

行政院國家科學委員會專題研究計畫 成果報告

奈米複合電磁波吸波材之研製

計畫類別：個別型計畫

計畫編號：NSC94-2623-7-009-003-

執行期間：94 年 01 月 01 日至 94 年 12 月 31 日

執行單位：國立交通大學電子工程學系及電子研究所

計畫主持人：曾俊元

報告類型：完整報告

處理方式：本計畫可公開查詢

中 華 民 國 95 年 3 月 2 日

國防科技學術合作協調小組研究計畫成果報告

奈米複合電磁波吸波材之研製

計畫編號：NSC 94-2623-7-009-003

執行期間：94 年 1 月 1 日 至 94 年 12 月 31 日

計畫主持人：曾 俊 元

共同主持人：

執行單位：國立交通大學電子工程系所

中華民國 94 年 12 月 31 日

摘要

本研究著重於溶膠凝膠法製備之奈米級錳鋅鐵氧與鎳鋅鐵氧鐵氧磁粉體於電磁波吸收材上的應用，由 X 光繞射分析與掃描式電子顯微鏡觀測可知錳鋅鐵氧磁體該粉體於 1000 °C 煅燒 2 小時，形成晶相良好的尖晶石結構錳鋅鐵氧單晶，其晶粒大小約為 73 nm；而鎳鋅鐵氧粉體於 900 °C 煅燒 2 小時後已開始形成尖晶石結構，且其晶粒約為 98 nm。吾人針對幾個吸收頻段較大的頻率位置進行奈米級錳鋅鐵氧與鎳鋅鐵氧鐵氧磁粉體的掃頻量測，我們發現在 8.3 GHz、13.4 GHz、18.7 GHz 擁有不錯的吸收特性。為加強電磁波吸收材之寬頻吸收，吾人亦同時選擇鐵、鋅、鎳等等的金屬粉體與其他數個不同的金屬氧化物加以添加在我們所製備出的奈米鐵磁粉體之中，在與其他塗層混合製作出不同奈米金屬粉體添加的奈米電磁波吸收材。同時運用不同種類的材料相互搭配，可以增強多頻段電磁波吸收的效果，則可達到廣頻域吸收的需求。

Abstract

The sol-gel derived $\text{Zn}_{0.2}\text{Mn}_{0.8}\text{Fe}_2\text{O}_4$ and $\text{Zn}_{0.5}\text{Ni}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ ferrite nanoparticles for the application in the microwave absorption were investigated in the present study. Both $\text{Zn}_{0.2}\text{Mn}_{0.8}\text{Fe}_2\text{O}_4$ ferrite synthesized at 1000 °C with the particle size of 73 nm and $\text{Zn}_{0.5}\text{Ni}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ ferrite synthesized at 900 °C with particle size of 98 nm are well spinel crystalline structure on the basis of X-ray diffraction and transmission electron microscopy analyses. These $\text{Zn}_{0.2}\text{Mn}_{0.8}\text{Fe}_2\text{O}_4$ and $\text{Zn}_{0.5}\text{Ni}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ nanoparticles exhibit the good electromagnetic wave absorption ability especially at 8.3 GHz、13.4 GHz、18.7 GHz. Their wide band absorption ability can also be improved by adding metal and ceramic nanoparticles to these ferrites absorbers. Such composite absorbers composed of ferrite and conduction metal is expected to be suitable for wide band microwave absorption applications.

目錄

中文摘要.....	I
英文摘要.....	II
目錄.....	III
圖目錄.....	VI
第一章序論.....	1
第二章文獻回顧.....	3
2-1 電磁波吸收.....	3
2-2 磁性材料.....	8
2-3 尖晶石鐵氧磁體.....	11
2-4 電磁波吸波材結構.....	12
2-5 傳輸線原理.....	13
2-6 奈米粒子.....	14
三、結果分析.....	19
3-1 奈米鐵磁粉體之製備.....	19
3-1-1 溶膠凝膠法合成鐵磁粉體.....	19
3-1-2 藥品.....	20

3-2 鐵磁粉末的物理性質.....	20
3-2-1 X 光繞射分析.....	20
3-2-2 微結構分析(電子顯微鏡 SEM/TEM).....	23
3-3 塗層與電磁波吸收量測.....	24
3-3-1 平板式電磁波吸收材的製作.....	24
3-3-2 量測方式與理論分析.....	25
3-3-1.1 使用熱固型高分子作為填充材.....	27
3-3-1.2 使用油漆作為填充材.....	27
3-4 預期目標.....	29
第四章 結果與討論.....	33
4-1 鐵氧磁粉體之製備.....	33
4-1-1 錳鋅鐵氧鐵磁粉體.....	33
4-1-1.1 X 光繞射分析.....	33
4-1-1.2 微結構分析.....	36
4-1-2 鎳鋅鐵氧鐵磁粉體.....	39
4-1-2.1 X 光繞射分析.....	39
4-1-2.2 微結構分析.....	42
4-2 電性量測結果之分析討論.....	45
4-2-1 不同組成的奈米粉體電磁波吸收特性.....	45

4-2-2 不同厚度的奈米粉體電磁波吸收特性.....	48
4-2-3 不同奈米粉體摻雜之複合電磁波吸收材吸收特性.....	51
4-2-4 複合吸收材之電磁波吸收特性.....	55
第五章 結論.....	60
第六章 未來展望.....	63
第七章 參考文獻.....	65

圖目錄

圖 2.1 類比網路式吸收體 (circuit analog RAM)	16
圖 2.2 分散電阻材料的等效電路圖	16
圖 2.3 磁性材料磁偶矩受外部磁場作用示意圖	17
圖 2.4 鎳鋅鐵氧磁體之晶體結構	17
圖 2.5 (a)一小段的 Δz 傳輸線 (b) 其等效電路圖	18
圖 3.1 鐵磁粉體製備流程	30
圖 3.2 晶面的繞射	31
圖 3.3 X 光繞射儀之基本原理	31
圖 3.4 一晶面系 (面間距為 d) 之 X 光反射示意圖	32
圖 3.5 電子顯微鏡主要構造示意圖	32
圖 4.1 溶膠凝膠法製備之鎳鋅鐵氧粉體於氧氣氣氛下煅燒 1000°C、 1100°C、1200°C、1300°C 持溫 2 小時 X 光繞射分析圖譜	35
圖 4.2 溶膠凝膠法製備之鎳鋅鐵氧粉體於氧氣氣氛下煅燒持溫 2 小時 合成粉體之晶粒大小變化	35
圖 4.3 利用溶膠凝膠法製備的鎳鋅鐵氧粉體於氧氣氣氛下煅燒(a) 1000 °C (b)1100 °C (c) 1200 °C (d) 1300 °C 持溫 2 小時樣品之 SEM 照 片	37

圖 4.4 利用溶膠凝膠法製備的錳鋅鐵氧粉體於氧氣氣氛下煅燒 1000 °C 持溫 2 小時樣品之(a) TEM (b,c) HRTEM (d) SAED 照片	38
圖 4.5 溶膠凝膠法製備之鎳鋅鐵氧粉體於氧氣氣氛下煅燒 900°C、1000°C、1100°C、1200°C 持溫 2 小時樣品之 X 光繞射分析圖譜.....	41
圖 4.6 溶膠凝膠法製備之鎳鋅鐵氧粉體於氧氣氣氛下煅燒持溫 2 小時所合成粉體之晶粒大小變化.....	41
圖 4.7 利用溶膠凝膠法製備的鎳鋅鐵氧粉體於氧氣氣氛下煅燒(a) 900 °C (b) 1000 °C (c) 1100 °C (d) 1200 °C 持溫 2 小時樣品之 SEM 照片	43
圖 4.8 利用溶膠凝膠法製備的錳鋅鐵氧粉體於氧氣氣氛下煅燒 1000 °C 持溫 2 小時樣品之(a) TEM (b,c) HRTEM (d) SAED 照片	44
圖 4.9 錳鋅鐵氧與鎳鋅鐵氧鐵磁粉體所製備的吸收材以及空腔的反射係數比較圖.....	47
圖 4.10 厚度對電磁波吸收的影響.....	50
圖 4.11 電磁波吸收特性的特徵波形與反射係數圖.....	53
圖 4.12 不同添加物的電磁波吸收特性的特徵波形與反射係數圖.....	54
圖 4.13 以熱塑性高分子為基底添加鐵氧磁粉體的電磁波的特徵波形與反射係數圖.....	58

圖 4.14 以熱塑性高分子為底不同添加物的電磁波吸收特性的特徵波 形與反射係數圖.....	59
---	----

第一章 序論

電磁波吸收材料的主要目的為衰減電磁波能量及降低反射電磁波，最早德國於二次大戰曾應用於潛艇上，避免遭敵方雷達偵測，直到 1991 波斯灣戰爭中，美軍成功地利用電磁波吸收材料使攻擊機隱形，引起了世界各國對於電磁波吸收材的重視；除了在軍事上的應用外，近年來大量的電磁產品充斥，電磁波干擾的問題越來越大，為減少電磁波干擾，電磁波吸波材也就越顯重要。

鐵氧磁體（Ferrite）為常見的電磁波吸波材料，主要分尖晶石（spinel）、六方晶系（hexagonal）及石榴石系（garent）等三類，屬於軟磁性材料，由於其高導磁性（high permeability）及低損失（low loss）常被用於製作變壓器、磁頭...等應用；但鐵氧磁體材料若具有導電性差、介電係數小、高損失（high loss）及磁導係數在共振頻率（resonance frequency）附近有陡降，因此可對電磁波產生吸波（Absorption）效應。近年來已陸續發現在高頻（大於 1GHz）電磁波吸波材質的文獻已逐漸增加，為求增加吸波頻寬而調整形狀，或是採用多層阻抗的理念來做設計，使得吸波材的厚度、重量及體積飽受限制。由於科技的快速發展，材料的需求已由原本的毫微米（ 10^{-6} m）範圍進到了奈米（ 10^{-9} m）的時代，由於奈米粒子的量子效應，使得奈米材料無論在光電、磁性與催化等性質上都有特殊的表現；目前對

於鐵氧磁體的特性多半著重於塊材部份，對於奈米粒子特性及厚膜製作及實際應用上則鮮少被研究，故本年度的計畫研究著重於奈米鐵氧磁體的製作及應用。而奈米級粉體之合成方法有：水熱法、共沉法、溶膠凝膠法、噴霧乾燥法及有機金屬水解法...等，為求粉體良好結晶與特性，本年度計畫選用溶膠凝膠法，合成結晶性佳、具燒結活性之粉體及大量且均勻製作奈米級鐵氧磁粉體之方法。

本年度計畫主要是以 Ni-Zn、Mn-Zn 鐵氧磁體材料為主，以溶膠凝膠法製備奈米級 Ni-Zn、Mn-Zn 鐵氧磁粉體，開發 2-18GHz 反射損失至少為-10dB 的高導磁性鐵氧磁體吸收材料。本年度計畫的重點如下：

- (1) 利用溶膠凝膠法製備奈米級 Ni-Zn、Mn-Zn 鐵氧磁體材料，利用鐵磁性材料研究對單層厚膜的反射損失影響。
- (2) 以溶膠凝膠法製備純的奈米級 Ni-Zn、Mn-Zn 鐵氧磁體材料，添加金屬粉末(Fe、Zn)，製備複合式吸收材料，研究其對反射損失的影響

本報告共分為七章，將於第二章介紹關於電磁波吸波材的文獻回顧；第三章則是實驗過程包括奈米級電磁波吸收材料製作與量測；第四章為實驗結果與討論；第五章為結論；第六章為未來展望與第七章參考文獻。

第二章 文獻回顧

電磁波吸收材料的種類相當多，主要是利用電場或磁場與電磁波吸收材料的相互作用，將電場或磁場的能量轉為熱能；一個理想的電磁波吸波材除了要減少大部分的電磁波反射外，還需要重量輕、厚度薄、材料機械性質強、電磁波吸收頻段寬與符合操作環境的狀況（如耐熱、耐壓與耐腐蝕性等）。事實上，目前並沒有單純一種電磁波吸收材就可以符合上述要求，故從事電磁波吸收材的研究人員需將各項因素進行評估後，選擇符合條件的電磁波吸波材料。

2-1 電磁波吸收

平板式吸波材料的發展起源於沙氏於 1952 年研製出的沙氏吸收幕（Salisbury screen）[1]，使用每平方單位阻抗 377Ω 的電阻護幕（resistive sheet），放置於金屬板前方四分之一波長處，以共振的方式吸收電磁波，此吸收材雖可吸收電磁波但其吸波頻段窄，並不符合工業上的實用，但卻可為研究平行式吸收材料特性的主要方向。

另一種平板式電磁波吸收材則為戴倫薄幕（Dallenbach layer）[2]，利用複介電等於複導磁係數 $\epsilon_r = \mu_r$ 的均質薄幕貼於金屬板前，戴倫薄幕的厚度是由輸入阻抗等於自由空間阻抗來決定，而戴倫薄幕的材料為鐵磁體（ferrite）的一種，唯其磁導係數隨頻率變化很快，故

只有一個小頻段內複介電係數等於複導磁係數。

此外平板式吸收材尚有類比式網路吸收體（circuit analog RAM）

[2]如圖 2.1，其製作方式為於薄幕上貼上具有幾何圖案的介電性耗損或是磁性耗損材料，利用薄幕的厚度來控制阻抗的實部，幾何圖案來決定阻抗的虛部，此方法為阻抗較易控制但製作困難且頻寬窄。

電磁波吸收體後方緊貼一金屬板，當入射的電磁波穿透電磁波吸收體後碰到金屬板反射回來，藉控制吸收體內材料的電磁特性，讓電磁波在吸收體中多重反射吸收，電磁波的總反射量減少，提升電磁波吸收效率，吸收體的吸收率即是反射損失之總和除以入射波，其公式如下。

$$\Gamma = \sum_n \frac{E_m}{E_i}$$

其中 Γ ：反射係數

E_m ：入射波向量電場

$E_i = E_{r0} + E_{r1} + E_{r2} + \dots$ ，反射波向量電場

當入射波為平面電磁波，則吸收前阻抗 Z_{in}

$$Z_{in} = \left(\frac{\mu^*}{\varepsilon^*} \right)^{1/2} \tanh j \left(\frac{2\pi}{\lambda} d \varepsilon^* x \mu^* \right)^{1/2}$$

其中 λ ：電磁波波長

d ：吸收體厚度

μ^* ：吸收體材料之複數比導磁率

ε^* ：吸收體材料之複數比介電率

反射係數

$$T = \frac{Z_{in} - 1}{Z_{in} + 1}$$

反射損失 (Return Loss)

$$R. L. = 20 \log|T|$$

反射損失以能量表示

$$dB = -10 \log \left(\frac{P_r}{P_t} \right)$$

其中 P_r ：反射的能量

P_t ：穿透的能量

當電磁波遇到介質時，可能會反射、散射、穿透或在介質內共振。一般來說，介質的電磁特性可以介電常數 (ε) 與磁導係數 (μ) 加以描述， ε 與 μ 皆為複數， ε 與 μ 的實數表介電常數與導磁係數的大小， ε 與 μ 的虛數則表吸收程度。依據電磁波的吸收原理，電磁波吸收材是將入射的電磁波衰減成熱能，其損失之機構可分為波的共振(干涉)損失、導電損失、介電損失及磁損失等類型；一般來說電磁波吸波材可分為下列三種：

A. 電阻性電磁波吸收材[3]

電阻性電磁波吸收材是利用材料本身的導電率，例如使用導電性的金屬纖維或蒸鍍氧化物形成阻抗體，將電磁波能量

吸收經由電流形式轉換成熱能發散掉；當電磁波電場與電阻性材料作用時，電阻材料中傳導帶的自由電子受電磁波影響進行加速運動而與材料晶格碰撞，使電子運動停止，將電磁波電場轉變成晶格熱震動來達成衰減電磁波的作用；故材料自由電子密度很高時電磁波就無法進入材料中，在表面形成完全反射，故金屬材能全反射電磁波。以電阻性電磁波吸收材的吸收原理來設計，吸收體表面阻抗膜設計為最大電場，吸收體厚度 $d=\lambda/4$ (λ 為電磁波波長) 則可發揮最大電磁波吸收，因此吸收體厚度會隨對應頻率而變化。故電阻式電磁波吸收體，多被應用於雷達波干涉的防護與防止無線 LAN 多重反射。

B. 介電性電磁波吸收材

由於電阻性材料自由電子密度高，使電磁波產生遮蔽現象，若能降低材料中的電子密度則可助於吸收電磁波，故將電阻性材料分散形成類似於介電材料的方式，如圖 2.2，分散的電阻材料可視為電阻與電容的複雜作用，而材料電容作用是由複數之介電常數 ($\varepsilon=\varepsilon'-i\varepsilon''$) 來決定，其中為入射電磁波能量損失的分量，通常以 $\varepsilon''/\varepsilon'=\tan\delta$ 表示介電性材料的損失因子，當電磁波與介電材料作用時，電場能量會隨介電材料的

介電係數之虛數部分成指數的衰減。介電損失的機構因介電材料本身的複數比磁導率大約等於 1，故根據 Zin 之表示公式(第 4 頁)以複數比介電率與厚度 d 來設計在不同的頻率下得到良好的吸收效果；若想達寬頻吸收特性，則可改變吸收體的外觀（例如角錐體），或以多層吸收材來加大其吸收頻寬。目前常見的有利用橡膠、發泡塑膠或熱塑性高分子與介電損失材料混合後，加工程薄片或是角錐型的吸收體，常被應用於船舶雷達偽相、電波暗室與電波暗箱等。

C. 磁性電磁波吸收材[4]

磁性電磁波吸收材的吸收機制是由 μ^* 、 ϵ^* 、 f 、 d 的變化來決定，因磁性電磁波吸收材的磁壁共振與自然共振的吸收頻段，故其於 MHz~GHz 頻段間的電磁波吸收很受矚目。當電磁波電場與磁場作用時，因磁性材料內部電子成旋轉（spin）狀態，使磁性材料具有磁偶矩（magnetic moment），當其受電磁波磁場影響時，原先的磁偶矩方向改變，當入射電磁波的頻率與磁偶矩旋轉頻率相同時，會產生吸收共振的現象如圖 2.3，磁性材料的磁偶矩式是由材料磁導率 μ 決定，此導磁率也為複數型態（ $\mu = \mu' - i\mu''$ ），其中 μ'' 為入射電磁波磁能損失分量，通常以 $\mu''/\mu' = \tan\delta$ 表示磁性材料的損失因數；這類型的材料最大

的優點就是吸收材的厚度 d 小，故其應用價值高。磁性吸收材料一般由磁性的鐵氧磁體如尖晶石鐵氧磁體（spinel ferrite）、平板式鐵氧體或軟磁性金屬粉末與樹酯、橡膠、塑膠等混合形成薄片；常被應用於電子電路干擾的抑制與電子電路共振的防止、雷達偽波的防止，或與介電材料組成的複合型吸收材用於電波暗房。

2-2 磁性材料

磁場強度與施加磁場的關係如下

$$I = \chi H$$

其中 χ ：磁化率

磁導率

$$\mu = B / H$$

與磁化率 χ 之關係為

$$\mu = 4\pi\chi + \mu_0$$

其中 μ_0 ：真空中的磁導率

相對導磁率 μ_r 的定義為

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} = 4\pi\chi_r + 1$$

其中 $\chi_r = \chi / \mu_0$ ，相對導磁性的數值視磁性物質的磁特性而定，與物質磁性離子或原子排列、物質結構、磁矩間的作用力有關，主要可以分為下列五種：

A. 反磁性 (Diamagnetism)

反磁性是由於原子內部繞原子核旋轉的電子，在外加磁場作用下所產生的電磁感應；依 Lenz 定律感應電流產生磁通 (magnetic flux) 以阻止外加磁場進入原子的變化。反磁性是一種弱磁性，呈現的磁化方向與外加磁場相反，磁化率為負值， χ_r 約為 10^{-3} 。反磁性甚弱，物質中的一些磁原子可以輕易的掩蓋反磁性的特性。

B. 順磁性 (Paramagnetism)

晶體中若有不成對電子，在磁場中便能能階分裂發生。在多數情形下，順磁物質所含之原子或離子，其磁矩與其他磁場隔離且能自由改變方向。當外加磁場，磁矩的方向改變產生弱感應磁化平行於外加磁場。 χ_r 約為 $10^{-3} \sim 10^{-5}$ 。

C. 鐵磁性 (Ferromagnetism)

鐵磁性物質原子間相鄰磁矩正交作用，固磁矩彼此平行排列，而有較強的自生磁化性質。鐵磁性物質大部分是鐵、鈷、鎳金屬及合金 (Permalloy)、稀土磁石 (NdFeB 、 SmCo_5) 與少數氧化物如 CrO_2 及 EuO 等。在居禮溫度 (Curie Temperature) 以下保有靜原子磁矩，當外加磁場消失後仍保有其磁性，將外加磁場增強，鐵磁物質的磁場強度增加而後

進入飽和磁化；當溫度高於居禮溫度，鐵磁材料則轉為順磁性。

D. 反鐵磁性 (Antiferromagnetism)

反鐵磁性也屬於弱磁性，與順磁性一樣顯示小的正磁化係數；溫度則對磁化係數有很大的影響，當溫度低於 Neel 溫度 (T_n)，磁矩呈逆平行排列，外加磁場對於反鐵磁性物質得正副磁矩交互作用而阻礙；當溫度越高磁矩間的交互作用力減弱，外加磁場對於物質磁化的能力增加，固磁化率隨溫度增高而增大，此與順磁性相反；當溫度高於 T_n 時，磁矩則成雜亂排列，磁化係數隨溫度增高而減少。

E. 陶鐵磁性 (Ferrimagnetism)

於陶鐵磁性 (Ferrite 又稱鐵氧磁體) 材料中，磁離子佔有兩個晶格位子，A 與 B；A 位置的磁矩指向正向、B 位置的磁矩指向負向，因於 A 與 B 位子的磁離子數目與離子磁矩大小都不同，這些規則位子的磁矩組成一磁化方向，該磁化方向並非外加磁場造成，故稱為自生磁化 (spontaneous magnetization)。當溫度升高，磁矩受熱擾亂故自生磁化減少，當溫度高於居禮溫度，磁矩排列雜亂故自生磁化消失；若溫度低於居禮溫度，陶鐵磁性材料則表現順磁特性，磁化

係數隨溫度增加而減小。陶鐵磁性常見於磁性氧化物如鎳鋅系、錳鋅系、鎂鋅系、鋇系及鋇系等鐵氧磁體。

2-3 尖晶石鐵氧磁體

鐵氧磁體 (ferrite) 是一種以氧化鐵為主，搭配其他之金屬氧化物所形成的氧化物；其晶體結構可分為兩大部分，一為立方晶 (cubic) 的尖晶石 (spinel) 結構，一為六方晶 (hexagonal) 結構；尖晶石結構鐵氧磁體的化學式可以 MFe_2O_4 表示，其中 M 表二價之金屬離子，當 M 為含 Fe、Ni、Zn 等金屬離子時則稱為鎳鋅鐵氧磁體。如圖 2.4 所示，尖晶石結構為一面心堆積 (F.C.C.)，結構中的晶格點位子為氧原子佔據，在氧原子間的兩種次晶格 (sub lattice)，一為四面體位置 (稱 A 位置)、一為八面體位置 (稱 B 位置)，結構中八分之一的 A 位置與二分之一的 B 位置將被金屬離子佔據。根據金屬離子的分布，尖晶石結構又可以分為正尖晶石結構 (Normal spinel structure) 與反尖晶石結構 (Inverse spinel structure)。金屬離子的分布則與 (1) 金屬離子半徑、(2) 電子結構及 (3) 晶格的 Madelung 能量有關；一般來說金屬離子半徑小與靜電場大的離子佔據 A 位置，反之則佔據 B 位置；當 M^{2+} 離子僅佔 A 位置、 M^{3+} 離子佔 B 位置則稱正尖晶石結構，當一部分的 M^{2+} 離子佔 B 位置，迫使 B 位置上的 M^{3+} 離子佔 A 位置則稱為反尖晶石結構；故鎳鋅鐵氧磁體為一反尖晶石結構。

2-4 電磁波吸波材結構

在了解吸波材的吸波機制之後，對吸波材結構作一個簡單的介紹如下：

(1) 單層雷達波吸收體：將導電或導磁材料均勻分散於樹脂中製成單層膠片，其材料要素為提升材料的導電或導磁特性，以增加折射係數 (μ_c) 降低吸收體厚度 (d 正比於 $-1/\mu_c^2$)。

(2) 多層雷達波吸收體：將單層吸收體於不同層次填裝成多層吸收體，層高阻抗層往內逐漸變小，使各層間具有不同的電阻阻抗，材質的特性則與填充物有關。

(3) 介電微波吸收體：由多種不同介電特性材料層層組合，又稱為階梯吸收體，調整介電材在各層中分散的情形以達電磁波吸收特性。

(4) 磁性微波吸收體：一般採用鐵氧磁體的磁性材料，利用磁性材料的高導磁性吸收電磁波，這類型的微波吸收體特徵為厚度較薄，約為介電吸收體的十分之一。

(5) 歐姆損失吸收體：由一 377Ω 的電阻層加上 $1/4\lambda$ 間隔空間與一個金屬化的反射基板組成。其吸收機制為當電磁波入射到 377Ω 的電阻層時，部分電磁波會穿透，穿透的電磁波碰到金屬板後會被反射，而電阻層的厚度為 $1/4\lambda$ ，故穿透電磁波可與反射電磁波形成相消性干涉，藉此以吸收電磁波。

(6) 類比電路吸收體：利用蒸鍍、濺鍍金屬或金屬氧化物膜，來蝕刻成設計圖案的電阻層，能有效的衰減電磁波能量。除此外，近年的研究更指出角錐型或是蜂窩形結構相互搭配，有助於寬頻段的電磁波吸收。

2-5 傳輸線原理

傳輸線通常由兩條等長的導線組成，圖 2.5 為其等效電路圖[5]

其中 R：單位長度串連電阻， Ω/cm

L：單位長度串連電感，H/m

G：單位長度並聯電導，S/m

C：單位長度並聯電容，F/m

根據柯希荷夫定律可得下列方程式

$$\begin{aligned}\frac{dV(z)}{dz} &= -(R + j\omega L)I(z) \\ \frac{dI(z)}{dz} &= -(G + j\omega C)V(z)\end{aligned}$$

解以上方程式得

$$\begin{aligned}\frac{d^2V(z)}{dz^2} &= \gamma^2 V(z) \\ \frac{d^2I(z)}{dz^2} &= \gamma^2 I(z)\end{aligned}$$

其中 $\gamma = \alpha + j\beta = \sqrt{(R + j\omega L)(G + j\omega C)}$

故

$$\begin{aligned}V(z) &= V_0^+ e^{-j\beta z} + V_0^- e^{j\beta z} \\ I(z) &= \frac{V_0^+}{Z_0} e^{-j\beta z} + \frac{V_0^-}{Z_0} e^{j\beta z}\end{aligned}$$

其中 Z_0 為傳輸線特性阻抗

$$Z_0 = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}}$$

當傳輸線有波源跟負載時，其邊界條件為

$$z=0, V_1 = V_s - I_1 Z_s$$

$$z=l, V_L = I_L Z_l$$

代回上式

$$V(z) = \frac{V_s Z_0}{Z_s + Z_0} \frac{e^{-j\beta z}}{1 - \Gamma_L \Gamma_0 e^{-2j\beta z}}$$

$$I(z) = \frac{V_s}{Z_s + Z_0} \frac{e^{-j\beta z}}{1 - \Gamma_L \Gamma_0 e^{-2j\beta z}}$$

$$Z(z) = Z_0 \frac{1 + \Gamma_l e^{-2j\beta z}}{1 - \Gamma_L \Gamma_0 e^{-2j\beta z}}$$

於兩端點 ($z=0, l$) 的反射係數為

$$\Gamma_0 = \frac{Z_s - Z_0}{Z_s + Z_0}$$

$$\Gamma_l = \frac{Z_l - Z_0}{Z_l + Z_0}$$

於 $z=0$ 的輸入阻抗 Z_{in} 為

$$Z_{in} = Z_0 \frac{1 + \Gamma_l e^{-2j\beta l}}{1 - \Gamma_l e^{-2j\beta l}} = \frac{1 + \Gamma_0}{1 - \Gamma_0} Z_0 = Z_0 \frac{Z_l + jZ_0 \tan \beta l}{Z_0 + jZ_l \tan \beta l}$$

$$\Gamma_0 = \Gamma_l e^{-2j\beta l}$$

2-6 奈米粒子

當粒子的尺寸降到奈米等級時，由於量子效應作用下，粒子的費米能階附近的電子能將會由連續轉為離散而使能帶變寬，此效應通稱

於奈米材料的奈米尺寸效應，這種量子化的效應為奈米粒子帶來一系列於聲、光、電、磁等特殊特性。奈米級的磁性材料則表現出一些特別的特性，如高矯頑力、低居禮溫度、有些粒子在奈米等級時會呈現超順磁性等，以上的現象都會影響電磁波的吸收。文獻指出奈米級粒子由於具有大量的表面缺陷與界面，會使的不連續的能階大量增加；相鄰能階的能階差隨粒子減小而增加，使電子吸收能量而造成損失；而且奈米級的粒子於高頻部份表現出良好的吸收。

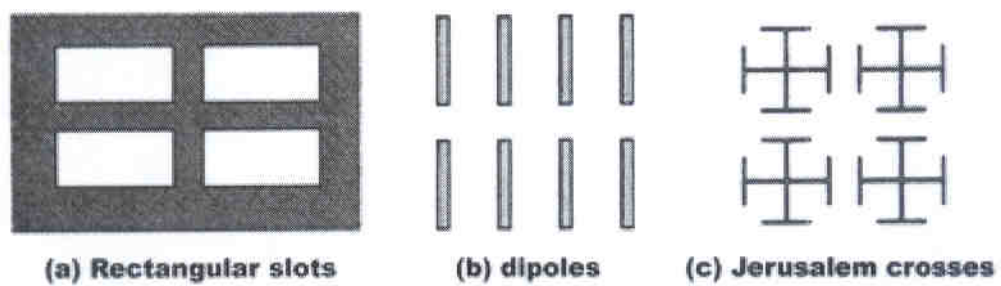


圖 2.1 類比網路式吸收體（circuit analog RAM）

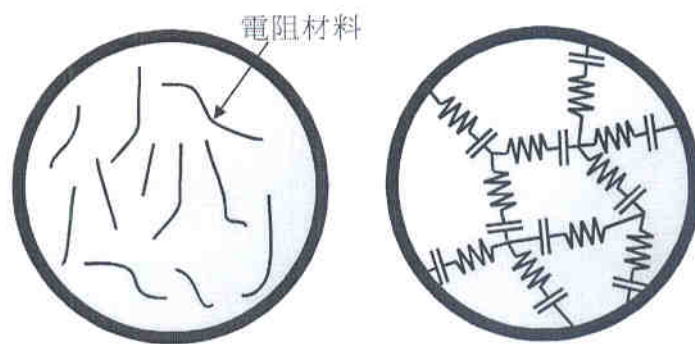


圖 2.2 分散電阻材料的等效電路圖

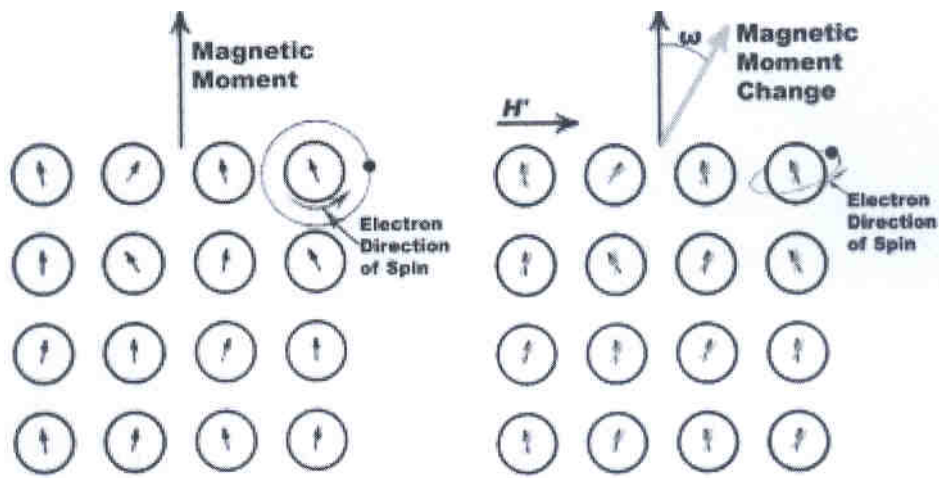


圖 2.3 磁性材料磁偶矩受外部磁場作用示意圖

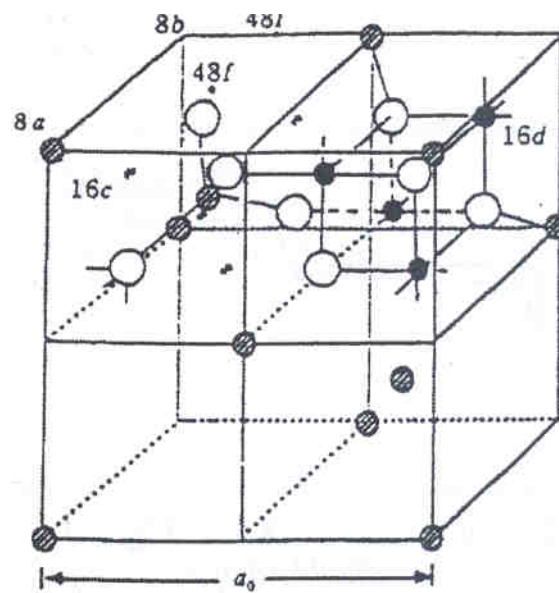


圖 2.4 鎳鋅鐵氧磁體之晶體結構

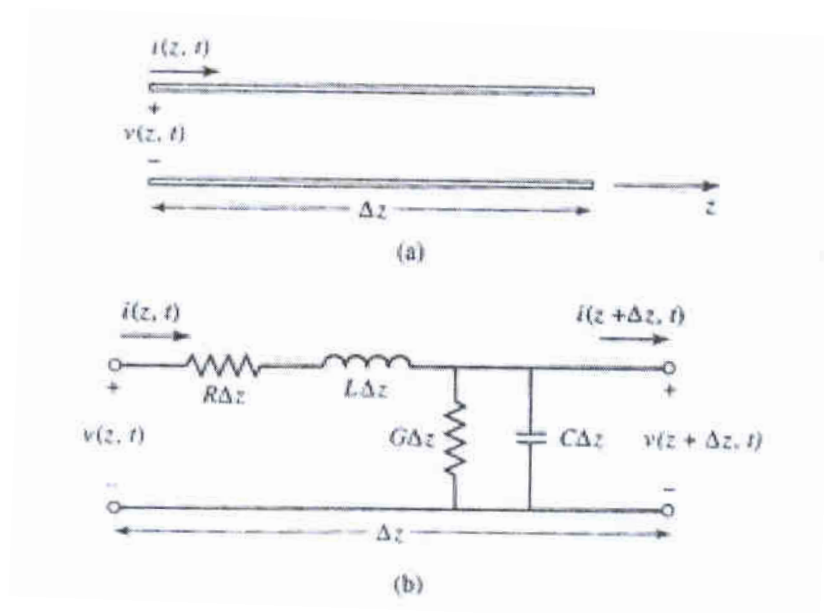


圖 2.5 (a)一小段的 Δz 傳輸線 (b) 其等效電路圖

三、結果分析

3-1 奈米鐵磁粉體之製備

3-1-1 溶膠凝膠法合成鐵磁粉體

鐵磁粉體常見的合成方法，主要有固相法（Solid state reaction）、溶膠凝膠法（Sol-gel method）與水熱法（Hydrothermal method）等。溶膠凝膠法由於配比控制容易與結晶性佳，故文獻上常採用此法。本實驗採用鐵源 $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3$ 、鋅源 $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2$ 、鎳源 $\text{Ni}(\text{NO}_3)_2$ 與錳源 $\text{Mn}(\text{NO}_3)_2$ 溶膠凝膠反應法，分別製備奈米級錳鋅鐵氧與鎳鋅鐵氧粉體，其實驗之流程如 3.1 所示：

將 $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3$ 、 $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2$ 、 $\text{Ni}(\text{NO}_3)_2$ 或 $\text{Mn}(\text{NO}_3)_2$ 粉末，依化學當量比所需之重量秤重混合後，加入 Acetic acid 與 2-methoxyethanol 加熱至 95°C 進行溶膠凝膠反應 3 小時，所得混合物置於烘箱中以移除多餘溶液，經初步混合後得錳鋅鐵氧與鎳鋅鐵氧先驅物混合粉末，將此先驅物置於管型爐中加熱，以 $10^\circ\text{C}/\text{min}$ 的升溫速度，通入氧氣氣氛煅燒至設定煅燒溫度，爐冷後樣品以瑪瑙研鉢研磨。粉末特性分析包括 X 光繞射分析（XRD）、微結構分析（SEM、TEM）及鐵氧磁粉體顆粒大小與分佈。為得到粒子細小而且分佈較均勻的粉體，將經溶膠凝膠法製備而得的鐵氧磁粉末放置於水中，經超音波震盪後加以攪拌，使粉末懸浮

於水中後，靜至一段時間後取水溶液部分乾燥，以得奈米級鐵氧磁粉體。

3-1-2 藥品

用來製備鐵氧磁粉體之所需藥品如下：

Iron (III) nitrate	$\text{Fe}(\text{NO}_3)_3$	Aldrich	99 %
Zinc (II) nitrate	$\text{Zn}(\text{NO}_3)_2$	Aldrich	99 %
Nickel (II) nitrate	$\text{Ni}(\text{NO}_3)_2$	Aldrich	99 %
Manganese (II) nitrate	$\text{Mn}(\text{NO}_3)_2$	Aldrich	99 %
Acetic acid	CH_3COOH	Aldrich	99 %
2-methoxyethanol	$\text{CH}_3\text{OCH}_2\text{CH}_2\text{OH}$	Aldrich	99%

3-2 鐵磁粉末的物理性質

3-2-1 X 光繞射分析

西元 1895 年倫琴(Wilhelm Conrad Rontgen)發現 X 光及 1912 年勞厄(Max von Laue)首先示範了 X 光對單晶繞射現象(Diffraction)以及布拉格(William Henry & William Lawrence Bragg)之繞射實驗後，X 光即被廣泛地用在晶體結構與材料分析上。微結構的分析中，晶體的結構鑑定通常都是由 X 光繞射儀或是 X 光粉末繞射儀(X-ray Diffraction，簡稱 XRD)來決定欲知晶體之晶體結構；XRD 的繞射原理如下：當試片受到波長 λ 單色 X 光照射時，試片中某些晶體中的晶面(h k l)面間距 d，對傾斜 θ

角之入射 X 光符合布拉格公式：

$$n\lambda = 2d\sin\theta$$

此時入射 X 光就會被晶面(h k l)所繞射。繞射線可如圖 3.2 所示，對晶面成 θ 角與入射 X 光之沿線成 2θ 角 (Diffraction angle)，X 光繞射儀之基本原理如圖 3.3 所示。使用 X 光繞射法進行定性分析時，可將未知物質之繞射圖形與以建立之已知物質之繞射圖形相比較，即可判斷前者是否含有後者物質，對既知物質常見的標準圖形一般可對照 ICDD 卡，此方法即稱為 X 光繞射之定性分析。

本實驗中將不同前驅物在不同反應條件下煅燒而得之粉體，以瑪瑙研鉢充分研磨，將磨好的粉體產物置於試片載台中來壓平，以便進行 X 光繞射分析 (Cu 靶、 $K\alpha$ 光波長 $\lambda=1.5418\text{\AA}$ 、電壓 30kV 掃描速率 $4^\circ/\text{min}$ 、範圍 $20^\circ\sim 70^\circ$)，然後將所得之粉末繞射圖與 ICDD 標準圖進行比對分析，確認是否為所需之樣品與不純物並藉此觀察其反應性與結晶變化的情況。

除了結構判定外，XRD 圖譜也可以用來觀察晶體形成後之晶粒大小。假設一晶片其沿[hkl]晶面僅有 p 個晶面如圖 3.4 所示；根據 Bragg's Law，當 X 光在連續晶面反射產生光程差 Δl

$$\Delta l = 2d_{hkl}\sin\theta = n\lambda$$

時，其中為 d_{hkl} 晶面距、 θ 為反射角、n 為整數、 λ 為光波波長會有建設性干涉的繞射現象。若將晶片旋轉一個小角度，前式成為

$$\begin{aligned}
\Delta l &= 2d_{hkl}\sin(\theta + \varepsilon) \\
&= 2d_{hkl}(\sin\theta\cos\varepsilon + \sin\varepsilon\cos\theta) \\
&= n\lambda\cos\varepsilon + 2d_{hkl}\cos\theta\sin\varepsilon
\end{aligned}$$

由於繞射僅發生於 ε 很小時，故上式為

$$\Delta l = n\lambda + 2d_{hkl}\varepsilon\cos\theta$$

所造成之像差為

$$\Delta\Phi = \frac{2\pi}{\lambda}\Delta l = 2\pi n + \frac{4\pi}{\lambda}\varepsilon d_{hkl}\cos\theta = \frac{4\pi\varepsilon d_{hkl}\cos\theta}{\lambda}$$

因此所有晶面造成的總相差為

$$\Delta\Phi = \frac{4\pi\varepsilon d_{hkl}\cos\theta}{\lambda} \dots (3.1)$$

而合成波則為

$$A = ap \frac{\sin \Phi/2}{\Phi/2}$$

其中 a 為入射光振幅。若 $\varepsilon = 0$ ， A_0 為尖峰波幅

$$A_0 = ap$$

半高寬處

$$\left(\frac{A_2}{A_0}\right)^2 = \frac{1}{2} = \frac{\sin^2 \Phi/2}{(\Phi/2)^2}$$

其解為

$$\frac{\Phi}{2} = 1.4$$

故繞射峰之半高寬 β_{hkl}

$$\beta_{hkl} = \delta(2\theta_{hkl}) = 4\varepsilon_{1/2}$$

代入(3.1)式

$$\beta_{hkl} = \frac{4 \times 1.40\lambda}{2\pi p d_{hkl} \cos\theta_{hkl}} = \frac{0.89\lambda}{L_{hkl} \cos\theta} \dots (3.2)$$

其中為 $L_{hkl} = p d_{hkl}$ 晶面沿方向之厚度。(3.2)式為 Bragg 在 1949 年

所導出，事實上 Scherrer 首先導出此關係式

$$\beta_{hkl} = \frac{k\lambda}{L_{hkl}\cos\theta}$$

所得 k 值為 0.94 而非 0.89，兩者的差異主要是由於 Scherrer 假設繞射峰之峰形為依高斯分佈，粉末晶體為立方且大小一致。要利用 Scherrer 關係是來計算晶粒大小，首先需要先得到粉體的繞射真實峰形才能獲得其真實之半高寬，並假設峰形為高斯分佈，由 Scherrer 關係是可計算晶粒大小，並由晶粒大小來觀察反應之結晶性。

3-2-2 微結構分析(電子顯微鏡 SEM/TEM)

在科學的發展史上，顯微技術一直隨人類的科學文明不斷地突破，科學研究與工業也隨著顯微技術的發明推向更小的世界。電子顯微鏡屬耀是用來觀察物體的表面型態，工作原理與構想於 1935 年德國 Knoll 提出，直到 1942 年第一部實驗用 SEM 才正式使用，1965 年由 Cambridge 公司首先推出商品化的 SEM 問世，之後隨著電子顯微鏡的改良、解析度提高、操作自動化、電腦化與價格的降低，可清晰的看到起伏較大的物體，使電子顯微鏡成為普及的材料分析工具。

電子顯微鏡主要構造示意圖如圖 3.5 所示，利用電子槍產生電子束經柵極聚集而成點光源，在陽極加速電壓作用下，經過三

個包含電磁透鏡的電子光學系統，使電子束聚焦成一個約幾個奈米的電子束照射在試片上，電子打在試片上可形成穿透電子、反射電子與二次電子，經由偵測這些電流訊號即可將試片表面的形貌、特徵一一顯現出來。

3-3 塗層與電磁波吸收量測

本計畫於粉體製作後，二種塗佈的方式被採用進行單層吸收幕的製作，利用所製作單層吸收幕來進行電磁波衰減效能的量測，針對不同的試片所得的量測結果作一個比較與分析來探討較佳的製作方式。

3-3-1 平板式電磁波吸收材的製作

為求電磁波吸收材具有製作簡單、重量輕與吸收良好的特點，本實驗採用重量輕且吸收良好的鐵磁粉體（錳鋅鐵氧與鎳鋅鐵氧奈米級粉體），利用不同的塗佈條件與配比來尋求一最佳吸收條件；本實驗室採用的塗佈方式有二種，其一則為利用熱固性高分子作為填充物，將其與奈米級鐵磁粉體混合後塗佈於不銹鋼鋼板上，再進行加熱使其固化，即為一單層電磁波吸收材；二為將奈米級鐵磁粉體與市面上常見的油漆(百麗牌)充分均勻混合後，塗佈於不銹鋼鋼板上，自然陰乾後進行電磁波吸收實驗，期

能獲得一製作方便、重量輕、吸收良好之電磁波吸收材料。

3-3-2 量測方式與理論分析

在這些粉體材料測試系統組裝完成之後，我們需要進行一連串的模擬測試，使用一些數學分析工具來計算如何安排這些奈米級吸收材料，不論是在平面的幾何位置安排與縱向與波長相關的安排上的改良，另外，也需要對電磁波吸收材料的間隔部分所需填入的空間支撐器作一個完整的分析，以便可以建立一個簡單的電磁波吸收材料配置模型。如此可以先行評估將這些多層膜組裝完成之後，其可能的電磁波吸收能力與頻率之間的關係將會以何種型式呈現。

我們將會使用電磁學中傳輸線原理與四分之一波長阻抗匹配的觀念來描述這個問題，在傳輸線理論中，根據柯希荷夫電壓與電流公式與波動方程式及其邊界條件，可以得到傳輸線的阻抗與反射係數的關係(Eqn. 1)，進而可以推導出在位置為零($Z=0$)時的輸入阻抗(Eqn. 2)情形如下。

$$Z(z) = Z_0 \frac{1 + \Gamma_l e^{-2j\beta z}}{1 - \Gamma_l e^{-2j\beta z}}, \quad \Gamma_0 = \frac{Z_s - Z_o}{Z_s + Z_o}, \quad \Gamma_l = \frac{Z_l - Z_o}{Z_l + Z_o} \quad (1)$$

$$Z_{in} = Z_0 \frac{1 + \Gamma_l e^{-2j\beta l}}{1 - \Gamma_l e^{-2j\beta l}} = \frac{1 + \Gamma_0}{1 - \Gamma_0} Z_0 = Z_0 \frac{Z_l + jZ_0 \tan \beta l}{Z_0 + jZ_l \tan \beta l}, \quad \Gamma_0 = \Gamma_l e^{-2j\beta l} \quad (2)$$

另外，在四分之一波長傳輸線的阻抗匹配上，因為四分之一波長的傳輸線具有極佳的轉換阻抗特性，是一般極為常用的阻抗轉換電路，其頻率響應可以從輸入端的反射係數推導得出(Eqn. 3)，但是，這樣的設計只可以匹配單一頻率，因此我們必須要使用多層串接的多級傳輸線阻抗轉換模型來設計這樣的一個奈米複合電磁波吸收材料(Eqn. 4)。

$$|\Gamma_0| = \frac{|Z_l - Z_0|}{2\sqrt{Z_0 Z_l}} |\cos \theta| \quad (3)$$

$$\Gamma = \Gamma_1 + \frac{T_{12} T_{21} \Gamma_3 e^{-2j\theta}}{1 - \Gamma_2 \Gamma_3 e^{-2j\theta}}, \quad \Gamma = \Gamma_1 + \Gamma_3 e^{-2j\theta} \quad (4)$$

根據 Eqn. 4 的近似式，在阻抗的不連續性很微小的情況下，也就是 $\Gamma_1 \ll 1, \Gamma_3 \gg 1$ 的條件下，就可以運用這樣的近似公式來評估分析，設計出雙層的電磁波吸收材料，針對多層的電磁波吸收材料，可以使用這樣的公式推導，再加上適當的不同邊界條件加以延伸，設計出多層電磁波吸收材料的數值分析模型，最後，將其所得到的分析模型運用在實際的設計上，使用先前所製備的奈米電磁波材料來製作此一複合形式的奈米電磁波吸收材料。

在製備完成奈米鐵磁粉體後，吾人開始將其製作為幾個不同結構的電磁波吸收材構型，分別為與塗料混合之電磁波吸收材，直接燒結之吸收材及加入環氧樹脂的電磁波吸收材三種。同時，並針

對其不同的比例與厚度加以分析，並比較其不同的電磁波吸收效果。

在量測方面考慮了空間吸收與微波散射的因素之後，我們採用了導波管(waveguide)模型的量測方式，配合安捷倫 8722 網路頻譜分析儀與 DeMaskco waveguide，這樣的量測方式可以有效的得到電磁波吸收材的反射損失與吸收係數，同時所能夠涵蓋的頻率範圍可以從極低的頻率到數十個 GHz，因此，我們根據計畫目標所需要的頻率範圍來量測，選擇由 1 GHz 至 20 GHz 的掃頻範圍，觀察在這些頻率範圍內電磁波吸收材的吸收情形。針對不同的材料組成，以及不同的吸收材厚度與不同的奈米粉體添加等方式，來加以分析奈米鐵磁粉體的電磁波吸收特性，試圖可以經由這些製備方式與量測數據分析，得到一個具有較佳吸收特性同時容易製備的奈米鐵磁粉體之電磁波吸收材料。

3-3-1.1 使用熱固型高分子作為填充材

將所需粉末依一定配比秤重後，與熱固型高分子(Epoxy 與鐵氟龍的混合物)以三軸滾輪均勻混合後，塗佈於不銹鋼鋼板上，再將其置於烘箱中持溫 5 小時 95 °C，即可獲得單層電磁波吸收材。

3-3-1.2 使用油漆作為填充材

相對於使用熱固型高分子其需加熱至 95 °C，在實際應用上仍有

其缺點，故於本年度的實驗，我們亦採用油漆作為塗佈的載體，其能提供依重量輕、成本低廉、簡單製作的電磁波吸收材。其製作方法如下，將所需粉末依一定配比秤重後，與油漆以三軸滾輪均勻混合後，塗佈於不銹鋼鋼板上，再將其置於室溫乾燥 5 小時，即可獲得單層電磁波吸收材。

跟據以報導的相關研究結果得知電磁波吸波材的厚度與吸收效果之間息息相關，因此於本年度的實驗中採用奈米級錳鋅鐵氧與鎳鋅鐵氧鐵氧磁體，分別與熱固性高分子與油漆充分混合後，製備成不同厚度之電磁波吸波材，再配合頻譜分析儀的量測，來討論厚度對吸波效果的影響。

在了解各種不同載體最佳的吸波厚度後，電磁波的吸收材的成分的控制對電磁波的吸收是相當重要的一環，因此於本年度的實驗中除了採用實驗室製備之奈米級錳鋅鐵氧與鎳鋅鐵氧鐵氧磁體，另外分別添加奈米金屬粉末、陶瓷粉體與碳管等，製備成不同成分配比之複合材料單層電磁波吸波材，配合頻譜分析儀的量測，討論配比對吸波效果的影響，期以利用簡單的方式達良好的吸收。

以下我們將究針對幾樣不同的試片量測所得到的數據加以分析與說明，並針對每個項目實驗研究結果做一個簡單的結論，這些項目可以詳述如下：

- (1) 不同組成的奈米粉體電磁波吸收特性
- (2) 不同厚度的奈米粉體電磁波吸收特性
- (3) 不同奈米粉體摻雜之電磁波吸收材吸收特性
- (4) 複合吸收材之電磁波吸收特性

最後，將針對這幾種不同形式的電磁波吸收材料作一個簡單的結論，並且希望藉由這樣的研究方式，可以建立相關的吸收材數據庫，而可尋求出一個容易製作同時吸收效果也相當不錯的奈米粉體電磁波吸收材料。

3-4 預期目標

本計畫的預期目標包括：

1. 了解奈米級顆粒之錳鋅鐵氧與鎳鋅鐵氧鐵磁粉體的製備條件。
2. 製備單相、良好結晶性與奈米級顆粒之錳鋅鐵氧與鎳鋅鐵氧鐵磁粉體，並進行微結構分析。
3. 藉由不同塗佈的技術，以及不同的成分及組成之材料來應用尋求具最佳化的吸收條件的樣品。(包括最適吸收厚度、最適吸收配比與最適吸收填充材與塗佈方式)

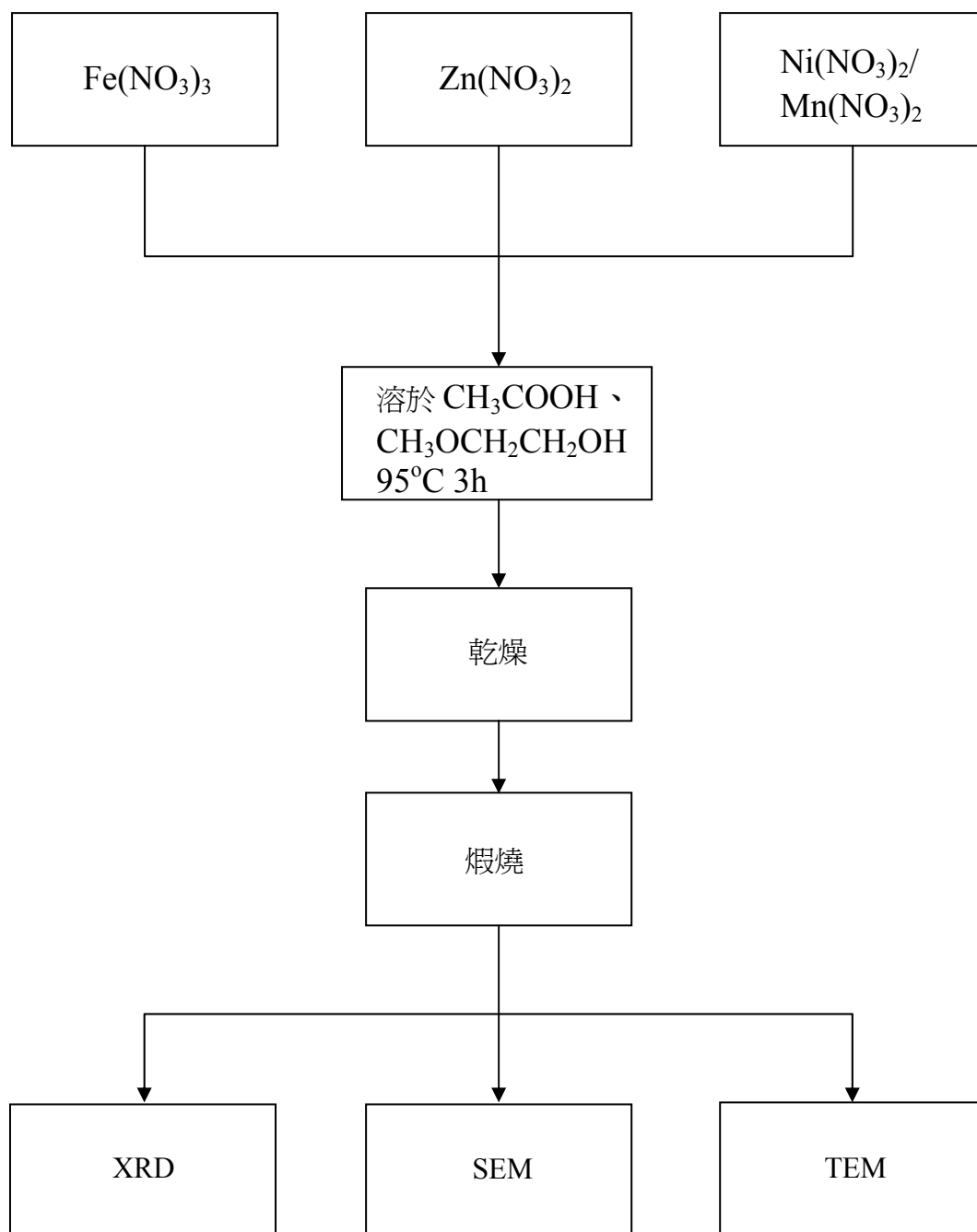


圖 3.1 鐵磁粉體製備流程

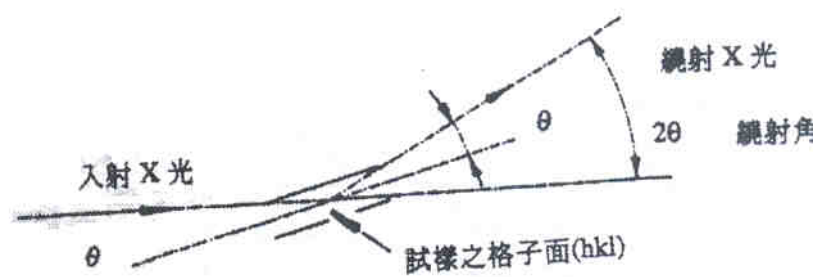


圖 3.2 晶面的繞射

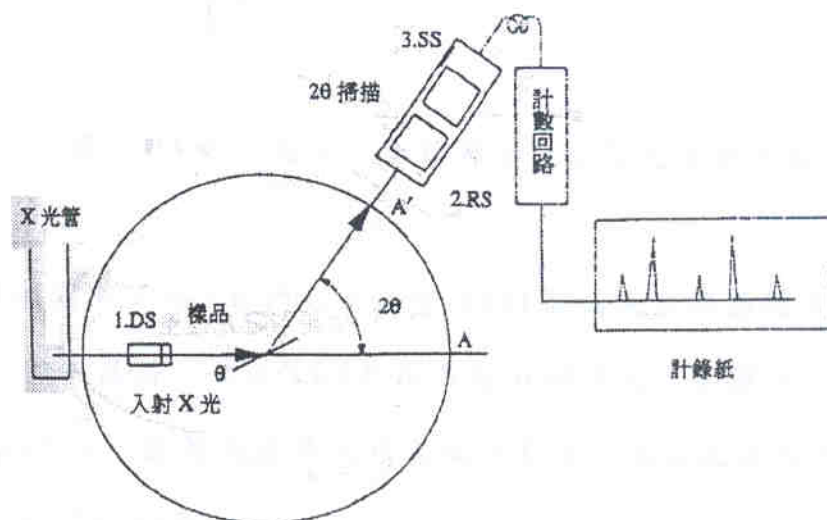


圖 3.3 X 光繞射儀之基本原理

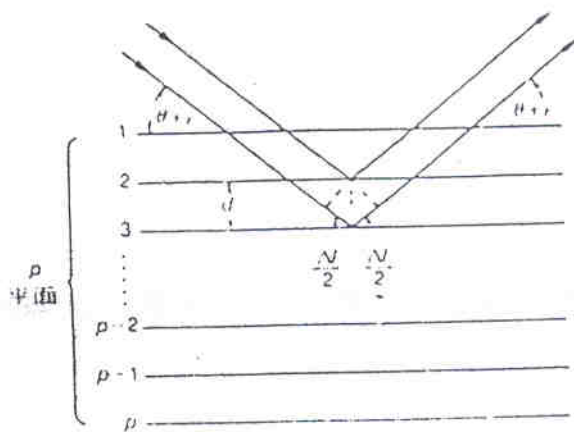


圖 3.4 一晶面系（面間距為 d ）之 X 光反射示意圖

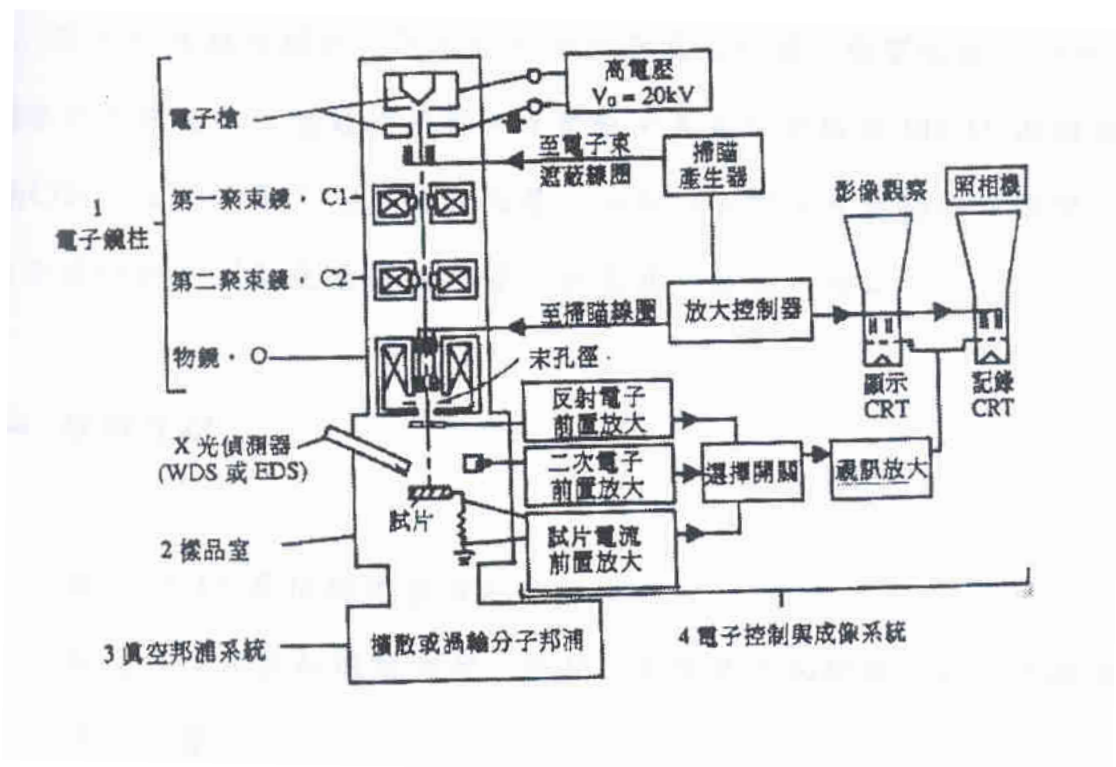


圖 3.5 電子顯微鏡主要構造示意圖

第四章 結果與討論

4-1 鐵氧磁粉體之製備

4-1-1 錳鋅鐵氧鐵磁粉體

錳鋅鐵氧鐵磁粉體的合成方法中，一般採用硝酸錳硝酸鋅硝酸鐵作為溶膠凝膠法的前驅物，經高溫煅燒後形成結晶粉體。本實驗中嘗試於氧氣氣氛中並改變不同溫度來製備粉體，藉觀察 XRD 繞射峰改變結果來驗證所合成之粉體晶相、晶格常數與晶粒大小的分析來討論粉體形成之反應機制。

4-1-1.1X 光繞射分析

圖 4.1 為溶膠凝膠先驅物粉末，以 $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 的升溫速率，置於氧氣氣氛中分別於煅燒至 $1000 \sim 1300^{\circ}\text{C}$ ，持溫 2 小時之後，作成試片以 X 光繞射分析（Cu 靶，電壓 30kV ，掃描速率 $4^{\circ}/\text{min}$ ，範圍 $20 \sim 60^{\circ}$ ）以觀察其反應狀況。由散射圖譜知未經熱處理之溶膠凝膠先驅物並無結晶相的產生，該粉體於 1000°C 煅燒 2 小時後已形成晶相良好的尖晶石結構錳鋅鐵氧單相，其於 35.1° 的 (311) 主峰都已生成，當反應溫度由 1000 升至 1300°C ，其 XRD 峰值強度越來越強，表示其結晶性越來越好。圖 4.2 則為錳鋅鐵氧鐵磁粉體之晶粒變化與反應溫度的關係，將溶膠凝膠先驅物於氧氣

氣氛下煅燒 $1000 \sim 1300^{\circ}\text{C}$ 持溫 2 小時的樣品，以 X 光繞射分析結果計算晶粒大小之變化，當反應溫度為 1000°C 時，鐵磁粉體的計算所得晶粒大小約為 73 nm ，當反應溫度逐漸提高至 1300°C ，所獲得的晶粒大小則增大至 $0.2\text{ }\mu\text{m}$ ，故由此知煅燒溫度越高晶粒大小逐漸也就越大。

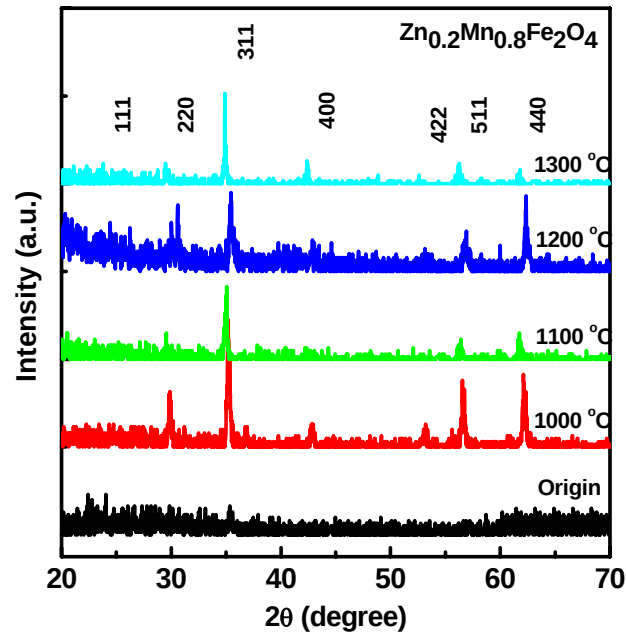


圖 4.1 溶膠凝膠法製備之錳鋅鐵氧粉體於氧氣氣氛下煅燒 1000°C、1100°C、1200°C、1300°C 持溫 2 小時 X 光繞射分析圖譜

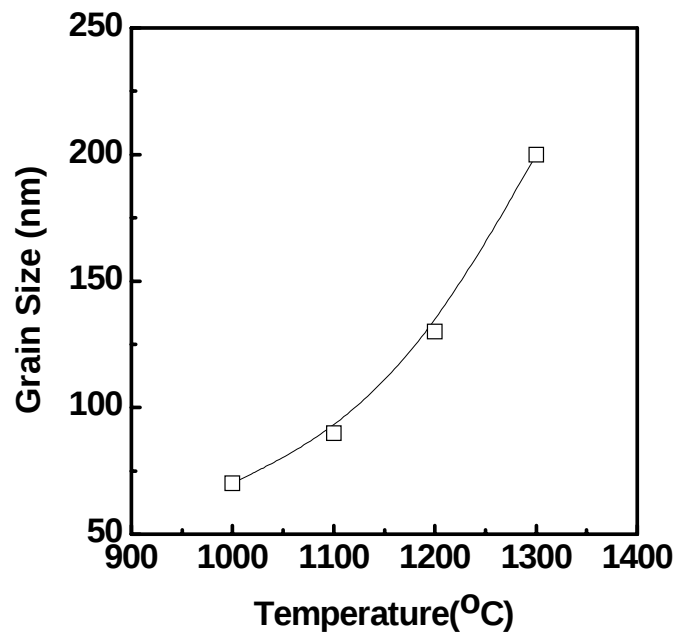


圖 4.2 溶膠凝膠法製備之錳鋅鐵氧粉體於氧氣氣氛下煅燒持溫 2 小時合成粉體之晶粒大小變化

4-1-1.2 微結構分析

圖 4.3 為利用溶膠凝膠法製備的錳鋅鐵氧粉體於氧氣氣氛下煅燒 1000~1300°C 持溫 2 小時樣品之 SEM 照片。由圖上明顯發現溶膠凝膠法合成之錳鋅鐵氧粉體先驅物於 1000°C 時結晶粒子較小，平均晶粒約為 70 nm，根據 X 光繞射分析判斷該粉體應錳鋅鐵氧鐵磁體粉體，其微結構約呈現長方體粉體，當反應溫度逐漸升高至 1100~1300 °C 時錳鋅鐵氧粉體結晶快速成長至 103、150 與 210 nm，粒子顆粒大小平均、晶癖明顯但高溫時粒子凝團現象嚴重。故由照片上知高溫煅燒下雖可是晶體結晶性變佳，卻伴隨著本實驗中不期待的晶粒成長。

圖 4.4 為利用溶膠凝膠法製備的錳鋅鐵氧粉體於氧氣氣氛下煅燒 1000 °C 持溫 2 小時樣品之穿透式電子顯微鏡影像 (TEM、HRTEM)與選區繞射圖譜(SAED)照片。由照片上可知錳鋅鐵氧粉體於 1000 °C 結晶的晶粒大小約為 73 nm，於該溫度下煅燒會導致輕微的凝團現象；由選區繞射圖譜可知使用溶膠凝膠法合成之錳鋅鐵氧磁體為一單相尖晶石結構，將此 TEM 的結果與 X 光繞射圖譜結果對比，可發現二者量測的結果是相符的。

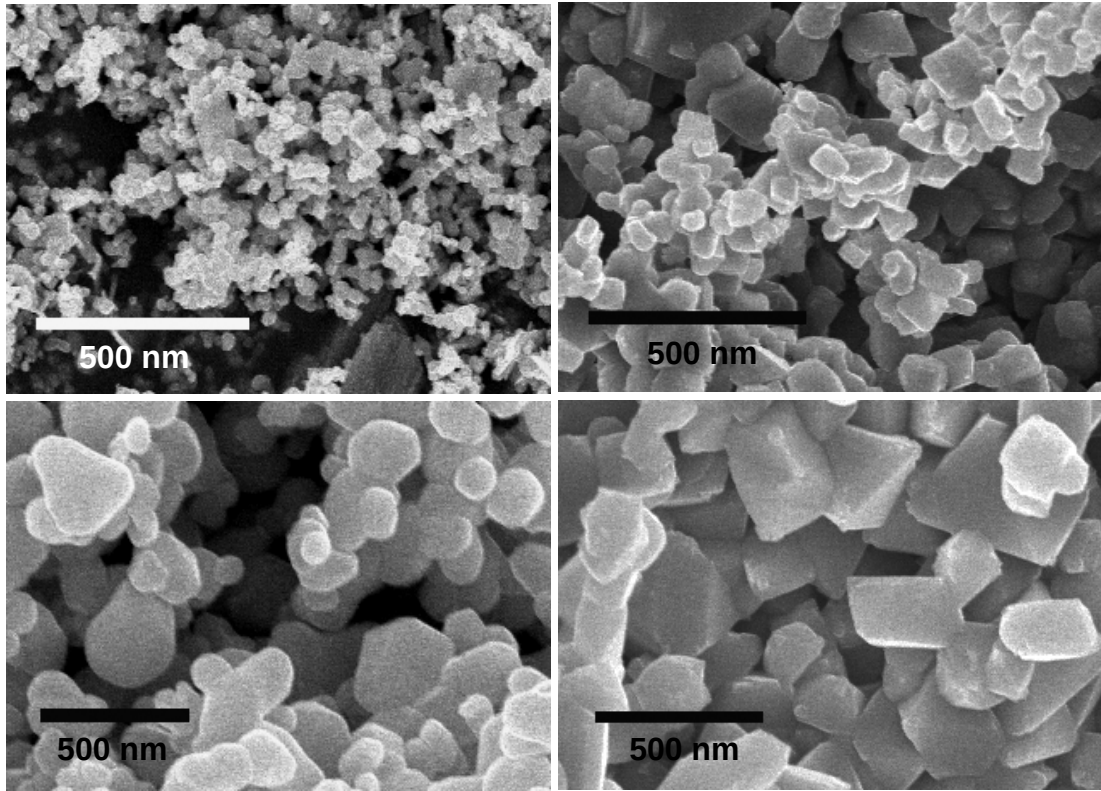


圖 4.3 利用溶膠凝膠法製備的錳鋅鐵氧粉體於氧氣氣氛下煅燒(a) 1000 °C (b) 1100 °C (c) 1200 °C (d) 1300 °C 持溫 2 小時樣品之 SEM 照片。

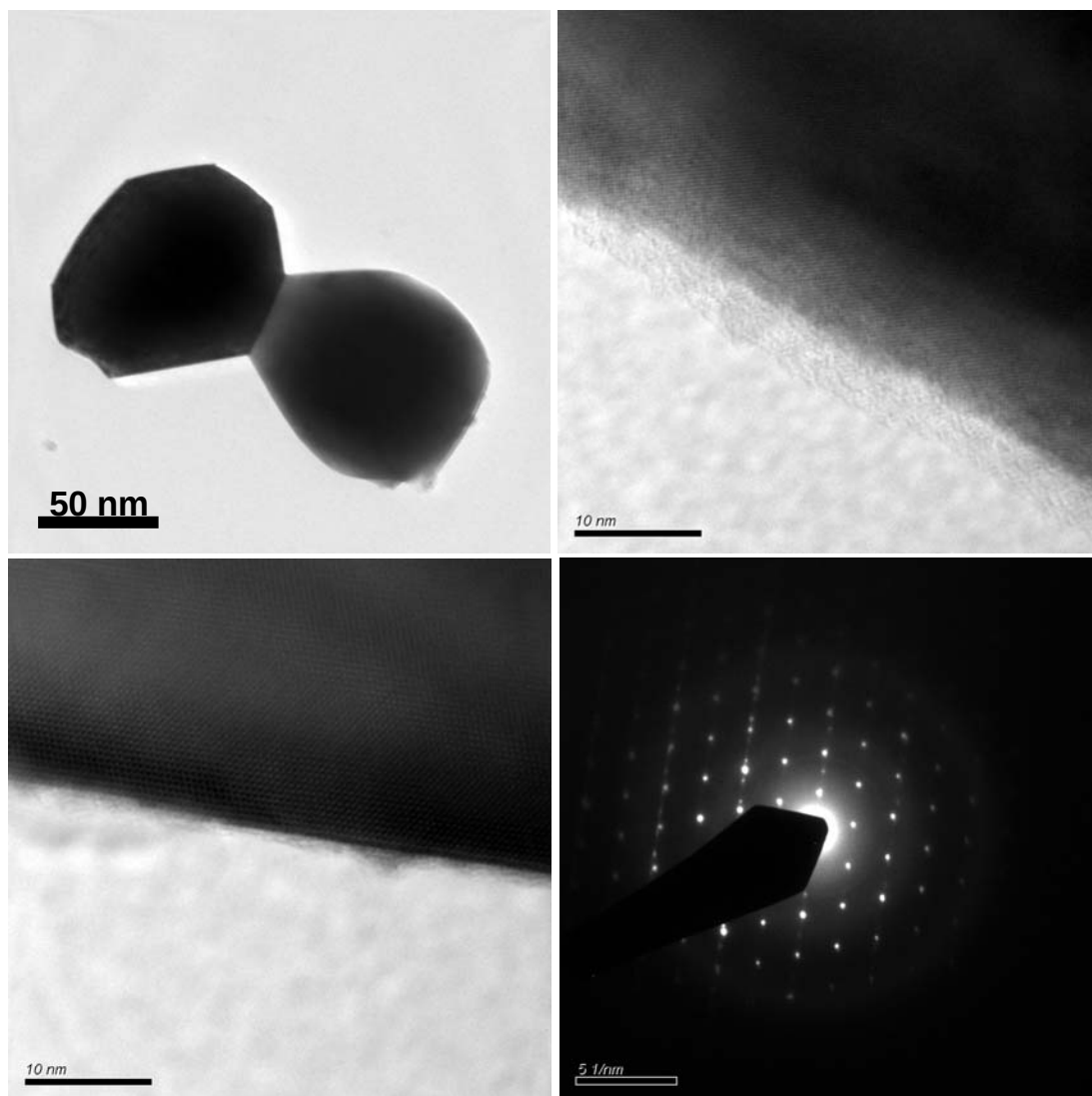


圖 4.4 利用溶膠凝膠法製備的錳鋅鐵氧粉體於氧氣氣氛下煅燒 1000 °C 持溫 2 小時樣品之(a) TEM (b,c) HRTEM (d) SAED 照片。

4-1-2 鎳鋅鐵氧鐵磁粉體

相同於錳鋅鐵氧鐵磁粉體的合成方法，本實驗亦採用溶膠凝膠法製備鎳鋅鐵氧奈米粉體，使用硝酸鎳、硝酸鋅、硝酸鐵為溶膠凝膠法的前驅物，再經高溫煅燒後形成結晶粉體。本實驗中將先驅物置於氧氣氣氛中來改變不同溫度進行煅燒，觀察所得樣品 XRD 繞射峰改變來驗證所合成樣品之粉體晶相、晶格常數與晶粒大小，並且分析討論其粉體形成反應機制。

4-1-2.1X 光繞射分析

圖 4.5 為溶膠凝膠製備之鎳鋅鐵氧先驅物粉末，以 10 °C/min 的升溫速率，置於氧氣氣氛中分別於煅燒至 900 ~ 1200 °C，持溫 2 小時之後所得粉末，作成試片以 X 光繞射分析（Cu 靶，電壓 30kV，掃描速率 4°/min，範圍 20~60 °）以觀察其反應狀況。由散射圖譜知未經熱處理之溶膠凝膠先驅物並無結晶相粉體的產生，該粉體於 900 °C 煅燒 2 小時後已開始形成具尖晶石結構鎳鋅鐵氧粉體，但其 XRD 鋒值不大，當反應溫度升至 1000 °C，此溶膠凝膠合成之先驅物已反應成良好的尖晶石結構錳鋅鐵氧晶相，其於 35.4 °的(311)主峰已生成，顯示無其他不純相出現於樣品中；當反應溫度由 1000 升至 1200 °C，其 XRD 峰值強度越

來越強，表示其結晶性越來越好。圖 4.6 則為鎳鋅鐵氧鐵磁粉體之晶粒大小變化與反應溫度的相互關係，將溶膠凝膠先驅物於氧氣氣氛下煅燒 900 ~ 1200°C 持溫 2 小時，以 X 光繞射分析結果計算 Scherrer 晶粒大小之變化，當反應溫度為 900 °C 時，鎳鋅鐵氧鐵磁粉體的計算所得晶粒大小約為 103 nm，當反應溫度逐漸提高至 1200 °C，所獲得的晶粒則增大至 0.3 μm，故由此知煅燒溫度越高晶粒大小逐漸增大。

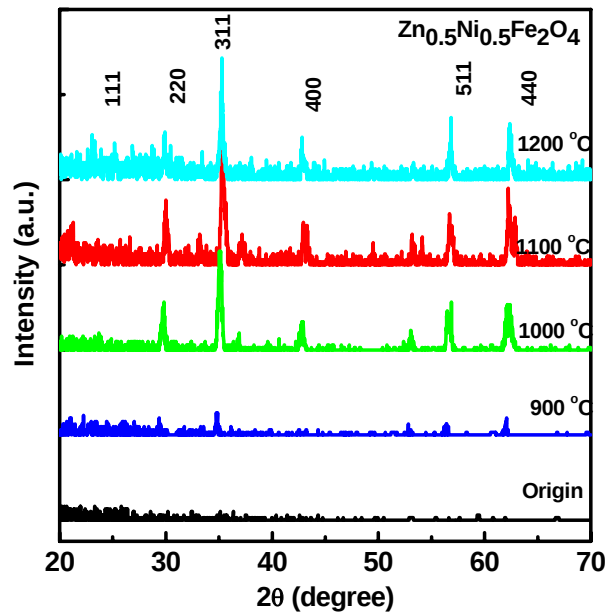


圖 4.5 溶膠凝膠法製備之鎳鋅鐵氧粉體於氧氣氣氛下煅燒 900°C、1000°C、1100°C、1200°C 持溫 2 小時樣品之 X 光繞射分析圖譜。

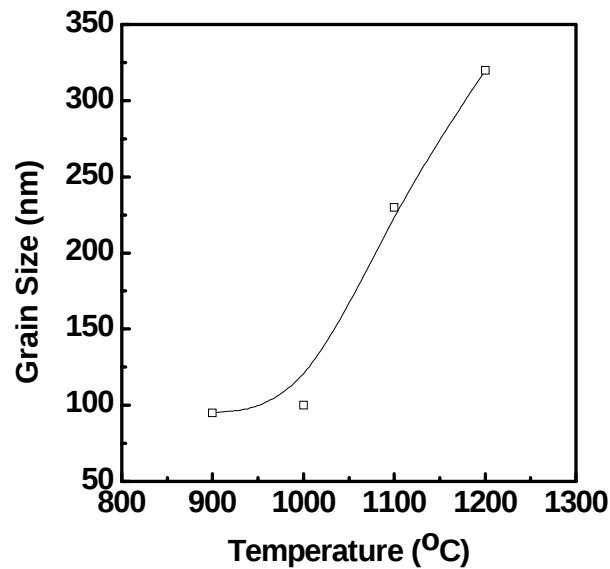


圖 4.6 溶膠凝膠法製備之鎳鋅鐵氧粉體於氧氣氣氛下煅燒持溫 2 小時所合成粉體之晶粒大小變化。

4-1-2.2 微結構分析

圖 4.7 為利用溶膠凝膠法製備的鎳鋅鐵氧粉體於氧氣氣氛下煅燒 900~1200°C 持溫 2 小時樣品之 SEM 照片。由圖上明顯發現經 900°C 與 1000°C 煅燒後其結晶粒子較小，平均晶粒約為 100 nm，根據 X 光繞射分析判斷該粉體應已為鎳鋅鐵氧鐵磁結晶相粉體，其 SEM 微結構圖約呈現其為球形粉體，且凝團現象嚴重；當反應溫度逐漸升高至 1100~1200 °C 時鎳鋅鐵氧粉體結晶快速成長至約 300 nm 大小，晶粒大小相當平均、晶癖明顯且但高溫時凝團現象更顯嚴重。故由照片上知高溫煅燒雖可使晶體結晶性變佳，卻伴隨著晶粒成長。因本計畫要求研究奈米粒子之吸收特性，故宜在較低溫下製備單相之奈米粒子。

圖 4.8 為利用溶膠凝膠法製備的結晶性較佳的鎳鋅鐵氧粉體(氧氣氣氛下煅燒 1000 °C 持溫 2 小時)樣品之穿透式電子顯微鏡影像(TEM、HRTEM)與選區繞射圖譜(SAED)照片。由照片上可知鎳鋅鐵氧粉體於 1000°C 結晶的晶粒大小約為 100 nm，且於該溫度下燒結可明顯發現凝團現象；由選區繞射圖譜可知使用溶膠凝膠法合成之鎳鋅鐵氧磁體為一單晶尖晶石結構。將此 TEM 的結果比對 X 光繞射圖譜，可發現二者的結果是相符的。

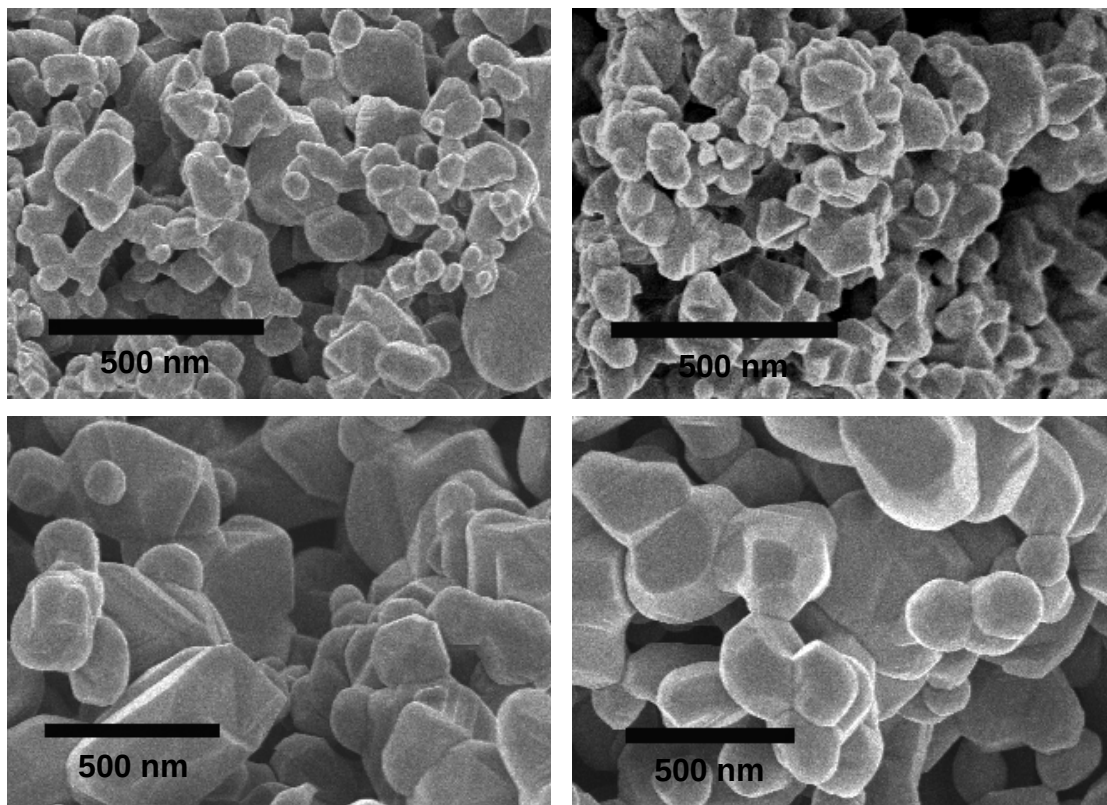


圖 4.7 利用溶膠凝膠法製備的鎳鋅鐵氧粉體於氧氣氣氛下煅燒(a) 900 °C (b) 1000 °C (c) 1100 °C (d) 1200 °C 持溫 2 小時樣品之 SEM 照片。

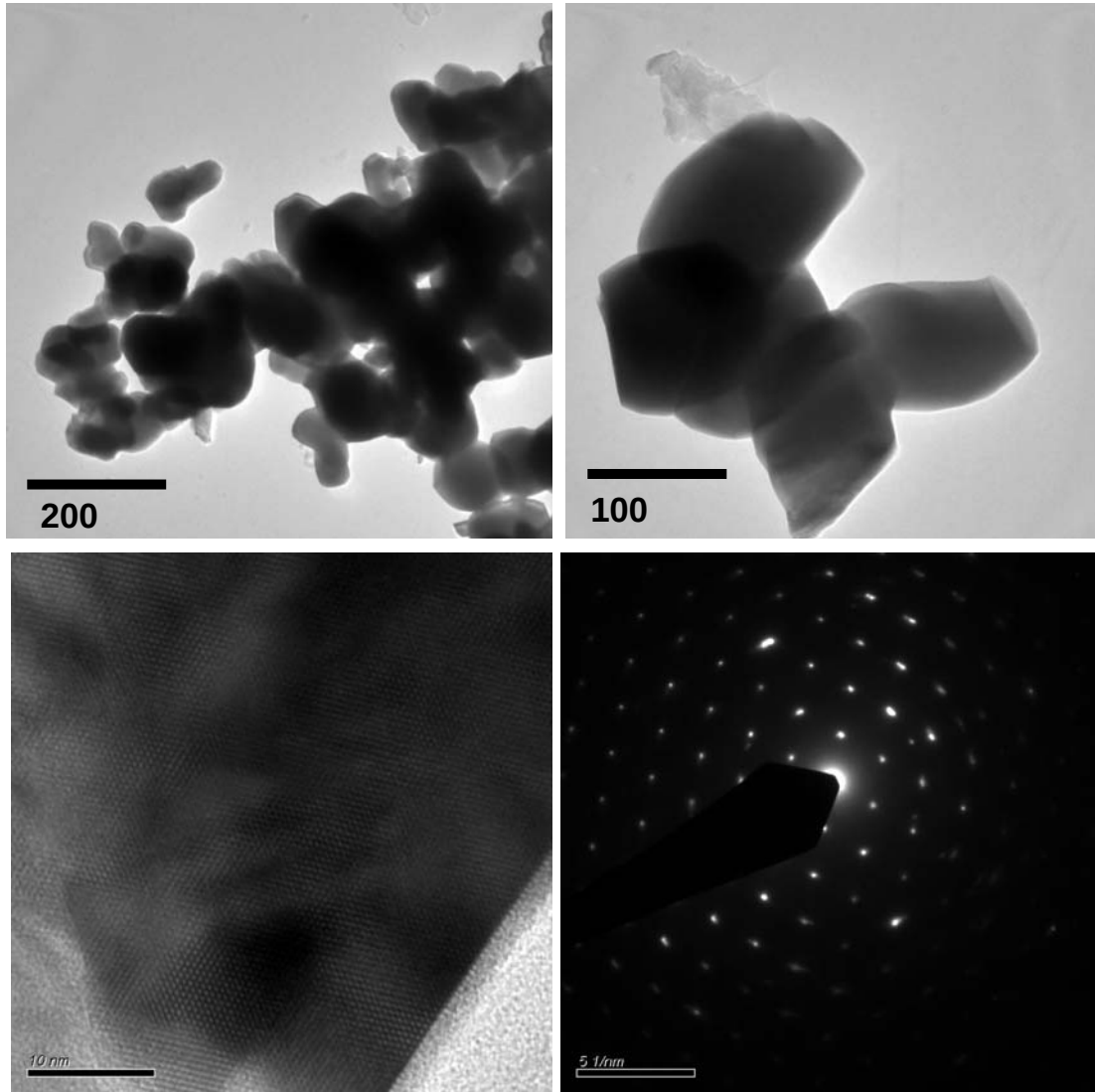


圖 4.8 利用溶膠凝膠法製備的錳鋅鐵氧粉體於氧氣氣氛下煅燒 1000 °C 持溫 2 小時樣品之(a) TEM (b,c) HRTEM (d) SAED 照片。

4-2 電性量測結果之分析討論

4-2-1 不同組成的奈米粉體電磁波吸收特性

在我們先前所製備的鐵磁粉體中，我們選擇錳鋅鐵與鎳鋅鐵氧這兩種起始奈米粉體做為分析的基礎(錳鋅鐵氧粉體平均粒徑大小約為 73 nm、鎳鋅鐵氧粉體平均粒徑大小約為 100 nm)，其中因此吾人先使用這兩種粉體進行簡單的量測，將鐵磁氧粉體分別與油漆溶液以 1:1 的比例混何後，塗布於淨面不銹鋼 304 表面，乾燥後吸收材厚度約為 3mm，從圖 4.9 可以明顯的看出兩種不同粉體吸收材的電磁波吸收特性上的差異。

圖 4.9 是這兩種粉體所製備的吸收材、厚度 3 mm 的不銹鋼 304 以及空腔的反射係數比較圖，在幾個特定的頻率可以發現，鐵磁粉體具有很好的吸收特性，因此，吾人針對幾個吸收頻段較大的頻率位置進行細部的掃頻量測，我們發現在 8.3 GHz、13.4 GHz、18.7 GHz 擁有不錯的吸收特性，由圖上可以知道錳鋅鐵氧磁體與鎳鋅鐵氧磁體在 8.3 MHz 頻段可以有約 7.1 至 7.5 dB 的反射損失，同時其吸收頻寬可以到達約 1.8 GHz，由圖可知其吸收特性以等厚度的不銹鋼 304 為最佳，其可能原因為金屬的電磁波屏蔽特性，若針對兩鐵氧磁粉體而言，以鎳鋅鐵粉體於較低電磁波頻段下具有較佳的電磁波吸收能力；當頻率至 13.4 GHz，錳鋅鐵氧與鎳鋅鐵氧奈米粉磁體皆具有良好的

吸收特性，約為 10.5dB；當頻率攀升至 18.7 GHz，則以錳鋅鐵氧具有較佳的電磁波吸收特性，其吸收約為 15.2 dB 的吸收能力，同時其吸收頻寬也到了約 800MHz 左右。由此可知，錳鋅鐵氧與鎳鋅鐵氧粉體的吸收特性會隨其頻率而改變，不同的頻率下其吸收特性也就不同，對於寬頻帶的電磁波吸收能力而言，已經初步的具有一定的涵蓋能力，可以有效的吸收廣頻段的電磁波。

因此，就針對這兩種基礎粉體，我們可以有一個初步的結論，針對以鐵氧粉體來製備電磁波吸收材而言，因為其內部的磁距震動與極化方式的改變，可以有效的針對特性波長的電磁波發射源產生一定程度的吸收效果，這樣的特性可以讓吾人進行進一步的材料改質動作時有一個參考的數據與結果，可以針對現有的吸收特性加以分析，尋找出最適當的配比與材料改質工程，達到廣頻段吸收的電磁波吸收材特性。

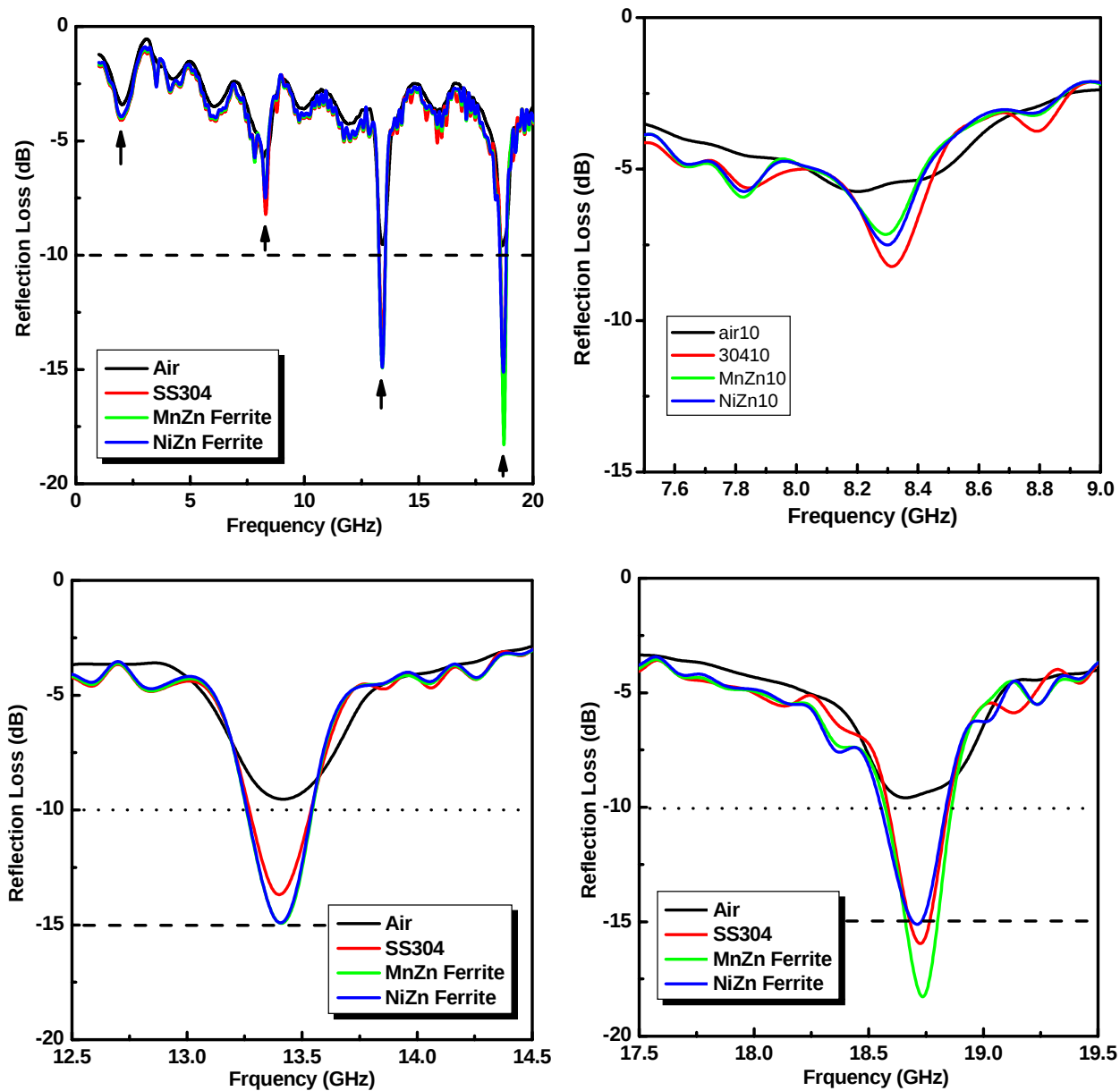


圖 4.9 錳鋅鐵氧、鎳鋅鐵氧鐵磁粉體所製備的吸收材、3mm 厚之不銹鋼 304 以及空腔的反射係數比較圖

4-2-2 不同厚度的奈米粉體電磁波吸收特性

在此同時，我們也針對不同膜厚度的電磁波吸收材特性之影響作一個研究與探討，希望可以藉由這樣的方式，找出奈米電磁波吸收材最佳的厚度配比，如此可以在重量上與施工工法上得到一些時間上的節省與施工繁雜度的降低。

針對此寬頻段的電磁波吸收材而言，厚度的影響預期相當顯著，不恰當的厚度將會導致電磁波與奈米電磁波吸收材產生共振，一旦在某個特定頻率發生材料共振的情況時，將會使得原本良好的吸收特性效果劇降，因此以塗層的觀點而言，所製作的電磁波吸收材其總厚度在數個釐米至一公分以下是一個可以接受的範圍，這樣的量測數據結果也可以同樣的在圖 4.10 忠實的呈現出來，對於兩種材料(錳鋅鐵與鎳鋅鐵電磁波吸收材)而言，較佳的最大厚度均差不多約在 2 至 3 個釐米之間，太厚的厚度反而導致電磁波在材料內部產生劇烈的共振效果，降低了電磁波吸收的能力。

此外，在塗佈的過程中，較厚的厚度也將會導致另一個問題的發生，也就是較厚的塗層厚度將會使得膜表面的平整性大為降低，平整性降低之後，對於電磁波吸收材而言又是另一個致命的傷害，在一個不平整的表面，將會發生許多繞射與散射的情況，導致降低吸收係數，也就是說較厚的塗層與較差的平整度會降低整體電磁波吸收材的

吸收能力。

因此，在選擇適當的厚度上，我們經由吸收係數的量測結果可以知道，在兩至三個釐米之間的鐵氧磁體厚度將可以最為有效的吸收 GHz 頻段的電磁波，同時吸收的效果可以在約莫 10 至 12 個 dB 之間，相當的符合我們所需要的特性，當然其最佳的吸收頻段也因為選擇的導波管量測方式的緣故在 8.13 GHz、12.7 GHz、15.34 GHz、18.92 GHz 擁有較為顯著的電磁波吸收特性。

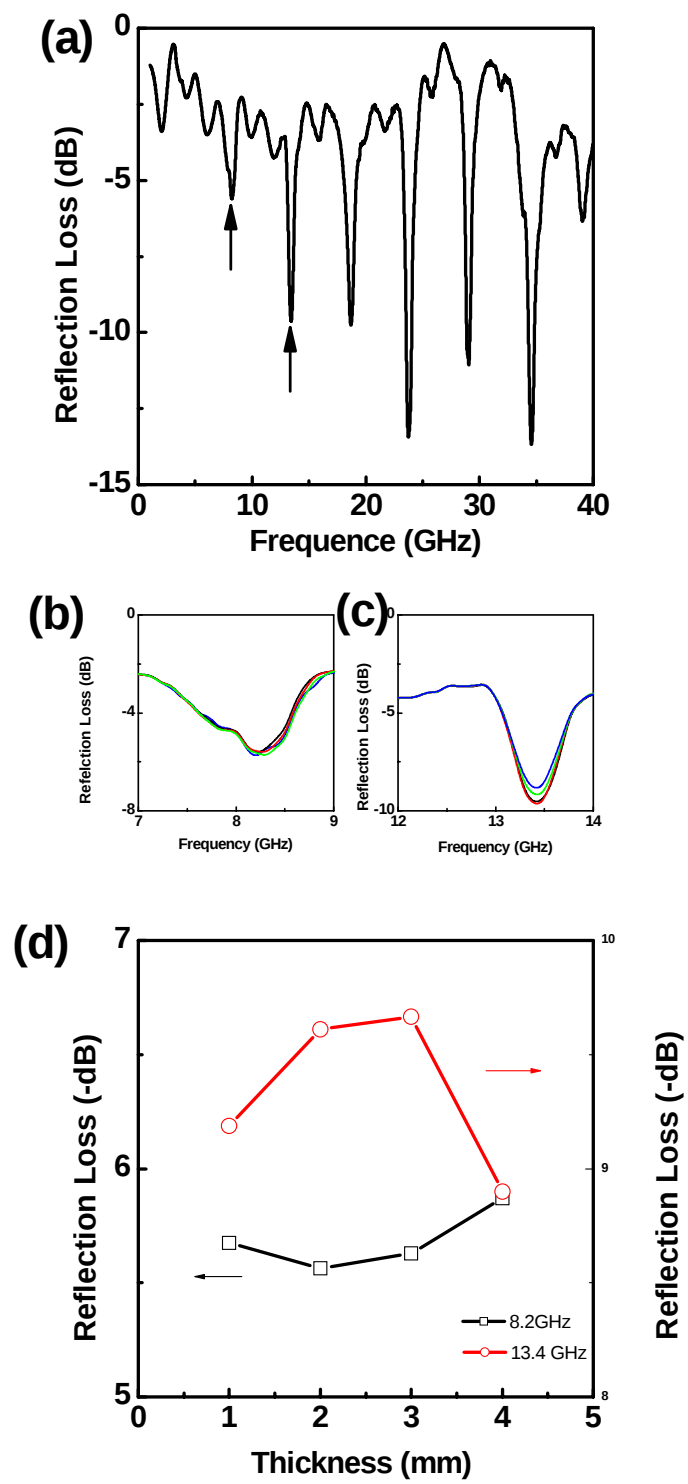


圖 4.10 厚度對電磁波吸收的影響

4-2-3 不同奈米粉體摻雜之複合電磁波吸收材吸收特性

接著，為了能夠可以得到更好的吸收特性，我們預期加入一些奈米金屬粉體，將可以大大的改善吸收的特性，因為奈米金屬粉體其具備有較大的相對表面積，在混合進入電磁波吸收材時可以提供較有效的吸收截面積，可以在電磁波吸收材的內部提供更多的波傳導與吸收路徑，如此一來，就可以再一次的降低反射係數與提高吸收損失，就可以提高目前所研製的奈米電磁波吸收材的電磁波吸收特性。

當然，在粉體的添加上，也要加以適度的選擇，從文獻上與過去的經驗中得到，針對奈米電磁波吸收材來說，要增加其吸收特性的方式有很多，例如加入金屬型的幾何構型或是增加內部的空間支持物來增大吸收空間等等，但是考慮到金屬奈米粉體的諸多好處之後，選擇以直接添加作為一個比較的因素，同時選擇鐵鋅鎳等的金屬粉體與其他數個不同的粒徑大小約為 100 nm 金屬氧化物加以添加在我們所製備出的錳鋅鐵氧粉體平均粒徑大小約為 73 nm、鎳鋅鐵氧粉體平均粒徑大小約為 100 nm 鐵磁粉體之中，其中鐵氧磁粉體:金屬粉粉體:油漆溶液之重量百分比為 20 % : 20 % : 60 %，利用不同的配比塗層混合製作出不同奈米金屬粉體添加的奈米電磁波吸收材。

我們針對不同的添加成份一一的加以量測，其電磁波吸收特性所得到的特徵波形與反射係數圖可以如圖 4.11 所示，在圖中可以發現，

幾種金屬性的奈米粉體如鈷、鎳、鈺可以增強電磁波吸收的效果，這也驗證了我們當初所做的推論，在奈米電磁波吸收材內部提供較多地有效截面積與吸收路徑來增強其吸收材的吸收效果。

透過這樣的摻雜與量測分析可以發現，鈷、鎳、鈺的奈米金屬粉體添加對於奈米電磁波吸收材而言有比較顯著的增強吸收效果，此外，氧化鐵與氧化鎳的適當比例添加也可以增強吸收特性，圖 4.12 為錳鋅鐵氧粉體與其他的金屬粉體或是金屬氧化物粉體以 20 wt% : 20 wt% (60 wt%的熱固性高分子)的配比製備而得電磁波吸收材，由圖可知氧化物粉體雖然也可以增強其吸收效果，但是增強的效果並不顯著，再以鎳金屬粉體的添加為例，20 wt %的鎳金屬摻雜可以有效的將反射損失於 15 及 18 GHz 的頻段內降至約-15 至-17 dB 的水準，其他的粉體如奈米碳管與氧化鋅奈米線皆有良好的吸收特性，但這一類的一為吸收粉體的吸收原理到目前為止尚不清楚，因此未來將可以針對這樣的添加在進行較為完整的研究。

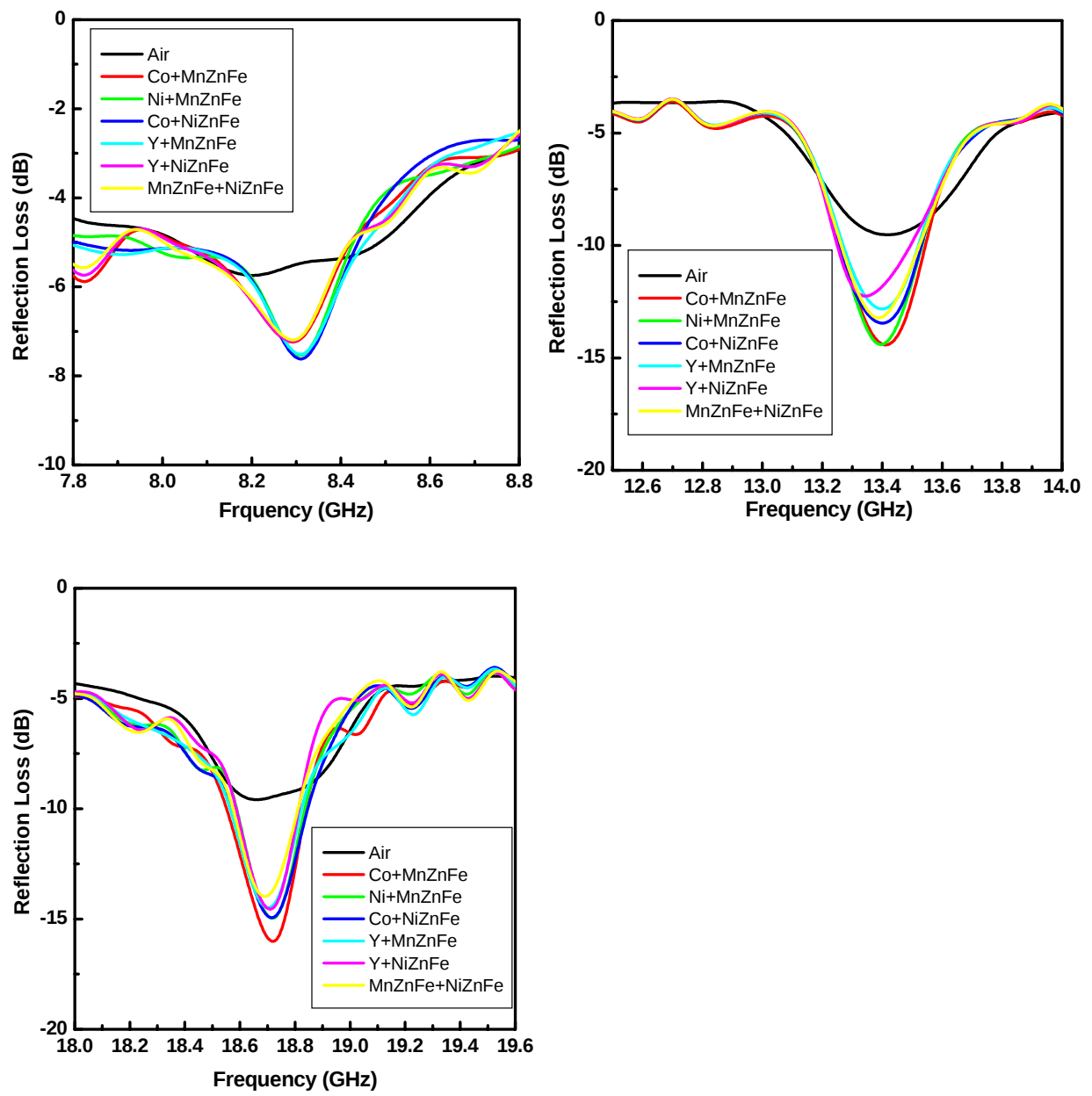


圖 4.11 電磁波吸收特性的特徵波形與反射係數圖

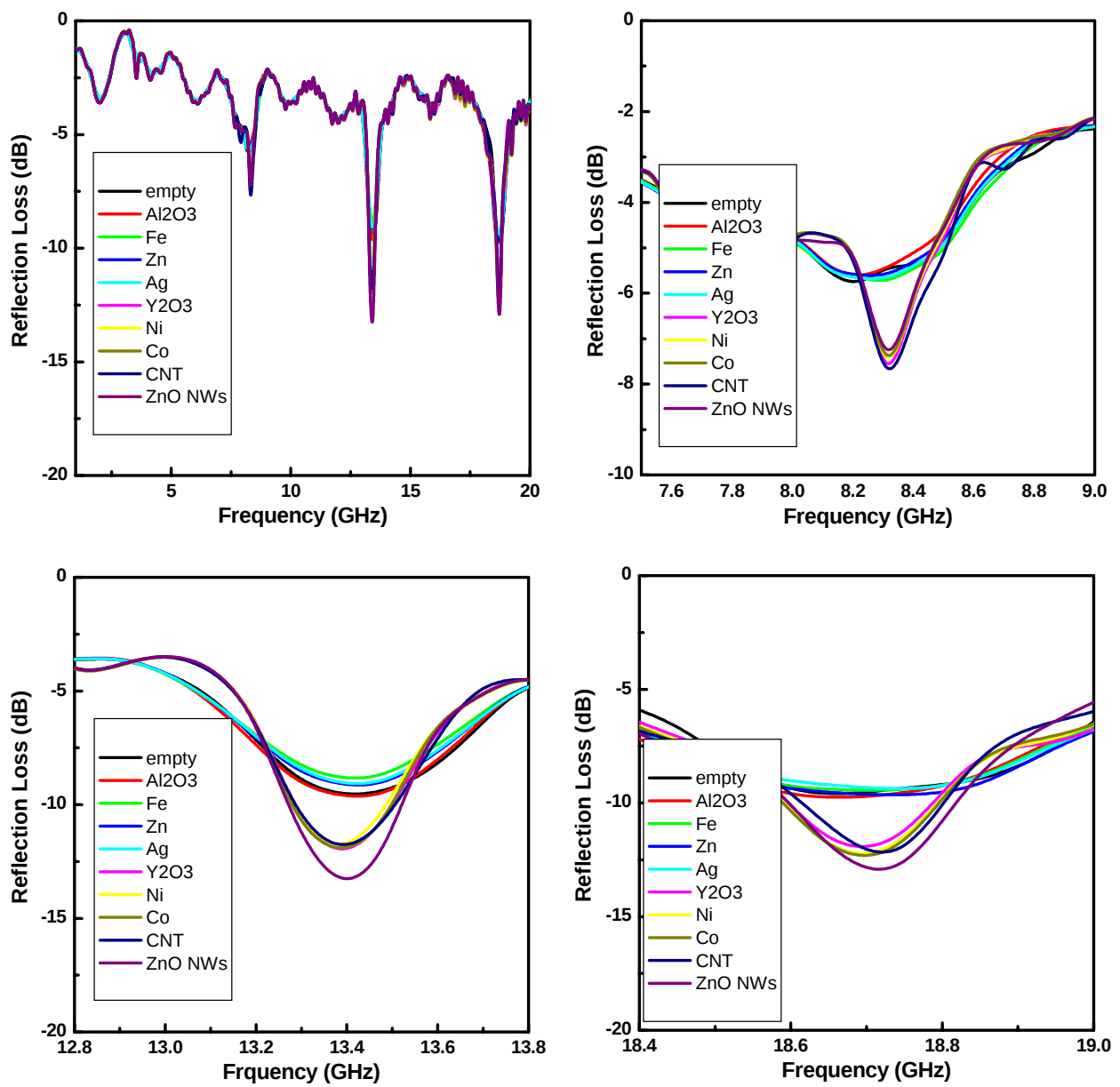


圖 4.12 不同添加物的電磁波吸收特性的特徵波形與反射係數圖

4-2-4 複合吸收材之電磁波吸收特性

在此同時，我們也針對了不同性質的複合材料吸收做了一些研究與分析，我們採用熱塑性高分子與奈米粉體的組合來研究其電磁波吸收特性，其中，高分子可以經由熱塑的過程加以型塑形成各種形狀，這種特性對於將來電磁波吸收材的各種應用上具備有相當的潛力，不過因為熱塑性高分子其本身的電磁波吸收特性不佳，因此在加入了適量的電磁波粉體後，可以使得電磁波粉體應用於各種我們所需要的形狀，同時又具備有吸收的特性，針對無法以塗佈方式覆上電磁波吸收材的形貌或物體就可以此種方式先塑形再貼附於其上，同樣達到電磁波吸收的目的。

針對這樣的材料，我們是以平面的方式來製作製作，形成平板型的複合型奈米吸收材，然後量度其電磁波吸收特性；平板式電磁波吸收材的製備過程為將錳鋅鐵氧粉體:欲添加之奈米粉體:熱塑性高分子溶液以 20 wt%: 20 wt%: 60 wt%的配比以三軸滾輪混合，均勻塗佈於不銹鋼 304 金屬板表面後，置於 95 °C 之烘箱乾燥 2 小時後得薄膜厚度 3mm 之平板式電磁波吸收材，量測後發現這樣類型的材料也擁有不錯的吸收特性，如圖 4.13 所示，我們可以發現這一類型的吸收材料於低頻的吸收效果較不顯著，大約在 8.13 GHz、12.7 GHz、15.34 GHz、18.92 GHz 擁有較為顯著的電磁波吸收特性，且反射係數也可

以降到約為 10 dB 附近，且吸收頻寬也較以油漆溶液作為基底實要來的寬，其可能原因為使用高分子溶液時由於溶液極性不同，使得粒子的分散效果較佳，使得電磁波進入吸收材內時較容易被這些奈米粉體所吸收，可以說是一種特性良好的電磁波複合型材料，而在製作與量測的過程中發現，粉體的含量也要有一定的比例，一般而言各式的奈米粉體需要佔有約四成以上的含量，才會有比較好的吸收特性曲線分布，但過多的粉體會造成凝團現象嚴重塗佈不易，薄膜表面的平整度差，易將欲吸收的電磁波反射；此外厚度對於特性之影響考量，須以適度的厚度(約 3mm)來製作，因為厚度較厚的薄膜表面平整度不易控制會大幅降低電磁波吸收的特性。

另一方面，我們也針對這樣的複合型材料做不同金屬粉體（如錳、鐵、鋅、鎳與鈷）的添加與電磁波吸收的關係相互分析，可以發現這一類型的結構可以在高頻時經由添加不同的奈米金屬粉體而在高頻時得到不錯的吸收特性，在高頻時添加錳或鎳的吸收特性最為顯著，而在一般的較低頻則是經由添加可以充分的降低原先的反射損失，達到寬廣頻段的良好電磁波吸收特性。

因此，對於電磁波吸收材以此種複合型式製作時，吾人必須要相當注意到粉體與膠合物的配比問題，一旦配比上出現些微的差異就很可能會影響到電磁波吸收能力的良窳，一般而言這一類的吸收材都較

先前的幾種形式在高頻段的電磁波吸收上有較為優異的表現，在 20 GHz 以上甚至更高的頻段有不錯的電磁波吸收能力，這個部份也是未來可以研究著重點之一。

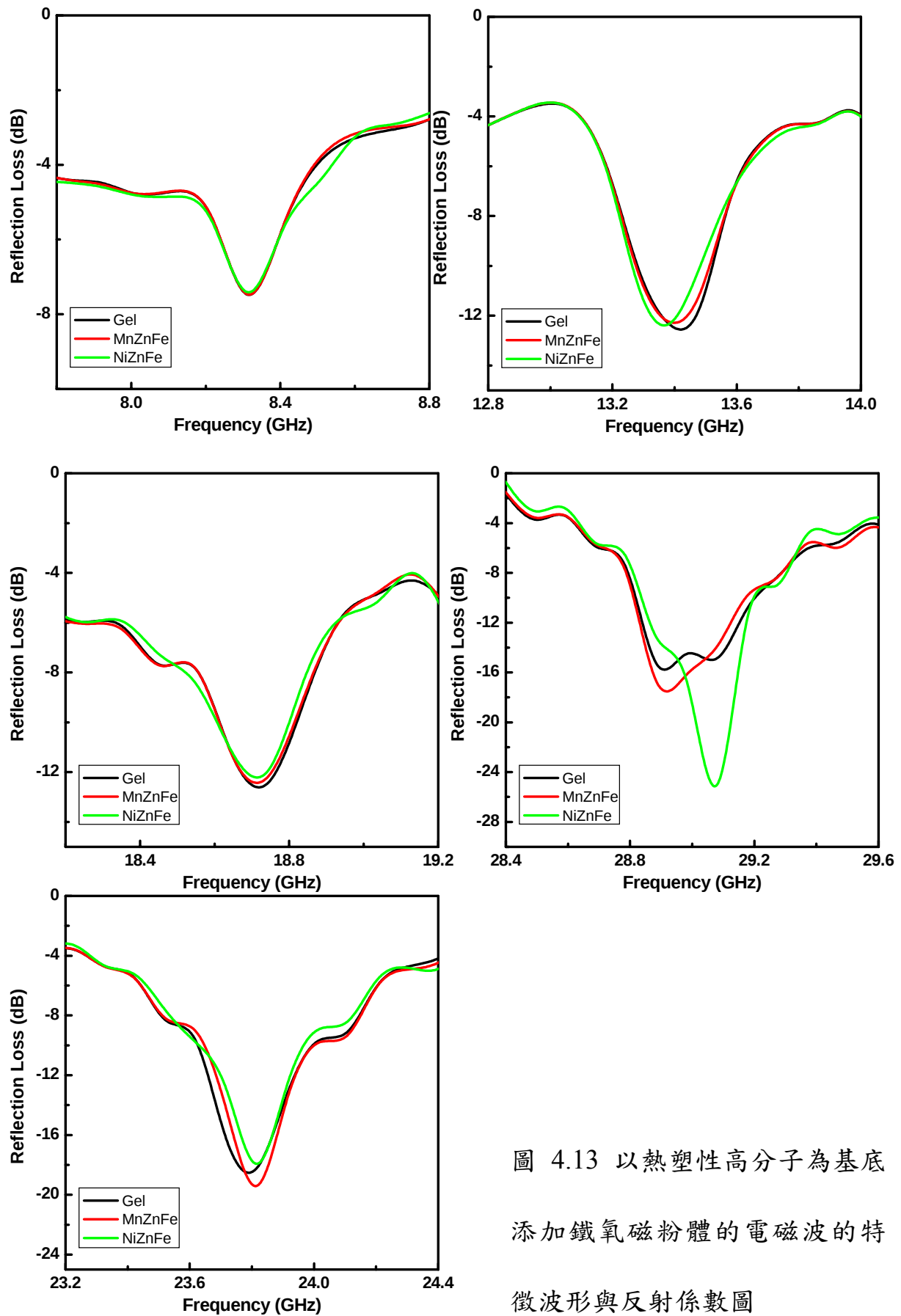


圖 4.13 以熱塑性高分子為基底
添加鐵氧磁粉體的電磁波的特
徵波形與反射係數圖

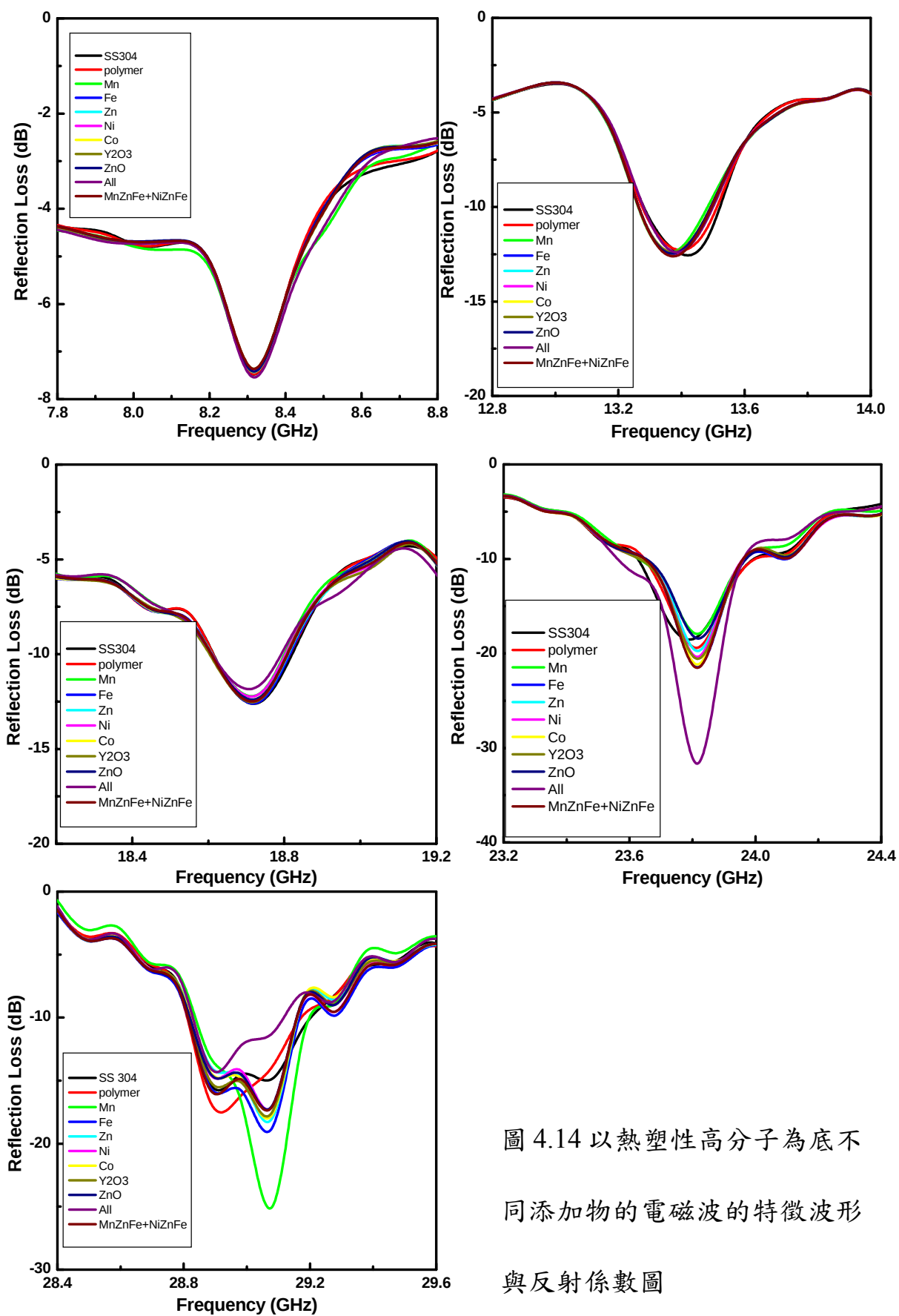


圖 4.14 以熱塑性高分子為底不同添加物的電磁波的特徵波形與反射係數圖

第五章 結論

總的來說，針對於奈米粉體所製作的電磁波吸收材料而言，透過這幾個不同形式樣品的吸收性質量測後，可以得到一些初步的結果與分析的結論，分別一一的詳述於下。

一、在量測的方式上，運用導波管的量測方法來量測電磁波吸收材料，可以說是一個新的嘗試，這樣的方式具備有屏蔽效果佳的特點，可以完全的屏除掉外界的電磁波干擾而得到較為精確的電磁波吸收量測結果，同時也是一個平行波導的微波傳輸發射模式，可以較為準確的模擬出現階段微波發射的實際情況，在波導的正中央設計一個可以屏蔽電磁波的吸收材料，可以充分的對這樣的吸收材做全面性的量測而得到較為精確的數據分析資料，本計畫所採用的量測方法可以去除掉散射與干涉的微波問題，針對吸收係數與反射損失可以精確的加以估算。

此外，這樣的量測方式也可以迅速的知道粉體所製作出的吸收材是不適合做為量測的標的，特別是在膜厚度的敏感性方面，因為這樣的量測方式對於厚度的敏感度相當優異，當有反射損失值突然增高的時候，就可知道所採用的微波吸收材厚度已經產生微波共振效應，不適合作為研究後續的分析使用，藉此來掌握製作奈米微波吸收材料的適當厚度。

同時，這樣的導波管形式來量測電磁波吸收材料也具備有節省空間的優點，因為隨著電磁波發射頻率不斷的增高，其薄膜吸收尺寸也就可以隨之降低，因此在探討 GHz 級的電磁波吸收時，可以導入這樣的量測方式，對於未來的高頻量測上是相當有幫助的，不過此法的缺點是對於其他電磁波的性質而言，以導波管的方式會有數據分析不夠縝密之處，例如在電磁波吸收材料與電磁波散射的分析上，需要運用其他不同的電磁波量測與分析工具來得到較為完整的分析。

二、在粉體的選擇上，我們發現選擇偏鐵磁性強的奈米粉體來製作電磁波吸收材具有較佳的吸收特性，此外，採用高溫超導陶瓷粉體來製作也會有良好的效果，另外有一些複合形式的奈米粉體也會對電磁波吸收材的研究上有一些助益，諸如現今許多奈米複合殼層的粉體，也會對這樣的研究有幫助，以此次的研究來說，我們發現許多金屬奈米粉可以經由適量的添加進入鐵磁粉體中得到不錯的電磁波吸收特性，這些像鐵鎳鈷等等的奈米粉在未來的電磁波吸收材料應用時可以扮演許多具足輕重的角色，透過其增加奈米粉體有效截面積以製造更多極化震動的吸收模態，可以增強電磁波吸收材的吸收效果與特性。

三、在厚度及摻雜的運用上，厚度的影響我們可以用一個簡單的敘述加以說明，當電磁波進入到吸收材料時，如果吸收材料的厚度非

常接近電磁波共振時所需的四分之一波長，此時也就相當的容易發生電磁波共振的情況，一旦這樣的情況發生就會大大的減低電磁波吸收材料的性質，另外，也就是當鐵磁性的電磁波吸收材料厚度不斷增加的同時，會使得內部的極化能力相對也越為提高，當極化值與電磁波的相互影響增大的時候，也就會容易削弱了電磁波吸收的特性，因此針對厚度上的考慮是我們所必須要注意的；在此次的實驗當中發現膜厚度為 3mm 為最佳電磁波吸收材厚度，由於考慮到塗佈時的便利性與均勻度，其溶液與粉體的混合則為 6:4，由於各粉體的添加對於吸收材有不同的影響力，應考慮其最重要的吸收頻段而選擇其適當之配比。

因此，我們可以導入多層的電磁波吸收材，運用各式不同材料的相互搭配，達到多頻段吸收的目的，這樣一來也就可以稍稍的降低對於電磁波吸收材料的厚度敏感性，同時運用不同種類的材料相互搭配，可以增強多頻段電磁波吸收的效果，達到廣頻域吸收的需求。

從攙雜的角度著手來說，我們使用不同的奈米金屬粉體做為攙雜的主要項目，是因為這一些奈米金屬粉體都可以提供許多其他的電磁波傳導路徑，簡單來說也就是使得電磁波在進入鐵磁性奈米粉體吸收材料時，有更多的途徑去讓鐵磁性的電磁波吸收材吸收轉換為其他的功函式或者是其他種類的能去釋放，而降低了反射損失，達到吸收電

磁波的目的，這一方面的研究現在才剛剛開始進行，對於這樣的機制還不是有一個很確切的說法與結論，不過，當添加的比例過多時又會降低電磁波吸收材的吸收特性，因此，我們可以說初步的發現添加這一類材料有助於吸收而沒有辦法提出一個較具學理性的解釋與推論。

此次研究的重點在於平版型的電磁波吸收材料，這樣的研究來說只是電磁波吸收材料的一個基礎，針對粉體與鐵磁性質的掌握及製備方式是此次研究的重點，吾人可以透過粉體製備的過程與流程的控制，得到一個很好的奈米鐵磁性粉體，而經由初步的實驗與電磁波量測吸收的測試，可以發現其具備有相當程度的電磁波吸收特性，在經由不同的改質過程可以使得其吸收電磁波的特性與性質更加完備，達到實驗上所能夠涵蓋的範圍與需求。

第六章 未來展望

1. 使用溶膠凝膠法製備奈米級鐵氧粉體，雖可製備結晶良好之鐵氧粉體，但其先天高溫燒結成像的限制，導致粉體粒子較大，且其凝團現象嚴重，雖以研鉢研磨並以沉降法篩檢，但粒子仍就達 100 奈米，為製備粒徑較小之鐵氧粉體並減少其凝團現象，未來可採用低反應溫度的水熱法方式來製備粉體，也可避免凝團現象使分散更為容易。
2. 於本年度的實驗中可之介電陶瓷粉體的添加無法增強電磁波的吸收能力，反之奈米級之金屬粉體卻有助於電磁波的吸收；故於未來的研究中可採用殼層奈米級複合式結構，先以水熱法製備出具有良好晶相之奈米粒子後，在於其外鍍上導電良好之金屬殼層，應可發揮其電磁波吸收之效用。

第七章 參考文獻

- [1] W. W. Salisbury, U. S. Patent No. 2599944 (1952).
- [2] K. J. Vinoy, R. M. Jha, “Radar Absorbing Materials From Theory to Design and Characterization, Kluwer Academic (1996).
- [3] J. C. Liu, S. S. Ho, S. S. Bor, IEEE Proceeding-H, 140, 414 (1993).
- [4] W. D. Callister, John Wiley & Sons Inc, 5th edition (2000).
- [5] R. E. Collin, “Foundation for Microwave Engineering” Mcgraw-Hill, 221~237 (1996).
- [6] T. Aoyama, K. Hirota and O. Yamaguchi, J. Am. Ceram. Soc., 79, 2792 (1996).
- [7] S. komarneni, E. Fragean, E. Brevel and R. Roy, J. Am. Ceram. Soc., 71, C26 (1988).
- [8] M. Rozman and M. Drofenik, J. Am. Ceram. Soc., 81, 1757 (1998).
- [9] M. Rozman and M. Drofenik, J. Am. Ceram. Soc., 78, 2449 (1995).
- [10] K. Oda, T. Yoshio, K. Hirata and K. Takahashi, J. Jpn. Soc. Powder Metall., 29, 170 (1982).
- [11] K. Higuchi, S. Naka and S. Hiraano, Adv. Ceram. Mat., 3, 278 (1988).

- [12] S. Wada, T. Suzuki and T. Noma, J. Cerm. Son. Jap., 103, 1220 (1995).
- [13] A. Chittofratt and E. Matijevic, Colloids and surface, 48, 65 (1990).
- [14] M. B. Amin and J. R. James, Radio Electron. Eng., 51, 209 (1981).
- [15] K. Sattler, J. Muhlbach, E. Recknagel, Phys. Rev. Lett., 45, 821 (1980).
- [16] S. Ruan, B. Xu, J. Mag. Mat. 212, 175 (2000).
- [17] C. Rath, S. Anand, R. P. Das, K. K. Sahu, S. D. Kulkarni, S. K. Date and N. C. Mishra, J. Appl. Phys., 91, 2211 (2002).
- [18] Y. Yoshikawa and K. Tsuzuki, J. Am. Ceram. Soc., 72, 31 (1990).
- [19] Z. X. Tang, C. M. Sorensen, K. Y. Klubunde and G. C. Hadjipanayis, J. Colloid. Interface Sci., 146, 38 (1991).
- [20] D. E. Baker and C. A. Neut, Microwave Journal, 31, 95 (1988).

致謝

本研究得以順利完成，主要得力於多方的協助與討論，在此特別感謝國科會（NSC 93-2216-E-009-003）、中科院鄒正德博士，交通大學材料所林鵬教授及博士班學生盧俊安，清大貴儀材料分析余勝德先生與陳怡蕙小姐，交大貴儀陳聯珠小姐等人的大力協助。