

奈米鐵碳複合材料製作及其釐米波吸波特性研究

張清志^{1*} 黃其清² 王哲釗²

¹國防大學理工學院 國防科學研究所

²國防大學理工學院 化材系

摘 要

本研究是針對微波 2-18 GHz 波段作新穎吸波材料之研發，希望能研發出質輕、厚度薄、吸收性佳之吸波材料。運用奈米鐵碳複合粉體與聚氯丁烯橡膠混練，調配製成重量百分比 60%、長 15cm×寬 15cm×厚度 0.2mm-3.5mm 之複合吸波片，並探討複合吸波材料在不同厚度、含碳組成比例等對電磁特性之影響。實驗結果顯示重量百分比 60% 厚度 1.0mm 之 Fe₃O₄/3C 及 Fe₃O₄/4C 吸波材分別在 16.5 GHz 及 15GHz 具有最大反射損失 20 dB 以上，且其反射損失在 10dB 以上皆有 4 GHz 頻域寬。Fe₃O₄/1C -60wt% 之吸波片厚度在 2.5mm-3.5mm 及 Fe₃O₄/2C -60wt% 之吸波片厚度在 2.5mm-3.0mm，最大反射損失皆在 20dB 以上，此結果為微波吸波材料發展提供基礎研究之參考。

關鍵字：微波吸波材料，奈米吸收劑，奈米分散技術

The study of Nano iron carbon composite materials and centimeter wave absorbing properties

Ching-Chih Chang^{1*}, Chyi-Ching Hwang², and Je-Chung Wang²

¹School of Defense Science, Chung Cheng Institute of Technology, NDU

²Department of Applied Chemistry and Materials Science, Chung Cheng Institute of Technology, NDU

Abstract

This study is to develop a new microwave absorption material with lighter, thinner, and higher absorption performance. Mixing Fe₃O₄ nano particle powders coating with different proportions of carbon (Fe₃O₄/1C -Fe₃O₄/4C) and rubber to make composites which are composed of wt60%, length of 15cm, width of 15cm, and thickness from 0.2mm to 3.5mm. The effect of nano Fe₃O₄ coating with different proportions of carbon, thickness, and weight percent on the electromagnetic properties of composite is investigated. Experimental results show that Fe₃O₄/3C and Fe₃O₄/4C with wt60%, thickness of 1.0mm absorbers have the maximum reflection loss value above 20dB appears at 16.5GHz and 15GHz. Meanwhile, the corresponding bandwidth of each reflection loss value above 10 dB is about 4 GHz. The wt60% Fe₃O₄/1C absorbers with thickness form 2.5mm to 3.5mm, and the wt60% Fe₃O₄/2C form 2.5mm to 3.0mm both have the maximum reflection loss value above 20dB. These results could be a valuable reference for the development of microwave absorption material.

Keywords: microwave absorbing materials, nano absorbent, nano dispersion

文稿收件日期 99.11.24; 文稿修正後接受日期 100.6.7; *通訊作者

Manuscript received November 24, 2010 ; revised June 7, 2011 ; * Corresponding author

一、前言

隨著電子科技的發展，許多電磁輻射之問題日益嚴重，不僅產生電磁干擾 (electromagnetic interference, EMI)，而且嚴重威脅人類健康。利用微波吸收材料 (microwave absorber) 是減少電磁波輻射污染的有效途徑之一。微波吸收材料或稱雷達吸波材料 (radar absorbing material, RAM) 具有特殊之電磁特性，能將入射之電磁波能量轉化成熱能，以減少電磁波之反射能量，目前已廣泛使用於隱形戰機 (stealth jetfighter) 之反雷達偵測、電子設備之抗電磁干擾以及防電磁輻射洩漏影響人員健康等領域 [1]。雷達隱形技術結合電磁波學、材料科學、飛機設計製造等多門學科之技術，其主要目的在提高反雷達探測的能力，透過外型特殊設計、電子干擾對抗、使用雷達吸波材料等方法來達到降低雷達反射截面 (radar cross section, RCS)，使目標在受測方向不反射或減少反射雷達波，以實現隱形的目的 [2]。

傳統的吸波材料鐵氧體、金屬微粉及碳纖維等相關吸收劑所製成吸波材料之隱形頻帶窄、吸波能力不夠強、較厚且面密度較大，很難滿足實務要求。奈米材料 (尺寸 1~100nm) 由於具有量子尺寸效應、宏觀量子隧道效應以及介面效應等作用，使其在光、電、磁等物理性質方面發生質的變化，不但電磁損耗增大，而且兼具吸波、透波及偏振等多種功能，同時具有寬頻帶、相容性好、質量小、吸收強、厚度薄、環境穩定性好等特點。目前應用於吸收體之奈米吸收劑主要有奈米金屬與合金吸收劑、奈米碳黑與金屬複合吸收劑、奈米碳管與金屬複合吸收劑及多層奈米膜複合吸收劑等，其吸波特性優於單一奈米金屬粉體，在電磁波衰減 10dB 的頻寬可達 3.2GHz、諧振頻率點均低於 20dB，其吸波特性主要因素為複合材料中各元素比例、粒徑及合金粉的顯微結構 [3]；美國明尼蘇達採礦製造公司利用中空玻璃球以濺渡方式製造奈米薄膜吸收劑，對正向入射電磁波在 9.5~11.5GHz 內衰減達 10dB，在 7.5~20GHz 小於 5dB，這種多層奈米顆粒薄膜吸收材料由於在每個粒子都經過適當匹配設計，可大大提升吸收效果 [3]。美國研製出的“超黑粉”奈米吸波材料，對雷達波的吸收率大於 99% [4]。法國研製的金屬奈米微屑作填充

劑的吸波材料在 50 MHz~50 GHz 都有良好的吸波性能 [5]。中國大陸有關磁性鐵氧體奈米微粒的合成及其性能的研究文獻較多，王小紅等用化學共沈法製備了平均粒徑為 5 nm 的 Fe_3O_4 超微粒子，並研究了該超微粒子磁性能、細微性與工藝條件的關係 [6]。

從上述奈米材料特性與發展綜觀，奈米材料因粒徑小，致使物理特性及材料的活性皆優於同物種之微米級材料，使得奈米材料設計應用於電磁波吸收體極具發展潛力。美、法、德、日等國家都把奈米吸波材料作為新一代隱形材料加以研究和開發 [7-9]。

二、實驗

2.1 實驗材料

本實驗使用松星奈米科技製作商用奈米吸收劑，利用化學沈澱法將奈米 C 及奈米 Fe_3O_4 均勻分散混合後，製作奈米複合吸收劑，再將聚氯丁二烯橡膠與奈米複合吸收劑製成複合吸收片，製作所需材料如表 1 所示，奈米複合吸收劑組成比例如表 2 所示。

表 1. 膠片材料

聚氯丁二烯橡膠	($\text{Fe}_3\text{O}_4/1\text{C}$)	促進劑 Na22
	($\text{Fe}_3\text{O}_4/2\text{C}$)	
	($\text{Fe}_3\text{O}_4/3\text{C}$)	
	($\text{Fe}_3\text{O}_4/4\text{C}$)	
促進劑 MBTS	促進劑 氧化鋅	分散劑 T-78

表 2. C 與 Fe_3O_4 之組成比例

No	Fe_3O_4 及 Carbon 混合材料			吸收劑
	Fe_3O_4	C	Rubber	
#1	52.5%	7.5%	40%	($\text{Fe}_3\text{O}_4/1\text{C}$)-60wt%
#2	45%	15%	40%	($\text{Fe}_3\text{O}_4/2\text{C}$)-60wt%
#3	37.5%	22.5%	40%	($\text{Fe}_3\text{O}_4/3\text{C}$)-60wt%
#4	30%	30%	40%	($\text{Fe}_3\text{O}_4/4\text{C}$)-60wt%

2.2 製作流程

將吸收劑及氯丁二烯橡膠經雙滾筒進行第一道均勻混合後，再加入分散劑及促進劑進行第二道均質混合，將精準控制生胚出片厚度，再將生胚裁成15cm×15cm之大小試片，將生胚試片放入15cm×15cm公分之模具中進行熱壓成型加工，加工條件為加熱溫度170°C，壓力控制在100kg/cm²，加熱時間為6分鐘，製作流程如圖1所示。

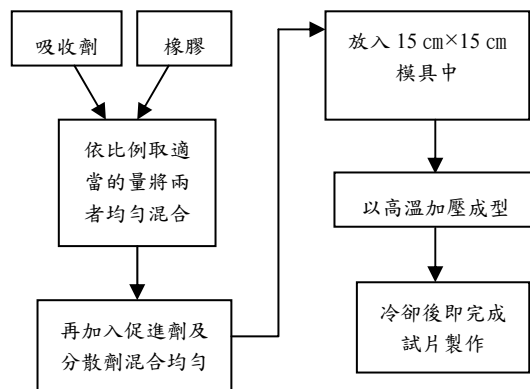


圖1. 奈米複合吸收材料製作流程

2.3 實驗方法

以1C /Fe₃O₄-4C/Fe₃O₄混合聚氯丁烯橡膠混煉，裝模熱壓製成厚度從0.2 mm至4.0 mm等尺寸的吸波片。先以編號#1~#4吸波片各別取厚度1mm進行相對介電係數(relative permittivity)及相對導磁係數(relative permeability)實部及虛部量測(參考3.4.1節)，將量測值代入電腦模擬運算，分析可預

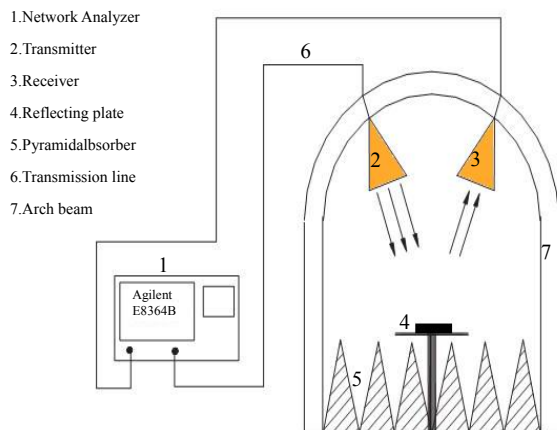


圖2. 自由空間量測法

測反射衰減≥20dB 之吸波片厚度及頻率範

圍，以預測厚度再實際製作吸波片，進行吸收特性分析，可在短時間修正厚度，得到所需之成品，對工程製作幫助極大。實驗中，電磁波量測頻率範圍為 2-18 GHz，量測設備為使用網路分析儀進行自由空間量測(如圖 2 所示)。

三、 結果與討論

3.1 奈米吸波材料顯微分析

3.1.1 XRD材質成份分析

將 Fe₃O₄/4C、Fe₃O₄/3C、Fe₃O₄/2C 及 Fe₃O₄/1C 四種奈米粉體經 X 光繞射儀分析，Fe₃O₄ 由 ICSD NO.028664 比對晶相角為 30.122(220)、35.483(420)、43.124(400)、57.033(511) 及 62.629(440)，晶格常數 a=8.384Å，本吸收劑中確實含有 Fe₃O₄；碳 60 由 ICSD NO.073661 比對晶相角為 27.434(331) 及 40.248(620) 如圖 3 所示，本吸收劑中確實含有碳 60。複合吸收劑其碳 60 含量組成大小為 Fe₃O₄/4C > Fe₃O₄/3C > Fe₃O₄/2C > Fe₃O₄/1C，故由碳 60 晶相角所對應之相對強度可相呼應。

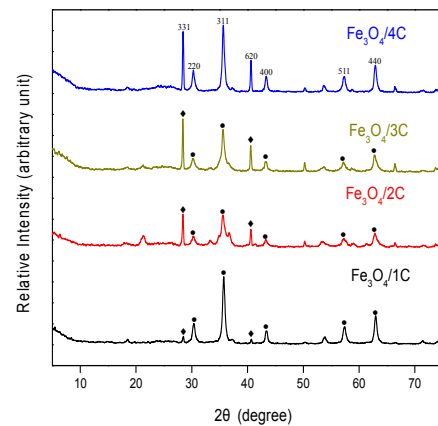


圖 3. Fe₃O₄/4C-1C 粉體 XRD

3.1.2 SEM分析

由圖4觀察可知，Fe₃O₄/3C與Fe₃O₄/4C奈米複合吸收劑顆粒產生局部團聚，因為含碳的組成比例越高，奈米顆粒表面能越大，為降低表面能，所以顆粒間產生團聚現象。解決團聚方法可在奈米鐵碳複合吸收劑與橡膠混煉製作過程中，加入分散劑，使得吸收劑顆粒在吸波片中分散均勻。

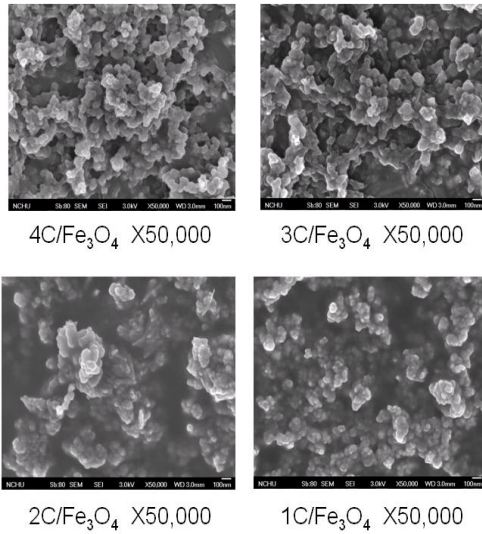


圖 4. Fe₃O₄/4C-1C-wt60% SEM

3.1.3 TEM分析

由圖5觀察可知，Fe₃O₄與C所組成之奈米複合材料，兩者介面混合均勻，其細微性約為20-40 nm，因顆粒細小，有利高頻吸收。

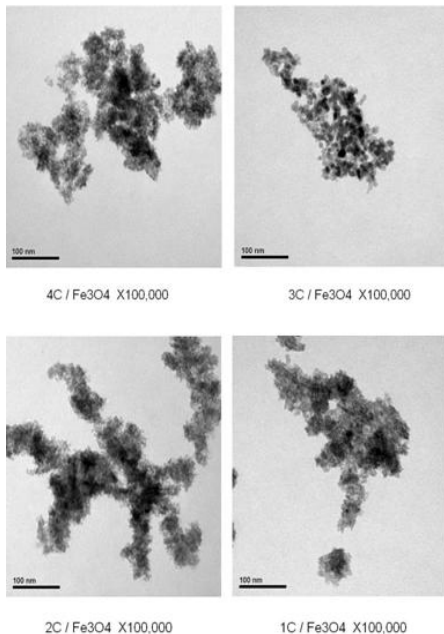


圖5. Fe₃O₄/4C-1C -wt60% TEM

3.2 微波吸收特性

3.2.1 基本原理

當電磁波碰到金屬時，電磁波無法進入金屬而產生完全反射。但對於吸收材料而言，當微波或電磁波照射材料時，材料可能將部分電磁波反射，部分電磁波穿入材料中。而材料對於入射的電磁波可產生電磁損耗及第一介面與第二介面之反射干涉使電磁波能量生削弱。

一般而言我們分析材料的吸波效能多以反射損失(Return loss)數值來作為比較之基準。以(1)、(2)及(3)式經電磁理論模擬分析出最佳吸收參數(ϵ' 、 ϵ'' 、 μ' 、 μ'')，以滿足最佳匹配之設計[10]。

$$Z_{in} = Z_0 \sqrt{\frac{\mu_r}{\epsilon_r}} \tanh \left[\left(j \frac{2\pi}{\lambda} \right) d \sqrt{\mu_r \epsilon_r} \right] \quad (1)$$

$$\Gamma = \frac{Z_{in} - Z_0}{Z_{in} + Z_0} \quad (2)$$

$$R(dB) = 20 \times \log |\Gamma| \quad (3)$$

式中 Z_{in} : 輸入阻抗值, Z_0 : 空氣特性阻抗值, $\mu_r = \mu' - j\mu''$: 相對導磁係數, $\epsilon_r = \epsilon' - j\epsilon''$: 相對介電係數, d : 厚度, λ : 電磁波波長, Γ : 反射係數, R : 反射損失。

3.2.2 微波吸收量測方法

本研究所製出奈米鐵碳複合吸收片，利用向量網路分析儀(Aglient E8364B)系統以微波自由空間量測法在常溫下進行電磁波衰減測試。使用電磁波反射損失測量系統檢測，電磁波掃描頻率範圍為2-18 GHz。在使用微波網路分析儀利用自由空間量測方法量測前，先以同試片大小(15 cm×15 cm)的金屬板放在待測位置上，先校正水準，量測其反射量，再將奈米鐵碳複合吸波片放在金屬板上，量測反射衰減強度。反射損失(Return loss)與能量關係如公式(3)表示。

3.3 材料之反射損失效應分析

當電磁波入射到吸波材料時，在吸波材料內的奈米顆粒發生多重散射作用，因奈米粒子的比表面積增大，表面的原子增多，表面懸

掛鍵增加，容易發生介面極化，從而表現出良好的吸波性能。本材料反射損失來自於材料本身厚度所產生之破壞性干涉及介電損耗效應，由實驗量測得知當編號#1的吸波片厚度在3.2-3.5mm時，雷達頻域6-7GHz之最大反射損失都在20dB以上，其中厚度達3.5mm時，頻率在6.37GHz(C頻)之最大衰減峰值為33.21dB，如圖6所示。編號#2的吸波片厚度在2.7-3.0mm時，雷達頻域6-7GHz之最大反射損失都在20dB以上，其中厚度達3.0mm時，頻率在6.28GHz(C頻)之最大衰減峰值為27.78dB，如圖7所示。編號#3的吸波片厚度在1.0-1.5 mm，散佈在雷達頻域11-17GHz之最大

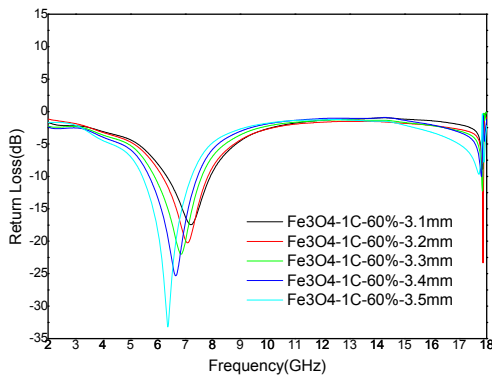


圖 6. 編號#1 在不同厚度之反射損失

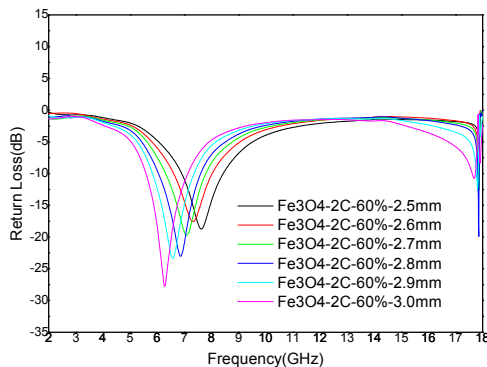


圖 7. 編號#2 在不同厚度之反射損失

反射損失都在20dB以上，其中厚度達1.4mm時，頻率在11.01GHz(X頻)之最大衰減峰值為32.03dB，如圖8所示。編號#4的吸波片厚度在0.9-1.2 mm，散佈在雷達頻域12-15GHz之最大反射損失都在20dB以上，其中厚度達1.1mm時，頻率在13.29GHz(Ku頻)之最大衰減峰值為25.97dB，如圖9所示。

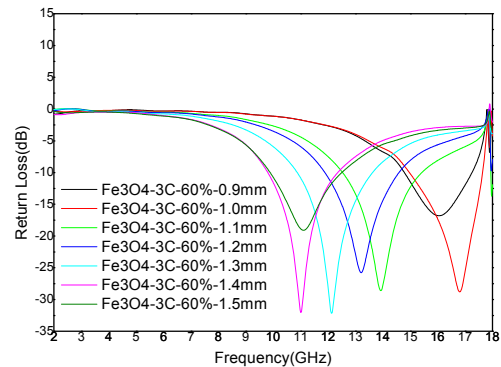


圖 8. 編號#3 在不同厚度之反射損失

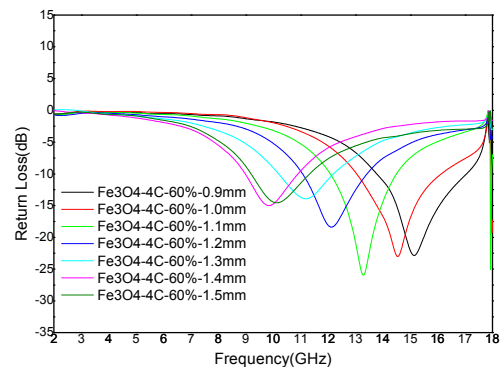


圖 9. 編號#4 在不同厚度之反射損失

吸收片之吸收值大都來自於材料本身之微波特性參數匹配與厚度調整達到最佳吸收效果，由圖6至圖9可知提高含碳組成比例，可滿足最大反射損失在20dB以上及厚度薄，但含碳比值若太高，會造成材料電性太大，致使材料表面與自由空間阻抗不匹配，無法製作高吸收值之吸收片，故材料製作時需經量測電磁參數，並以電腦模擬分析計算達成最佳設計。

本研究以奈米碳與奈米 Fe_3O_4 均質混合吸收劑($\text{Fe}_3\text{O}_4/4\text{C}$)製作之複合吸收材，吸波片厚度在0.9-1.2 mm，散佈在雷達頻域12-15GHz之最大反射損失都在20dB以上，大於10 dB頻寬達4dB以上，在薄型化製作上都比目前在2-18 GHz 波段所發表文獻[11-16]之吸波材料厚度還要薄。

3.4 介電係數及導磁係數之分析

3.4.1 介電係數及導磁係數之量測

透過網路分析儀進行兩次的量測，一次是將待測物放置於參考鋁板上量測出 S_{11_short} 、另一次是將待測物(*高度位置須和 short 量測等高度；即等相位)放置於與低密度保麗龍(假設其介電特性相等於空氣)上量測出 $S_{11_through}$ 。將兩次量出的值與參考鋁板(未放置任何待測物) \bar{S}_{11} 相除後得 S_{11} 及 S_{11}' 如(1)式及(2)式所示。

$$S_{11} = \frac{S_{11_through}}{\bar{S}_{11}} \quad (1)$$

$$S_{11}' = \frac{S_{11_short}}{\bar{S}_{11}} \quad (2)$$

(其中(1)式之 S_{11_short} 及(2)式之 $S_{11_through}$ 可由反射係數 Γ 及穿透係數 T 定義，可參考文獻 [17])

再經過電場及磁場強度的切面分量連續(入射介面)及變數變換可推導出本質阻抗 Z_{sn} 如(3)式所示。

$$Z_{sn} = \frac{1+\Gamma}{1-\Gamma} = \sqrt{\frac{\mu^*}{\varepsilon^*}} = \sqrt{\frac{AB}{1+B-A}} \quad (3)$$

其中

$$A = \frac{1+S_{11}}{1-S_{11}} = \frac{e^{i2\pi \cdot L/c} + S_{11} \cdot e^{-i2\pi \cdot L/c}}{e^{i2\pi \cdot L/c} - S_{11} \cdot e^{-i2\pi \cdot L/c}}$$

$$B = \frac{1+S_{11}'}{1-S_{11}'} = \frac{e^{i2\pi \cdot L/c} + S_{11}' \cdot e^{-i2\pi \cdot L/c}}{e^{i2\pi \cdot L/c} - S_{11}' \cdot e^{-i2\pi \cdot L/c}}$$

(L 為待測物厚度)

配合穿透係數 $T = e^{-\gamma L}$ ；(其中 傳播常數 $\gamma = \gamma_0 \sqrt{\varepsilon^* \mu^*}$ ； $\gamma_0 = j2\pi / \lambda_0$ ； λ_0 為自由空間的波長) 傳播常數經過對數轉換可寫成(4)式

$$\gamma = \frac{\log_e(1/T)}{L} \quad (4)$$

因(4)式中穿透係數 T 為複數(在此假設

$T = |T|e^{j\theta}$)，所以傳播常數 γ 會有多重解，傳

播常數 γ 可以再整理成(5)式

$$\gamma = \frac{\log_e \left| \frac{1}{T} \right| + j(\theta - 2n\pi)}{-2jL \left(\frac{2\pi}{\lambda_0} \right)} \quad (5)$$

其中 $n=0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$ ，由(3)式及(5)式可求出 ε^* 及 μ^* 參數，如(6)式及(7)式所。

$$\varepsilon^* = \frac{\gamma}{\gamma_0} \cdot \frac{1}{Z_{sn}} \quad (6)$$

$$\mu^* = \frac{\gamma}{\gamma_0} \cdot Z_{sn} \quad (7)$$

以上量測採用待測物每成份只有一種，規格是 15 cm×15 cm×1 mm 之吸收片。量測金屬鋁板規格是 15 cm×15 cm×1 cm (經儀校合格之平板)。量測數據已包含反射係數及相位，且反射係數及相位參考面是以金屬鋁板為參考面，將四組反射數據利用電腦程式去解出 ε' 、 ε'' 、 μ' 及 μ'' 四個參數。為求量測值之穩定性，每個 samples 各測兩次，兩次數值差異性皆非常小。

3.4.2 介電係數分析

量測相對介電係數與頻率之變化，如圖 10 及圖 11 所示。本材質相對介電係數實部 ε' 值隨頻率的增加而緩步遞減及相對介電係數虛部 ε'' 變化則是隨著頻率的增加而漸近遞減，當頻率在 15 GHz 時介電係數 ε' 及 ε'' 滿足匹配，因此有較大吸收效果。編號#1 之 ε' 值在 14.59-10，編號#2 之 ε' 值在 18.47-13.18，編號#3 之 ε' 值在 27-16.88，編號#4 之 ε' 值在 33.17-19.74。編號#1 之 ε'' 值在 2.38~0.28，編號#2 之 ε'' 值在 3.9-0.7，編號#3 之 ε'' 值在 11.48-3.06，編號#4 之 ε'' 值在 14.09-2.72，因含碳組成越多，使的吸波片之相對介電係數虛部 ε'' 損耗能量的能力增強。當材料表面與自由空間阻抗匹配時，介電性越

佳，奈米粒子表面懸掛鍵增加，容易產生介面極化，使得相對介電係數提高，有利吸波材料達到吸收強及厚度薄的理想需求。

3.4.3 導磁係數分析

相對導磁係數與頻率之關係，如圖12及圖13所示，編號#1-#4吸波材的相對導磁係數實部 μ' 值趨近於1，虛部 μ'' 值趨近於0。在微波頻率2-18 GHz波段之相對介電係數及相對導磁係數分析中，得知奈米鐵碳複合吸波材料吸波貢獻來自於介電特性損耗而不是磁特性損耗。加入四氧化三鐵主要在調整相對介電常數 ϵ' 及 ϵ'' ，使得吸波片達到最佳匹配效果。

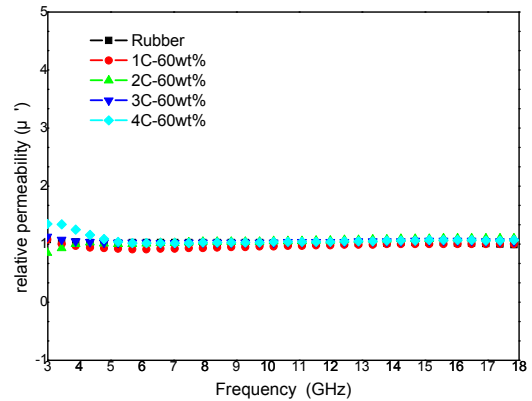


圖 12. 編號#1-#4 之 μ' 值

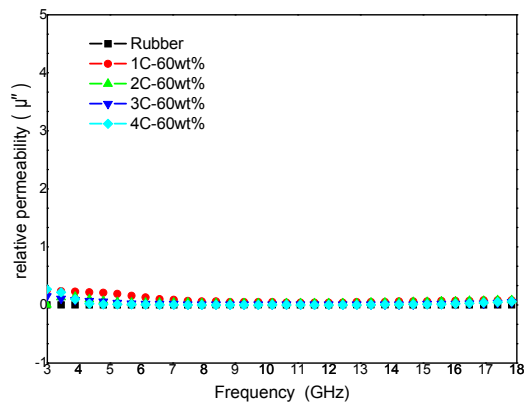


圖 13. 編號#1-#4 之 μ'' 值

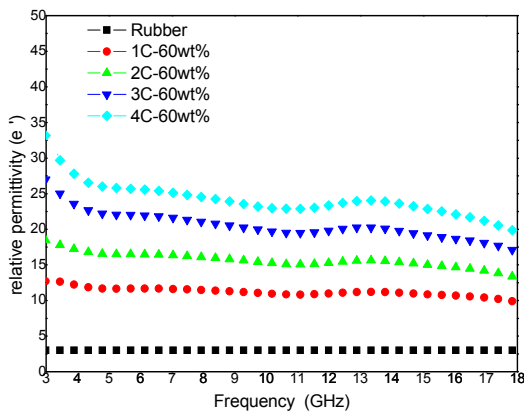


圖 10. 編號#1-#4 之 ϵ' 值

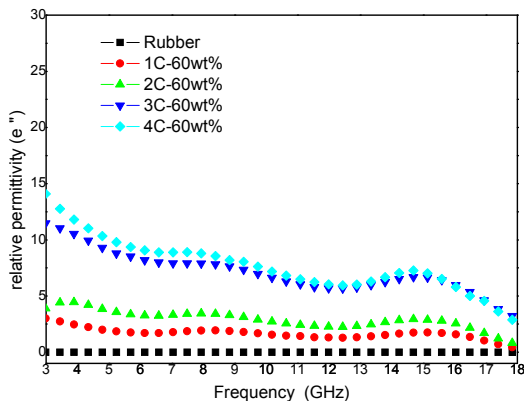


圖 11. 編號#1-#4 之 ϵ'' 值

3.4.4 介電損耗角正切分析

在本文定義介電損耗角正切值 $\text{tg}\delta_e$ 為相對介電係數虛部 ϵ'' 除以相對介電係數實部 ϵ' ，其中 ϵ' 及 ϵ'' 參數資料之取得可參考3.4.1節之介紹。

在本文中將探討介電材料之介電損耗角正切對製作薄型化吸波材之響應，當編號#1吸波片在頻率6.85GHz，吸波值為33.21dB時，是此材質在 $\geq 20\text{dB}$ 時之最薄厚度3.3mm， ϵ' 值為12.63， ϵ'' 值為1.84， $\text{tg}\delta_e$ 值為0.14；編號#2吸波片在頻率7.09GHz，吸波值為20dB時，是此材質在吸波值在 $\geq 20\text{dB}$ 時之最薄厚度2.7mm， ϵ' 值為16.35， ϵ'' 值為3.31， $\text{tg}\delta_e$ 值為0.20；編號#3吸波片在頻率16.81GHz，吸波值為28.78dB時，是此材質在吸波值在 $\geq 20\text{dB}$ 時之最薄厚度1.0mm時， ϵ' 值為18.22， ϵ'' 值為4.88， $\text{tg}\delta_e$ 值為0.27；編號#4

吸波片在頻率15.14GHz，吸波值為22.85dB時，是此材質在吸波值在 ≥ 20 dB時之最薄厚度0.9mm時， ϵ' 值為22.86， ϵ'' 值為7.02， $\text{tg}\delta_e$ 值為0.31。由以上數據分析可知在固定最大反射損失 Γ 條件下，材質微波特性如相對導磁係數與相對介電係數是與厚度成反比關係，因此滿足最大反射損失在20dB以上之反射損失 Γ 條件下，越高的複數介電參數，得到更薄厚度。當介電損耗角正切愈大，吸波片可製作厚度較薄，比較容易作設計匹配。編號#4及編號#3因介電損耗角正切大，電性吸收來自於電性損耗貢獻，達到高吸收及厚度薄；編號#2及編號#1因介電損耗角正切小，製作厚度較厚，如圖14及表3所示。

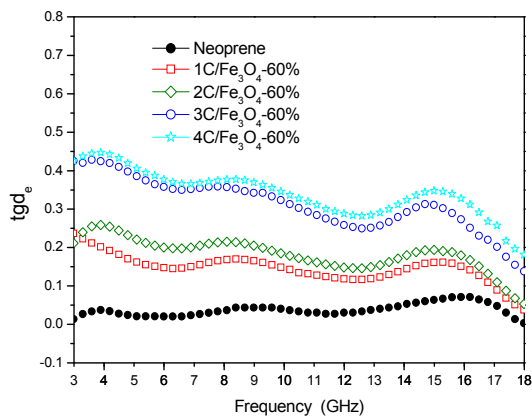


圖 14. 編號#1-#4 之介電損耗 $\text{tg}\delta_e$

表 3. 介電損耗角正切對厚度之響應

編號	頻率 (GHz)	吸波值 (dB)	厚度 (mm)	$\text{tg}\delta_e$
#1	6.85	33.21	3.3	0.14
#2	7.09	20.00	2.7	0.20
#3	16.81	28.78	1.0	0.27
#4	15.14	22.85	0.9	0.31

四、結 論

一般介電性單層平板型吸收體只能單頻帶的吸收，其頻寬涵蓋範圍狹小。編號#1的吸波片厚度在3.2-3.5 mm，雷達頻域6-7GHz之最大反射損失都在20dB以上，其中厚度達3.5 mm時，頻率在6.37GHz之最大衰減峰值為33.21dB，適合於C頻使用。編號#2的吸波片厚度在2.7-3.0 mm時，雷達頻域6-7GHz之最大反射損失都在20dB以上，其中厚度達3.0mm時，頻率在6.28GHz之最大衰減峰值為27.78dB，適合於C頻使用。編號#3的吸波片厚度在1.0-1.5 mm，散佈在雷達頻域11-17GHz之最大反射損失都在20dB以上，其中厚度達1.4mm時，頻率在11.01GHz之最大衰減峰值為32.03dB，適合於X頻使用。編號#4的吸波片厚度在0.9-1.2 mm，散佈在雷達頻域12-15GHz之最大反射損失都在20dB以上，其中厚度達1.1mm時，頻率在13.29GHz之最大衰減峰值為25.97dB，適合於Ku頻使用。

介電係數及導磁係數分析中，得知奈米鐵碳複合吸波材料吸波貢獻來自於介電性損耗而不是磁性損耗。加入四氧化三鐵主要在調整介電常數 ϵ' 及 ϵ'' ，使得吸波片達到最佳匹配效果。當材料表面與自由空間阻抗匹配時，含碳組成越多，介電性越佳，奈米粒子表面懸掛鍵增加，容易產生介面極化，使得介電係數提高，有利吸波材料達到吸收強及厚度薄的理想需求。

滿足最大反射損失在20dB以上之反射損失 Γ 條件下，越高的複數介電參數，得到更薄厚度。當介電損耗角正切愈大，吸波片可製作厚度較薄，比較容易作設計匹配。編號#4及編號#3因介電損耗角正切大，電性吸收來自於電性損耗貢獻，達到高吸收及厚度薄；編號#2及編號#1因介電損耗角正切小，製作厚度較厚。

在2-18 GHz波段，有許多吸波材料的厚度在2.0mm以上，才會有較顯著的吸波效果。本實驗編號#4吸波片在厚度0.9mm有最大反射損失23 dB，都比目前在2-18 GHz 波段所發表文獻之吸波材料厚度還要薄，而且反射損失在10 dB以上頻寬達4GHz，達到吸波材料要求的厚度薄與吸收頻域寬。

參考文獻

- [1] Vinoy, K. J. and Jha, R. M., Radar Absorbing Materials, USA, Kluwer Academic, pp. 10-18, 1997.
- [2] Knott, E. F., Shaeffer, J. F., and Tuley, M. T., Radar Cross Section, London, Artech House, pp. 1-114, 1993.
- [3] 範綱賢，以電磁參數實驗函數評估設計奈米材料微波吸收體之研究，國立國防大學電子工程研究所碩士論文，桃園，2006。
- [4] 秦嶸，陳雷，“國外新型隱身材料研究動態”，宇航材料工藝，第4卷，第17-19頁，1997。
- [5] 陸懷光，“複合磁性吸收劑研究”，功能材料，增刊，第266-268頁，1995。
- [6] 王小紅，“雷達吸波塗層膠粘劑的現狀與發展”，高等學校化學學報，第50卷，第12期，第684-688頁，1991。
- [7] Zhang, H. and Yao, X., “Zhang Liangying. The preparation and microwave properties of Ba₃ZnCo₂zFe₂ ferrite by citrate sol-gel process,” Mater Sci and Engineering., 84B, pp. 252-257, 2001.
- [8] Kojima, A., Makino, A., and Inoue, A., “Rapid annealing effect on the microstructure and magnetic properties of the Fe-rich nanocomposite magnets,” J. Appl. Phys., Vol. 87, No. 9, pp. 6576-6578, 2000.
- [9] 孟建華，楊桂琴，嚴采美，“吸波材料研究進展”，磁性材料及器件，第8卷，第11-14頁，2004。
- [10] 謝明凱，雷達波吸收體之設計及特性評估研究，國立國防大學電子工程研究所碩士論文，桃園，2005。
- [11] Zhang, X. F., Dong, X. L., Haung, H., Lv B., Lei, J. P., and Choi, C. J., “Microstructure and microwave absorption properties of carbon-coated iron nanocapsules,” J. Phys. D: Appl. Phys., Vol. 40, pp. 5383-5387, 2007.
- [12] Lu, B., Dong, X. L., Haung, H., Zhang, X. F., Zhu, X. G., Lei, J. P., and Sun, J. P., “Microwave absorption properties of core/shell-type iron and nickel nanoparticles,” Journal of Magnetism and Magnetic Materials., Vol. 320, pp. 1106-1111, 2008.
- [13] Liu, X. G., Li, B., Geng, D. Y., Cui, W. B., Yang, F., Xie, Z. G., Kang, D. J., and Zhang, Z. D., “(Fe, Ni)/C nanocapsules for electromagnetic-wave absorber in the whole Ku-band,” Carbon, Vol. 47, pp. 470-474, 2009.
- [14] Ni, S. B., Wang, X. H., Zhou, G., Yang, F., Wang, J. M., and He, D. Y., “Designed synthesis of wide range microwave absorption Fe₃O₄-carbon sphere composite,” Journal of Alloys and Compounds, Available online 23 September, pp. 1-5, 2009.
- [15] Zeng, J., Tao, P., Wang, S., and Xu, J. C., “Preparation and study on radar-absorbing materials of cupric oxid-nanowire-covered carbon fibers,” Applied Surface Science, Vol. 255, pp. 4916-4920, 2009.
- [16] Wei, J., Liu, J. H., and Li, S. M., “Electromagnetic and Microwave absorption properties of Fe₃O₄ magnetic films plated on hollow glass spheres,” Journal of Magnetism and Magnetic Materials., Vol. 312, pp. 414-417, 2007.
- [17] Ghodgaonkar, D. K., Varadan, V. V., and Varadan, V. K., “Free-Space Measurement of Complex Permittivity and Complex Permeability of Magnetic Materials at Microwave Frequencies,” IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, Vol. 39, No. 2, pp. 387 – 394, 1990.

