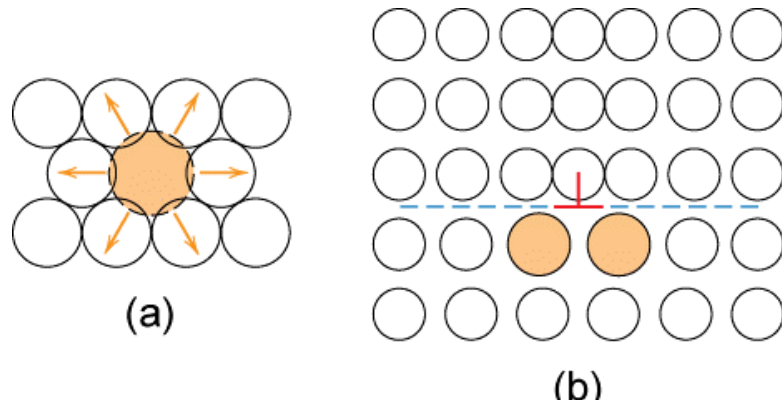


圖 2-3 (a)(b)藉著一較大置換原子使得壓縮應變作用在母相原子上[20]。

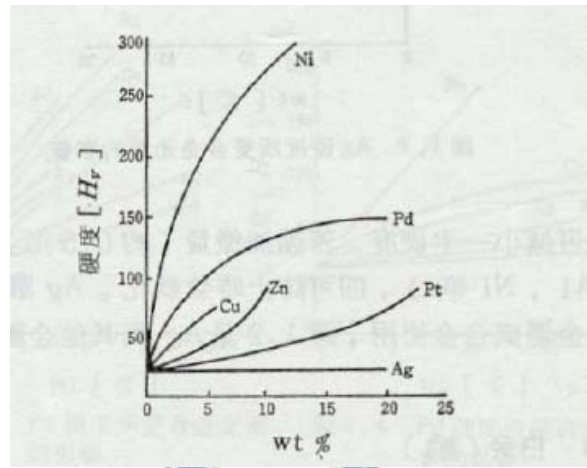


圖 2-4 Au 硬度受合金元素之影響[27]。

2.3.2 時效強化

利用淬火及時效操作以提高合金的強度，稱為時效硬化，其效果與時效過程中析出的強化相性質、數量及分布狀態有關。時效過程中析出的強化相，能導致合金的強度、硬度顯著升高，電阻降低。在強化相數量一定的條件下，強化相質點的彌散度愈大，合金的強化程度也愈大。細化強化相質點是進一步強化合金的有效方法。一般在固溶處理後進行強烈的冷變形，時效硬化的效果就更好。當強化相為不含基體金屬的化合物，且在高溫下很少固溶到基體金屬中時，合金的耐熱性很高。採用時效硬化的方法可獲得高強度、高導電、耐熱等良好綜合性能的導電合金。

圖 2-5 定性的表示時效時的性質變化在第一段的峰，光學顯微鏡下看不出析出物，電阻降低格子常數不變。在第二段的峰，可看出析出物，電阻降繼續降低，格子常數增加。因為析出現象會分階段發生不同的舉動才會使時效曲線呈複雜的圖形。[23]

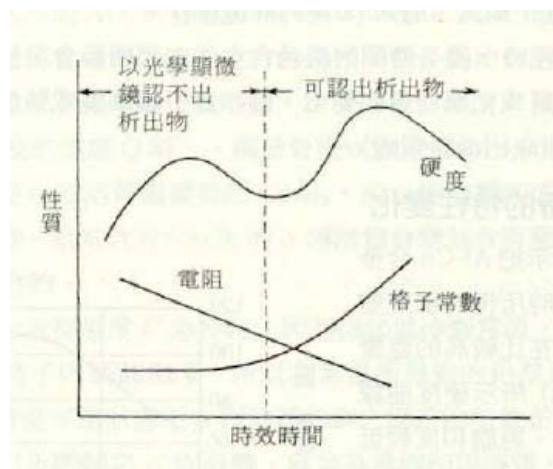


圖 2-5 由時效引起之性質變化[23]。

2.3.3 彌散強化

彌散硬化及時效硬化都是藉助彌散分布的質點以阻礙位錯線的移動，提高對塑性變形的抗力，使合金強化，但時效硬化的質點是從過飽和固溶體中析出，且隨溫度升高又溶解於基體金屬，而彌散硬化的質點是在製造過程中加入的金屬氧化物微粒或極細的絲和纖維。氧化物在高溫下不溶解於基體金屬，所以這類合金有更好的耐熱性，甚至在接近金屬熔點時仍保持相當高的強度。彌散硬合金的組織屬於機械混合物，氧化物含量不高，且對晶格畸變影響不大，所以具有高的導電性。

2.4 合金固溶溶解度的條件(Hume-Rothrey 法則)

合金系統內合金元素彼此間，能夠具有無限固溶溶解度，必須滿足 Hume-Rothrey 法則，陳述如下：[20]

1. 原子尺寸因素(Atomic size factor):

金屬原子必須具有相近尺寸，其原子半徑之差不能大過 15%，否則溶質原子將會產生巨大的晶格畸變且會形成新相。

2. 晶體結構(Crystal structure):

金屬必須具有相同的結晶結構。

3. 陰電性(Electronegativity):

金屬原子必須具有相近的陰電性，否則易形成化合物。

4. 價數(Valences):

金屬原子必須具有相同的原子價數，若其他因素相同則一金屬溶解較高價數的金屬的傾向較大。

為使兩金屬具有無限固溶溶解度，必須符合 Hume-Rothrey 法則，但它們並非充分條件。為了解本計畫所熔融的合金元素是否符合 Hume-Rothrey 法則，相關的合金元素結晶及化學特性整理如表 2-2 及表 2-3 所示。

本計畫所熔融的合金元素是以金(Au)為溶劑，銅(Cu)、鉑(Pt)、銀(Ag)為固溶強化相，以上四元素皆符合 Hume-Rothrey 溶解度法則，且都具備良好之導電性與安定性，其中金-銅系統金屬原子尺寸差為 12.5%，大於金-鉑、金-銀系統，為主要固溶強化基礎。

鋅(Zn)及鎳(Ni)為析出強化材料，鋅(Zn)導電率優於鎳(Ni)且易與銅(Cu)形成金屬間化合物以達成強化目地。鎳(Ni)與金(Au)金屬原子尺寸差為 15%，為 Hume-Rothrey 溶解度法則之極限值，故可預期以鎳(Ni)為析出強化相將使材料之強度優於以鋅(Zn)為析出強化相之材料，但導電率將稍差。

表 2-2 合金元素特性

物質 (元素)	熔點 (T _m , °C)	沸點 (T _b , °C)	密度 (g/cm ³) (20 °C)	晶格結構	電阻溫度係數 $\alpha/^\circ\text{C}^{-1}$	電阻率 ($\Omega\mu\text{-cm}$) (20 °C)	化學性質
Au	1064.43	2807	19.32	Cubic (FCC)	0.00324 (20°C)	2.4	導電性佳, 抗熔鋸, 抗電弧燒損, 抗氧化
Pt	1772	3827	21.45	Cubic (FCC)	0.00374 (0°C~60°C)	10.5	導電性佳, 抗熔鋸, 抗電弧燒損, 抗氧化
Pd	1552	2927	12.02	Cubic (FCC)	0.0037 (20°C)	10.8	導電性佳, 抗熔鋸, 抗電弧燒損; 350°C 以上易生氧化膜; 易與有機物蒸汽反應; 增加合金抗硫化腐蝕
Ag	961.93	2212	10.50	Cubic (FCC)	0.0038 (20°C)	1.62	導電性佳, 抗熔鋸, 抗電弧燒損, 抗氧化
Cu	1083	2567	8.96	Cubic (FCC)	0.00393 (20°C)	1.724	增加導電性
Zn	419.58	907	7.133	Hexagonal (HCP)	0.00419 (0~100°C)	6.10	生成和金屬相, 增加母材強度
Sb	630	1750	6.684	Rhombohedral		39	增加硬度, 抗碳化物生成
Rh	1966	3727	12.41	Cubic (FCC)			抗氧化, 增加耐磨性
Ni	1453	2732	8.902	Cubic (FCC)	0.0069 (0~100°C)	6.90	生成和金屬相, 增加母材強度, 增加耐磨性


表 2-3 合金元素結晶結構特性

Substance (Element)	Atomic Number	Crystal structure	Atomic Radius (nm)	Valences	Electronegative
Au	79	Cubic (FCC)	0.144	Au ⁺	2.4
Pt	78	Cubic (FCC)	0.138	Pt ²⁺	2.2
Ag	47	Cubic (FCC)	0.144	Ag ⁺	1.9
Cu	29	Cubic (FCC)	0.128	Cu ⁺	1.9
Zn	30	Hexagonal (HCP)	0.133	Zn ²⁺	1.6
Ni	28	Cubic (FCC)	0.125	Ni ²⁺	1.8



2.5 相圖(Phase Diagrams)

相圖也稱為平衡圖(equilibrium diagram)或組合圖(constitution diagram)，在合金的研究上是一種非常重要的工具。相圖提供有關溶融鑄造結晶化和其他現象的一些有用訊息。它們定義一合金系統在定壓(大氣壓)情況下各穩定相的區域。這些圖的座標是溫度(縱座標)和組成(橫座標)。這裡所稱的“合金系統”的意思是指由一組已知成份所形成的所有可能合金。系統這個字在此的用法不同於熱力學上的定義，熱力學上的系統是指單一隔離的物質體。一個組成的合金是熱力學系統典型的代表，但一個合金系統是指所有被考慮的組成。



只有在平衡的情況下合金系統之相、溫度和組成間關係才能由相圖來表示。這些相圖不能直接應用在非平衡狀態的金屬上。一金屬由高溫淬冷(急冷)到低溫(例如室溫)，其可能擁有好幾個相或準安定相及組成，這些相有較多高溫的特徵。此時，由於熱活化使原子運動的結果，此淬冷的試片可能接近其平衡的低溫態。若是如此，則在試片內相之間關係符合平衡圖。換言之，在任何已知的溫度下，只有當時間足夠使金屬達到平衡，相圖才能給我們適當的相間關係。[24]

2.5.1 Au-Cu 二元相圖

Au-Cu 合金相圖如圖 2-6 所示，此系統分為二部分，一為在高溫時 910°C 以上，Au、Cu 形成可完全互溶之液相，另一為在低溫 410°C 以下時形成多種(Au,Cu)金屬間化合物，此等化合物處之合金由高溫徐冷時因化合物之生成而硬化。

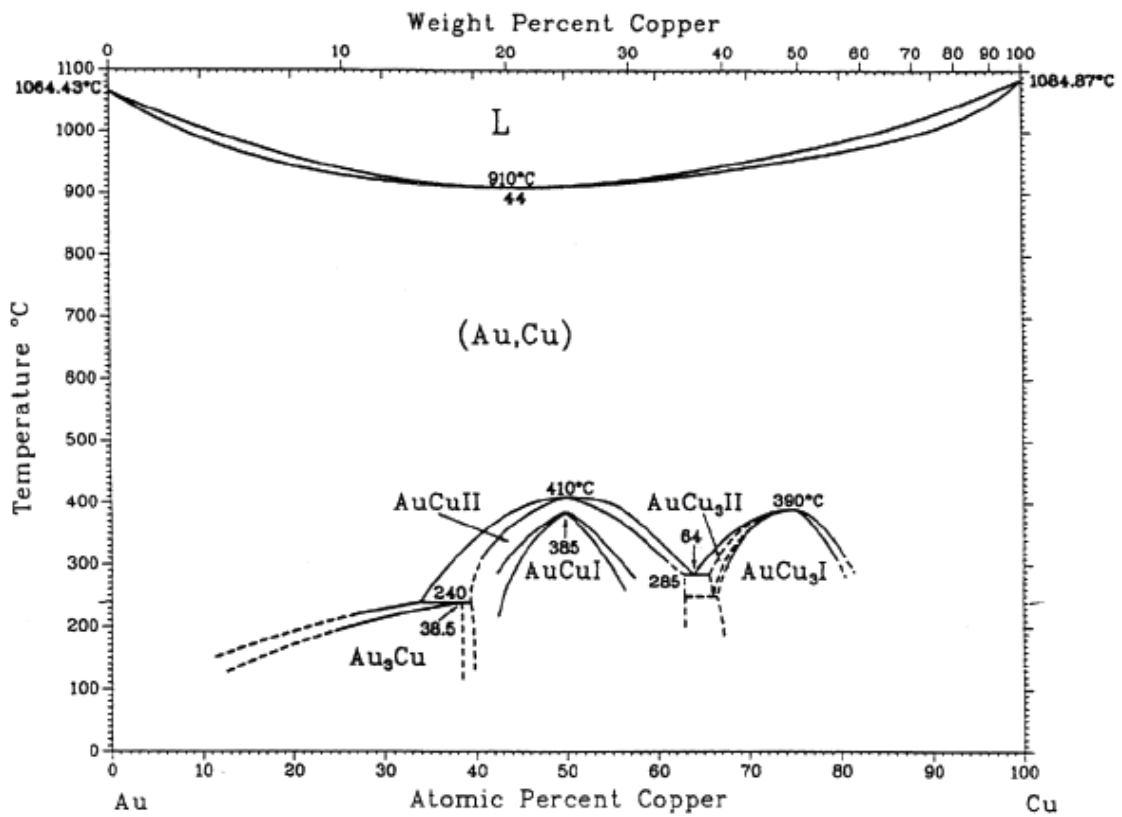


圖 2-6 Au-Cu 二元相圖[25]。

2.5.2 Au-Ag 二元相圖

Au-Ag 合金相圖如圖 2-7 所示，此系統為連續之固溶體，高溫時 960°C 以上，Au、Ag 形成可完全互溶之液相。低溫時 Ag-Au 形成均之固溶體有助於保持合金之導電性。

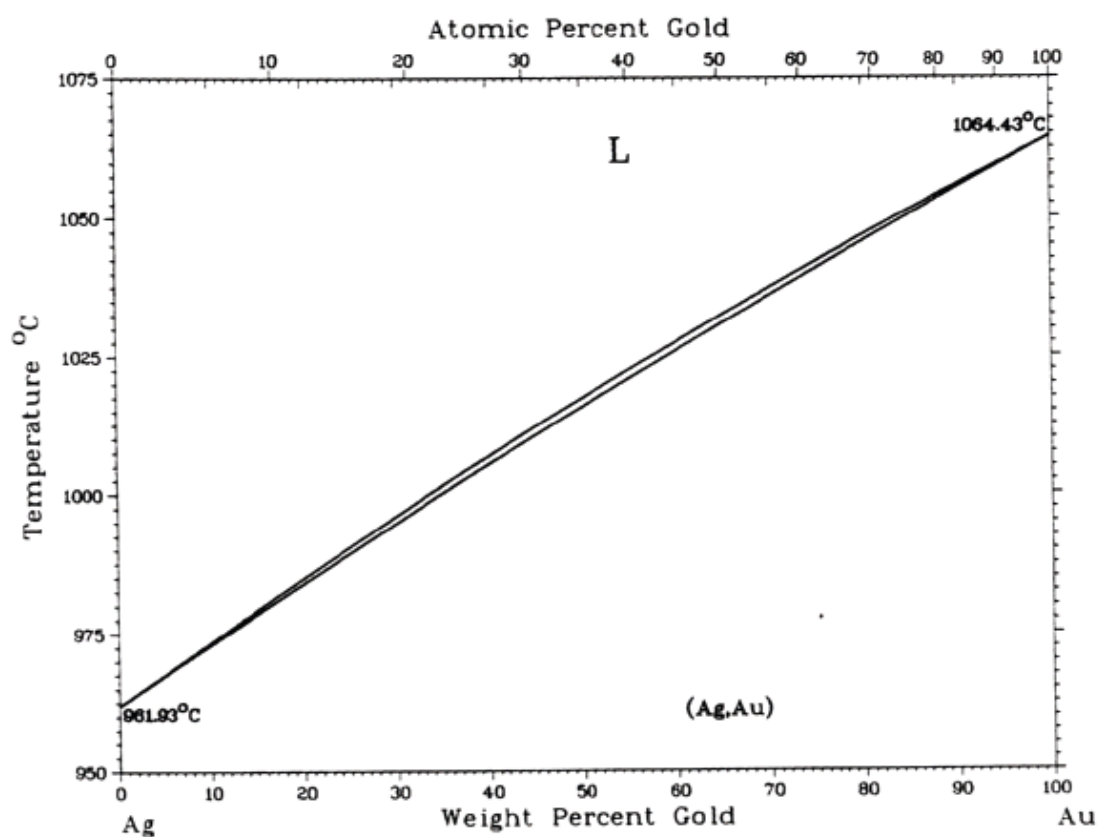


圖 2-7 Au-Ag 二元相圖[26]。

2.5.3 Au-Ni 二元相圖

Au-Ni 合金相圖如圖 2-8 所示，此系統與 Au-Cu 相似，分為二部分，一為在 810°C 以上時為全率固溶，另一為在溫 810°C 以下時形成 Au+Ni 金屬間化合物，此合金稱為 white-Gold(白色黃金)。急冷時色美而軟，但徐冷時成為混合組織，色不美但硬度高，此化合物將影響合金之導電性。

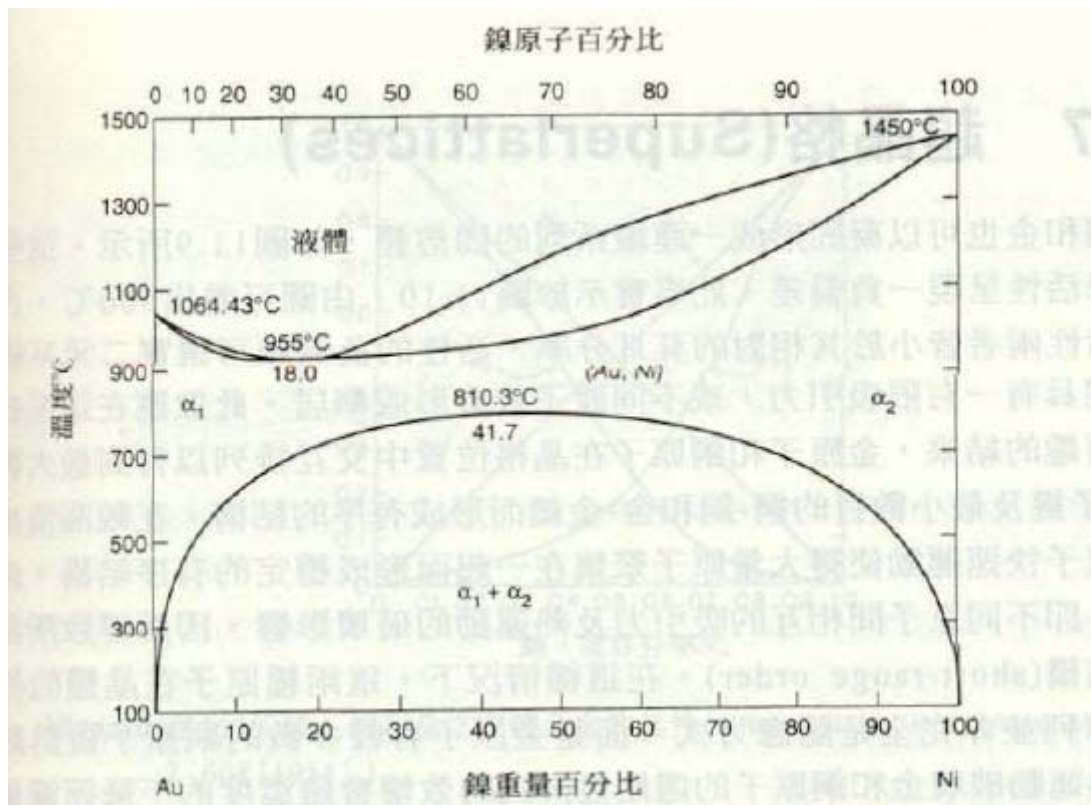


圖 2-8 Au-Ni 二元相圖[28]。

2.5.4 Au-Pt 二元相圖

Au-Pt 合金相圖如圖 2-9 所示，此系統在高溫時為全率固溶，Pt 含量低於 15% 時在低溫 Au-Pt 形成均之固溶體有助於保持合金之導電性，且 Pt 為高溫相具有高度安定性，有助於抗沾粘。

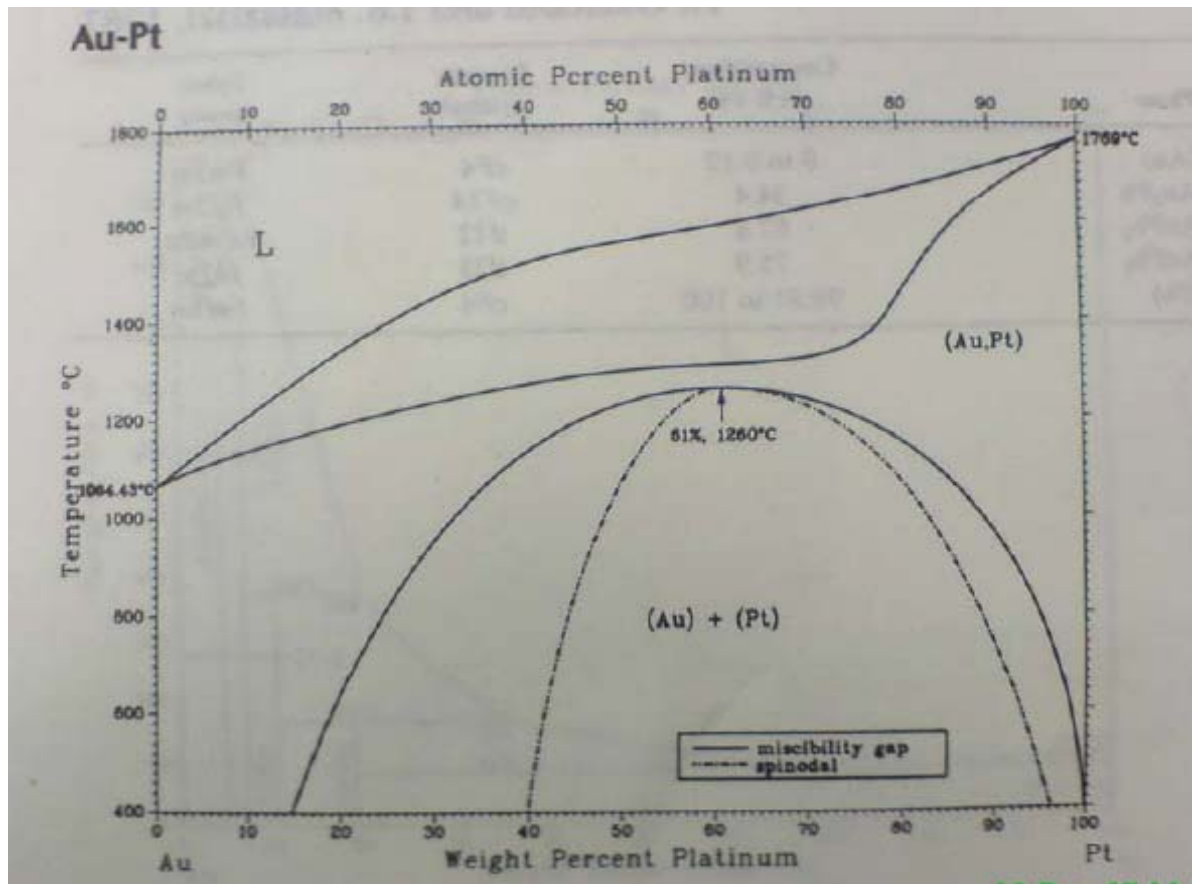


圖 2-9 Au-Pt 二元相圖[29]。

2.5.5 Cu-Zn 二元相圖

Cu-Zn 合金相圖如圖 2-10 所示，由圖可知含 Zn 量不同而成為 α 、 β 、 γ 、 δ 、 ϵ 、 η 六種固溶體。Zn 含量低於 38.5% 時形成均勻 α 固溶體(FCC 結構)。有助於保持合金之導電性。

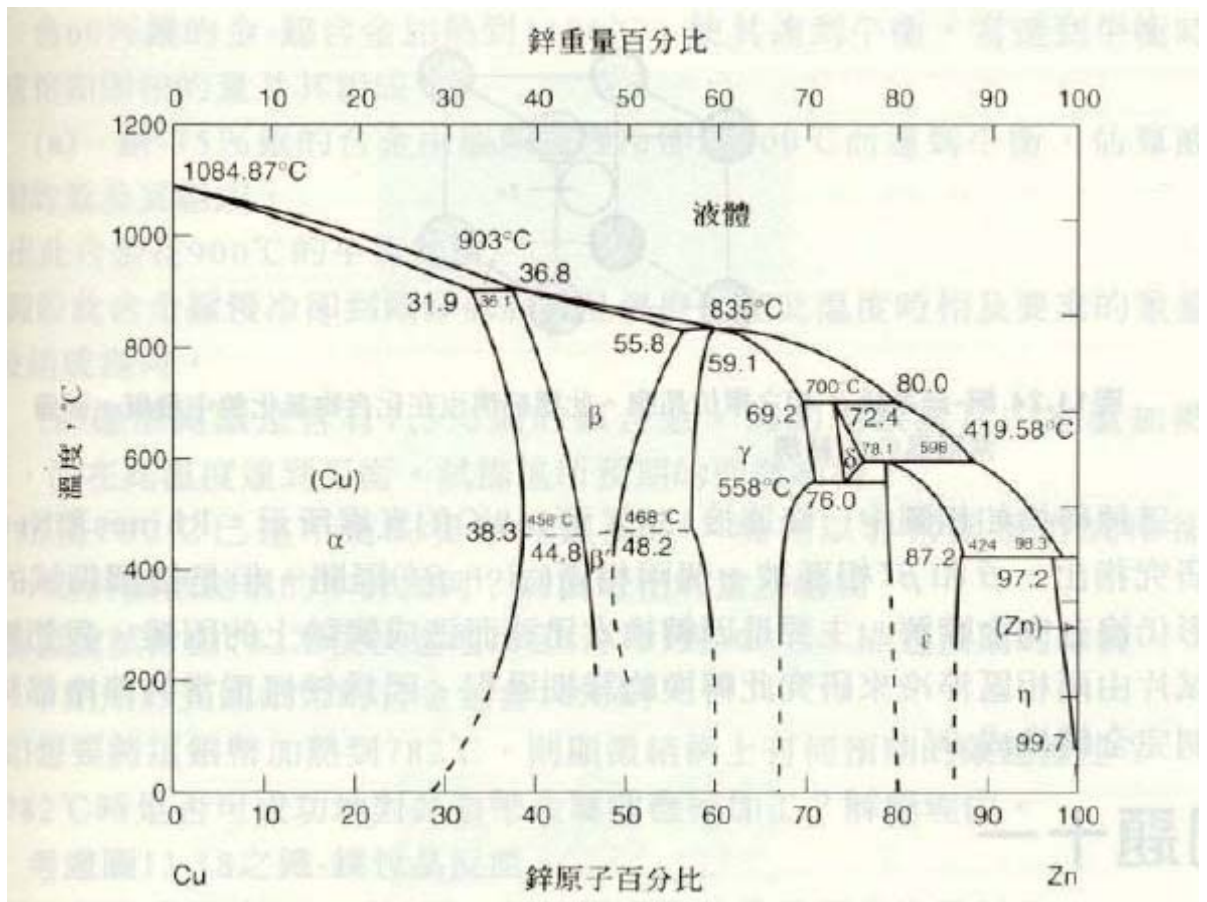


圖 2-10 Cu-Zn 二元相圖[30]。

2.5.6 Ag-Cu 二元相圖

Ag-Cu 合金相圖如圖 2-11 所示，由圖可知此系統為一共晶系統，含 8%Ag 對合金可起時效硬化。

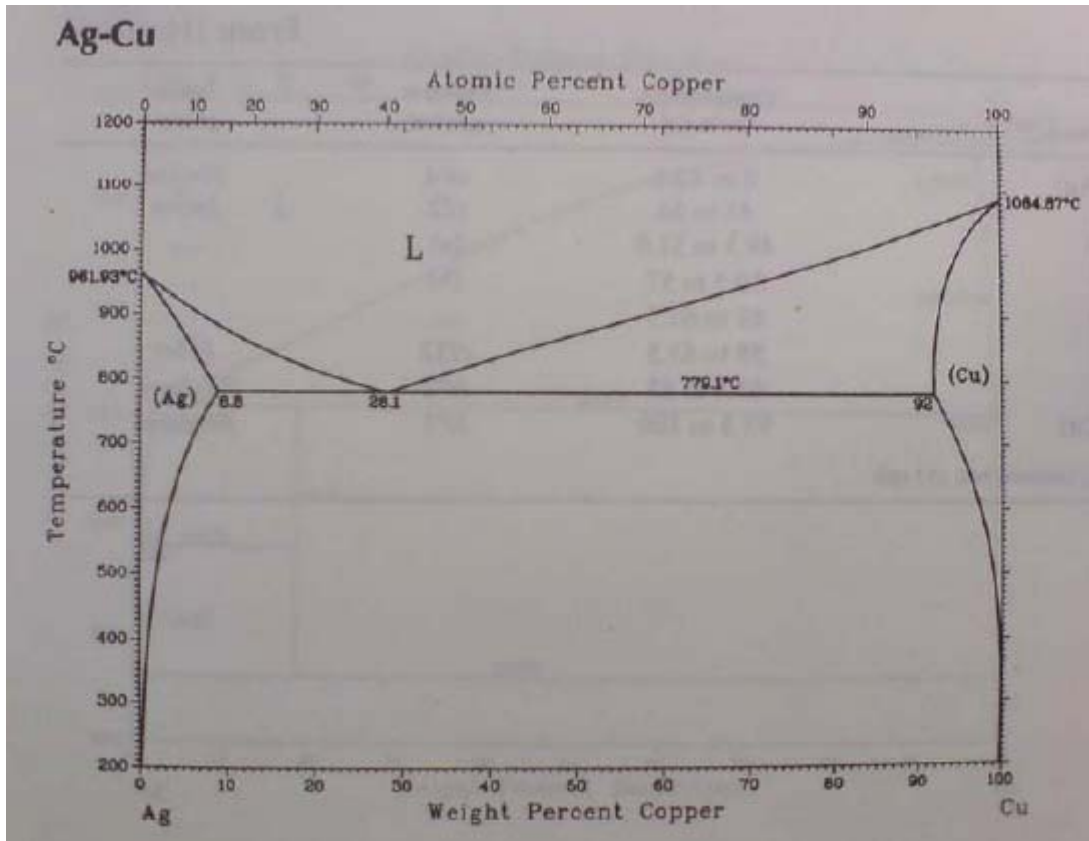


圖 2-11 Cu-Ag 二元相圖[31]。

2.6 電接觸的型式

在電力、電機、機械、通信工業系統中，各種電氣設備及裝置和控制網路，其電力及信號的傳輸都是通過導線及電接觸(或稱觸頭)來實現電路的接通與分斷，來達到間斷或連續接通電流及訊號的目的[22]。電接觸通常指二個組件其點或面，因帶電接觸而產生的一種狀態[3]。從狀態上，兩導電組件間可以分為「閉合」及「斷開」兩種狀態。在根據電接觸的型式和使用狀態可以分成以下幾種型式[3，22]：

- (1) 固定接觸：此種電接觸長年固定，通常是在修理時才需要斷開接觸，其最主要在線路系統中承擔母線和導線的固定連接。
- (2) 開閉接觸：承擔接通、載流、分斷和隔離電流的任務。例如斷電器、接觸器等。
- (3) 滑動接觸：在相對滑動的接觸之間傳輸電流或訊號。如微電機電刷、集電環中的接觸等。
- (4) 接插件：利用接觸元件插接閉合達到電流或訊號傳輸的目的。

若按電接觸傳導時有無電弧產生，又可將電接觸分為：

- (1) 無電弧接觸(nonarcing contact)
- (2) 有電弧接觸(arcng contact)
- (3) 滑動電接觸(sliding electrical contact)。

若電接觸的型式以觸頭的形狀對接觸面的關係可區分為[22]：

- (1) 球面對平面：觸頭的形狀為球面其對平面的接觸為點接觸，在小接觸壓力情況下，點接觸的接觸電阻小，若加大接觸壓力，點接觸的電阻下降並不很快。
- (2) 圓柱對平面：觸頭的形狀為圓柱其對平面的接觸為線接觸，接觸電阻隨著接觸壓力的增大，使接觸點數增多，接觸電阻隨之降低。
- (3) 平面對平面：觸頭的形狀為平面其對平面的接觸為面接觸，在大的接觸壓力下，面接觸的接觸電阻較小。

由於點接觸形式的接觸電阻較小，繼電器或檢測探針等小功率電器，多數選用點接觸形式，而大功率的電器如斷路器、無熔絲開關等多數選用面接觸形式。



2.7 電接觸材料的分類

用於相互接觸傳導電流、訊號、電能等元件的材料通稱為電接觸材料。電接觸材料的好壞關係著電器及儀器其電流、電能或訊號傳輸的穩定性、安全性及使用壽命。

電接觸材料的分類法很多，比較常見的分類法有[3]:

- (1) 依材料分類，分為純金屬、合金、電鍍、薄膜、複合電接觸材料。
- (2) 依電器工作電壓分類，可分為低壓電接觸材料和高壓電接觸材料。
- (3) 依電器工作環境氣氛分類，可分為真空電接觸材料和氣氛保護電接觸材

料。

在工業上電接觸材料依特性和用途可概分為輕負載、中負載、重負載和真空接觸材料[22]。

(1)輕負載接觸材料：此類材料多用於負載小(電壓小於 30V、電流小於 60A)

的設備，例如通訊技術領域、設備的控制系統、測量及調節系統中。

(2)中負載接觸材料：中負載通常指工作電壓 110~1200V，工作電流

6~2500A，接通合分斷電流可達 10kA，此類設備如控制開關、負荷開關

及電動機啟動器等。

(3)重負載接觸材料：這類接觸材料用於具有過電流、短路和接地保護功能

的保護開關及斷路器中，額地電壓 110V~500kV，額定電流 6~6300A，最大分斷電流可達 15~1000 倍額定電流。

(4)真空接觸材料：真空接觸材料屬於重負載接觸材料範圍，這種接觸材料

通常用於真空環境中，如真空斷路器及負荷開關。

2.8 電接觸材料選用原則

電接觸材料的選定通常與工作特性及操作環境有密切的關係。為了確保電器或電子產品使用的安全性、可靠性及穩定性，一般對電接觸材料的要求為必須具備良好的導電性、導熱性、接觸電阻低、耐電弧燒損、耐機械磨損、耐化學腐蝕、抗熔焊及抗環境污染等條件。在實際應用時則建議以下原則進

行選用[3, 22]：

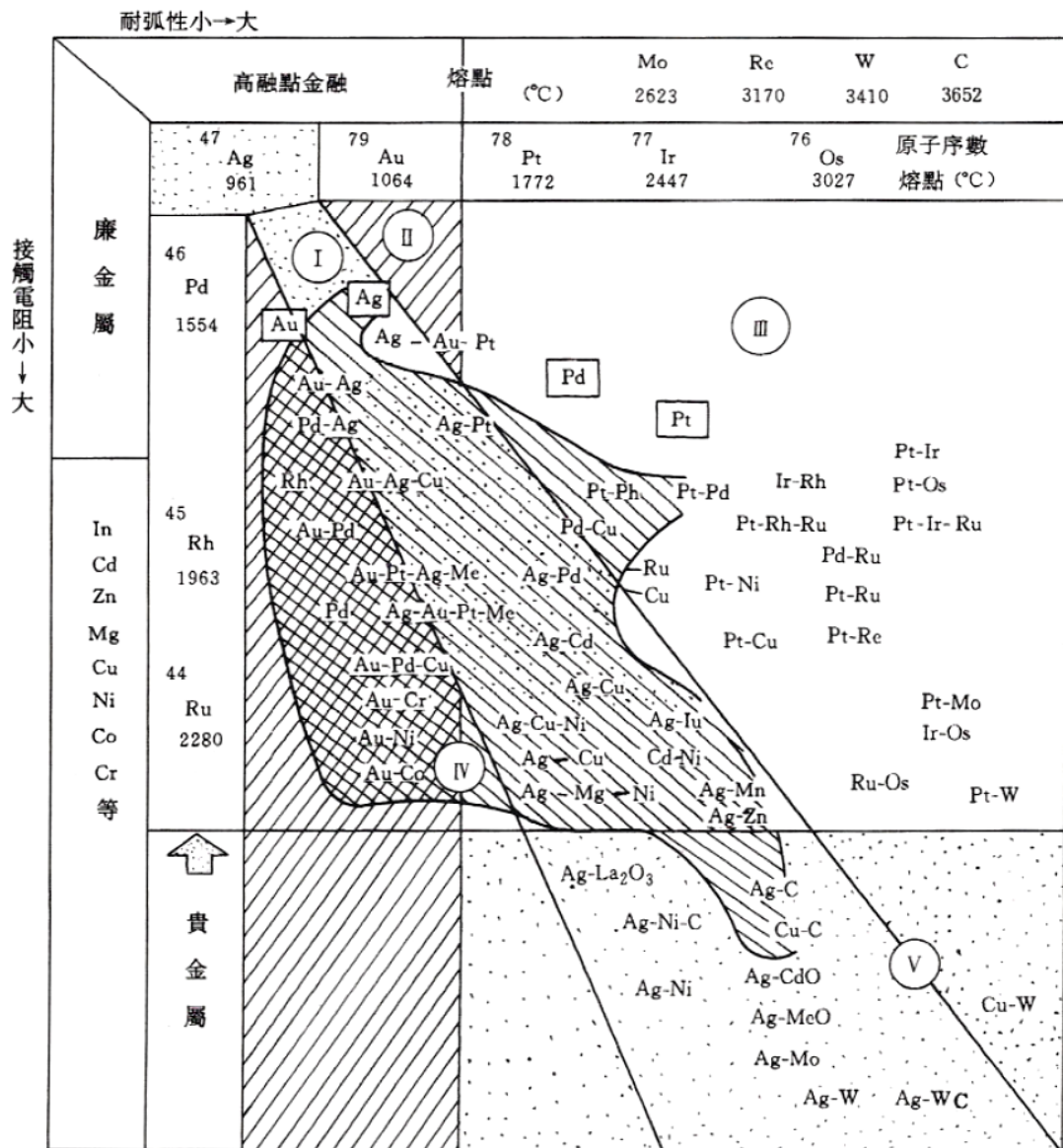
- (1) 電氣條件：根據所使用電器或電子產品開關及電路特性來選用，例如電流種類和大小、電壓種類和高低、電弧大小和電壽命等電氣條件來選用。
- (2) 機械條件：根據所使用電器或電子產品開關的動作原理、接觸力大小、斷開與閉合頻率、磨耗性及機械壽命等相關機械條件進行選用。
- (3) 環境條件：根據所使用電器或電子產品開關及電路所處的環境溫度和濕度、壓力、粉塵、是否有輻射、易燃易爆氣體及腐蝕性氣體等使用環境條件進行選用。

電接觸材料的選用原則受到很多因素的限制，一般以符合電氣條件、機械條件和環境條件為基礎，並配合實際操作狀況加以修正。電接觸材料也可依照使用目的、用途及材料特性加以搭配選用，材料選用參考如下[19, 22]：

- (1) 用於弱電流(低能量回路)以高導電率為特色，可選用金(Au)基、銀(Ag)基系合金。
- (2) 用於弱電流以耐蝕性、耐氧化性為特色，可選用金(Au)基、鉑(Pt)基及鈀(Pd)基系合金。
- (3) 用於輕負載以耐弧性、高導電率為特性，可選用 Ag-W、Ag-CdO 等燒結材料。
- (4) 用於滑動接觸以耐磨耗性、低接觸電阻為特性，可選用 Ag-Cu 及鈀(Pd)基、金(Au)基系多元貴金屬合金。

- (5)用於中負載以良導電性、導熱性、接觸電阻低、抗熔焊、耐電弧燒損、極性轉移少及壽命長為特性，可選用銀-金屬(AgNi、AgFe、AgCu)和銀-金屬氧化物(AgCdO、AgZnO、AgSnO₂、AgCuO)等。
- (6)用於重負載以在大電流下具有有良好的抗熔焊性和快速息弧性能，及長期承受高熱負載的能力，可選用鎢(W)基和鉬(Mo)基系。

接觸材料的特性與母合金及所添加的元素有密切關係，如圖 2-12 所示 [22]。從圖 2-12 可以看出電接觸材料耐電弧特性隨元素原子序增加而逐漸提高趨勢，其接觸電阻由上而下而逐漸增加趨勢。圖中 I 組為銀基電接觸材料其應用範圍很廣，包含從要求具有接觸穩定性的輕負載領域至中負載領域。II 組則包含金基材料及輕鉑族，III 組包含重鉑族及輕鉑族。在輕負載電接觸材料中，II 及 III 組材料被廣泛應用及重視。V 組主要為粉末冶金複合電接觸材料，用於中負載及重負載領域。在圖中間部分由線所包圍不定形的區域為 IV 組，包含金基、銀基、鉑及銻等合金材料，多用於滑動電接觸。表 2-4、表 2-5、表 2-6 及表 2-7 分別為應用於輕負載、中負載、重負載及真空等不同領域的電接觸材料其種類、性能及用途選用參考。



- ⊙ I 組: 銀和銀合金
 - ⊙ II 組: 金、金合金和輕鉑族合金
 - ⊙ III 組: 重鉑族和輕鉑族組成的合金
 - ⊙ IV 組: 滑動觸頭(斜紋線的範圍)
 - ⊙ V 組: 重負載觸頭
- 註: Me 代表金屬

圖 2-12 不同種類電接觸合金材料及其特性關係[22]。

表 2-4 常用輕負載電接觸材料種類、性能及用途[22]

序號	品種	代號	熔點 (°C)	熱導率 [W/ (m-K)]	密度 (g/cm ³) ≥	電阻率 (μΩ.cm) ≤	硬度 HB	抗拉 強度 (MPa)	特性和用途
1	鉑銱	PtIr ₁₀	1780	30	216	24.5	105-216	340~650	機械強度高,耐腐蝕性優良,接觸電阻穩定,價格昂貴。用於微電機調節器,汽車閃光燈,航天飛行器,報警器等。
		PtIr ₂₀	1815	18	21.7	30.0	200-260	700~1000	
		PtIr ₃₀	1885	16	21.8	34.5	270-400	830~1160	
2	鉑鎳	PtNi ₈	1660		19.1	27.0	180-280	600~950	硬度高,彈性好,接觸電阻不如 PtIr 穩定。用於各種繼電器,開關,微型電刷等。
		PtNi ₁₀	1650		18.8	29.0	210-	800~1500	
3	鉑金	PtAu ₁₀	1710	16	21.2	24.3	140-220	540~630	耐蝕性好,與純鉑相比不易形成聚合物,接觸電阻非常穩定。用於微型精密繼電器及開關。
4	金銀	AuAg ₁₀	1055		17.8	10.0	30-		隨著 Au 含量增高,耐蝕性增強,實際含金量超過 70%才具有強的耐蝕性。AuAg 合金與純金相比不易黏著。用於通信設備用繼電器,交換器,直流信號機,調壓器,集電環,電刷等
		AuAg ₂₀	1040	326	16.4	10.0	38-115	190~380	
		AuAg ₃₀	1025		15.4	10.0	46-110	220~380	
		AuAg ₉₀	970		11.0	4.3	52-90		
5	金銀鎳	AuAg ₂₂ Ni ₃	1011		15.9	11.4	100-185	350~570	力學性能好,材料轉移少,接觸電阻較穩定,可作部分鉑鎳的代用品。用於高靈敏繼電器,閃光發生器,離心調節器等測量儀器,電鐘用抗金屬轉移的精密觸頭,通信設備用觸頭,計算機鍵盤插針
		AuAg ₂₆ Ni ₃	1050		15.5	11.4	85-155	350~570	
		AuAg ₂₅ Ni ₅	1050		15.4	11.4	85-155	350~570	
6	金鎳	AuNi ₅	1020	84	18.3	133	115-190	380~640	耐蝕性好,接觸電阻低,具有長壽命,可靠性高。用於通信繼電器,測量儀樣用化學穩定性最高的觸頭
		AuNi ₉	1060		17.2	20.0	-240		
7	金鈷	AuCO ₅	1010		18.2	550	95-150	340~530	
8	金銀鉑	AuAg ₂₅ Pt ₆	1060	50.2	16.1	15.6	60-125	280~480	為時效強化型合金,具有極高的彈性強度和硬度耐蝕性優越。用於電話繼電器,電位計電刷,滑動觸頭
	金銀鉑	AuAg ₄ Pt ₉ Cu ₁₄	955		16.0	18.9	190-280	620~900	
	及其他金屬	AuAg ₁₀ Pt ₅ Cu ₁₄ Ni	955		15.9	13.0	~290		
		AuPd ₃₀ Ag ₁₅ Cu ₁₀ Pt ₅			13.6	29.0		1178	

表 2-4 常用輕負載電接觸材料種類、性能及用途[22] (續)

序號	品種	代號	熔點 (°C)	熱導率 [W/ (m-K)]	密度 (g/cm ³) ≥	電阻率 (μΩ.cm) ≤	硬度 HB	抗拉 強度 (MPa)	特性和用途
9	鈀銀	PdAg40	1320	29	11.4	42	100-200	370~750	特性與金銀相似,但隨著銀含量增高,耐蝕性下降,硬度較高,價格便宜合銀量 70%以下,能長期保持光澤,是最便立的抗硫化材料,質硬,耐燒損材料轉移比純銀少。用於電話繼電器,電位計電刷滑動觸頭。
		PdAg90	1060	142	11.6	5.7	60-160	280~550	
10	鈀銀銅	PdAg20Cu30	1150		10.6	27.0	190-320	700~1300	硬度極高,耐蝕性好耐氧化性比 Pd-Ag 差,作為高彈性滑動觸頭具有侵越的特性。用於各類滑動觸頭,電位計,微電機電刷等。
		PdAg30Cu30	1065		10.0	34.8	200-450	700~1400	
11	銀	Ag	960	418	10.5	1.67	30-90	200~360	導電導熱性好,接觸電阻低,加工性能好,抗硫化性差,有經時變化,表面不會氧化。用於繼電器電話機,小電流接觸器主觸頭及輔助觸頭。
12	細晶銀	AgNi0.15	960	418	10.5	1.80	40-100	220~360	性能與純銀相似,但晶粒細小,強度和耐蝕性能高於銀。在應用中出現較高溫度時可用它代銀。
13	銀銅	AgCu3	940	385	10.4	192	45-115	250~470	機械強度高,耐磨損好,不易轉移、價廉但抗氧化和耐性差。在接觸壓力小的場合下使用,接觸電阻不穩定。用於微電機換向器,集電環等的滑動部件,及接觸壓力較大的閉關觸頭。
		AgCu5	910	335	10.4	1.96	60-135	270~550	
14	銀鎂鎳	Ag(Mg+Ni)0.5	960	418	10.5	2.32	40-170	220~400	能在軟態下成型,通過內氧化,可提高硬度,且不再隨時間而變化,對硫敏感與純銀相同,不宜與銅及銅合金覆層。用於微型繼電器簧片,苛刻溫度負載的觸頭。

表 2-5 常用中負載電接觸材料種類、性能及用途[22]

序號	品種	代號	熔點 (°C)	熱導率 [W/ (m·K)]	密度 (g/cm ³) ≥	電阻率 (μΩ·cm) ≤	硬度 HB	抗拉 強度 (MPa)	特性和用途	
1	銀鎳	AgNi40	960	320~350	10.0	2.1	55-75	220~400	電弧運動特性好,接觸電阻低而穩定,在直流下材料遷移少。用低壓接觸器,繼電於器,特別適用於直流電器,家用電器	
	銀鎳石墨	AgNi10C2~3	960	260	9.5	2.5	50-70			
2	銀鐵	AgFe7	960		10.0	2.0	55-70	700~1300	抗熔焊性比 Ag-Ni 好,但耐蝕性差,特別是潮濕地區易鏽蝕。用於低壓接觸器,斷路器等。	
3	銀銅	AgCu10	870	335	10.3	2.0	70 - 150	280~550	機械强度高,耐磨損性好,轉移少,只適宜接觸壓,只適宜接觸壓力大的場合使用,AgCu28 可達彈性硬度,抗氧化性差。用於接觸壓力大的閘關觸頭。	
		AgCu28	779	335	10.1	2.1	100-175	300~650		
4	銀氧化 鎘	AgCdO ₁₀ (I.O)	960	290	10.0	2.1	66-120		優良的抗熔焊及耐損蝕性,熄弧性能好,接觸電阻較穩定。用於微型開關,低壓接觸器,低壓斷路器,大電流繼電器等。	
		AgCdO ₁₀ -T(I.O)	960	290	10.0	3.2	70-125			
		AgCdO ₁₀ (P.M)	960	290	9.8	2.4	56-66			
		AgCdO ₁₂ (I.O)	960	290	9.9	2.3	69-122			
		AgCdO ₁₂ -T(I.O)	960	290	9.9	3.4	70-125			
		AgCdO ₁₂ - (P.M)	960	290	9.7	2.6	58-68			
5	銀氧化 錫	AgSnO ₂ (8) (P.M)	960		9.7	2.5	54-67		熱穩定性好,抗熔焊性比 AgCdO 更佳,在直流下材料遷移少,內氧化速度緩慢,表面易聚集 SnO ₂ ,溫升高,可通過添加 W、Mo 氧化物可降低溫升。用於大、中容量交直接觸器,過電流繼流電器,低壓閉關等。	
		AgSnO ₂ (10) (P.M)	960		9.6	2.7	58-70			
		AgSnO ₂ (7) In ₂ O ₃ (3)(I .O)	960		9.8	3.3	76-129			
		AgSnO ₂ (8) In ₂ O ₃ (4)-T(I .O)	960		9.75	3.4	78-130			
		AgSnO ₂ (10) In ₂ O ₃ (4) -T(I .O)	960		9.7	3.5	84-135			
		AgSnO ₂ (11.5) WO ₃ (4)	960		9.7	2.5	84-135			

註 :(I.O) 一內氧化 ,(P.M) 一粉末冶金。

表 2-5 常用中負載電接觸材料種類、性能及用途[22] (續)

序號	品種	代號	熔點 (°C)	熱導率 [W/ (m·K)]	密度 (g/cm ³) ≥	電阻率 (μΩ·cm) ≤	硬度 HB	抗拉 強度 (MPa)	特性和用途
6	銀氧化 鋅	AgZnO(8) (P.M)	960	330	9.5	2.6	61-71	抗熔短,表面有拒氧化 焊,燃弧時間短,表面有 拒氧化現象。用於中小 容量斷路器,漏電保護 閉關	
		AgZnO(8) (I.O)	960	330	9.7	3.2	66-120		
		AgZnO(8)-T (I.O)	960		9.7	3.4	70-125		
		AgZnO(10) (P.M)	960		9.4	2.7	64-78		
		AgZnO(10) (I.O)	960		9.55	3.4	72-127		
		AgZnO(10) -T(I.O)	960		9.55	3.5	76-129		
7	銀氧化 銅	AgCuO(10) (P.M)	960		9.7	25	54-67	抗熔焊,耐損蝕。用於中 等容量斷路器和大電流 接觸器。	
		AgCuO(10) (I.O)	960		9.6	2.7	58-70		
		AgCuO(10) -T(I.O)	960		9.8	3.3	76-129		
8	多元銀 多屬氧 化物	Ag(CdO+SnO ₂ +M eO) ₁₆	960		9.7	3.7		綜合了 AgCdO 及 AgSnO ₂ 的優點,即抗熔 焊,又能滿足溫升的要 求。用於交直流大電流 接觸器,過流繼電器。	

註:(I.O) 一內氧化,(P.M) 一粉末冶金。

表 2-6 常用重負載電接觸材料種類、性能及用途[22]

序號	品種	代號	熔點 (°C)	熱導率 [W/ (m·K)]	密度 (g/cm ³) ≥	電阻率 (μΩ·cm) ≤	硬度 HB ≥	抗拉 強度 (MPa)	特性和用途
1	銀鎳	AgNi30	960	240~320	9.7	2.7	65	330~530	電弧運動特性好,通斷時材料遷移少,其氧化物為絕緣物,特別適用於狹小外殼中通斷,抗熔焊性差,常與 AgC 配對。用於直流快速開關,電源開關,電磁開關,各種低壓斷路器。
2	銀石墨	AgC ₃ Q	960	200~250	9.10	2.2	35		在接過短路電流時,抗熔焊性最好,接觸電阻小,有自潤滑作用,滑動性能好,抗電弧燒損性差。用於鐵路信號繼電器,大型調壓器,電機電刷,高壓磁吹斷路器,電阻樣的滑動部件等。
		AgC ₃ P	960	200~250	9.10	2.4	25		
		AgC ₅ Q	960	200~250	8.60	2.5	35		
		AgC ₅ P	960	200~250	8.60	3.2	25		
3	銀鎢	AgW ₄₀	960	290~330	12.40	2.6	85		高熔點,高硬度,耐損蝕、抗熔焊,材料轉移少,通斷過程中產生氧化物,隨開閉次數增加,接觸電阻劇增,以至溫升超過標準,銀碳化鎢的接觸電阻比 AgW 穩定。用於漏電保護開關,電動機保護開關,直流保護開關,直流快速開關,中壓及高壓壓縮空氣斷路器。
		AgW ₅₀	960		13.15	3.0	105		
		AgW ₇₀	960		14.90	3.8	150		
		AgW ₈₀	960		16.10	4.6	180		
4	銀碳化鎢	AgWC ₄₀	960	200	11.50	4.0	130		
		AgWC ₆₅	960		13.00	5.0	160		
5	銀碳化鎢石墨	AgWC ₁₂ C ₃	960		9.30	3.2	60		石墨的添加,可進一步防止 WC 的氧化,但降低了耐電弧燒損特性。與 AgW 配對用於各種低壓斷路器觸頭
		AgWC ₁₂ C ₃ Ni ₁	960		10.3	2.8	80		
6	銅鎢	CuW ₆₀	1083	120~230	12.75	3.7	140		高熔點,高硬度,切削性能好,抗熔焊極好,但比 AgW 更易氧化,只能在油、SF ₆ 等介質中使用,不能在空氣中使用。用於中壓油斷路器,高壓油斷路器,SF ₆ 斷路器,變壓器用有載分接開關的弧觸頭。
		CuW ₈₀	1083	120~230	15.15	5.0	220		

表 2-6 常用重負載電接觸材料種類、性能及用途[22] (續)

序號	品種	代號	熔點 (°C)	熱導率 [W/ (m-K)]	密度 (g/cm ³) ≥	電阻率 (μΩ.cm) ≤	硬度 HB ≥	抗拉 強度 (MPa)	特性和用途
7	銅碳化 鎢	CuWC ₁₅	1083		9.15	2.80	80		抗熔焊,耐損蝕,由於WC分解生成CO和CO ₂ 可保護其不受氧化。用於空氣斷路器代替部分AgW
		CuWC ₂₀	1083		9.35	2.80	80		
		CuWC ₅₀	1083		12.5		140		
8	銅鎢/ 銅鉻自 力行觸 頭	CuW ₇₀	1083		14.5	4.1	175		本身具有彈力,不需外加彈簧,與銅鎢特性相同。用於SF ₆ 高壓斷路器
		CuCr _{0.6}	1083		8.0	2.15	110		
9	銅石墨	CuC ₃	1083		7.8	2.40	40		導電導熱性好,抗熔焊,有自潤滑特性,價廉,可部分代替AgC。用於電動機換向器,微電機電刷,空氣斷路器
		CuC ₅	1083		7.0	3.40	30		

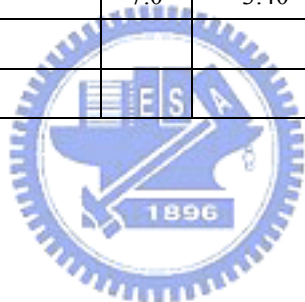


表 2-7 常用真空電接觸材料種類、性能及用途[22]

序 號	品 種	代 號	主要成分的 質量分數 (%)	含氣量質量 分數(x10-6) ≤		密 度 (g/cm ³) ≥	電 阻 率 (μΩ.cm) ≥	硬 度 HB ≥	特 性 和 用 途
				氧	氮				
1	銅鈹銀	CuBiAg	Bi: 0.4~0.7 Al: 2.2~2.6 Cu 餘量	8	3	8.90	50.0	45	10kV 以下真空斷路器 及負荷開關
2	銅鈹鋁	CuBiAl	Bi: 0.15~0.5 Al: 9.5~11 Cu 餘量	10	3	7.40	7.7	133	10kV 以下真空斷路器 及負荷開關
3	銅鈹鈾	CuBiCe	Bi: 0.4~0.8 Ce: 0.1~0.15 Cu 餘量	22	3	8.80	47.5	45	10kV 以下真空斷路器 及負荷開關
4	銅鉻	Cu-Cr	Cr: 47~52 Cu 餘量	500	50	7.80	15.0	80	35kV 以下真空斷路器 及負荷開關
5	鈾鈹鑲 嵌合金	SbBi	Bi: 9.5~10.5 Sb 餘量	50		6.60	20.0		1140V、600A 以下真空 接觸器
6	銅鐵鎳 鈷	CuFeNiCo	Fe: 2.5~3.5 Ni: 3.5~4.5 Co: 2.5~3.5 Cu 餘量	20		8.85	10.5	80	1140V、600A 以下真空 接觸器
7	銅鎢碳 化鎢	Cu(W+WC) ₇₀	Cu: 28~32 C: 1~2 W 餘量	60	2①	13.50	20.3	200	6kV 以下真空接觸器
8	銅鎢碲	CuWTe-T	W: 70 Te: 1~2 Cu 餘量	50	8	14.2	22.0	140	1~10kV 以下真空斷路 器及負荷開關(630A 以 下)

① 為氮的質量分數。

第三章 實驗方法

3.1 商用電接觸材料組成分析

在進行第一階段自主生產合金製作前，首先必須先了解並進行商用電接觸材料組成分析。目前所採用的商用探針為 Johnstech PAD ROL200 系列，如圖 3-1 所示[32]。將探針分成 A、B、C 三區，利用掃描式電子顯微鏡(SEM)及能量散射光譜分析儀(EDS)進行材料化學組成半定量分析。

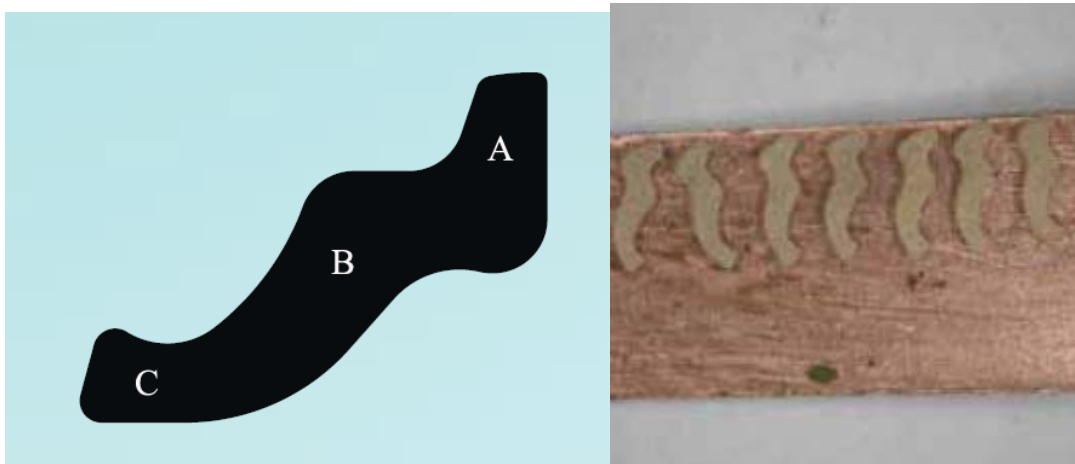


圖 3-1 商用探針為 Johnstech PAD ROL200 系列外觀 [32]。

圖 3-2 所示為商用探針 Johnstech PAD ROL200 在所劃分 A 區，經 SEM/EDS 所分析的結果。圖 3-2(a)為 SEM 顯微型態圖及圖 3-2(b)為 EDS 光譜分析圖。經分析主要元素為金(Au) 71wt%，其次為銅(Cu) 16.31wt%、鉑(Pt) 7.35wt%及銀(Ag) 4.44wt%，最後為鋅(Zn) 0.90wt%，其化學組成重量比例如表 3-1 所示。

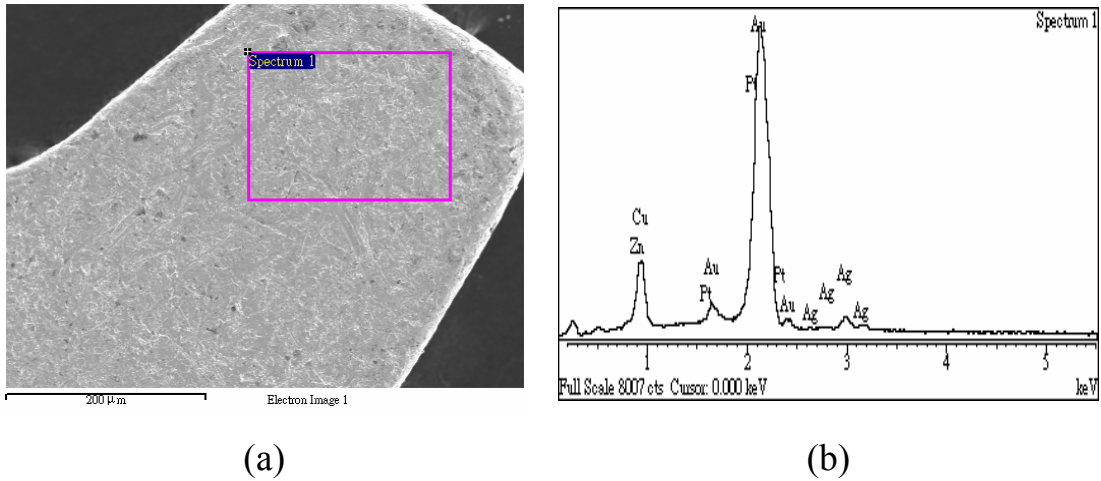


圖 3-2 商用探針 Johnstech PAD ROL200 在所劃分 A 區，經 SEM/EDS 所分析的結果：(a) SEM 顯微型態圖，(b) EDX 光譜分析圖。

表 3-1 商用探針 Johnstech PAD ROL200 化學組成成分表(A 區)

Element	Cu	Zn	Ag	Pt	Au
Weight(%)	16.31	0.90	4.44	7.35	71.00
Atomic(%)	36.16	1.94	5.80	5.31	50.79

圖 3-3 所示為商用探針 Johnstech PAD ROL200 在所劃分 B 區，經 SEM/EDS 所分析的結果。同樣圖 4-3(a)為 SEM 顯微型態圖及圖 4-3(b)為 EDS 光譜分析圖。經分析主要元素為金(Au) 71.97wt%，其次為銅(Cu) 16.36wt%、鉑(Pt) 6.43wt%及銀(Ag) 4.3wt%，最後為鋅(Zn) 0.94wt%，其化學組成重量比例如表 3-2 所示。

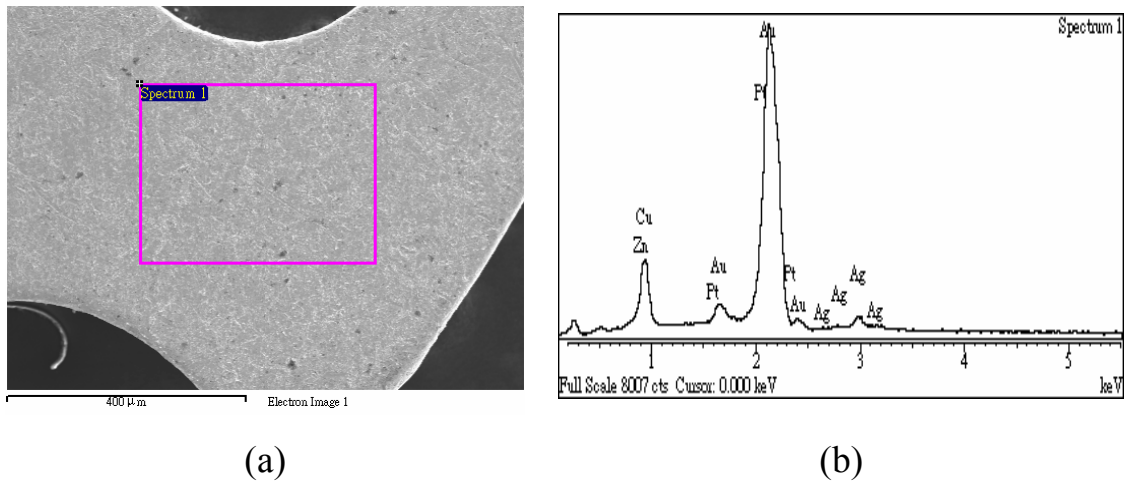


圖 3-3 商用探針 Johnstech PAD ROL200 在所劃分 B 區，經 SEM/EDS 所分析的結果：(a) SEM 顯微型態圖，(b) EDS 光譜分析圖。

表 3-2 商用探針 Johnstech PAD ROL200 化學組成成分表(B 區)

Element	Cu	Zn	Ag	Pt	Au
Weight(%)	16.36	0.94	4.3	6.43	71.97
Atomic(%)	36.26	2.03	5.61	4.64	51.46

接續分析商用探針 Johnstech PAD ROL200 在所劃分 C 區，經 SEM/EDS 分析所得的結果如圖 3-4 所示。同樣圖 3-4(a)為 SEM 顯微型態圖及圖 3-4(b)為 EDS 光譜分析圖。經分析主要元素為金(Au) 70.91wt%，其次為銅(Cu) 16.38wt%、鉑(Pt) 7.68wt%及銀(Ag) 4.25wt%，最後為鋅(Zn) 0.78wt%，其化學組成重量比例如表 3-3 所示。

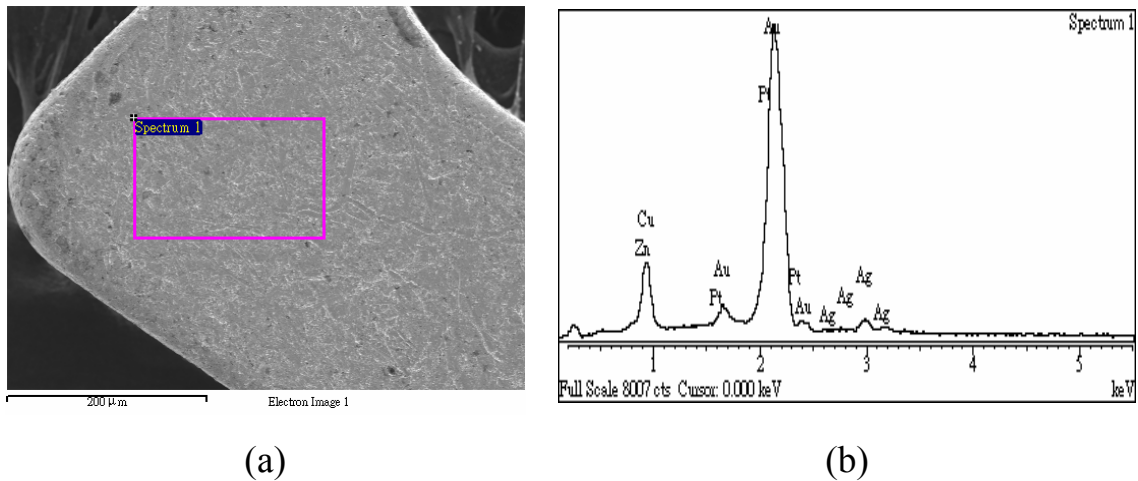


圖 3-4 商用探針 Johnstech PAD ROL200 在所劃分 C 區，利用 SEM/EDX

所分析的結果：(a) SEM 顯微型態圖，(b) EDX 光譜分析圖。

表 3-3 商用探針 Johnstech PAD ROL200 化學組成成分表(C 區)

Element	Cu	Zn	Ag	Pt	Au
Weight(%)	16.38	0.78	4.25	7.68	70.91
Atomic(%)	36.39	1.68	5.56	5.56	50.81

綜合以上三區域分析的結果可發現，PAD ROL200 探針其材料化學組成主要元素為金(Au)、銅(Cu)、鉑(Pt)、銀(Ag)及鋅(Zn)。由於合金材料從液態變成固態，在凝固過程中內部元素的偏析，導致在各區域分析所得到的元素化學組成重量比有所差異。其次有些元素熔點較低，在合金元素熔融過程中容易被揮發的因素。所以，在此可以預估 PAD ROL200 探針其原材料化學組成成分大約為金(Au) 71~73wt%，其次為銅(Cu) 14~17wt%、鉑(Pt) 7~8wt% 及銀(Ag) 3~4wt%，最後為鋅(Zn) 0.9~1wt%，符合 ASTM B541 Gold Electrical Contact Alloy 之標準規範。

3.2 實驗流程

3.2.1 合金溶煉

合金溶煉流程如圖 3-5 所示，本計畫進行的方法以建立低成本合金溶煉技術為第一步，以低成本的溶煉技術為核心，降低整個生產成本。所謂低成本溶煉技術為利用高週波加保護氣體的溶煉技術，不採用高成本的真空或電弧溶煉的技術。合金溶煉後，檢驗合金成分是否符合計劃成分，如果所發展的低成本合金溶煉技術可行，則進入熱分析(TGA,DSC)其分析結果為下一步熱處理條件之依據。

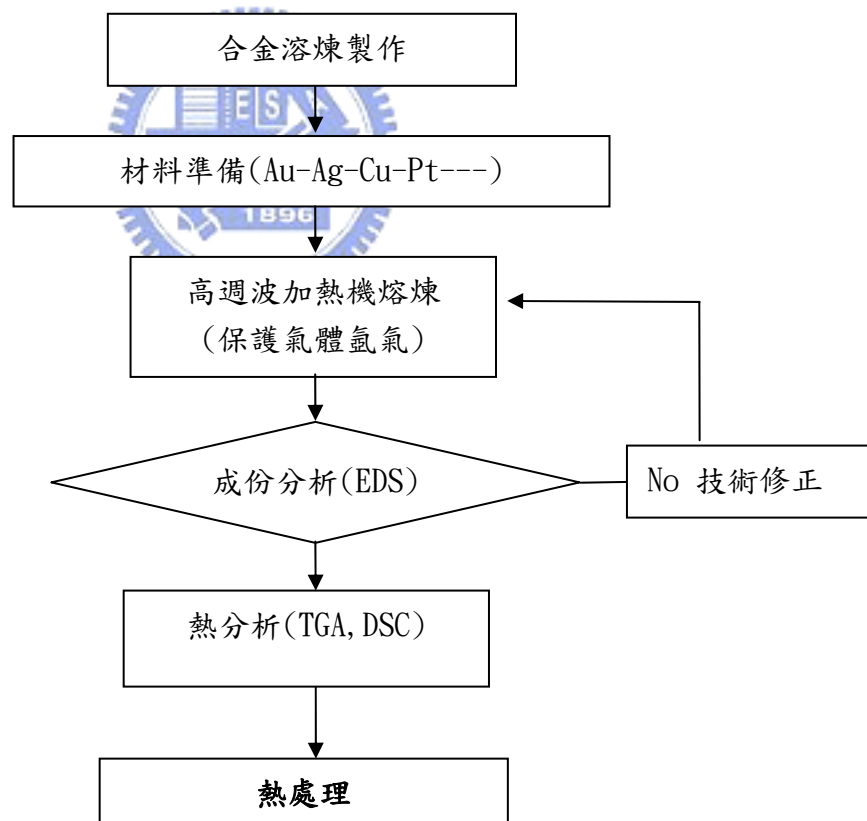


圖 3-5 合金溶煉流程

3.2.2 材料熱處理

材料熱處理流程如圖 3-6 所示，目前所使用的金基(Au based)合金電接觸材料，所添加的合金元素種類有銀(Ag)、銅(Cu)、鉑(Pt)等。電性量測用的電接觸材料必須具備低電阻、耐熔銲、抗腐蝕及耐磨耗等特性，本計畫為了符合低電阻及抗腐蝕的特性，採用金基(Au-based)系合金，然後選用添加其他合金元素例如鎳(Ni)、鋅(Zn)等合金元素，利用加工及熱處理的方式來強化材料機械性質。合金元素對金(Au)的固溶率，影響材料的結構及電性，並進而影響其物理、化學、機械及加工等性質，所以選用添加的合金元素及比例，能與金(Au)完全固溶，並可使合金達成固溶強化或析出強化為首選，然後在利用調整合金來達到低電阻的目的。整個新材料在開發過程中，利用以下方法來鑑定新材料是否符合實際所需的電性及機械等相關性質。材料化學組成分分析方面，利用 ICP 或 EDS 進行定量或半定量的化學分析。顯微組織觀察則使用光學顯微鏡(OM)及掃瞄式電子顯微鏡(SEM)觀察。在電性量測方面，使用四點探針量測電阻率。在機械性質方面，量測材料的微硬度。

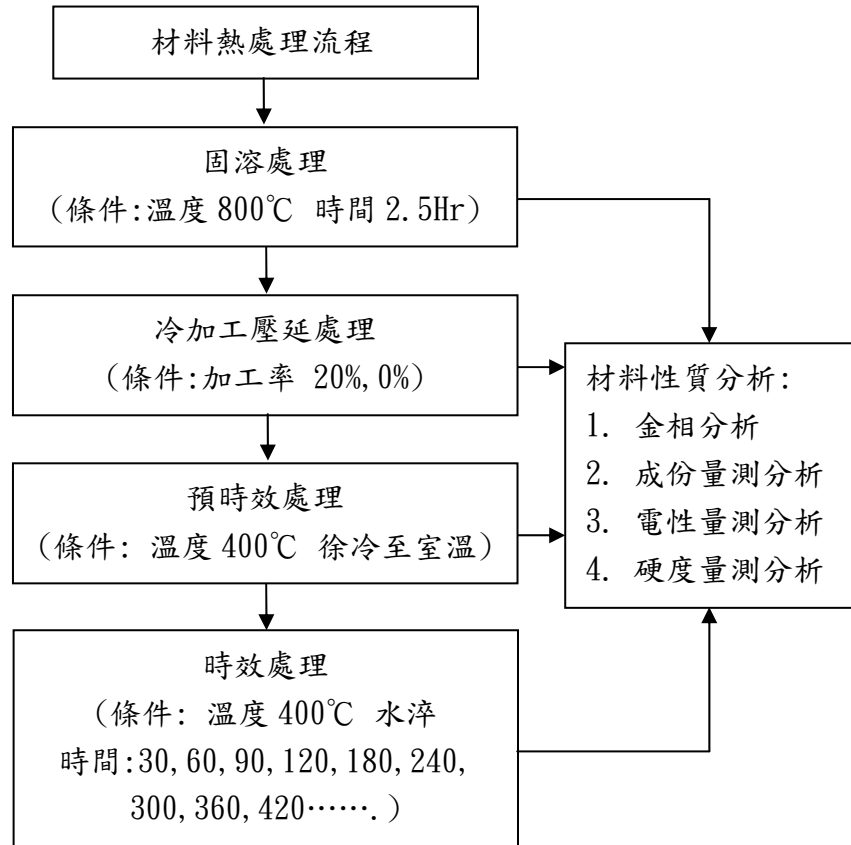


圖 3-6 材料熱處理流程

3.3 材料準備

3.3.1 實驗金屬材料及純度要求

本計畫熔煉所用的材料為純金屬，依合金組成所需的重量比，配製後加以熔煉成所需的合金。所需純金屬材料及純度如表 3-4 所示。

表 3-4 所需純金屬材料及純度

材料	Au	Ag	Pt	Cu	Zn	Ni
純度 (wt%)	99.99	99.99	99.99	99.99	99.99	99.99

3.3.2 設計合金組成

本計畫主要設計元素為 Au、Ag、Pt 及 Cu 四元合金為主，然後再添加 1%Ni 或 Zn 來改變其化學組成，並比較不同添加物對電性及機械性質的影響。所設計的合金比例如表 3-5 所示。

表 3-5 合金設計組成比例

試片編號	元素	Au	Pt	Ag	Cu	--	四元合金
1	重量百分比(wt%)	71.5	8.5	4.5	15.5	--	(40 公克)
試片編號	元素	Au	Pt	Ag	Cu	Zn	五元合金
2	重量百分比(wt%)	71.5	8.5	4.5	14.5	1	(40 公克) ASTM B541
試片編號	元素	Au	Pt	Ag	Cu	Ni	五元合金
3	重量百分比(wt%)	71.5	8.5	4.5	14.5	1	(40 公克)

3.4 實驗設備

3.4.1 熔煉設備

在合金熔煉方面，熔煉設備則採用五力機電所生產的桌上型高週波爐 GP-25(25KW,30KVA)如圖 3-7，圖 3-8。先選取好預配重的的比例，再利用重量百分比算出各元素金屬重量，使用高週波熔爐，功率維持約 12KW 加熱時間約 80 秒，即可達到 1700°C，因為四元合金的元素為 Au、Cu、Ag 和 Pt，且 Pt 的熔點高達 1700°C，因此在高週波熔爐的條件設定，需要升溫至 1700°C 的高溫，才可以將四元合金的金屬完全熔煉一起。

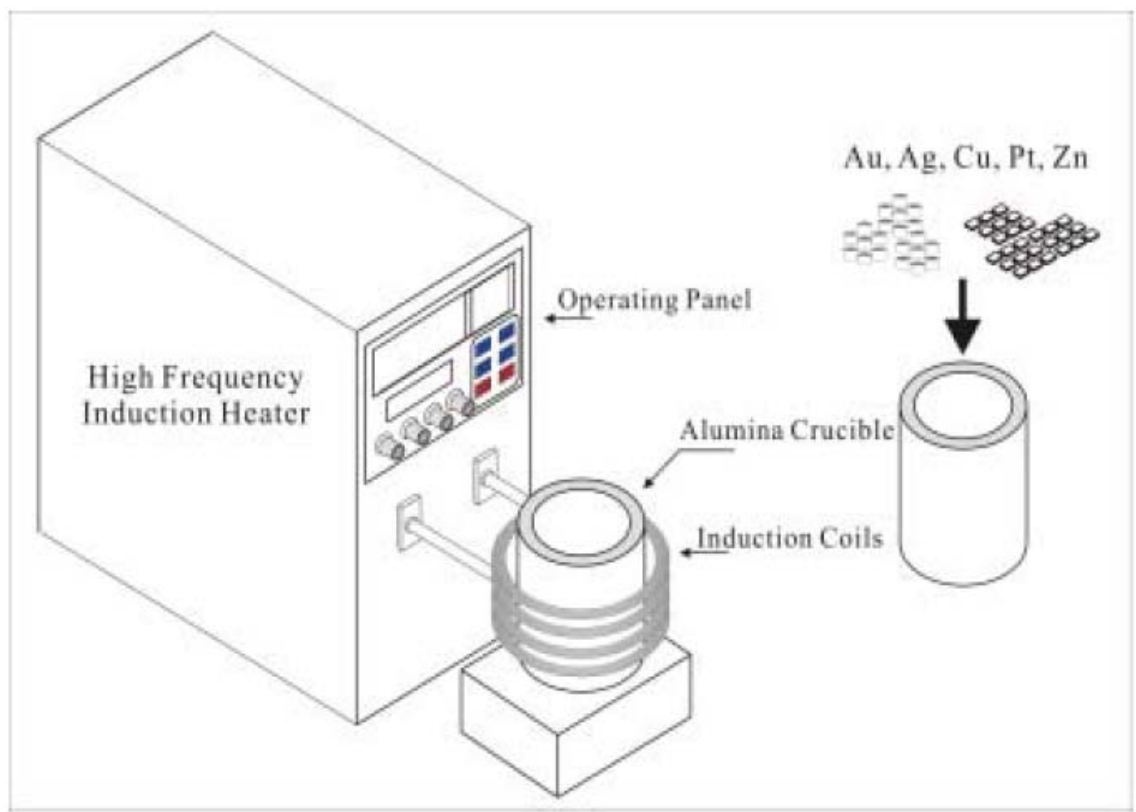
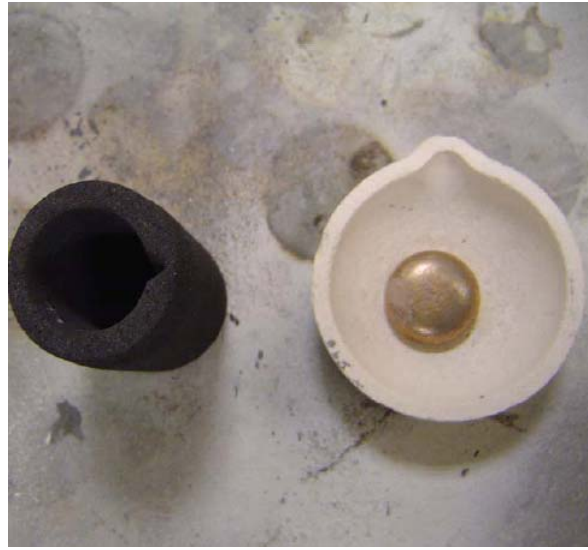


圖 3-7 高週波感應加熱合金溶煉配置圖



(a)



(b)



(c)



(d)

圖 3-8 (a)高週波熔煉實況, (b)合金實體, (c)合金直徑 20mm, (d)合金厚度 8mm。

3.4.2 導電率量測

使用四點探針(4 Point)法量測試片電阻值 R，再依下式求得材料之導電

率 σ ：

$$\rho = RA/L \quad (3.1)$$

$$\sigma = 1/\rho \quad (3.2)$$

$$\%IACS = \rho(\text{Cu}) / \rho * 100 \quad (3.3)$$

A 為試片截面積，L 為量測長度， ρ 為電阻係數， $\rho(\text{Cu})$ 銅電阻率

1913 年國際電工委員會規定退火工業純銅標準電阻率為 $1.7241 \mu \Omega \cdot \text{cm}$ 20

°C 為標準導電率，以 100%IACS 表示，IACS 即指國際退火工業純銅標準。

在導電率量測方面，採用四點探針電性量測，機型為 NAP-RT-3000，
NAPSON CORP. (日本)公司製造如圖 3-9。

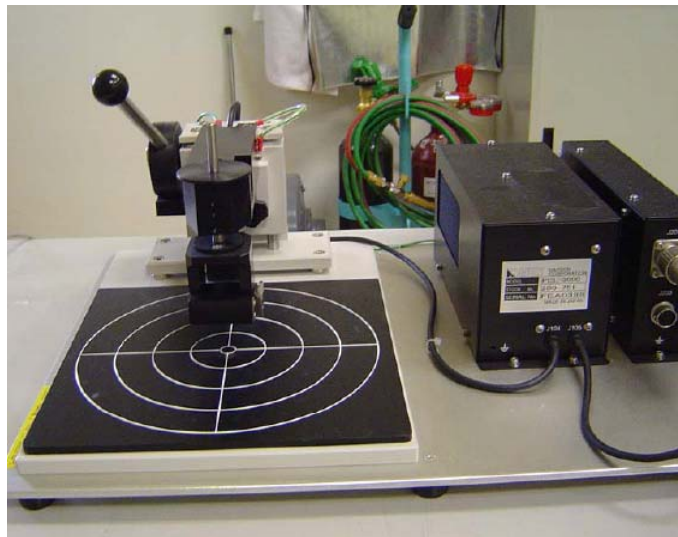


圖 3-9 四點探針 NAP-RT-3000(NAPSON)。

3.4.3 熱分析(TGA,DSC)

3.4.3.1 熱重分析儀(Thermogravimetry Analyzer TGA)

熱重分析儀的基本原理為將待測物(sample)置於一耐高溫的容器中，此容器被置於一具有可程式控制溫度的高溫爐中，而此待測物被懸掛在一個具有高靈敏度及精確度的天平上，如圖 3-10 所示，在加熱或冷卻的過程中，由於待測物會因為反應導致重量的變化，這個因溫度變化而造成的重量變化可以由以上提及的天平量測獲得。一組熱電偶(thermal couple)被置於靠近待測物旁但是不接觸，以量測待測物附近的溫度，依此量測待測物的溫度並控制高溫爐的溫度曲線。熱重分析所量測的結果如圖 3-11 所示。縱座標顯示在一個熱變化的過程中，分析儀量測出的重量變化，而橫座標為熱變化的溫度或是時間。一般而言，熱重分析都是使用固定的升溫或是降溫過程。[33,34]

熱重分析儀可以應用之範圍相當廣凡舉各種物質的反應或變化具有重量改變熱重分析儀皆可以偵測得知其反應的重量變化與溫度的關係。

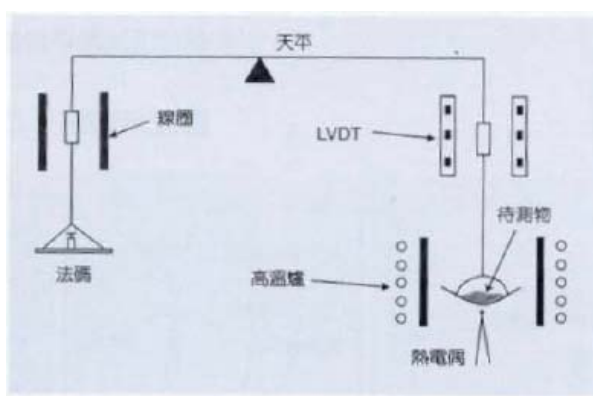


圖 3-10 熱重分析儀內部結構示意圖[33]。

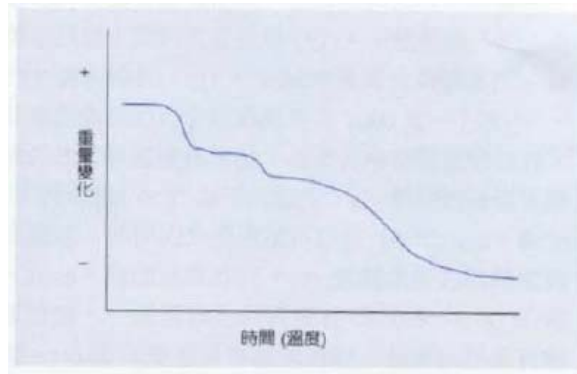


圖 3-11 熱重分析的反應測試結果[33]。

3.4.3.2 示差掃描熱量分析(Differential Scanning Calorimetry DSC)

示差掃描熱量分析儀(以下稱 DSC)的測試曲線雖非常類似熱差分析(differential thermal analysis, DTA)，但是其基本原理卻與熱差分析不盡相同，DSC 的儀器中也有兩個試料容器，分別可以裝置待測物(sample)及標準物(reference)，而每一個試料容器有自己的加熱系統及測溫器來偵測待測物及標準物的溫度。在一個設定的加溫(或降溫)過程中，兩個試料容器以本身的加熱系統加熱(或冷卻)，儀器的溫控系统將兩者於測試的過程中一直保持相同的溫度，由於標準物並不會有反應，當待測物發生吸熱(放熱)反應時，待測物一側的測溫器會偵測出因吸熱(放熱)反應造成此處的溫度較標準物側的溫度低(高)，因此，待測物端的加熱系統會較標準物側的加熱系統額外的多輸入(減少)一些熱量(以電流或電壓的變化)，以增加(減少)待測物的溫度，如此才可以保持兩者的溫度一致。而在測試過程中為保持兩方的溫度相同，其所需在待測物端的額外增加或減少的熱量就是待測物在測試過程中由於反應造成的實際熱量的變化。因此，DSC 可以做反應或相變化等的定性

及定量的實驗。圖 3-12 為示差掃描熱量分析儀內部結構示意圖

示差掃描熱量分析儀可以應用的範圍相當廣，舉凡各種物質的反應或相變化具有吸熱或放熱反應，熱差分析儀皆可以偵測得知其反應的起始溫度 (onset temperature)，如圖 3-13 所示，是吸熱反應或放熱反應，及此反應熱量的大小，此儀器可以做定量分析。可分析的反應如金屬材料的合金熔煉後的析出過程、礦物的脫水反應、有機的熱聚合及硬化反應、陶瓷材料的相變化、玻璃材料的再結晶等。

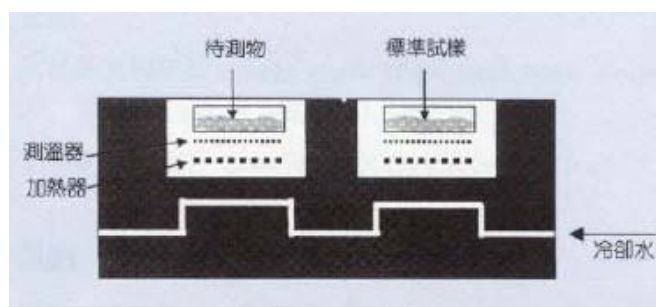


圖 3-12 示差掃描熱量分析儀內部結構示意圖[33]。

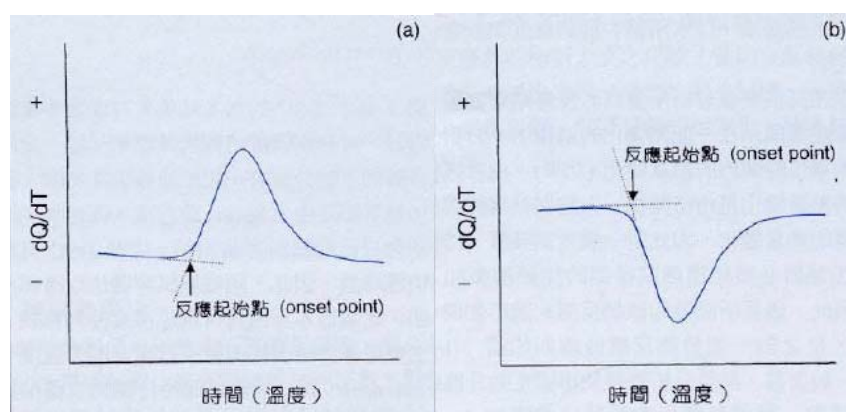


圖 3-13 DSC 分析反應時之結果(a)吸熱反應(b)放熱反應[33]。

3.4.4 試片處理與金相觀察

3.4.4.1 試片處理

試片合金材料，經精密切割機(圖 3-14)切段後，分別使用 320、400、800、1000、1200、1500、2000、2500 和 4000 號水砂紙研磨(圖 3-15)，噴水管水量調整至適當大小，調整至適當轉數，進行研磨試片約 5~10 秒後旋轉 90 度繼續研磨，如此重複數次直到以除去前一加工過程所留下的痕跡，最終用 0.5 及 0.03 μ 氧化鋁粉研磨液拋光。



圖 3-14 精密切割機



圖 3-15 研磨拋光機

3.4.4.2 金相觀察

金相實驗的腐蝕液，採用一硝三鹽一水($\text{HNO}_3:\text{HCl}:\text{H}_2\text{O}=1:3:1$)的比例，均勻混合並放置一段時間(至少 1 小時)使腐蝕液反應完全。將預觀察之試片浸泡於腐蝕液中約 5~10 秒後，使用工具顯微鏡觀察，如果試片晶界不夠明顯則須再次腐蝕，如果呈現焦黑狀態，則須再次研磨拋光過腐蝕區域，再次腐蝕。



第四章 結果與討論

4.1 合金溶煉結果分析

4.1.1 合金設計組成比例

本實驗計劃設計製作三種不同組成比例如表 3-5 所示，試片編號 2 為依據 ASTM B541 Gold electrical Contact Alloy 化學成份組成，試片編號 1 為將鋅(Zn)1wt%取消並將銅(Cu)成份由 14.5 wt%提高至 15.5 wt%，成為四元合金，預期其將有更佳之導電率表現，但機械硬度將稍差。試片編號 3 為將鋅(Zn)1wt%變更為鎳(Ni)1wt%，因為鎳(Ni)的原子半徑為 0.125nm 與金(Au)的原子半徑 0.144nm，鎳(Ni)與金(Au)金屬原子尺寸差為 15%，為 Hume-Rothrey 溶解度法則之極限值，故可預期以鎳(Ni)為析出強化相將使材料之強度優於以鋅(Zn)為析出強化相之材料，但導電率將稍差。

表 3-5 合金設計組成比例

試片編號	元素	Au	Pt	Ag	Cu	--	四元合金
1	重量百分比(wt%)	71.5	8.5	4.5	15.5	--	(40 公克)
試片編號	元素	Au	Pt	Ag	Cu	Zn	五元合金
2	重量百分比(wt%)	71.5	8.5	4.5	14.5	1	(40 公克) ASTM B541
試片編號	元素	Au	Pt	Ag	Cu	Ni	五元合金
3	重量百分比(wt%)	71.5	8.5	4.5	14.5	1	(40 公克)

4.1.2 製造過程中可能遭遇之困難

1. 鋅(Zn)熔點低及組成含量低極易蒸發，金與鉑價格昂貴，實驗難以大量進行，且失敗後之合金難以回熔使用增加困難性，依據 ASTM B541 Gold electrical Contact Alloy 化學成份組成為金(Au)71.5 wt%，其次為銅(Cu) 14.5wt%、鉑(Pt) 8.5wt%及銀(Ag) 4.5 wt%，最後為鋅(Zn) 1wt%，Zn 在合金中重量佔 1%，組成含量低且為最低比重之添加元素，Zn 熔點溫度(420°C)都遠低 Au(1065°C), Ag(961°C), Pt(1772°C), Cu(1085°C)等元素，與 Pt 熔點溫度相差更高達 1352°C，Zn 沸點溫度僅 907°C，在動輒 1000°C 以上的熔煉條件下有極易蒸發之缺點。
2. 鋅(Zn)之結晶構造為六方密格子(HCP)與金(Au)、銅(Cu)、鉑(Pt)、銀(Ag)之面心立方格子(FCC)不同不符合合金固溶溶解度的條件(Hume-Rothery 法則)，恐將影響合金之均質性。

4.1.3 解決遭遇困難方法

Cu-Zn 合金相圖如圖 2-10 所示，由圖可知含 Zn 量不同而成為 α 、 β 、 γ 、 δ 、 ϵ 、 η 六種固溶體。Zn 含量低於 38.5%時形成均勻 α 固溶體(FCC 結構)。試片編號 2 之 Cu-Zn 之 Zn 相對含量為 6.5%，由 Cu-Zn 合金相圖中可預測其溶點約為 1050°C，其結構為 FCC，故溶煉過程中先將 Cu-Zn 溶合後再將

Au、Ag、Pt 投入溶煉將有助於保持合金之設計組成成份。

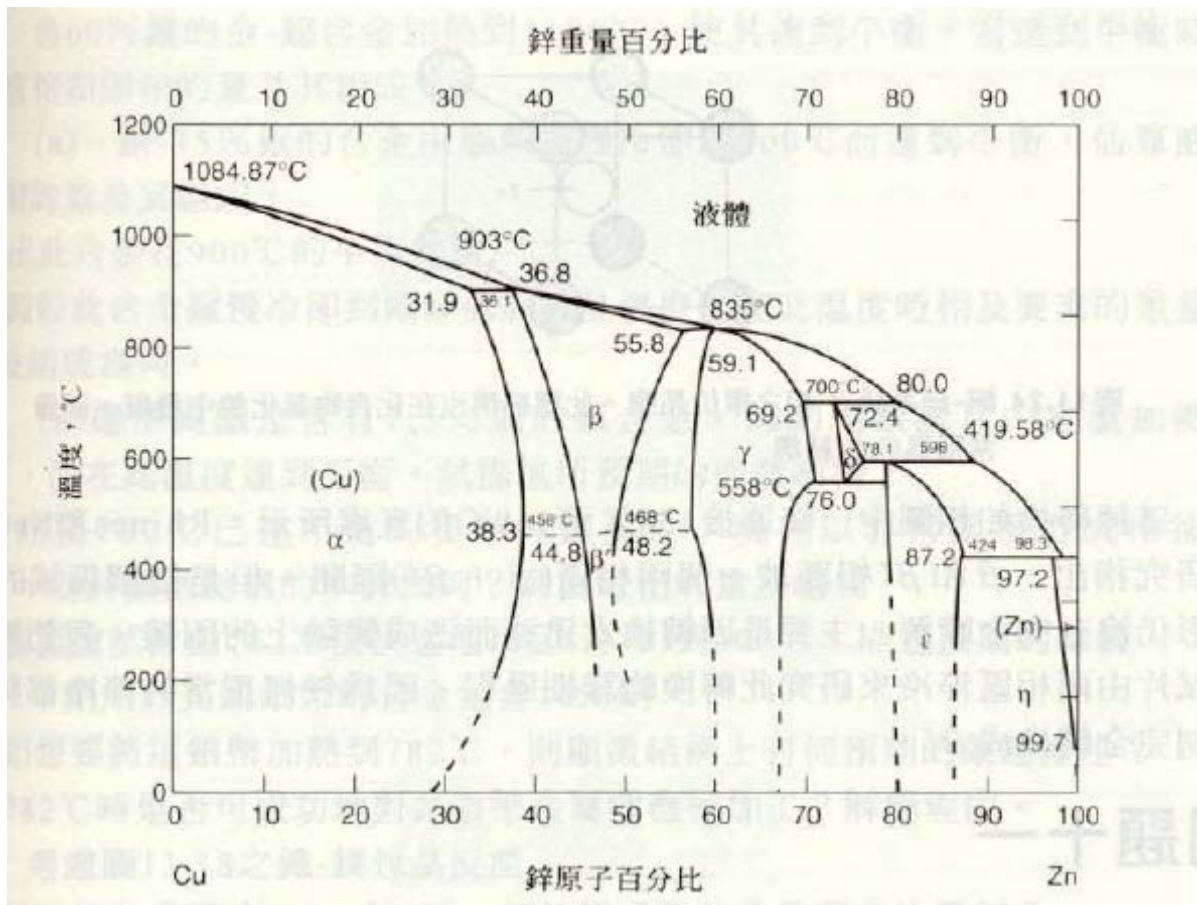


圖 2-10 Cu-Zn 二元相圖[30]。

4.1.4 合金溶煉製作程序

為驗證溶煉過程中先將 Cu-Zn 溶合後再將 Au、Ag、Pt 投入溶煉將有助於保持合金之設計組成成份。故將溶煉製作方法分為：

1. 五元合金法：其製作流程如圖 4-1 所示，所有材料依設計比例調配完成，同時投入坩鍋，使用高週波熔爐，功率維持約 12W 加熱時間約 80 秒，即可達到 1700°C，因為 Pt 的熔點高達 1700°C，因此在高週波熔爐的條件設定，需要升溫至 1700°C 的高溫，才可以將五元合金的金屬完全熔煉

一起。後降溫待凝固後倒出迅速水淬以保持合金之均質性。

2. 合銅法+四元合金法: 其製作流程如圖 4-2 所示, 鋅(Zn)以商用 37 黃銅取代其於材料依設計比例調配完成, 同時投入坩鍋, 使用高週波熔爐, 同樣升溫至 1700°C 的高溫, 後降溫待凝固後倒出迅速水淬以保持合金之均質性。

X 射線能量散佈分析儀(EDS) , 採 mapping 的方式分析, 放大的倍率為 3500X, 比例尺規的大小為 10um, 故框選的測試的大小為 30-40um, 每個樣品測試中間與外部共三處, 將三處 Mapping 值取平均值。

表 4-1, 表 4-2 為利用 SEM/EDS 所分析的結果, 五元合金法溶煉法其鋅(Zn)平均只有 0.58 wt%, 不符合 ASTM 0.7~1.3 wt%之要求, 而合銅法+四元合金法其鋅(Zn)平均為 0.78 wt%, 故由此證實合銅法+四元合金法可保持鋅(Zn)之成份。

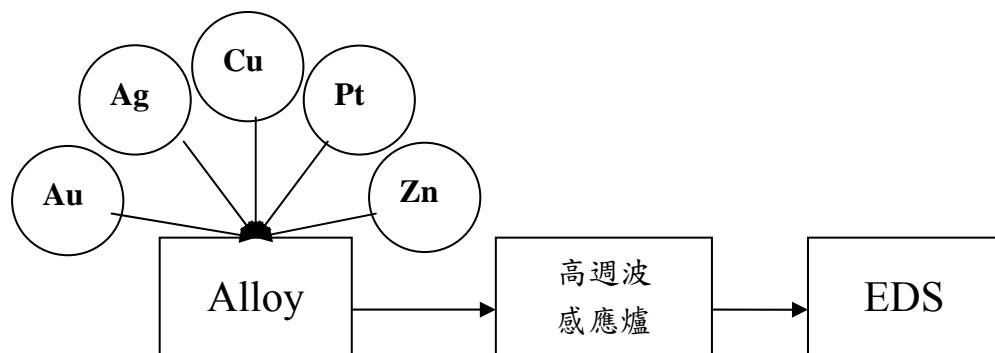


圖 4-1 五元合金法製作流程

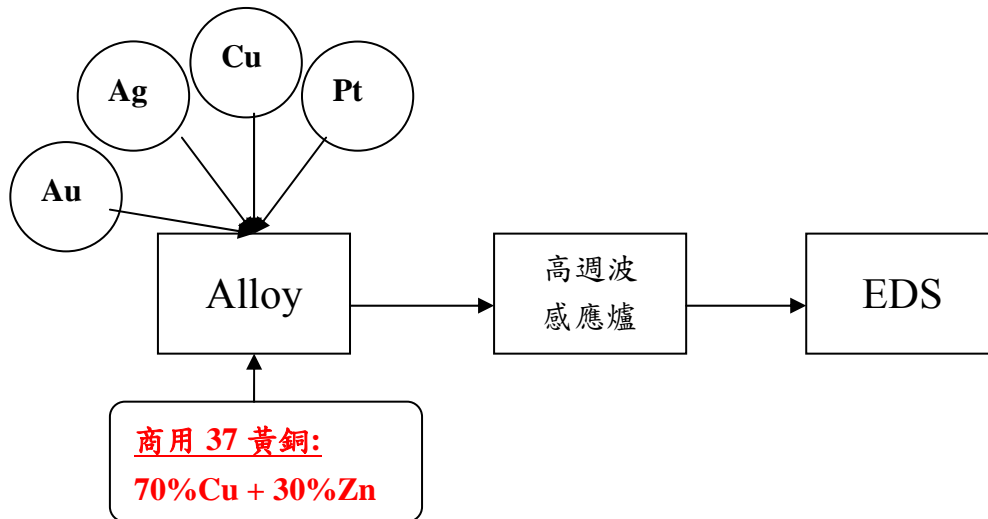


圖 4-2 合銅法+四元合金法製作流程

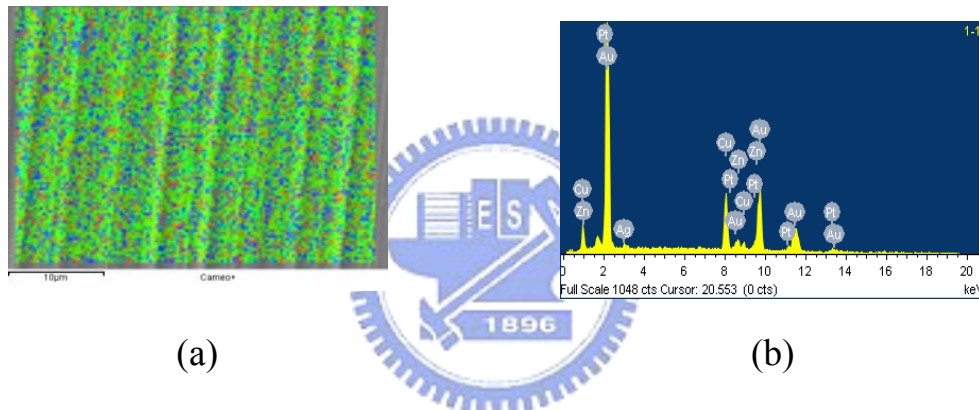


圖 4-3 五元合金法，利用 SEM/EDS 所分析的結果：(a) SEM 顯微型態圖(mapping)，(b) EDS 光譜分析圖。

表 4-1 五元合金法合金化學組成成分表

Element	Zn	Cu	Ag	Pt	Au	Total Weight(%)
Mapping-1	0.55	13.93	3.99	8.08	73.45	100
Mapping-2	0.59	13.58	3.83	8.22	73.78	100
Mapping-3	0.60	13.79	3.81	8.91	72.89	100
Average(wt%)	0.58	13.77	3.88	8.40	73.37	(100)
Design(wt%)	1	14.5	4.5	8.5	71.5	100

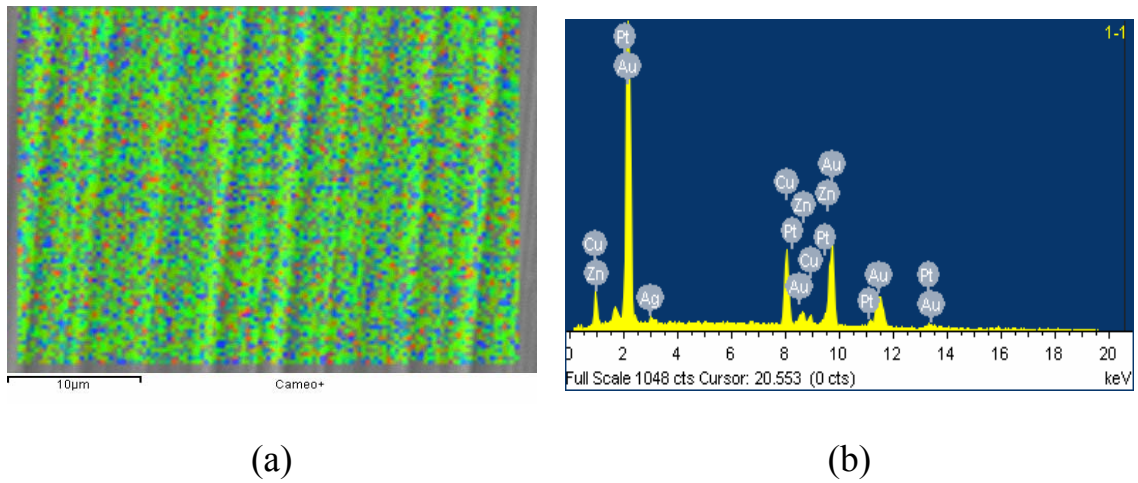


圖 4-4 合銅法+四元合金法，利用 SEM/EDS 所分析的結果：(a) SEM 顯微型態圖(mapping)，(b) EDS 光譜分析圖。

表 4-2 合銅法+四元合金法合金化學組成成分表

Element	Zn	Cu	Ag	Pt	Au	Total Weight(%)
Mapping-1	0.75	14.40	4.00	8.23	72.62	100
Mapping-2	0.73	13.61	4.08	8.72	72.86	100
Mapping-3	0.85	13.66	3.78	8.30	73.42	100
Average(wt%)	0.78	13.89	3.95	8.42	72.97	(100)
Design(wt%)	1	14.5	4.5	8.5	71.5	100

4.1.5 高週波合金溶煉結果

4.1.5.1 外觀及金相觀察

圖 4-5 試片 2 溶煉後實體，左側表研磨後質地完整並無氣孔產生，右側表精密切割機切斷後之形貌，外表有一層黑色氧化物但厚度約為 50~100 μ m，噴砂後即可去除。圖 4-6，4-7，4.8 分別表示試片 1，2，3 經研磨蝕刻後在 500X 光學顯微鏡底下觀察之結果，明顯可觀察出皆存有樹枝狀偏析成長組織，此乃由於凝固過程擴散時間不足，使材料內部產生不均勻之組成，稱為偏析(Segregation)。一般高溫溶煉過程難以避免偏析現象之產生，最終皆須施以各種熱處理以達到所想要之材料性質。

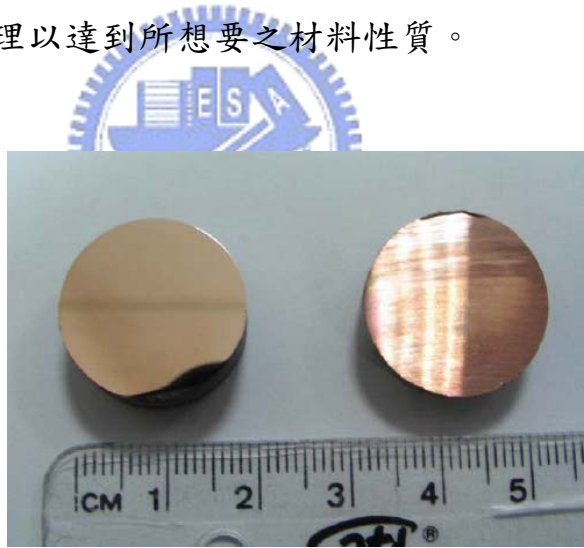


圖 4-5 試片 2 溶煉後實體，左側表研磨後質地完整並無氣孔產生

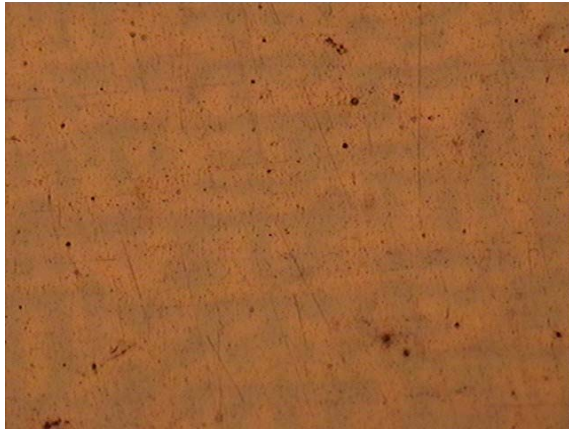


圖 4-6 試片 1 高週波溶煉後金相_500X



圖 4-7 試片 2 高週波溶煉後金相_500X



圖 4-8 試片 3 高週波溶煉後金相_500X

4.1.5.2 化學組成成份分析

表 4-3 為試片 1,2,3 經高週波溶煉後經 SEM/EDS 所分析的結果。採 mapping 的方式分析，放大的倍率為 3500X，比例尺規的大小為 10um，故框選的測試的大小為 30-40um，每個樣品測試中間與外部共三處，將三處 Mapping 值取平均值。

與合金設計值相比較，試片 1、金(Au) 增加 1.73wt%，銀(Ag) 減少 0.67wt%，試片 2、金(Au) 增加 1.47wt%，銀(Ag) 減少 0.55wt%，鋅(Zn)減少 0.22wt%。試片 3、金(Au) 增加 2.45wt%，銀(Ag) 減少 1.03，銅(Cu) 減少 1.16wt%，鎳(Ni)增加 0.12wt%。從結果顯示，合金中金(Au)含量增加主要原因為其它合金元素在合金中含量相對應減少的緣故。合金在凝固過程中會發生偏析的現象，而且 EDX 屬於化學半定量分析，所以整個材料化學組成份在分析會與原設計有所偏差。但從結果可以發現熔點最低的鋅(Zn)元素，在採合銅法熔煉過程中揮發量並沒有預期中的大。

再從溶煉後重量損失變化來觀察，表 4-4 所示，除了試片 2(四元+Zn) 重量損失為 3.7%為最高外，其餘重量損失皆小於 3%。

綜合以上所得結果可以證實，利用高週波在常壓及適當的保護氣氛下，的確可以自主熔煉出想要的金基合金。

表 4-3 試片 1,2,3 高週波溶煉後 EDS 化學組成成分表

試片編號	元素	Au	Pt	Ag	Cu	--	Total wt(%)
1	Design(wt%)	71.5	8.5	4.5	15.5	--	100
	Mapping 1,2,3 Average(wt%)	73.23	8.38	3.83	14.56		(100)
試片編號	元素	Au	Pt	Ag	Cu	Zn	Total wt(%)
2	Design(wt%)	71.5	8.5	4.5	14.5	1	100
	Mapping 1,2,3 Average(wt%)	72.97	8.42	3.95	13.89	0.78	(100)
試片編號	元素	Au	Pt	Ag	Cu	Ni	Total wt(%)
3	Design(wt%)	71.5	8.5	4.5	14.5	1	100
	Mapping 1,2,3 Average(wt%)	73.95	8.12	3.47	13.34	1.12	(100)

表 4-4 試片 1,2,3 高週波溶煉後重量變化表

試片編號	1(四元)	2(四元+Zn)	3(四元+Ni)
溶煉前重量(g)	40.27	40.33	40.15
溶煉後重量(g)	40.16	40.18	40.05
Loss (%)	2.7	3.7	2.5

4.2 熱處理分析

4.2.1 合金材料熱分析

由 TGA 熱重分析測試曲線觀察得知，三件試片皆無明顯材料揮發情形，約小於 0.2%，試片初始相變化反應溫度分別為試片 1 Au-Pt-Ag-Cu 827°C、試片 2 Au-Pt-Ag-Cu-Zn 832°C、試片 3 Au-Pt-Ag-Cu-Ni 850°C。為避免溫度控制不當而造成溫度過高致使合金內部，部份熔融所以固溶處理溫度選擇 800°C。

4.2.1.1 Au-Pt-Ag-Cu 熱分析

由圖 4-9 TGA 熱重分析測試曲線觀察得知，並無明顯材料揮發情形。圖 4-10 DSC 示差掃描熱量分析曲線，初始相變化反應溫度為 827°C，之後有一峰值出現，表示合金成份有 partial melting 現象，應是有合金相重新組合排列所造成之吸熱反應，另一峰值之大量吸熱反應則為合金熔點 1049°C。

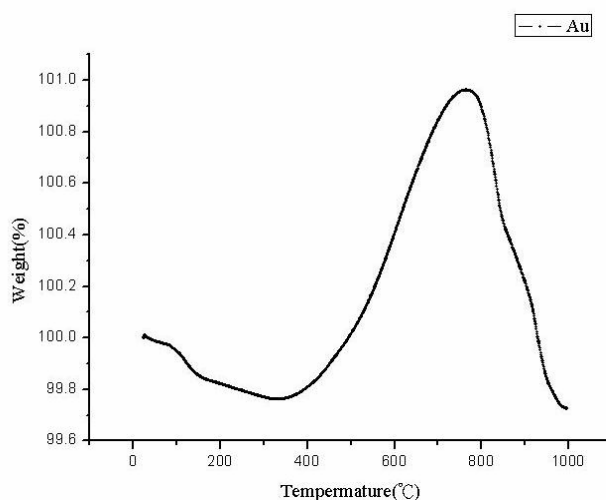


圖 4-9 試片 1 Au-Pt-Ag-Cu 合金 TGA 熱重分析測試曲線

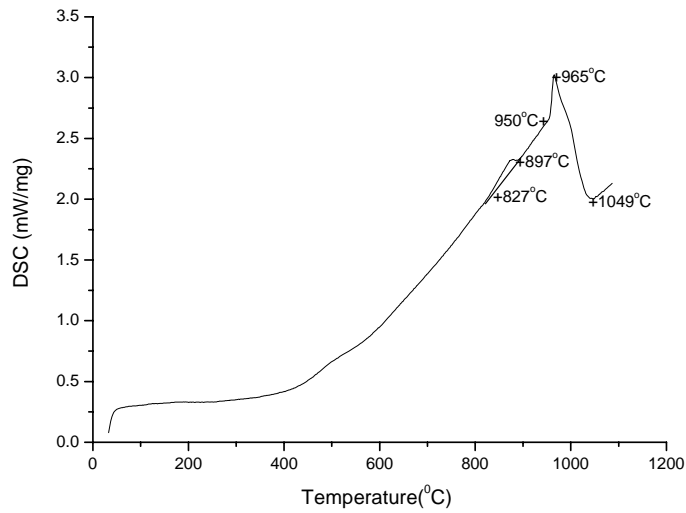


圖 4-10 試片 1 Au-Pt-Ag-Cu 合金 DSC 示差掃描熱量分析曲線

4.2.1.2 Au-Pt-Ag-Cu-Zn 熱分析

由圖 4-11 TGA 熱重分析測試曲線觀察得知，並無明顯材料揮發情形。圖 4-12 DSC 示差掃描熱量分析曲線，初始相變化反應溫度為 832°C，之後有一峰值出現，表示合金成份有 partial melting 現象，應是有合金相重新組合排列所造成之吸熱反應，另一峰值之大量吸熱反應則為合金熔點 1025°C。

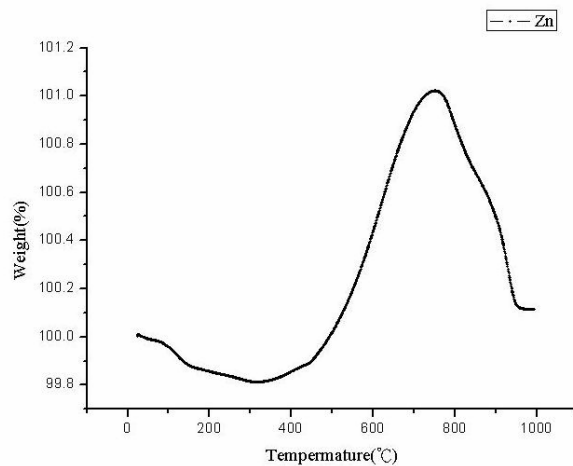


圖 4-11 試片 2 Au-Pt-Ag-Cu-Zn 合金 TGA 熱重分析測試曲線

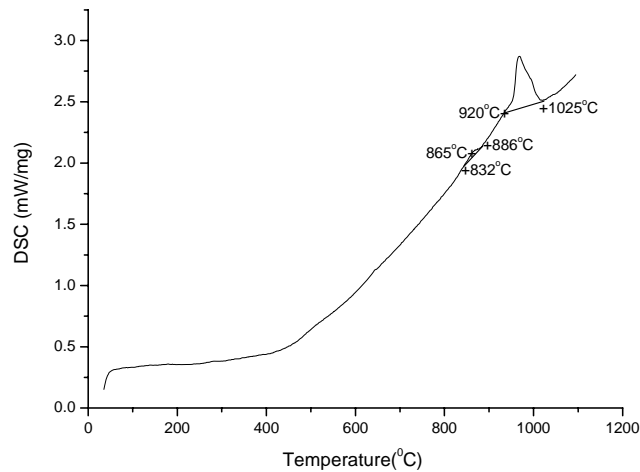


圖 4-12 試片 2 Au-Pt-Ag-Cu-Zn 合金 DSC 示差掃描熱量分析曲線

4.2.1.3 Au-Pt-Ag-Cu-Ni 熱分析

由圖 4-13 TGA 熱重分析測試曲線觀察得知，並無明顯材料揮發情形。

圖 4-14 DSC 示差掃描熱量分析曲線，初始相變化反應溫度為 850°C，之後有一峰值出現，表示合金成份有 partial melting 現象，應是有合金相重新組合排列所造成之吸熱反應，另一峰值之大量吸熱反應則為合金熔點 1035°C。

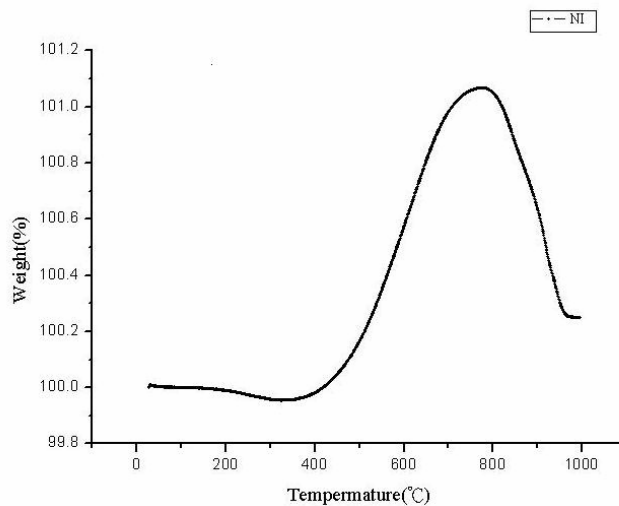


圖 4-13 試片 3 Au-Pt-Ag-Cu-Ni 合金 TGA 熱重分析測試曲線

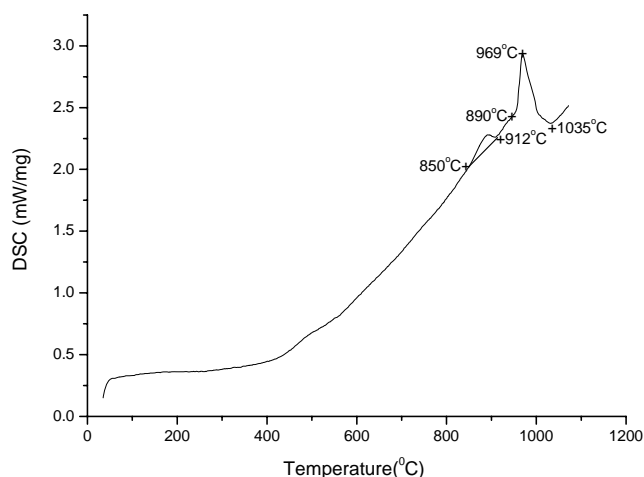


圖 4-14 試片 3 Au-Pt-Ag-Cu-Ni 合金 DSC 示差掃描熱量分析曲線

4.2.2 熱處理步驟與條件

半導體用電接觸材料必須具體良好之抗蝕性、延展性、高導電率、不易氧化等優異特性，故為能提高其硬度並保持高導電性，必須施以熱處理。

本實驗之熱處理步驟與條件：

1. 固溶強化處理：溫度： 800°C ，時間：2.5 小時，水淬。

其目地為使合金元素均勻地溶解在基體金屬(Au)中形成置換型固溶體，由於金屬的原子半徑不同，造成晶格畸變，使金屬的硬度、強度和電阻升高，為保持高的電導率，及進一步提高強度，必須配合冷加工及時效處理。

2. 冷加工強化處理：加工率為 0%及 20%，滾壓機常溫壓延。

其目地為提高合金強度及時效硬化效果。但由於冷加工變形引起晶格畸變，造成電子波散射使電阻升高，為保持高導電率故本實驗只作 20%加工率。

3. 預時效強化處理：溫度： 400°C ，時間：0.5 小時，爐冷。

其目地為提高合金強度及導電率。Au-Cu 合金相圖(圖 2-6)所示，在低

溫 410°C 以下時形成多種(Au,Cu)金屬間化合物，此等化合物處之合金由高溫徐冷時因化合物之生成而硬化，經實驗發現此化合物非但能提高合金硬度對於導電率之提升亦大有助益。


4. 時效強化處理：溫度：400°C，時間：30, 60, 90, 180, 240min...，水淬。

其目地為提高合金強度及導電率。本實驗之合金溶點皆高於 1000°C 以上，故採較高之時效溫度 400°C，200~300°C 初步驗證時效強化成效不大且緩慢。

4.2.3 顯微組織及化學組成分析

4.2.3.1 試片 1 Au-Pt-Ag-Cu 金相及組成分析

1. 固溶強化處理



試片利用固溶化處理來消除或減少材料熔鑄後巨觀的偏析 (marco-segregation)，以達到成份均勻化。圖 4-15 可觀察出固溶後明顯消除因偏析造成之暗沉樹枝結構。由圖 4-16 表 4-5 SEM/EDS 分析點結果可觀察出，基地成份大致與設計成份相同，Spectrum1, 2 為圓形析出物含有較高之金(Au)，鉑(Pt)成份，Spectrum3, 4 為基地成份。

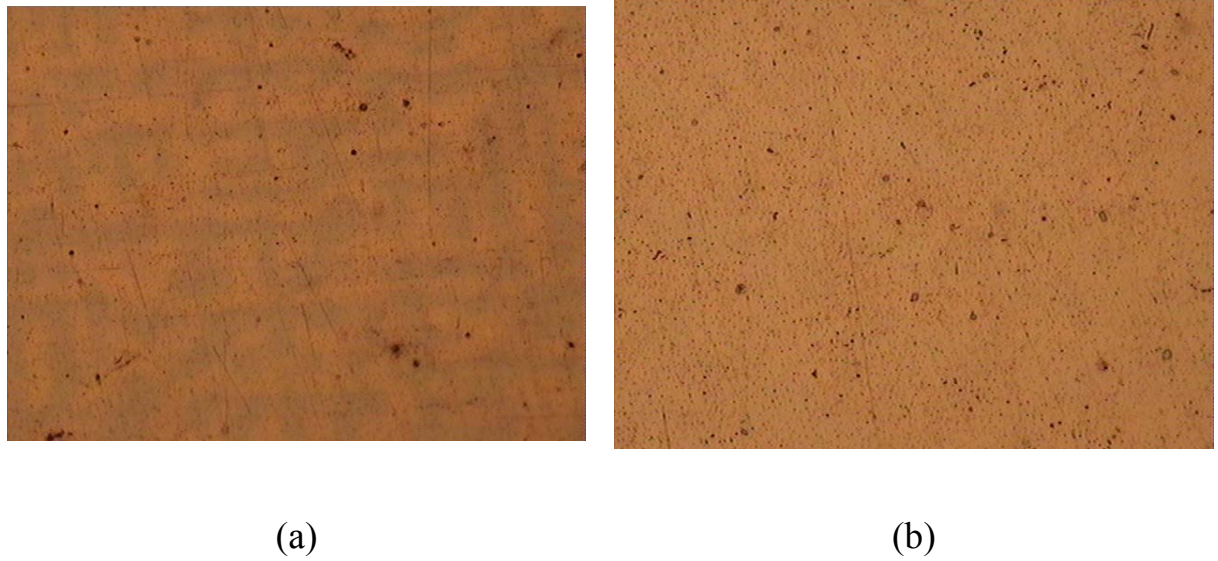


圖 4-15 試片 1 Au-Pt-Ag-Cu 固溶前後之金相(500X) (a) 固溶前(b)固溶後。

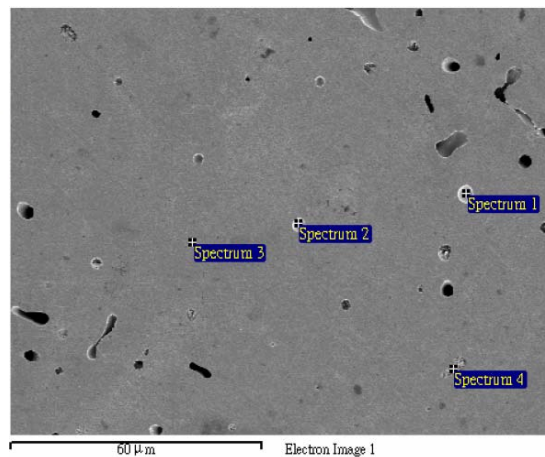


圖 4-16 試片 1 Au-Pt-Ag-Cu 固溶後 SEM 顯微型態圖及 EDS 分析點。

表 4-5 試片 1 Au-Pt-Ag-Cu 固溶後材料化學組成成分表

Spectrum	In stats.	Cu	Ag	Pt	Au	Total
Spectrum 1	Yes	11.38	2.38	9.37	76.87	100.00
Spectrum 2	Yes	12.06	3.03	8.62	76.29	100.00
Spectrum 3	Yes	15.22	3.58	8.47	72.73	100.00
Spectrum 4	Yes	15.48	3.51	8.09	72.92	100.00

Weight%

2. 時效強化處理

圖 4-17, 18 為時效過程中金相組織之變化，隨時間之增加，析出物隨之增加，且有細化之現象，晶界不明顯，400°C 時效 4hr. 為硬度最佳之金相組織，400°C 時效 8hr. 為過時效之金相組織，析出物因時間過長而溶回基地此時硬度較差，此時可觀察出有較明顯之肥大晶粒產生。

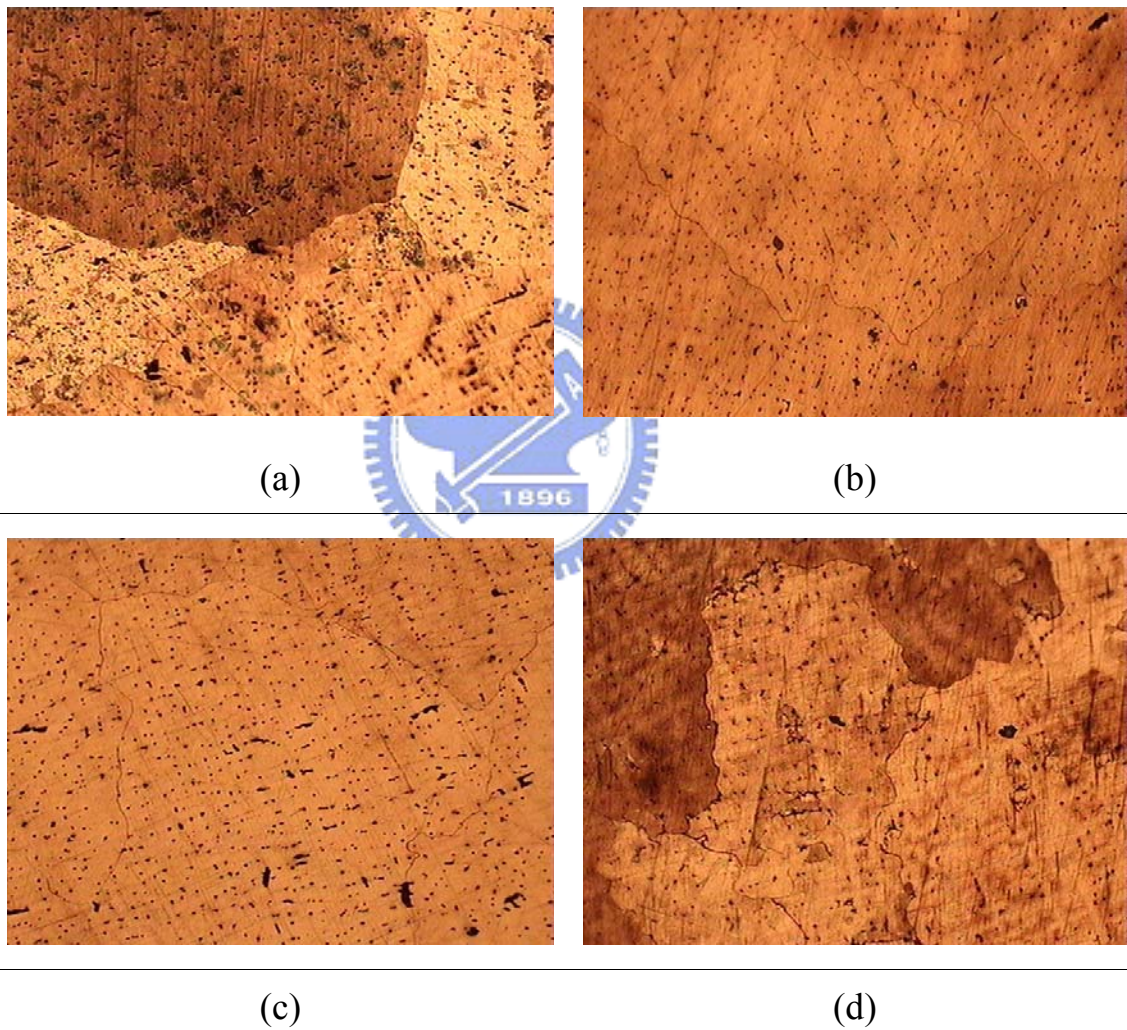


圖 4-17 試片 1 Au-Pt-Ag-Cu 時效後之金相(100X)(a) 400°C 預時效.(b) 400°C 時效 1hr. (c) 400°C 時效 4hr. (d) 400°C 時效 8hr。

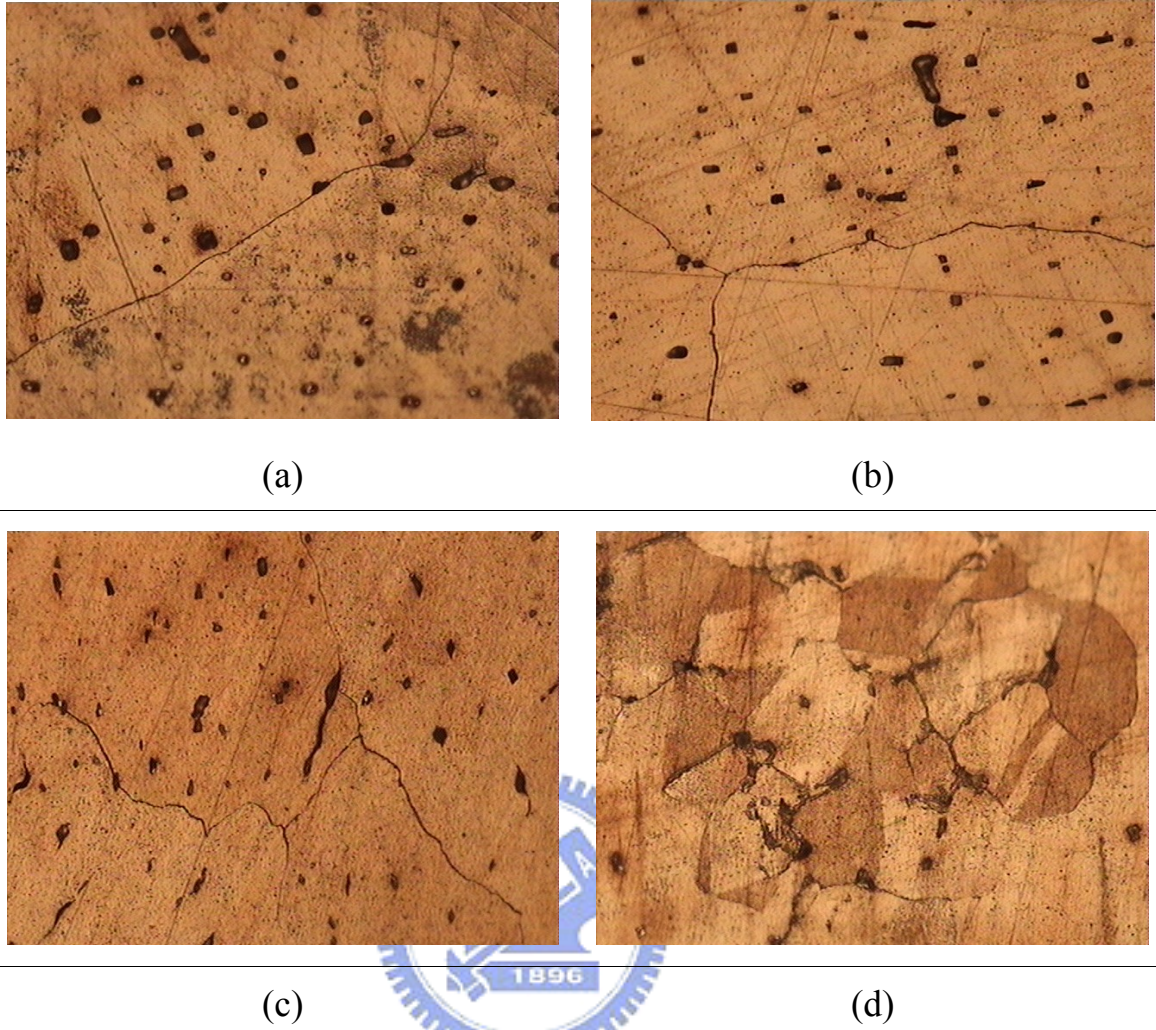


圖 4-18 試片 1 Au-Pt-Ag-Cu 時效後之金相(500X)(a) 400°C 預時效.(b) 400°C 時效 1hr.(c) 400°C 時效 4hr.(d) 400°C 時效 8hr。

3. 強化相之成份分析

圖 4-19, 表 4-6 Spectrum 1,2,3,為強化相, 其鉑(Pt)含量明顯偏高,故可推測 Au-Pt-Ag-Cu 四元合金之強化相為,富鉑相 47Pt-35Au-15Cu-3Ag。

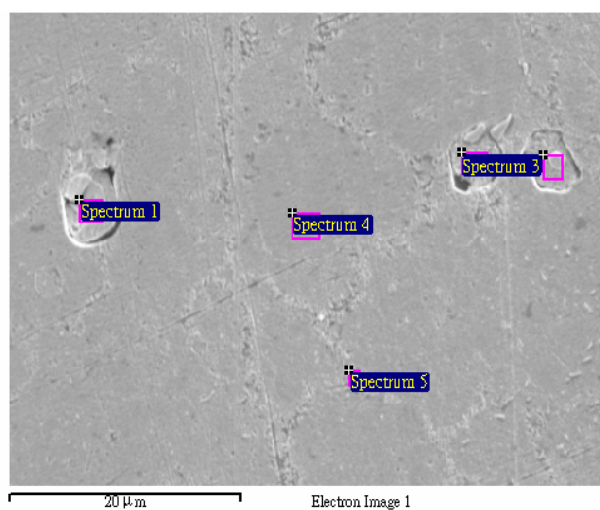


圖 4-19 試片 1 Au-Pt-Ag-Cu 400°C 時效 4hr SEM 顯微型態圖及 EDS 分析

點。

表 4-6 試片 1 Au-Pt-Ag-Cu 400°C 時效 4hr 化學組成成分表

Spectrum	In stats.	Cu	Ag	Pt	Au	Total
Spectrum 1	Yes	16.77	2.33	43.88	37.02	100.00
Spectrum 2	Yes	15.53	2.80	46.55	35.12	100.00
Spectrum 3	Yes	15.32	4.24	36.52	43.91	100.00
Spectrum 4	Yes	16.17	3.64	7.41	72.77	100.00
Spectrum 5	Yes	16.36	3.54	11.96	68.15	100.00

Weight%

4.2.3.2 試片 2 Au-Pt-Ag-Cu-Zn 金相及組成分析

1. 固溶強化處理

試片利用固溶化處理來消除或減少材料熔鑄後巨觀的偏析 (macro-segregation)，以達到成份均勻化。圖 4-20 可觀察出固溶後明顯消除因偏析造成之暗沉樹枝結構。由圖 4-21 表 4-7 SEM/EDS 分析點結果可觀察出，基地成份大致與設計成份相同，圓形析出物含有較高之金(Au), 鉑(Pt) 成份。Spectrum1, 2 為圓形析出物含有較高之金(Au), 鉑(Pt) , 鋅(Zn) 成份，Spectrum3, 4, 5 為基地成份。

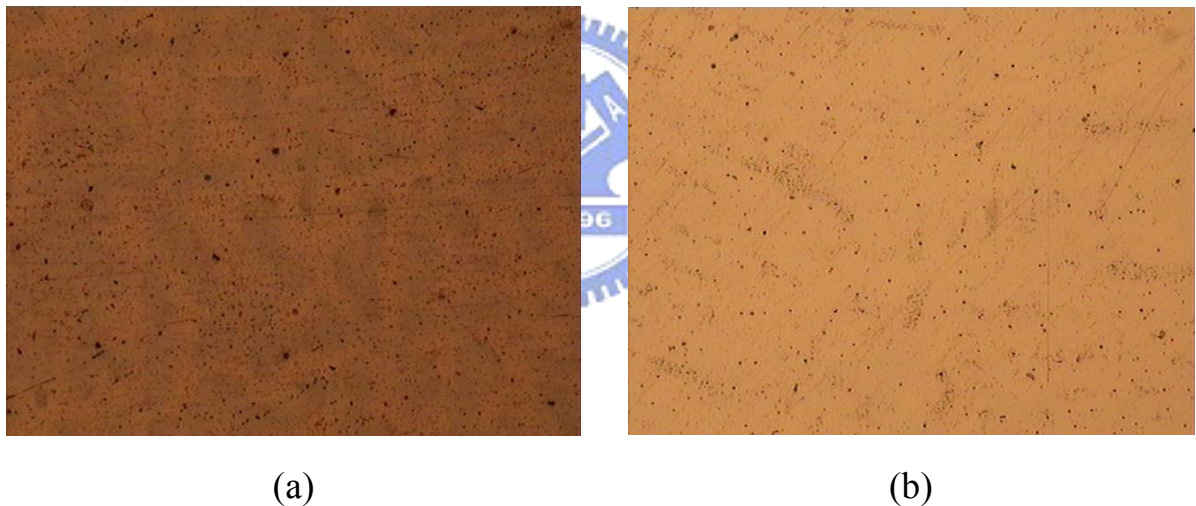


圖 4-20 試片 2 Au-Pt-Ag-Cu-Zn 固溶前後之金相(500X)(a) 固溶前(b)固溶後。

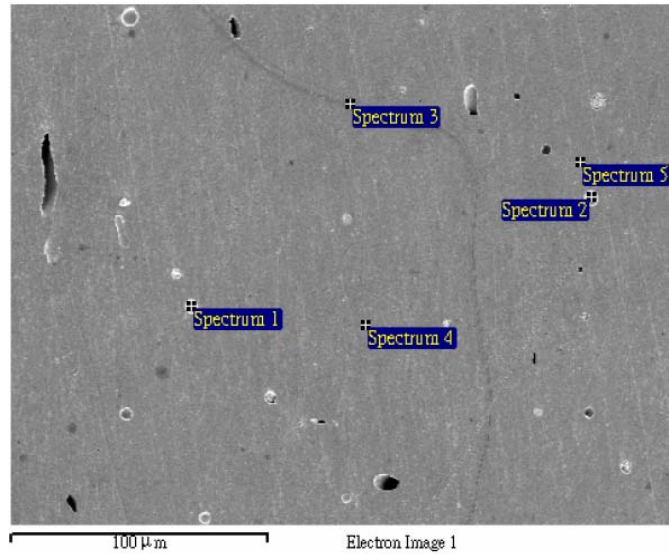


圖 4-21 試片 2 Au-Pt-Ag-Cu-Zn 固溶後 SEM 顯微型態圖及 EDS 分析點。

表 4-7 試片 2 Au-Pt-Ag-Cu-Zn 固溶後材料化學組成成分表

Spectrum	In stats.	Cu	Zn	Ag	Pt	Au	Total
Spectrum 1	Yes	10.16	1.71	2.64	9.44	76.05	100.00
Spectrum 2	Yes	11.21	1.55	2.51	9.82	74.91	100.00
Spectrum 3	Yes	15.82	0.93	3.92	7.92	71.41	100.00
Spectrum 4	Yes	16.11	1.23	4.05	7.25	71.36	100.00
Spectrum 5	Yes	15.10	0.75	3.50	7.76	72.89	100.00

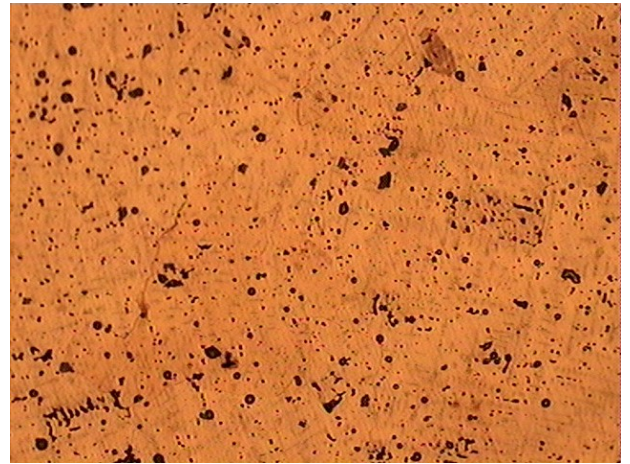
Weight%

2. 時效強化處理

圖 4-22, 23 為時效過程中金相組織之變化，與試片 1 Au-Pt-Ag-Cu 相似，隨時間之增加，析出物隨之增加，且有細化之現象，晶界不明顯，400°C 時效 4hr. 為硬度最佳之金相組織，400°C 時效 8hr. 為過時效之金相組織，析出物因時間過長而溶回基地此時硬度較差，此時可觀察出有較明顯之肥大晶粒產生。



(a)



(b)



(c)



(d)

圖 4-22 試片 2 Au-Pt-Ag-Cu-Zn 時效後之金相(100X)(a) 400°C 預時效.(b) 400°C 時效 1hr. (c) 400°C 時效 4hr. (d) 400°C 時效 8hr。



(a)



(b)



(c)



(d)

圖 4-23 試片 2Au-Pt-Ag-Cu-Zn 時效後之金相(500X)(a) 400°C 預時效.(b) 400°C 時效 1hr.(c) 400°C 時效 4hr.(d) 400°C 時效 8hr。

3. 強化相之成份分析

圖 4-24，表 4-8 Spectrum 1,2,為強化相，其鉑(Pt)含量高達 74%且加入之鋅(Zn)與鉑(Pt)同時析出為強化相，明顯可提高合金之強度，鋅(Zn)之導電性高於鉑(Pt)故可保持合金之導電性。

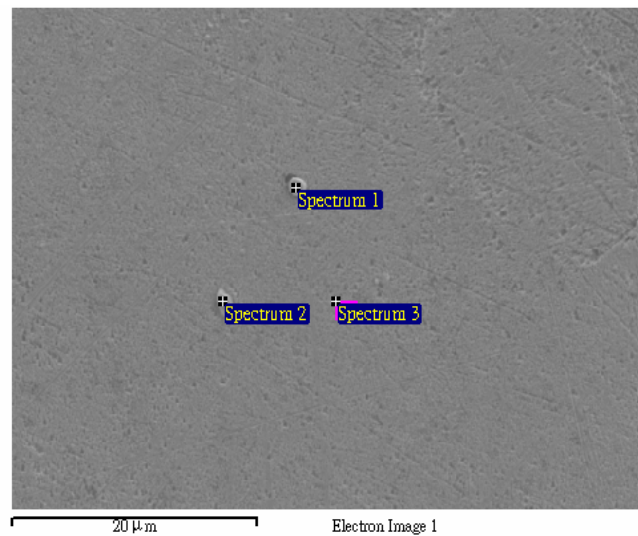


圖 4-24 試片 2 Au-Pt-Ag-Cu-Zn 400°C 時效 4hr SEM 顯微型態圖及 EDS 分析點。

表 4-8 試片 2 Au-Pt-Ag-Cu-Zn 400°C 時效 4hr 化學組成成分表

Spectrum	In stats.	Cu	Zn	Ag	Pt	Au	Total
Spectrum 1	Yes	16.66	6.60		74.11	2.63	100.00
Spectrum 2	Yes	15.77	5.40	1.06	65.30	12.47	100.00
Spectrum 3	Yes	15.53		3.95	7.99	72.53	100.00

Weight%

4.2.3.3 試片 3 Au-Pt-Ag-Cu-Ni 金相及組成分析

1. 固溶強化處理

試片利用固溶化處理來消除或減少材料熔鑄後巨觀的偏析 (macro-segregation)，以達到成份均勻化。圖 4-25 可觀察出固溶後明顯消除因偏析造成之暗沉樹枝結構。由圖 4-26 表 4-9 SEM/EDS 分析點結果可觀察出，成份大致與設計成份相同，圓形析出物含有稍高之鎳(Ni)成份。 Spectrum 3, 4 為圓形析出物含有高之鎳(Ni)成份，Spectrum 1, 2, 5 為基地成份。

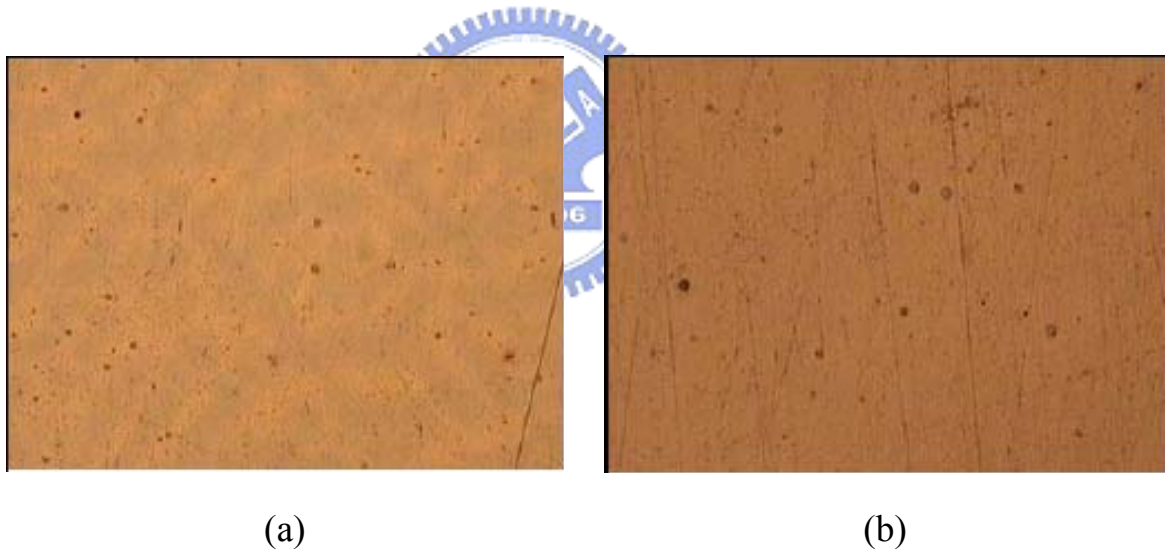


圖 4-25 試片 3 Au-Pt-Ag-Cu-Ni 固溶前後之金相(500X)(a)固溶前(b)固溶後。

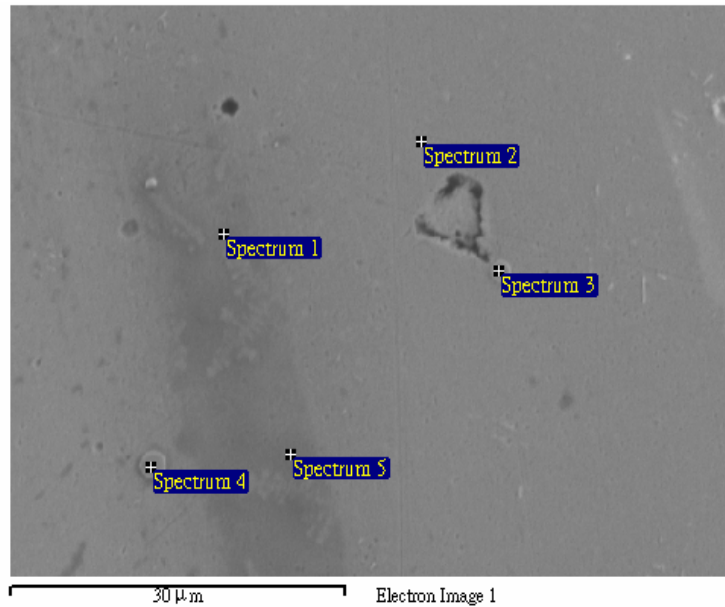


圖 4-26 試片 3 Au-Pt-Ag-Cu-Ni 固溶後 SEM 顯微型態圖及 EDS 分析點。

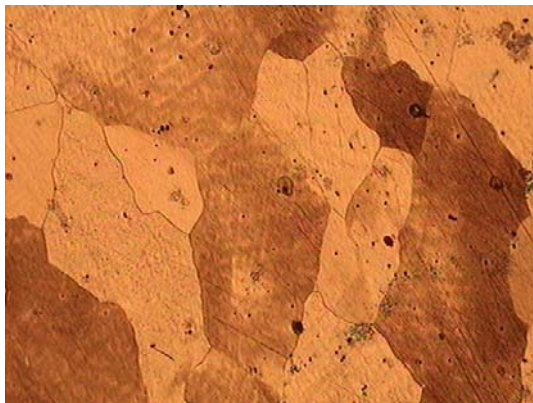
表 4-9 試片 3 Au-Pt-Ag-Cu-Ni 固溶後材料化學組成成分表

Spectrum	In stats.	Ni	Cu	Ag	Pt	Au	Total
Spectrum 1	Yes	1.04	14.61	3.91	7.13	73.31	100.00
Spectrum 2	Yes	1.13	13.81	3.85	7.14	74.07	100.00
Spectrum 3	Yes	1.48	12.66	3.95	8.43	73.48	100.00
Spectrum 4	Yes	1.53	13.01	3.75	8.14	73.57	100.00
Spectrum 5	Yes	1.10	14.24	4.24	7.82	72.60	100.00

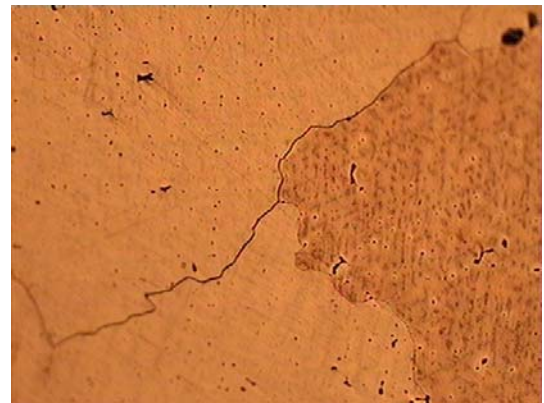
Weight%

2. 時效強化處理

圖 4-27, 28 為時效過程中金相組織之變化，預時效後便有明顯之晶界析出，隨時間之增加，析出物隨之增加，晶界有細化之現象，晶粒成長緩慢，400°C 時效 5hr. 為硬度最佳之金相組織，400°C 時效 8hr. 為過時效之金相組織，析出物因時間過長而溶回基地此時硬度較差，此時可觀察出有較明顯之肥大晶粒產生。



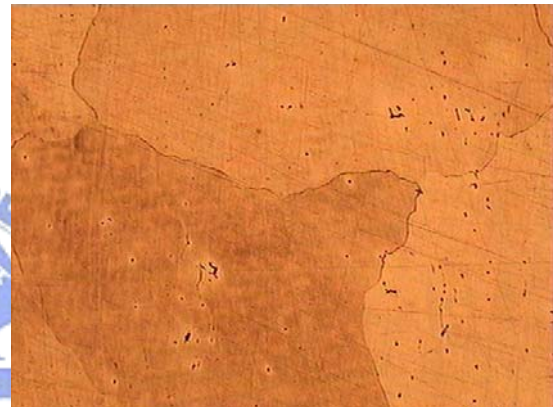
(a)



(b)



(c)



(d)

圖 4-27 試片 3 Au-Pt-Ag-Cu-Ni 時效後之金相(100X)(a) 400°C 預時效.(b) 400°C 時效 1hr. (c) 500°C 時效 5hr. (d) 400°C 時效 8hr。

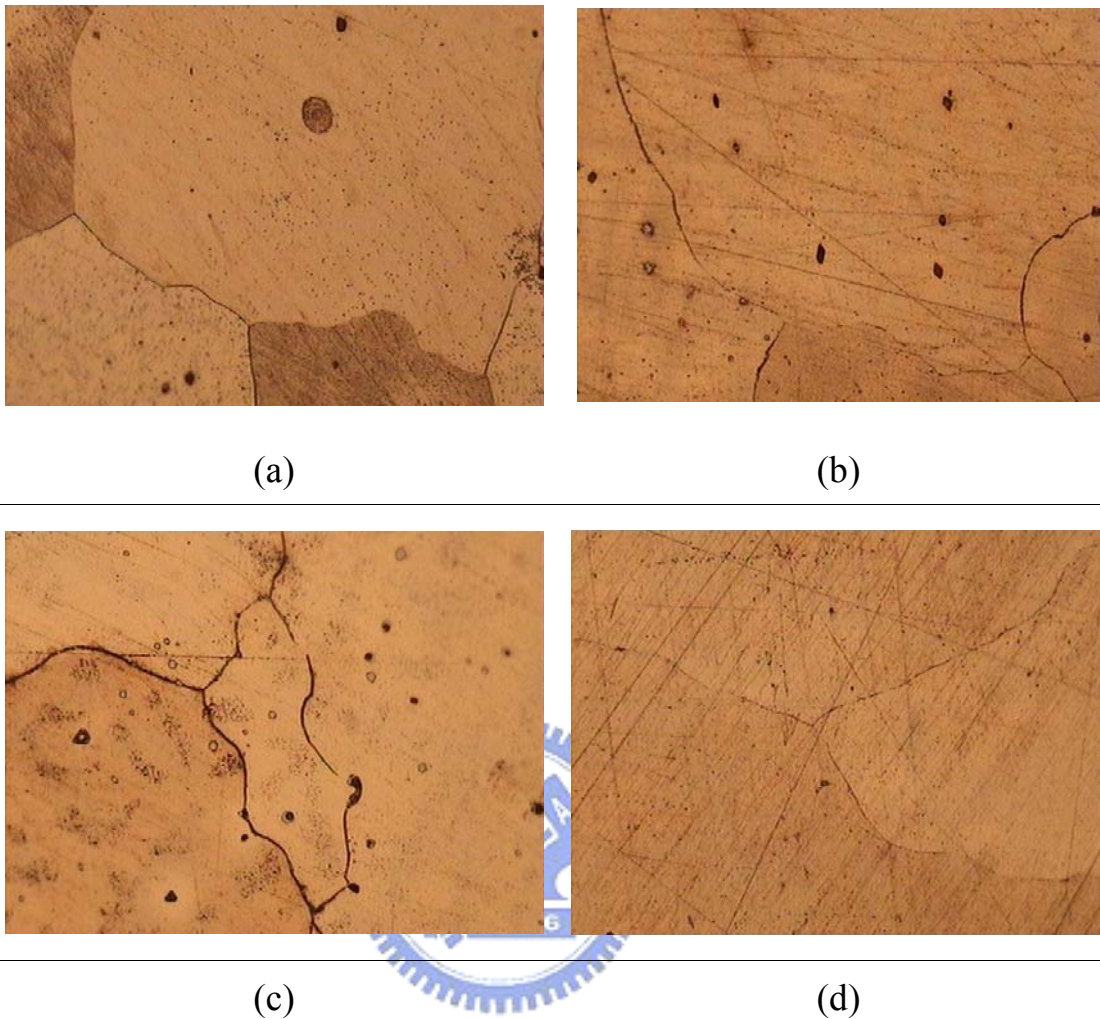


圖 4-28 試片 3 Au-Pt-Ag-Cu-Ni 時效後之金相(500X)(a) 400°C 預時效.(b) 400°C 時效 1hr.(c) 400°C 時效 5hr.(d) 400°C 時效 8hr。

3. 強化相之成份分析

Au-Pt-Ag-Cu-Ni 之時效硬化過程，分為初期之晶界析出硬化，及後期之晶粒析出硬化，由於晶界析出硬化造成較佳之硬度表現，但也因此無法有效提升導電性。由圖 4-29，表 4-10 得知其硬化析出相分別為 Au-Cu(Spectrum 1,4)，Pt-Cu-Ni(Spectrum 2,3)，Au-Ag-Cu(Spectrum 5)。

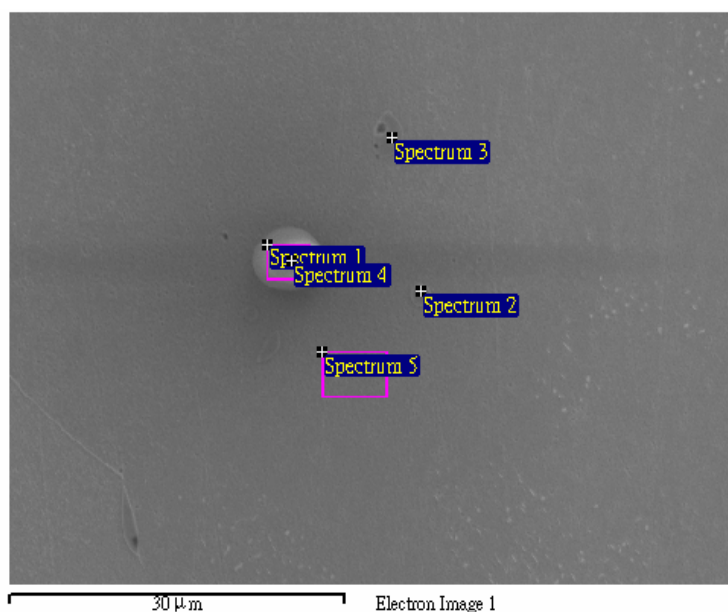


圖 4-29 試片 3 Au-Pt-Ag-Cu-Ni 400°C 時效 5hr SEM 顯微型態圖及 EDS

分析點。

表 4-10 試片 3 Au-Pt-Ag-Cu-Ni 400°C 時效 5hr 化學組成成分表

Spectrum	In stats.	Ni	Cu	Ag	Pt	Au	Total
Spectrum 1	Yes		21.47			78.53	100.00
Spectrum 2	Yes	10.15	12.79		77.06		100.00
Spectrum 3	Yes	7.70	14.57		77.73		100.00
Spectrum 4	Yes		27.88			72.12	100.00
Spectrum 5	Yes		15.20	4.39		80.41	100.00

Weight%

4.3 合金材料硬度與導電率之量測結果分析

4.3.1 微硬度及電阻係數量測結果

將試片 1(四元合金)、試片 2(四元合金+1%Zn) 、試片 3(四元合金+1%Ni)，實施固溶處理(800°C,2.5Hr,水淬)後，再施與塑性加工，加工量 20%，之後再作預時效處理(400°C,0.5Hr, 爐冷) 及時效處理(400°C, 水淬, 1~8 小時)，每階段完成後切割研磨，量測其微硬度及電阻係數，其結果如表 4-11~14，圖 4-30~33 所示。

表 4-11 固溶 800°C,預時效(爐冷),加工量 0%,時效溫度 400°C 微硬度量測

熱處理條件	800°C	400°C	400°C 水淬(時效處理), 1~8 小時							
	2.5Hr 水淬	0.5Hr 爐冷	1	2	3	4	5	6	7	8
四元	Sol.	P.A.	281.2	264	283.6	319.8	317.7	309.8	312.9	280.2
四元+Zn	221.4	252.4	244.2	257.8	312.2	334.4	321.6	319.5	306.2	292.5
四元+Ni	235.9	281.8	285.8	270.7	285.8	331.3	351.4	344.2	320.5	305.3

微硬度 Hv 測試條件:荷重 300g,保持 30sec.

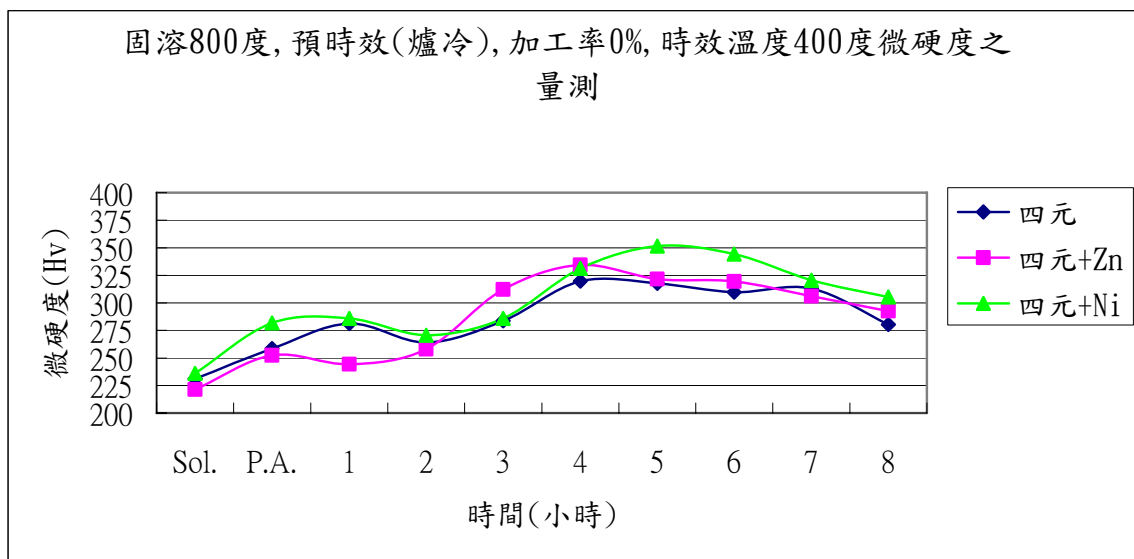


圖 4-30 固溶 800°C,預時效(爐冷),加工量 0%,時效溫度 400°C 微硬度量測

表 4-12 固溶 800°C,預時效(爐冷),加工量 0%,時效溫度 400°C 電阻係數之量測

熱處理 條件	800°C	400°C	400°C 水淬(時效處理), 1~8 小時									
	2.5Hr 水淬	0.5Hr 爐冷	Sol.	P.A.	1	2	3	4	5	6	7	8
四元	20.25	18.12	17.77	17.2	16.86	16.58	17.22	18.05	18.27	18.71		
四元+Zn	20.79	18.29	18.64	18.14	18.05	17	16.86	16.61	16.42	16.29		
四元+Ni	22.18	21.16	21.18	20.57	20.03	19.56	20.36	20.64	19.9	19.85		

電阻係數 ρ , 四點探針量測, Unit: $\mu \Omega \cdot \text{cm}$

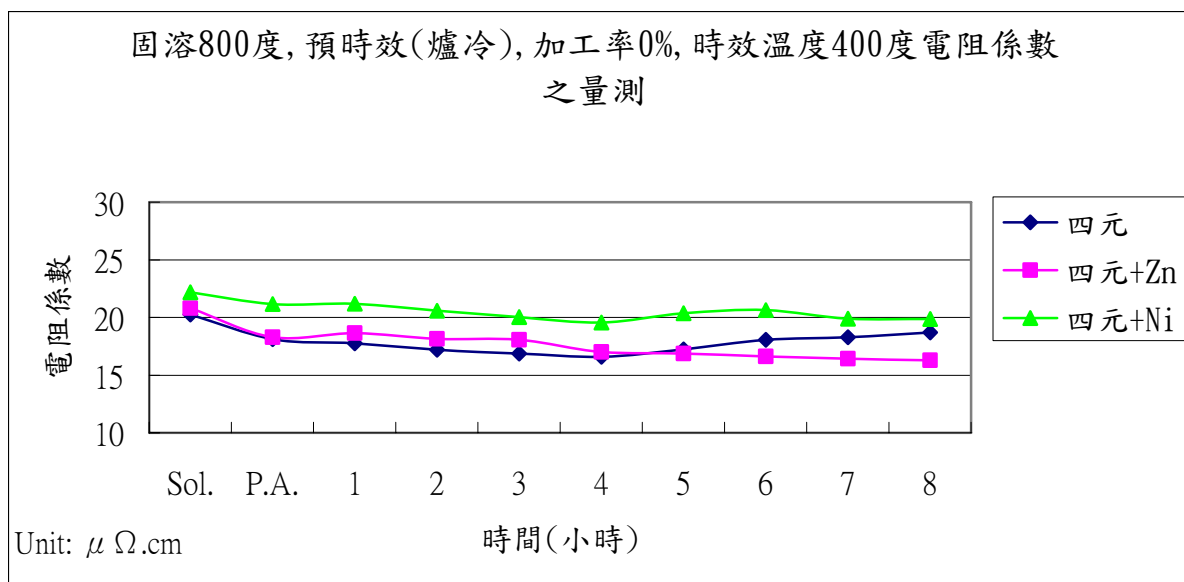


圖 4-31 固溶 800°C,預時效(爐冷),加工量 0%,時效溫度 400°C 電阻係數之量測

表 4-13 固溶 800°C,預時效(爐冷),加工量 20%,時效溫度 400°C 微硬度量測

熱處理 條件	800°C	冷加	400°C	400°C 水淬(時效處理), 1~8 小時							
	2.5Hr 水淬	工 20%	0.5Hr 爐冷	1	2	3	4	5	6	7	8
四元	231.1	255.3	310.6	345.1	340.5	338.7	342.6	345.7	355.5	348.3	320.6
四元+Zn	221.4	263.7	305.1	325.8	355.2	347.7	338.9	349.5	344.2	360.5	329.8
四元+Ni	235.9	272	329.3	353.4	365.5	359.6	371.8	377.2	369.3	360.1	342.7

微硬度 Hv 測試條件:荷重 300g,保持 30sec.

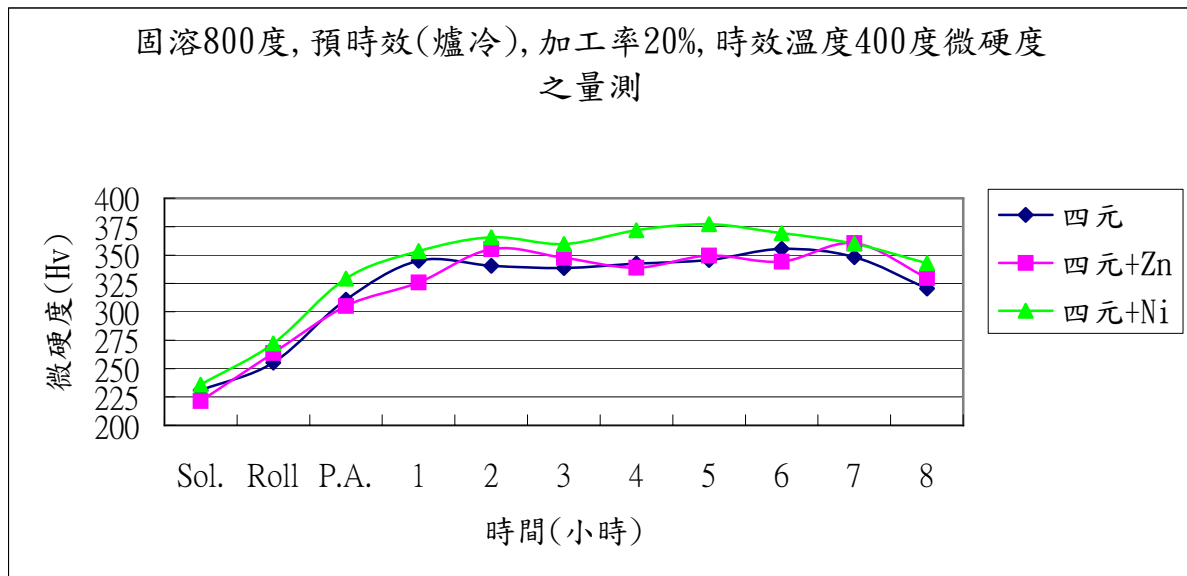


圖 4-32 固溶 800°C,預時效(爐冷),加工量 20%,時效溫度 400°C 微硬度量測

表 4-14 固溶 800°C,預時效(爐冷),加工量 20%,時效溫度 400°C 電阻係數量測

熱處理 條件	800°C	冷加	400°C	400°C 水淬(時效處理), 1~8 小時							
	2.5Hr 水淬	工 20%	0.5Hr 爐冷	1	2	3	4	5	6	7	8
四元	20.25	21.2	18.12	17.27	16.72	16.16	15.68	15.55	15.72	16.17	16.51
四元+Zn	20.79	22.41	17.75	17.02	18.14	18.05	18.35	18.57	18.12	17.86	17.21
四元+Ni	22.18	24.21	20.46	20.12	20.77	21.63	21.21	20.67	22.23	21.29	21.05

電阻係數 ρ , 四點探針量測, Unit: $\mu \Omega \cdot \text{cm}$

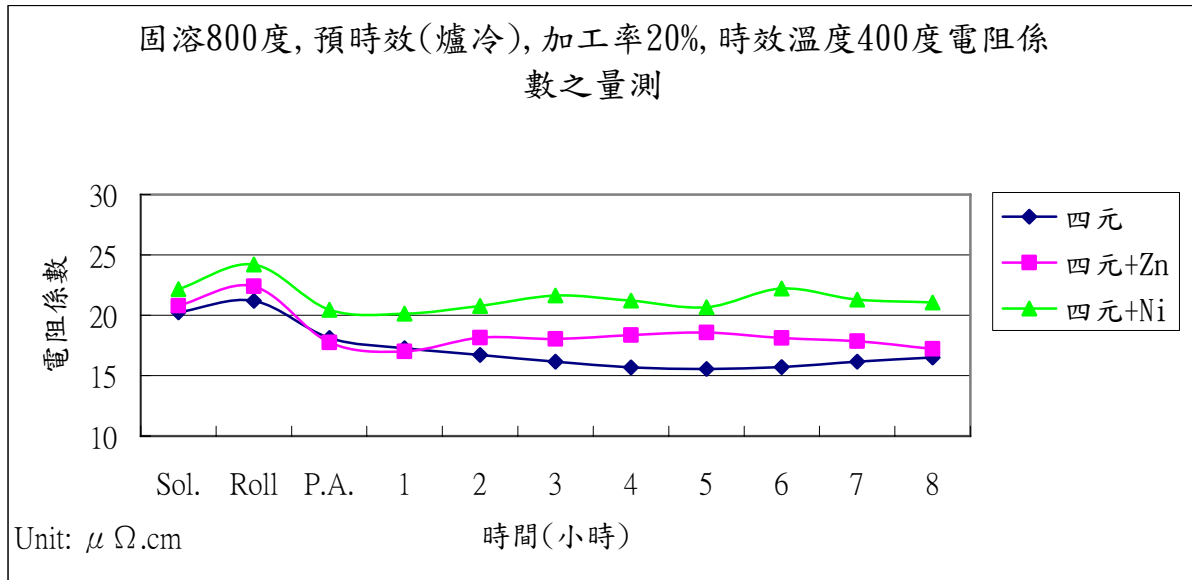


圖 4-33 固溶 800°C,預時效(爐冷),加工量 20%,時效溫度 400°C 電阻係數量測

4.3.2 量測結果分析

1. 最佳硬度及電阻係數結果分析

表 4-15 所示，最佳硬度分別為四元+1%Ni 合金(377.2Hv)> 四元+1%Zn 合金(360.5Hv) > 四元合金(355.5Hv)。最佳電阻係數分別為四元合金(15.68 $\mu\Omega\cdot\text{cm}$)> 四元+1%Zn 合金(16.29 $\mu\Omega\cdot\text{cm}$)> 四元+1%Ni 合金(19.56 $\mu\Omega\cdot\text{cm}$)。

表中亦可發現，塑性加工對於硬度之提升有絕對助益，但對於電阻係數卻有變差之影響，尤其是 Zn 及 Ni 合金，值得注意。

表 4-15 合金材料最佳硬度及電阻係數比較表

合金材料	最佳微硬度(Hv)	最佳電阻係數($\mu\Omega\cdot\text{cm}$)
四元合金	355.5Hv(15.72 $\mu\Omega\cdot\text{cm}$)	15.68 $\mu\Omega\cdot\text{cm}$ (342.6Hv)
	At 20%加工率, 時效 6hr	At 20%加工率, 時效 4hr
四元+1%Zn 合金	360.5Hv(17.86 $\mu\Omega\cdot\text{cm}$)	16.29 $\mu\Omega\cdot\text{cm}$ (292.5Hv)
	At 20%加工率, 時效 7hr	At 0%加工率, 時效 8hr
四元+1%Ni 合金	377.2 Hv(20.67 $\mu\Omega\cdot\text{cm}$)	19.56 $\mu\Omega\cdot\text{cm}$ (331.3Hv)
	At 20%加工率, 時效 5hr	At 0%加工率, 時效 4hr

2. 塑性加工對硬度及電阻係數之影響

由表 4-16 得知，硬度方面，塑性加工及時效處理皆可大幅改善材料硬度，其改善幅度依序為 Zn 合金(62.8%)，Ni 合金(59.9%)，四元合金(53.8%)。電性方面，塑性加工將惡化材料之導電性，單就塑性加工而言，其影響程度依序為 Ni 合金(-9.2%)，Zn 合金(-7.8%)，四元合金(-4.7%)。時效處理可改善材料導電性，但會因塑性加工而降低其改善幅度，四元合金例外，Zn 合金由 21.6%降至 18.1%，Ni 合金由 11.9%降至 9.3%，四元合金由 18.1%提升至 22.7%。

表 4-16 塑性加工及時效處理對硬度及電阻係數之影響

合金材料	性狀	微硬度(Hv)			電阻係數($\mu \Omega \cdot \text{cm}$)		
		時效前	時效後	變化	時效前	時效後	變化
四元合金	固溶化處理	231.1	319.8	38.4%	20.25	16.58	18.1%
	20%加工率	255.3	355.5	39.2%	21.2	15.65	26.2%
	變化	10.5%	11.2%	53.8%	-4.7%	5.6%	22.7%
四元+1% Zn 合金	固溶化處理	221.4	334.4	51%	20.79	16.29	21.6%
	20%加工率	263.7	360.5	36.7%	22.41	17.02	24%
	變化	19.1%	7.8%	62.8%	-7.8%	-4.5%	18.1%
四元+1% Ni 合金	固溶化處理	235.9	351.4	49%	22.18	19.56	11.9%
	20%加工率	272	377.2	38.6%	24.21	20.12	16.9%
	變化	15.3%	7.34%	59.9%	-9.2%	-2.9%	9.3%

第五章 結論

本研究計畫為利用高週波爐建立熔煉完成，金基合金電接觸材料的技術。本實驗之金基合金電接觸材料是以，金-銅-鉑-銀四元合金系統為主分別搭配，1%鋅(Zn)或 1%鎳(Ni)等之強化相材料，其目的在於強化機械性質並保持高導電性。金(Au)俱有良好之抗蝕性、延展性、高導電率、不易氧化等優異特性，只要能提高其硬度並保持高導電性，便能拓展電接觸材料之應用，尤其在高頻、高效能之半導體 IC 元件測試應用上。經製作與性能測試後，歸納結論如下：

1. 利用高週波爐在常壓及惰性氣體保護下，熔煉完成之金基合金電接觸材料，只要經過適當之固溶、塑性加工及時效處理，硬度可達 377Hv 或電阻係數 $15.68 \mu \Omega \cdot \text{cm}$ ，證實可利用低成本之高週波爐熔煉完成金基合金電接觸材料。
2. 在合金溶煉過程中遭遇鋅(Zn)之結晶構造為六方密格子(HCP)與金(Au)、銅(Cu)、鉑(Pt)、銀(Ag)之面心立方格子(FCC)不同，不符合合金固溶溶解度的條件(Hume-Rothrey 法則)及鋅(Zn)之溶點與鉑(Pt)相差 1352°C 甚遠。本實驗採用合銅法，先將 Cu-Zn 溶煉形成 α 固溶體(FCC 結構)，溶點約為 1050°C 與金(Au)溶點相近，如此便可保留住約 78%鋅(Zn)。
3. 硬度方面，塑性加工及時效處理皆可大幅改善材料硬度，其改善幅度依序為 71.5Au-8.5Pt-4.5Ag-14.5Cu-1Zn 合金(62.8%)，71.5Au-8.5Pt-4.5Ag-14.5Cu-1Ni 合金(59.9%)，

71.5Au-8.5Pt-4.5Ag-15.5Cu 四元合金(53.8%)。

4. 電性方面，塑性加工將惡化材料之導電性，單就塑性加工而言，其影響程度依序為 Ni 合金(-9.2%)，Zn 合金(-7.8%)，四元合金(-4.7%)。時效處理可改善材料導電性，但會因塑性加工而降低其改善幅度，Zn 合金由 21.6%降至 18.1%，Ni 合金由 11.9%降至 9.3%，但實驗中發現四元合金例外，四元合金由 18.1%提升至 22.7%。由此得知塑性加工對於越多元合金尤其是析出強化能力越強之材料，導電性之影響更大。
5. 最佳硬度及電阻係數結果分析，最佳硬度分別為四元+1%Ni 合金(377.2Hv) > 四元+1%Zn 合金(360.5Hv) > 四元合金(355.5Hv)。最佳電阻係數分別為四元合金($15.68 \mu \Omega \cdot \text{cm}$) > 四元+1%Zn 合金($16.29 \mu \Omega \cdot \text{cm}$) > 四元+1%Ni 合金($19.56 \mu \Omega \cdot \text{cm}$)。實驗發現，塑性加工對於硬度之提升有絕對助益，但對於電阻係數卻有變差之影響，尤其是 Zn 及 Ni 合金，值得注意。
6. 在機械性質微硬度方面，增加材料硬度及強度的方法有固溶強化、晶格強化、應變強化及析出強化等方式。在本實驗中主要的強化方式為固溶強化、應變強化及析出強化，其中發現析出強化能提高材料硬度，亦能改善材料電性，為最佳金基合金電接觸材料之強化方式。

參考文獻

1. 工業技術研究院，「第三篇產業發展動向」，2006 半導體工業年鑑，pp.9-38~44，2006。
2. 施文宗，「TSIA VLSI 測試程式原理實務」，經濟部工業局 95 年度設立半導體學院計劃訓練課程，新竹，2006 年 11 月。
3. 堵永國，張為軍，胡君遂，”電接觸與電接觸材料(一)”，電工材料，2005，No.2，p.44。
4. 堵永國，張為軍，胡君遂，”電接觸與電接觸材料(二)”，電工材料，2005，No.3，p.42。
5. 堵永國，張為軍，鮑小恒，”電接觸與電接觸材料(三)”，電工材料，2005，No.4，p.38。
6. 堵永國，俞洁，張為軍，”電接觸與電接觸材料(四)”，電工材料，2006，No.1，p.42。
7. 堵永國，鮑小恒，俞洁，”電接觸與電接觸材料(五)”，電工材料，2006，No.2，p.43。
8. 堵永國，張為軍，胡君遂，”電接觸與電接觸材料(六)”，電工材料，2006，No.3，p.49。
9. Gold based electrical contact materials, US Patent US4387073.
10. Method of making electrical contact materials, US Patent US3992199.

11. Material for low voltage current contacts, US Patent 4579787.
12. Jeff Sherry and Dave Haupt, "Optimizing the Whole Test System to Achieve Optimal Yields and Lowest Test Costs", IEEE/SEMI Int'l Electrics Manufacturing Technology Symposium, 2004.
13. 許瑞玲, 林欣蔚譯, RoHS 綠色指令, 龍環文化事業股份有限公司, pp.2-5, 2005 年 10 月.
14. Chip Scale Review, "Understanding How PB-Free Platings Affect Production-Test Cost, Throughput and Yield", November/December 2005.
15. Johnstech International Corporation, <http://www.johnstech.com>.
16. American Society for Testing and Materials, B541-01 Standard Specification for Gold Electrical Contact Alloy, ASTM, 2006.
17. 韓大鵬, 電接觸用銅基複合材料之研製與特性分析, 遠東技術學院機械工程學系碩士論文, 中華民國九十三年七月.
18. 吳朗 編著, 電工材料, 全華圖書股份有限公司, 中華民國八十一年三月。
19. 賴耿陽 編著, 電子用金屬材料實務, 復漢出版社印行, 中華民國八十九年四月。
20. 陳文照, 曾春風, 游信和譯, William D. Callister JR 著, 材料科學與工程導論, 高立圖書有限公司, 中華民國九十四年九月。

21. William D. Callister , Materials science and engineering an introduction ,
John Wiley & Sons, Inc , pp174-200(2007) 。
22. 電機工程手冊編輯委員會編輯，電機工程手冊 5，電工與電子材料基礎，
五南圖書出版股份有限公司，2002 年 11 月。
23. 黃振賢編著，金屬熱處理，新文京開發出版有限公司，中華民國九十三年十二月。pp 113-114.
24. Reed-Hill , Abbaschian 著，劉偉隆，林淳杰，曾春風，陳文照編譯，物理冶金，全華科技圖書出版，中華民國九十三年八月。
25. H. Okamoto and T.B.Massalski , Binary Alloy Phase Diagrams , Vol.1 ,
pp.193-201(1984).
26. H. Okamoto and T.B.Massalski , in “ASM Handbook Vol3 Alloy Phase
Diagrams” , ed by H. Baker , ASM International , Materials Park , Ohio(1992).
27. 賴耿陽 編著，貴金屬元素化學與應用，復漢出版社印行，中華民國九十年十一月。
28. H. Okamoto and T.B.Massalski , Binary Alloy Phase Diagrams Vol3 , ASM
International.p.289(1986).
29. H. Okamoto and T.B.Massalski , Binary Alloy Phase Diagrams Vol3 , ASM
International.p.274(1987).
30. A.P. Miodownik, unpublished , Binary Alloy Phase Diagrams Vol3 , ASM
International.p.2182(1993).

31. P.R. Subramanian and J.H. Perepezko, unpublished, Binary Alloy Phase Diagrams Vol3, ASM International.p.228(1993).
32. Johnstech International, <http://www.johnstech.com>.
33. 精密儀器發展中心，材料分析儀器，儀器總覽， pp107~112，中華民國九十二年二月。
34. 汪建民編著，材料分析，中國材料科學學會，pp556~562，中華民國九十五年三月。

