

東海大學應用物理學系  
碩士論文

指導教授：王昌仁 博士

共同指導教授：張晃暉 博士

FePd 薄膜結構與磁性之研究

Structure and magnetic properties of FePd thin films

研究生：李明育

中華民國一〇八年七月

# 東海大學應用物理學系

## 碩士論文

論文題目

(中文) FePd 薄膜結構與磁性之研究

(英文) Structure and magnetic properties of FePd thin films

指導教授：王昌仁 博士

共同指導教授：張晃暉 博士

研究生：李明育

中華民國一〇八年七月

東海大學碩士班研究生  
論文指導教授推薦書

應用物理學系 碩士班 李明育 君所提之論文

論文題目：

(中文) FePd 薄膜結構與磁性之研究

(英文) Structure and magnetic properties of FePd thin films

係由本人指導撰述，同意提付審查。

指導教授 王碧如 (簽章)

108 年 7 月 15 日

東海大學碩士班研究生  
論文口試委員審定書

應用物理學系 碩士班 李明育 君所提之論文

(中文) FePd 薄膜結構與磁性之研究

(英文) Structure and magnetic properties of FePd thin films

論文口試委員會

召集人

申進陽

(簽章)

委員

王昌仁

袁輔德

張景暘

中華民國 108 年 7 月 15 日

## 誌謝

求學的時間之短，但是在這段期間幫助過我的人非常多，在此表達我的感謝之意，能夠在求學期間有你們的協助真的是我的福氣。

今論文能順利完成要感謝許多師長、親友。首先，感謝指導教授張晃暉老師在這段期間對我的指導，不論是在學術理論、實驗方面，都給予我很多的幫忙及建議，讓我從中學習到要在研究上必須要有的觀念。同時非常感謝口試召集人申繼陽教授、東海大學應用物理系王昌仁教授、愛盛科技袁輔德博士於畢業口試上指導與建言。在碩士班的期間，有很多的有趣的事，感謝已畢業的昱文學長和詹明哲學長及士嘉學長教會我鍍膜和測量樣品及拍攝 TEM，感謝同期葉朋祐同學給予實驗上許多的協助和解決畫圖上的問題，也感謝實驗室的學林柏槐學弟、蘇品芳學妹等等幫忙協助我鍍製與分析樣品，使論文更加充實，也因此讓我能夠順利的畢業，真心感謝你們。

最後要好好感謝我的同事及朋友，在我遇到難關時能夠與你們出門放鬆身心，希望友誼能夠維持下去，還有感謝我的父母給予我鼓勵及支援，讓我能夠完成碩士學業。真心感謝周遭的一切。

## 中文摘要

面心正方結構的  $L1_0$  FePd 薄膜具有高的磁晶異向性能和大的飽和磁化量及居里溫度還有良好的化學穩定性，故近年來被受許多學者關注並著重在以底層效應、摻雜、成份改變影響及化學沉積提高其磁性之研究。本實驗先以不同濺鍍法並且改變靶距製備 30 nm  $Fe_{50}Pd_{50}$  薄膜於玻璃基板上，進行不同溫度退火( $T_a = 500 - 750\text{ }^\circ\text{C}$ )，FePd 經由退火後皆呈現水平磁異向性。隨著溫度之升高，其結構漸從面心立方轉變為面心四方，因而提高其矯頑磁力，但當溫度提升至  $750\text{ }^\circ\text{C}$ ，FePd 薄膜從  $L1_0$  相轉變為 fcc 結構，導致其矯頑磁力大幅降低。實驗結果顯示當靶距越遠，矯頑磁力隨之提升，且靶距的提高有助於降低序化溫度。此外，脈衝濺鍍法鍍製 FePd 薄膜在靶距為 5 cm 時，矯頑磁力較高，可能與初始狀態下所受到壓縮應力較大有關。再者，亦研究了在氮氣下製備 FePd 薄膜經不同溫度後退火研究其結構與磁性。隨著退火溫度的增加，FePd 矯頑磁力有明顯的大幅上升。其矯頑磁力最高值為 3.9 kOe，出現在氮氣下以直流濺鍍 FePd 薄膜經  $700\text{ }^\circ\text{C}$  之退火。由於氮氣鍍製當靶距為 5 cm 時較與氬氣鍍製矯頑磁力提升 100%。氮氣的鍍製並且調控靶距，降低序化溫度區間較為顯著，使磁性之提升可能與初鍍態壓縮應力較大有關。最後，以非磁性銅膜做為頂層，進行不同溫度下擴散，隨擴散火溫度之提升，可進一步的提升其矯頑磁力，由於銅經擴散後會包覆硬磁性 FePd 晶粒以致降低晶粒之間交互作用，須以較大的磁場下來翻轉其磁區，因而可大幅提高其矯頑磁力至 4.5 kOe。

關鍵字：FePd, 濺鍍法, 矯頑磁力提升, 擴散法.

## Abstract

$L1_0$  FePd film with a tetragonal structure has high magnetic crystal anisotropy, large saturation magnetization, Curie temperature and good chemical stability. In recent years, many groups have focused on the enhancement of magnetic properties by underlayer, doping, composition and chemical deposition. In this work, structure and magnetic properties of FePd films prepared by various sputtering methods with various distances between target and substrate, post annealed at various temperatures are systematically studied. FePd films deposited at room temperature followed by a rapid thermal annealing exhibits in-plane magnetic anisotropy. The phase transformation from face-centered cubic to face-centered tetragonal with increasing  $T_a$  in FePd films enhances its coercivity. Nevertheless, the  $L1_0$  phase is gradually transformed into fcc phase at higher  $T_a = 750$  °C, improves the coercivity. Besides, longer the distances between target and substrate is, the higher the coercive force is, and the change of the distances between target and substrate is helpful to reduce the ordering temperature. In addition, when the distances between target and substrate is 5 cm, FePd film prepared by pulse sputtering method exhibits higher coercivity, which may be related to the large compression stress of as-deposited film. Furthermore, significant enhancement of coercivity to 3.9 kOe is also found for FePd films at nitrogen atmosphere. Finally, Cu was used as the top layer for diffusion at different temperatures. With the increase of annealing temperature, the coercivity was further increased. Since copper would be coated with hard magnetic FePd grains after diffusion, the interaction between grains is reduced and the magnetic field to reverse the magnetization is increased. As a result, the coercivity is significantly increased to 4.5kOe.

Keywords: FePd films, sputtering, coercivity enhancement, diffusion.

# 目錄

誌謝.....	i
中文摘要.....	ii
Abstract.....	iii
目錄.....	iv
表目錄.....	xi
圖目錄.....	xvii
第一章 緒論.....	1
1.1 前言.....	1
1.2 FePd 之簡介.....	3
1-2-1 FePd 合金之晶體結構.....	4
1-2-2 序化與非序化.....	5
1-3 文獻回顧.....	7
1-4 研究動機.....	19
第二章 文獻探討.....	21
2-1 磁性來源.....	21
2-1-2 磁性物質分類.....	22
順磁性 (paramagnetism).....	22
鐵磁性 (ferrimagnetism).....	23



反鐵磁性 (ferrimagnetism).....	23
陶鐵磁性 (ferrimagnetism).....	24
2-2 磁異向性(magnetic anisotropy) .....	25
2-2-1 磁晶異向性 .....	26
2-2-2 形狀異向性 .....	27
2-2-3 應力異向性 .....	27
2-2-4 交換異向性.....	27
2-2-5 誘導異向性.....	28
2-3 磁區.....	29
2-4 磁滯曲線.....	31
2-5 薄膜沉積原理.....	33
2-6 磁控濺鍍系統.....	36
2-6-1 直流磁控濺鍍(DC magnetron sputtering).....	36
2-6-2 射頻磁控濺鍍(RF magnetron sputtering).....	37
2-6-3 脈衝直流磁控濺鍍系統.....	39
第三章 研究方法 .....	41
3-1 實驗流程.....	41
3-2 實驗製備及參數.....	42
3-2-1 實驗材料.....	42

3-2-2 基板清洗流程 .....	43
3-2-3 濺鍍流程 .....	44
3-2-4 製備薄膜底層以及緩衝層之參數 .....	45
3-3 快速升溫退火系統 .....	46
3-4 晶體結構分析 .....	47
3-5 表面形貌分析 .....	49
3-6 磁性量測 .....	51
3-7 掃描式電子顯微鏡(SEM)薄膜微結構分析 .....	52
3-8 TEM 樣品製備 .....	54
3-9 穿透式電子顯微鏡(TEM) .....	56
3-10 成份分析 .....	58
第四章 以不同磁控濺鍍法製備 FePd 薄膜磁性之研究 .....	59
4-1 靶距效應對於以射頻濺鍍法製備的 Fe <sub>50</sub> Pd <sub>50</sub> 薄膜結構與磁性 之影響 .....	60
4-1-1 靶距 5 cm 下以射頻濺鍍沉積 FePd 薄膜經由不同溫度後退 火之結構及磁性研究 .....	61
4-1-2 靶距 10 cm 下以射頻濺鍍沉積 FePd 薄膜經由不同溫度後退 火之結構及磁性研究 .....	66
4-1-3 靶距 12.5 cm 下以射頻濺鍍沉積 FePd 薄膜經由不同溫度後	

退火之結構及磁性研究 .....	71
4-1-4 靶距效應對於射頻磁控濺鍍 FePd 薄膜綜合探討 .....	77
4-2 靶距效應對於以直流濺鍍法製備的 Fe <sub>50</sub> Pd <sub>50</sub> 薄膜結構與磁性 之影響 .....	81
4-2-1 靶距 5 cm 下以直流濺鍍沉積 FePd 薄膜經由不同溫度後退 火之結構及磁性研究 .....	82
4-2-2 靶距 10 cm 下以直流濺鍍沉積 FePd 薄膜經由不同溫度後退 火之結構及磁性研究 .....	87
4-2-3 靶距 12.5 cm 下以直流濺鍍沉積 FePd 薄膜經由不同溫度後 退火之結構及磁性研究 .....	92
4-2-4 靶距效應對於射頻濺鍍 FePd 薄膜綜合探討 .....	97
4-3 靶距效應對於以脈衝直流濺鍍法製備的 Fe <sub>50</sub> Pd <sub>50</sub> 薄膜結構與磁 性之影響 .....	103
4-3-1 固定脈衝頻率 20 kHz 並改變脈衝持續時間(10 – 80%) ...	104
4-3-2 固定脈衝頻率 35 kHz 並改變脈衝持續時間(10 – 80%) ...	127
4-3-3 固定脈衝頻率 50 kHz 並改變脈衝持續時間(10 – 80%) ...	149
第五章 氮氣效應以濺鍍研製 FePd 薄膜 .....	184
5-1 氮氣效應對於以射頻濺鍍法製備的 Fe <sub>50</sub> Pd <sub>50</sub> 薄膜結構與磁性 之影響 .....	185

5-1-1 靶距 5 cm，在氮氣下以射頻濺鍍沉積 FePd 薄膜經由不同溫度後退火之結構及磁性研究 .....	186
5-1-2 靶距 10 cm 下以射頻濺鍍氮氣沉積 FePd 薄膜經由不同溫度後退火之結構及磁性研究 .....	193
圖 5.1.13 為氮氣下鍍製 Fe <sub>50</sub> Pd <sub>50</sub> 薄膜經不同溫度後退火之 MFM 圖。隨著退火溫度增加，磁區隨之增大。 .....	199
5-1-3 射頻濺鍍靶距 12.5 cm 氮氣下沉積 FePd 薄膜經由不同退火溫度之結構及磁性影響 .....	200
5-1-4 射頻濺鍍氮氣下沉積並改變靶距效應之 FePd 薄膜結構與磁性之探討 .....	207
5-2 氮氣效應對於以直流濺鍍法製備的 Fe <sub>50</sub> Pd <sub>50</sub> 薄膜結構與磁性之影響 .....	219
5-2-1 靶距 5 cm，在氮氣下以射頻濺鍍沉積 FePd 薄膜經由不同溫度後退火之結構及磁性研究 .....	220
5-2-2 靶距 10 cm，在氮氣下以射頻濺鍍沉積 FePd 薄膜經由不同溫度後退火之結構及磁性研究 .....	226
5-2-4 射頻濺鍍氮氣下沉積並改變靶距效應之 FePd 薄膜結構與磁性之探討 .....	239
5-3 氮氣效應對於改變靶距沉積 FePd 薄膜結構與磁性影響之探討。	

.....	252
第六章 Cu 頂層擴散對 FePd 結構與磁性影響.....	254
6-1 Cu 頂層擴散效應對經 650 °C 後退火 FePd 膜結構及磁性之影響.....	255
6-1-1 結構分析.....	256
6-1-2 磁性之研究.....	257
6-1-3 表面形貌之研究.....	261
6-2 Cu 頂層擴散效應對經 675 °C 後退火 FePd 膜結構及磁性之影響.....	262
6-2-1 結構分析.....	262
6-2-2 磁性之研究.....	263
6-2-3 表面形貌之研究.....	267
6-3 Cu 頂層擴散效應對經 700 °C 後退火 FePd 膜結構及磁性之影響.....	268
6-3-1 結構分析.....	268
6-3-2 磁性之研究.....	269
6-3-4 表面形貌之研究.....	272
6-4 Cu 擴散效應對不同序化 FePd 薄膜結構與磁性之探討。 ..	273
第七章 結論.....	276



## 表目錄

表 1.2.1 磁性合金材料特性 .....	3
表 1.3.1 為改變厚度下並且在沉積溫度為 450 °C 序化度及晶粒尺寸 和 c/a 比.....	7
表 3.2.1 實驗相關用材 .....	42
表 3.2.2 實驗參數表 .....	45
表 3.3.1 退火參數 .....	46
表 3.4.1 X 光繞射分析儀規格表 .....	47
表 4.1.1 實驗參數 .....	60
表 4.1.2 靶距 5 cm 之 FePd 薄膜經不同溫度後退火之飽和磁化量、殘 餘磁化量、矯頑磁力及磁能積一覽表 .....	63
表 4.1.3 靶距 10 cm 之 FePd 薄膜經不同溫度退火之飽和磁化量和殘 餘磁化量及矯頑磁力、磁能積一覽表 .....	68
表 4.1.3 靶距 12.5 cm 之 FePd 薄膜經不同後退火溫度之飽和磁化量、 殘餘磁化量、矯頑磁力及磁能積一覽表 .....	73
表 4.1.4 不同靶距初鍍態之 FePd(111)晶面間距.....	78
表 4.2.1 實驗參數 .....	81
表 4.2.2 靶距 5 cm 之 FePd 薄膜經不同溫度後退火之飽和磁化量、殘 餘磁化量、矯頑磁力及磁能積一覽表 .....	84

表 4.2.3 靶距 10 cm 之 FePd 薄膜經不同溫度退火之飽和磁化量和殘餘磁化量及矯頑磁力、磁能積一覽表 .....	89
表 4.2.4 靶距 12.5 cm 之 FePd 薄膜經不同後退火溫度之飽和磁化量、殘餘磁化量、矯頑磁力及磁能積一覽表 .....	94
表 4.2.5 不同靶距初鍍態之 FePd(111)晶面間距.....	99
表 4.2.6 為 FePd(111)繞射峰值.....	102
表 4.3.1 實驗參數 .....	103
表 4.3.2 為 20 kHz 10 % FePd 薄膜經不同溫度後退火之飽和磁化量、殘餘磁化量、矯頑磁力及磁能積一覽表 .....	106
表 4.3.3 為 20 kHz 20 % FePd 薄膜經不同溫度後退火之飽和磁化量、殘餘磁化量、矯頑磁力及磁能積一覽表 .....	111
表 4.3.2 為 20 kHz 50 % FePd 薄膜經不同溫度後退火之飽和磁化量、殘餘磁化量、矯頑磁力及磁能積一覽表 .....	118
表 4.3.5 為 20 kHz 80 % FePd 薄膜經不同溫度後退火之飽和磁化量、殘餘磁化量、矯頑磁力及磁能積一覽表 .....	123
表 4.3.6 為 35 kHz 10 % FePd 薄膜經不同溫度後退火之飽和磁化量、殘餘磁化量、矯頑磁力及磁能積一覽表 .....	129
表 4.3.7 為 35 kHz 20 % FePd 薄膜經不同溫度後退火之飽和磁化量、殘餘磁化量、矯頑磁力及磁能積一覽表 .....	134



表 4.3.8 為 35 kHz 50 % FePd 薄膜經不同溫度後退火之飽和磁化量、 殘餘磁化量、矯頑磁力及磁能積一覽表 .....	141
表 4.3.9 為 35 kHz 80 % FePd 薄膜經不同溫度後退火之飽和磁化量、 殘餘磁化量、矯頑磁力及磁能積一覽表 .....	146
表 4.3.10 為 50 kHz 10 % FePd 薄膜經不同溫度後退火之飽和磁化量、 殘餘磁化量、矯頑磁力及磁能積一覽表 .....	151
表 4.3.11 為 50 kHz 20 % FePd 薄膜經不同溫度後退火之飽和磁化量、 殘餘磁化量、矯頑磁力及磁能積一覽表 .....	158
表 4.3.12 為 50 kHz 50 % FePd 薄膜經不同溫度後退火之飽和磁化量、 殘餘磁化量、矯頑磁力及磁能積一覽表 .....	163
表 4.3.13 為 50 kHz 80 % FePd 薄膜經不同溫度後退火之飽和磁化量、 殘餘磁化量、矯頑磁力及磁能積一覽表 .....	168
表 4.3.14 為 20 kHz 不同頻率之 FePd(111)晶面間距 .....	179
表 4.3.15 為 35 kHz 不同頻率之 FePd(111)晶面間距 .....	180
表 4.3.16 為 50 kHz 不同頻率之 FePd(111)晶面間距 .....	181
表 4.4.1 以不同濺鍍法鍍製 FePd 薄膜經不同退火溫度矯頑磁力及磁 能積一覽表.....	183
表 5.1.1 實驗參數 .....	185
表 5.1.2 氮氣下靶距 5 cm 之 FePd 薄膜經不同溫度後退火之飽和磁化	

量、殘餘磁化量、矯頑磁力及磁能積一覽表 .....	188
表 5.1.3 氮氣下靶距 10 cm 之 FePd 薄膜經不同溫度後退火之飽和磁化量、殘餘磁化量、矯頑磁力及磁能積一覽表 .....	195
表 5.1.4 氮氣下靶距 12.5 cm 之 FePd 薄膜經不同溫度後退火之飽和磁化量、殘餘磁化量、矯頑磁力及磁能積一覽表 .....	202
表 5.1.5 為氬氣與氮氣鍍製 FePd 薄膜經由 500 °C 退火溫度 XRD 圖及角度和半高寬一覽表。 .....	208
表 5.1.6 為氬氣與氮氣鍍製 FePd 薄膜經由 550 °C 退火溫度 XRD 圖及角度和半高寬一覽表。 .....	209
表 5.1.7 為氬氣與氮氣鍍製 FePd 薄膜經由 600 °C 退火溫度 XRD 圖及角度和半高寬一覽表。 .....	210
表 5.1.8 為氬氣與氮氣鍍製 FePd 薄膜經由 650 °C 退火溫度 XRD 圖及角度和半高寬一覽表。 .....	211
表 5.1.9 為氬氣與氮氣鍍製 FePd 薄膜經由 675 °C 退火溫度 XRD 圖及角度和半高寬一覽表。 .....	212
表 5.1.10 為氬氣與氮氣鍍製 FePd 薄膜經由 700 °C 退火溫度 XRD 圖及角度和半高寬一覽表。 .....	214
表 5.1.11 為氬氣與氮氣鍍製 FePd 薄膜經由 725 °C 退火溫度 XRD 圖及角度和半高寬一覽表。 .....	215

表 5.1.12 為氫氣與氮氣鍍製 FePd 薄膜經由 750 °C 退火溫度 XRD 圖及角度和半高寬一覽表。 .....	216
表 5.2.1 實驗參數 .....	219
表 5.2.2 氮氣下靶距 5 cm 之 FePd 薄膜經不同溫度後退火之飽和磁化量、殘餘磁化量、矯頑磁力及磁能積一覽表 .....	222
表 5.2.3 氮氣下靶距 10 cm 之 FePd 薄膜經不同溫度後退火之飽和磁化量、殘餘磁化量、矯頑磁力及磁能積一覽表 .....	228
表 5.2.4 氮氣下靶距 12.5 cm 之 FePd 薄膜經不同溫度後退火之飽和磁化量、殘餘磁化量、矯頑磁力及磁能積一覽表 .....	234
表 5.2.5 為氫氣與氮氣鍍製 FePd 薄膜經由 500 °C 退火溫度 XRD 圖及角度和半高寬一覽表。 .....	240
表 5.2.6 為氫氣與氮氣鍍製 FePd 薄膜經由 550 °C 退火溫度 XRD 圖及角度和半高寬一覽表。 .....	242
表 5.2.7 為氫氣與氮氣鍍製 FePd 薄膜經由 600 °C 退火溫度 XRD 圖及角度和半高寬一覽表。 .....	243
表 5.2.7 為氫氣與氮氣鍍製 FePd 薄膜經由 650 °C 退火溫度 XRD 圖及角度和半高寬一覽表。 .....	245
表 5.2.8 為氫氣與氮氣鍍製 FePd 薄膜經由 675 °C 退火溫度 XRD 圖及角度和半高寬一覽表。 .....	246

表 5.2.9 為氫氣與氮氣鍍製 FePd 薄膜經由 700 °C 退火溫度 XRD 圖及 角度和半高寬一覽表。 .....	247
表 5.2.10 為氫氣與氮氣鍍製 FePd 薄膜經由 725 °C 退火溫度 XRD 圖 及角度和半高寬一覽表。 .....	248
表 5.2.12 為氫氣與氮氣鍍製 FePd 薄膜經由 600 °C 退火溫度 XRD 圖 及角度和半高寬一覽表。 .....	249
表 5.3.1 為氫氣與氮氣磁性一覽表 .....	252
表 6.1.1 實驗參數 .....	255
表 6.1.2 Cu/FePd (650 °C) 薄膜經不同溫度退火之飽和磁化量和殘餘磁 化量及矯頑磁力、磁能積一覽表 .....	258
表 6.2.2 Cu/FePd (675 °C) 薄膜經不同溫度退火之飽和磁化量和殘餘磁 化量及矯頑磁力、磁能積一覽表 .....	264
表 6.3.2 Cu/FePd (700 °C) 薄膜經不同溫度退火之飽和磁化量和殘餘磁 化量及矯頑磁力、磁能積一覽表 .....	270
表 6.4.1 加入銅頂層後經由不同溫度退火之飽和磁化量和殘餘磁化量 及矯頑磁力、磁能積一覽表 .....	275

## 圖目錄

圖 1.1 磁性材料分類。 .....	2
圖 1.2.1 水平記錄媒體與垂直記錄媒體比較。 .....	2
圖 1.2.1 FePd 二元相圖。 .....	5
圖 1.2.2 非序化的 FePd $\gamma$ 相序化的 FePd $\gamma_1$ 相 .....	6
圖 1.3.1 為在沉積溫度為 450 °C 表面形貌與磁特性 .....	8
圖 1.3.2 450 °C FePd 薄膜變膜厚之水平(紅)與垂直(黑)磁滯曲線圖與 MFM 磁區結構圖(3 $\mu$ m x 3 $\mu$ m)。 .....	8
圖 1.3.3 熱處理下之 FePd 薄膜的表面形貌(SEM)，(a)沉積溫度 100 °C 再後退火 400 °C 一小時 (b) 沉積溫度為 400 °C (c)其磁性與磁區。 .....	10
圖 1.3.4 加入 CoFeB 磁化量與磁滯曲線圖。 .....	10
圖 1.3.5 FePd 薄膜加入 Ag 底層改善矯頑力。 .....	11
圖 1.3.6 FePd/Ag 的 plane-view TEM 圖。 .....	11
圖 1.3.7 FePd/W 薄膜經不同退火磁性之變化圖。 .....	12
圖 1.3.8 加入金退火 700 °C 長時間退火之矯頑力變化圖。 .....	14
圖 1.3.9 為加入矽層通氮後並經由後退火後分析圖。 .....	15
圖 1.3.10 為加入矽氮後並經由後退火後磁性以及表面形貌。 .....	16
圖 1.3.11 為 FePdSi 加入氮氣經後退火 550 °C 表面形貌與磁性。 ....	16

圖 1.3.12 為經由 550 °C 後退火和不同測量溫度的磁滯曲線圖。 ....	17
圖 1.3.13 為覆蓋 Ti 頂層後經由退火後磁滯曲線。 .....	18
圖 1.3.14 為單層 FePt 覆蓋 Au 頂層後經由退火後磁滯曲線。 .....	18
圖 2.1 軌道磁矩及電子自旋磁矩。 .....	21
圖 2.1.2 磁性物質的分類。 .....	24
圖 2.2.1 單晶(a)鐵(b)鎳之磁化曲線。 .....	26
圖 2.3.1 磁區與磁區壁。 .....	29
圖 2.3.2 尼爾壁(Neel wall)和布洛赫壁(Bloch wall)。 .....	29
圖 2.3.3 鐵磁性材料磁區受外在磁場移動示意圖。 .....	30
圖 2.4.1 M-H 曲線與 B-H 曲線之關係圖。 .....	32
圖 2.5.1 薄膜成長過程:(a)成核(b)晶粒成長(c)晶粒團聚(d)縫道填補(e) 薄膜生長。 .....	33
圖 2.6.1 Dc 直流示意圖。 .....	36
圖 2.6.2 RF 磁控濺鍍示意圖。 .....	38
圖 2.6.3 脈衝波形示意圖。 .....	39
圖 2.6.4 磁場效應下電子在 Y 軸上的迴旋運 .....	40
圖 3.1 實驗流程圖。 .....	41
圖 3.2.1 基板清洗流程圖。 .....	43
圖 3.2.2 濺鍍系統 .....	44

圖 3.3.1 MILA-3000 型快速升溫退火爐。	46
圖 3.4.1 晶體繞射 X 光與布拉格繞射之幾何關係	48
圖 3.5.1 原子與原子間交互作用力示意圖	49
圖 3.5.2 原子力顯微鏡量測原理	50
圖 3.6.1 AGM 系統	51
圖 3.7.1 掃描式電子顯微鏡結構圖。	53
圖 3.8.1 研磨流程。	55
圖 3.9.1 穿透式電子顯微鏡之結構示意圖	57
圖 3.10.1 偵測 X-光子示意圖。	58
圖 4.1.1 靶距 5 cm FePd 薄膜經不同退火溫度後退火之 XRD 圖。	61
圖 4.1.2 靶距 5 cm 之 FePd 薄膜經不同後退火溫度之磁滯曲線圖	62
圖 4.1.3 靶距 5 cm 之 FePd 薄膜飽和磁化量及殘餘磁化量隨後退火溫度變化圖。	64
圖 4.1.4 靶距 5 cm 之 FePd 薄膜水平矯頑磁力隨後退火溫度變化圖。	64
圖 4.1.5 靶距 5 cm 之 FePd 薄膜磁能積隨後退火溫度變化圖。	65
圖 4.1.6 靶距 10 cm FePd 薄膜經不同退火溫度後退火之 XRD 圖。	66
圖 4.1.7 靶距 10 cm FePd 薄膜經不同退火溫度後退火之磁滯曲線圖。	67
圖 4.1.8 靶距 10 cm 之 FePd 薄膜飽和磁化量及殘餘磁化量隨不同後	

退火溫度之變化圖。 .....	69
圖 4.1.9 靶距 10 cm 之 FePd 薄膜經不同溫度退火之水平矯頑磁力圖。 .....	69
圖 4.1.10 靶距 10 cm 之 FePd 經不同溫度退火之磁能積變化圖。 ...	70
圖 4.1.11 靶距 12.5 cm FePd 薄膜經不同退火溫度後退火之 XRD 圖	71
圖 4.1.12 靶距 12.5 cm 之 FePd 薄膜經不同後退火溫度之磁滯曲線圖 .....	72
圖 4.1.13 靶距 12.5 cm 之 FePd 薄膜飽和磁化量及殘餘磁化量隨不同 後退火溫度之變化圖 .....	75
圖 4.1.14 靶距 12.5 cm 之 FePd 薄膜經不同溫度後退火水平矯頑磁力 變化圖。 .....	75
圖 4.1.15 靶距 12.5 cm 之 FePd 薄膜經不同溫度後退火之磁能積圖	76
圖 4.1.16 靶距 12.5 cm 之 FePd 薄膜經不同溫度後退火之磁區圖。 .	76
圖 4.1.16 改變靶距在室溫下 XRD 圖。 .....	78
圖 4.1.17 不同靶距之 FePd 膜經由不同溫度後退火之飽和磁化量。 .	79
圖 4.1.18 不同靶距之 FePd 膜經由不同溫度後退火之殘餘磁化量 ....	79
圖 4.1.19 不同靶距之 FePd 膜經由不同溫度後退火之矯頑磁力圖。 .	80
圖 4.1.20 不同靶距之 FePd 膜經由不同溫度後退火之磁能積圖。 ....	80
圖 4.2.1 靶距 5 cm FePd 薄膜經不同退火溫度後退火之 XRD 圖 .....	82
圖 4.1.2 靶距 5 cm 之 FePd 薄膜經不同後退火溫度之磁滯曲線圖 ...	83



圖 4.2.3 靶距 5 cm 之 FePd 薄膜飽和磁化量及殘餘磁化量隨後退火溫度變化圖.....	85
圖 4.2.4 靶距 5 cm 之 FePd 薄膜水平矯頑磁力隨後退火溫度變化圖	85
圖 4.2.5 靶距 5 cm 之 FePd 薄膜磁能積隨後退火溫度變化圖 .....	86
圖 4.2.6 靶距 10 cm FePd 薄膜經不同退火溫度後退火之 XRD 圖 ....	87
圖 4.2.7 靶距 10 cm FePd 薄膜經不同退火溫度後退火之 XRD 圖 ....	88
圖 4.2.8 靶距 10 cm 之 FePd 薄膜飽和磁化量及殘餘磁化量隨不同後退火溫度之變化圖 .....	90
圖 4.2.9 靶距 10 cm 之 FePd 薄膜經不同溫度退火之水平矯頑磁力圖 .....	90
圖 4.2.10 靶距 10 cm 之 FePd 薄膜經不同溫度退火之磁能積變化圖 .....	91
圖 4.2.11 靶距 12.5 cm FePd 薄膜經不同退火溫度後退火之 XRD 圖	92
圖 4.1.12 靶距 12.5 cm 之 FePd 薄膜經不同後退火溫度之磁滯曲線圖 .....	93
圖 4.2.13 靶距 12.5 cm 之 FePd 薄膜飽和磁化量及殘餘磁化量隨不同後退火溫度之變化圖 .....	95
圖 4.2.14 靶距 12.5 cm 之 FePd 薄膜經不同溫度後退火水平矯頑磁力變化圖.....	95
圖 4.2.15 靶距 12.5 cm 之 FePd 薄膜經不同溫度後退火之磁能積圖	96
圖 4.2.16 改變靶距在室溫下 XRD 圖.....	99

圖 4.2.17 不同靶距之 FePd 膜經由不同溫度後退火之飽和磁化量..	100
圖 4.2.18 不同靶距之 FePd 膜經由不同溫度後退火之殘餘磁化量..	100
圖 4.2.19 不同靶距之 FePd 膜經由不同溫度後退火之矯頑磁力圖..	101
圖 4.2.20 不同靶距之 FePd 膜經由不同溫度後退火之磁能積圖 .....	101
圖 4.2.21 靶距 10 cm FePd(111)薄膜經不同退火溫度後退火之 XRD 變化圖.....	102
圖 4.3.1 為 20 kHz 10 % FePd 薄膜經不同退火溫度後退火之 XRD 圖.....	104
圖 4.3.2 為 20 kHz 10 % 之 FePd 薄膜經不同後退火溫度之磁滯曲線圖.....	105
圖 4.3.3 為 20 kHz 10 之 FePd 薄膜飽和磁化量及殘餘磁化量隨後退火溫度變化圖.....	107
圖 4.3.4 為 20 kHz 10 % 之 FePd 薄膜水平矯頑磁力隨後退火溫度變化圖.....	107
圖 4.3.5 為 20 kHz 10 % 之 FePd 薄膜磁能積隨後退火溫度變化圖	108
圖 4.3.6 為 20 kHz 20 % FePd 薄膜經不同退火溫度後退火之 XRD 圖.....	109
圖 4.3.7 為 20 kHz 20 % 之 FePd 薄膜經不同後退火溫度之磁滯曲線圖.....	110
圖 4.3.8 為 20 kHz 20 之 FePd 薄膜飽和磁化量及殘餘磁化量隨後退	

火溫度變化圖.....	112
圖 4.3.9 為 20 kHz 20 % 之 FePd 薄膜水平矯頑磁力隨後退火溫度變化圖.....	112
圖 4.3.9 為 20 kHz 20 % 之 FePd 薄膜磁能積隨後退火溫度變化圖	113
圖 4.3.10 為 20 kHz 10 % 之 FePd 薄膜經不同後退火溫度 SEM 圖.....	113
圖 4.3.11 為 20 kHz 20 % 之 FePd 薄膜經不同後退火溫度 TEM 圖.....	114
圖 4.3.12 為 20 kHz 20 % 之 FePd 薄膜經不同後退火溫度 MFM 圖。.....	115
圖 4.3.13 為 20 kHz 50 % FePd 薄膜經不同退火溫度後退火之 XRD 圖.....	116
圖 4.3.14 為 20 kHz 50 % 之 FePd 薄膜經不同後退火溫度磁滯曲線圖.....	117
圖 4.3.15 為 20 kHz 50 之 FePd 薄膜飽和磁化量及殘餘磁化量隨後退火溫度變化圖.....	119
圖 4.3.16 為 20 kHz 50 % 之 FePd 薄膜水平矯頑磁力隨後退火溫度變化圖.....	119
圖 4.3.17 為 20 kHz 50 % 之 FePd 薄膜磁能積隨後退火溫度變化圖.....	120
圖 4.3.18 為 20 kHz 80 % FePd 薄膜經不同退火溫度後退火之 XRD 圖.....	121
圖 4.3.19 為 20 kHz 80 % 之 FePd 薄膜經不同後退火溫度磁滯曲線圖	

.....	122
圖 4.3.20 為 20 kHz 80 % 之 FePd 薄膜飽和磁化量及殘餘磁化量隨後退火溫度變化圖 .....	125
圖 4.3.21 為 20 kHz 80 % 之 FePd 薄膜水平矯頑磁力隨後退火溫度變化圖 .....	125
圖 4.3.22 為 20 kHz 80 % 之 FePd 薄膜磁能積隨後退火溫度變化圖 .....	126
圖 4.3.23 為 35 kHz 10 % FePd 薄膜經不同退火溫度後退火之 XRD 圖 .....	127
圖 4.3.24 為 35 kHz 10 % 之 FePd 薄膜經不同後退火溫度磁滯曲線圖 .....	128
圖 4.3.25 為 35 kHz 10 之 FePd 薄膜飽和磁化量及殘餘磁化量隨後退火溫度變化圖.....	130
圖 4.3.26 為 35 kHz 10 % 之 FePd 薄膜水平矯頑磁力隨後退火溫度變化圖.....	130
圖 4.3.27 為 35 kHz 10 % 之 FePd 薄膜磁能積隨後退火溫度變化圖 .....	131
圖 4.3.28 為 35 kHz 20 % FePd 薄膜經不同退火溫度後退火之 XRD 圖 .....	132
圖 4.3.29 為 35 kHz 20 % 之 FePd 薄膜經不同後退火溫度磁滯曲線圖 .....	133
圖 4.3.30 為 35 kHz 20 之 FePd 薄膜飽和磁化量及殘餘磁化量隨後退火溫度變化圖.....	135

圖 4.3.31 為 35 kHz 20 % 之 FePd 薄膜水平矯頑磁力隨後退火溫度變化圖.....	135
圖 4.3.32 為 35 kHz 20 % 之 FePd 薄膜磁能積隨後退火溫度變化圖.....	136
圖 4.3.33 為 35 kHz 20 % 之 FePd 薄膜經不同後退火溫度 SEM 圖.....	136
圖 4.3.34 為 35 kHz 20 % 之 FePd 薄膜經不同後退火溫度.....	137
TEM 圖。.....	137
圖 4.3.35 為 35 kHz 20 % 之 FePd 薄膜經不同後退火溫度.....	138
MFM 圖。.....	138
圖 4.3.36 為 35 kHz 50 % FePd 薄膜經不同退火溫度後退火之 XRD 圖.....	139
圖 4.3.37 為 35 kHz 50 % 之 FePd 薄膜經不同後退火溫度磁滯曲線圖.....	140
圖 4.3.38 為 35 kHz 50 之 FePd 薄膜飽和磁化量及殘餘磁化量隨後退火溫度變化圖.....	142
圖 4.3.39 為 35 kHz 50 % 之 FePd 薄膜水平矯頑磁力隨後退火溫度變化圖.....	142
圖 4.3.40 為 35 kHz 50 % 之 FePd 薄膜磁能積隨後退火溫度變化圖.....	143
圖 4.3.41 為 35 kHz 80 % FePd 薄膜經不同退火溫度後退火之 XRD 圖.....	144

圖 4.3.42 為 35 kHz 80 % 之 FePd 薄膜經不同後退火溫度磁滯曲線圖 .....	145
圖 4.3.43 為 35 kHz 80 之 FePd 薄膜飽和磁化量及殘餘磁化量隨後退 火溫度變化圖.....	147
圖 4.3.44 為 35 kHz 80 % 之 FePd 薄膜水平矯頑磁力隨後退火溫度變 化圖.....	147
圖 4.3.45 為 35 kHz 80 % 之 FePd 薄膜磁能積隨後退火溫度變化圖 .....	148
圖 4.3.46 實驗參數為 50 kHz 10 % FePd 薄膜經不同退火之 XRD 圖 .....	149
圖 4.3.47 為 50 kHz 10 % 之 FePd 薄膜經不同後退火溫度磁滯曲線圖 .....	150
圖 4.3.48 為 50 kHz 10 之 FePd 薄膜飽和磁化量及殘餘磁化量隨後退 火溫度變化圖.....	152
圖 4.3.49 為 50 kHz 10 % 之 FePd 薄膜水平矯頑磁力隨後退火溫度變 化圖.....	152
圖 4.3.50 為 50 kHz 10 % 之 FePd 薄膜磁能積隨後退火溫度變化圖 .....	153
圖 4.3.51 為 50 kHz 10 % 之 FePd 薄膜經不同溫度退火.....	153
SEM 圖。.....	153
圖 4.3.52 為 50 kHz 10 % 之 FePd 薄膜經不同溫度退火.....	154
TEM 圖。.....	154

圖 4.3.53 為 50 kHz 10 % 之 FePd 薄膜經不同溫度退火.....	155
圖 4.3.54 為 50 kHz 20 % FePd 薄膜經不同退火溫度後退火之 XRD 圖 .....	156
圖 4.3.55 為 50 kHz 20 % 之 FePd 薄膜經不同後退火溫度磁滯曲線圖 .....	157
圖 4.3.56 為 50 kHz 20 之 FePd 薄膜飽和磁化量及殘餘磁化量隨後退 火溫度變化圖.....	159
圖 4.3.57 為 50 kHz 20 % 之 FePd 薄膜水平矯頑磁力隨後退火溫度變 化圖.....	159
圖 4.3.58 為 50 kHz 20 % 之 FePd 薄膜磁能積隨後退火溫度變化圖 .....	160
圖 4.3.59 為 50 kHz 50 % FePd 薄膜經不同退火溫度後退火之 XRD 圖 .....	161
圖 4.3.60 為 50 kHz 50 % 之 FePd 薄膜經不同後退火溫度磁滯曲線圖 .....	162
圖 4.3.61 為 50 kHz 50 之 FePd 薄膜飽和磁化量及殘餘磁化量隨後退 火溫度變化圖.....	164
圖 4.3.62 為 50 kHz 50 % 之 FePd 薄膜水平矯頑磁力隨後退火溫度變 化圖.....	164
圖 4.3.63 為 50 kHz 50 % 之 FePd 薄膜磁能積隨後退火溫度變化圖 .....	165
圖 4.3.64 為 50 kHz 80 % FePd 薄膜經不同退火溫度後退火之 XRD 圖	

.....	166
圖 4.3.65 為 50 kHz 80 % 之 FePd 薄膜經不同後退火溫度之磁滯曲線	
圖.....	167
圖 4.3.66 為 50 kHz 80 之 FePd 薄膜飽和磁化量及殘餘磁化量隨後退	
火溫度變化圖.....	169
圖 4.3.67 為 50 kHz 80 % 之 FePd 薄膜水平矯頑磁力隨後退火溫度變	
化圖.....	169
圖 4.3.68 為 50 kHz 80 % 之 FePd 薄膜磁能積隨後退火溫度變化圖	
.....	170
圖 4.3.69 為 20 kHz 不同頻率之 FePd 薄膜飽和磁化量隨後退火溫度變	
化圖。.....	172
圖 4.3.70 為 20 kHz 不同頻率之 FePd 薄膜殘餘磁化量隨後退火溫度	
變化圖.....	172
圖 4.3.71 為 20 kHz 不同頻率之 FePd 薄膜水平矯頑磁力隨後退火溫	
度變化圖。.....	174
圖 4.3.72 為 20 kHz 不同頻率之 FePd 薄膜磁能積隨後退火溫度變化	
圖.....	174
圖 4.3.73 為 35 kHz 不同頻率之 FePd 薄膜飽和磁化量隨後退火溫度	
變化圖.....	175
圖 4.3.74 為 35 kHz 不同頻率之 FePd 薄膜殘餘磁化量隨後退火溫度	



變化圖.....	175
圖 4.3.75 為 35 kHz 不同頻率之 FePd 薄膜水平矯頑磁力隨後退火溫度變化圖.....	176
圖 4.3.76 為 35 kHz 不同頻率之 FePd 薄膜磁能積隨後退火溫度變化圖.....	176
圖 4.3.77 為 50 kHz 不同頻率之 FePd 薄膜飽和磁化量隨後退火溫度變化圖.....	177
圖 4.3.78 為 50 kHz 不同頻率之 FePd 薄膜殘餘磁化量隨後退火溫度變化圖.....	177
圖 4.3.79 為 50 kHz 不同頻率之 FePd 薄膜水平矯頑磁力隨後退火溫度變化圖.....	178
圖 4.3.80 為 50 kHz 不同頻率之 FePd 薄膜磁能積隨後退火溫度變化圖.....	178
圖 4.3.81 為 20 kHz 不同頻率在室溫下 XRD 圖 .....	179
圖 4.3.82 為 35 kHz 不同頻率在室溫下 XRD 圖 .....	180
圖 4.3.83 為 50 kHz 不同頻率在室溫下 XRD 圖 .....	181
圖 5.1.1 氮氣下靶距 5 cm FePd 薄膜經不同退火溫度後退火之 XRD 圖 .....	186
圖 5.1.2 為氮氣下靶距 5 cm 之 FePd 薄膜經不同後退火溫度之磁滯曲線圖.....	187

圖 5.1.3 氮氣下靶距 5 cm 之 FePd 薄膜飽和磁化量及殘餘磁化量隨不同後退火溫度之變化圖 .....	189
圖 5.1.4 氮氣下靶距 5 cm 之 FePd 薄膜經不同溫度退火之水平矯頑磁力圖.....	189
圖 5.1.5 氮氣下靶距 5 cm 之 FePd 經不同溫度退火之磁能積變化圖 .....	190
圖 5.1.6 為氮氣下靶距 5 cm FePd 薄膜經不同退火溫度後退火之 SEM 圖 .....	190
圖 5.1.7 為氮氣下靶距 5 cm FePd 薄膜經不同退火溫度後退火之 MFM 圖 .....	192
圖 5.1.8 氮氣下靶距 10 cm FePd 薄膜經不同退火溫度後退火之 XRD 圖 .....	193
圖 5.1.9 為氮氣下靶距 10 cm FePd 薄膜經不同退火溫度後退火之磁滯曲線圖.....	194
圖 5.1.10 氮氣下靶距 10 cm 之 FePd 薄膜飽和磁化量及殘餘磁化量隨不同後退火溫度之變化圖 .....	196
圖 5.1.11 氮氣下靶距 10 cm 之 FePd 薄膜經不同溫度退火之水平矯頑磁力圖.....	196
圖 5.1.12 氮氣下靶距 10 cm 之 FePd 經不同溫度退火之磁能積變化圖 .....	197

圖 5.1.13 為氮氣下靶距 10 cm FePd 薄膜經不同退火溫度後退火之 SEM 圖 .....	197
圖 5.1.14 為氮氣下靶距 10 cm FePd 薄膜經不同退火溫度後退火之 MFM 圖。 .....	199
圖 5.1.15 氮氣下靶距 12.5 cm FePd 薄膜經不同退火溫度後退火之 XRD 圖 .....	200
圖 5.1.16 為氮氣下靶距 12.5 cm FePd 薄膜經不同退火溫度後退火之磁滯曲線圖 .....	201
圖 5.1.17 氮氣下靶距 12.5 cm 之 FePd 薄膜飽和磁化量及殘餘磁化量隨後退火溫度變化圖 .....	203
圖 5.1.18 氮氣下靶距 12.5 cm 之 FePd 薄膜水平矯頑磁力隨後退火溫度變化圖 .....	203
圖 5.1.19 氮氣下靶距 12.5 cm 之 FePd 薄膜磁能積隨後退火溫度變化圖 .....	204
圖 5.1.20 為氮氣下靶距 12.5 cm FePd 薄膜經不同退火溫度後退火之 SEM 圖 .....	204
圖 5.1.21 為氮氣下靶距 12.5 cm FePd 薄膜經不同退火溫度後退火之 TEM 圖 .....	205
圖 5.1.22 為氮氣下靶距 12.5 cm FePd 薄膜經不同退火溫度後退火之	

MFM 圖。 .....	206
圖 5.1.23 為氬氣與氮氣鍍製 FePd 薄膜經由 500 °C 退火溫度 XRD 圖。 .....	208
圖 5.1.24 為氬氣與氮氣鍍製 FePd 薄膜經由 550 °C 退火溫度 XRD 圖。 .....	209
圖 5.1.25 為氬氣與氮氣鍍製 FePd 薄膜經由 600 °C 退火溫度 XRD 圖。 .....	210
圖 5.1.26 為氬氣與氮氣鍍製 FePd 薄膜經由 650 °C 退火溫度 XRD 圖。 .....	211
圖 5.1.27 為氬氣與氮氣鍍製 FePd 薄膜經由 675 °C 退火溫度 XRD 圖 及角度和半高寬彙整圖。 .....	212
圖 5.1.28 為氬氣與氮氣鍍製 FePd 薄膜經由 700 °C 退火溫度 XRD 圖 及角度和半高寬彙整圖。 .....	214
圖 5.1.29 為氬氣與氮氣鍍製 FePd 薄膜經由 725 °C 退火溫度 XRD 圖 及角度和半高寬彙整圖。 .....	215
圖 5.1.30 為氬氣與氮氣鍍製 FePd 薄膜經由 750 °C 退火溫度 XRD 圖 及角度和半高寬彙整圖。 .....	216
圖 5.1.31 氮氣下改變靶距經由不同溫度退火飽和磁化量。 .....	217
圖 5.1.32 氮氣下改變靶距經由不同溫度退火殘餘磁化量。 .....	217
圖 5.1.33 氮氣下改變靶距經由不同溫度退火矯頑磁力變化圖。 ...	218
圖 5.1.34 氮氣下改變靶距經由不同溫度退火磁能積變化圖。 .....	218

圖 5.2.1 氮氣下靶距 5 cm FePd 薄膜經不同退火溫度後退火之 XRD 圖。	220
圖 5.1.2 為氮氣下靶距 5 cm 之 FePd 薄膜經不同後退火溫度之磁滯曲線圖。	221
圖 5.2.3 氮氣下靶距 5 cm 之 FePd 薄膜飽和磁化量及殘餘磁化量隨不同後退火溫度之變化圖。	223
圖 5.2.4 氮氣下靶距 5 cm 之 FePd 薄膜經不同溫度退火之水平矯頑磁力圖。	223
圖 5.2.5 氮氣下靶距 5 cm 之 FePd 經不同溫度退火之磁能積變化圖。	224
圖 5.2.6 為氮氣下靶距 5 cm FePd 薄膜經不同退火溫度後退火之 SEM 圖。	224
圖 5.2.7 氮氮氣下靶距 10 cm FePd 薄膜經不同退火溫度後退火之 XRD 圖。	226
圖 5.2.8 為氮氣下靶距 10 cm FePd 薄膜經不同退火溫度後退火之磁滯曲線圖。	227
圖 5.2.9 氮氣下靶距 10 cm 之 FePd 薄膜飽和磁化量及殘餘磁化量隨不同後退火溫度之變化圖。	229
圖 5.2.10 氮氣下靶距 10 cm 之 FePd 薄膜經不同溫度退火之水平矯頑磁力圖。	229

圖 5.2.11 氮氣下靶距 10 cm 之 FePd 經不同溫度退火之磁能積變化圖 .....	230
圖 5.2.12 為氮氣下靶距 10 cm FePd 薄膜經不同退火溫度後退火之 SEM 圖 .....	230
圖 5.2.13 氮氣下靶距 12.5 cm FePd 薄膜經不同退火溫度後退火之 XRD 圖 .....	232
圖 5.1.14 為氮氣下靶距 12.5 cm FePd 薄膜經不同退火溫度後退火之磁 滯曲線圖.....	233
圖 5.2.15 氮氣下靶距 12.5 cm 之 FePd 薄膜飽和磁化量及殘餘磁化量 隨後退火溫度變化圖 .....	235
圖 5.2.16 氮氣下靶距 12.5 cm 之 FePd 薄膜水平矯頑磁力隨後退火溫 度變化圖。.....	235
圖 5.2.17 氮氣下靶距 12.5 cm 之 FePd 薄膜磁能積隨後退火溫度變化 圖。.....	236
圖 5.1.18 為氮氣下靶距 12.5 cm FePd 薄膜經不同退火溫度後退火之 SEM 圖。.....	236
圖 5.2.19 為氮氣下靶距 12.5 cm FePd 薄膜經不同退火溫度後退火之 TEM 圖。.....	237
圖 5.2.20 為氮氣與氮氣鍍製 FePd 薄膜經由 500 °C 退火溫度 XRD 圖。 .....	240

圖 5.2.21 為氫氣與氮氣鍍製 FePd 薄膜經由 550 °C 退火溫度 XRD 圖。	242
圖 5.2.22 為氫氣與氮氣鍍製 FePd 薄膜經由 600 °C 退火溫度 XRD 圖。	243
圖 5.2.23 為氫氣與氮氣鍍製 FePd 薄膜經由 650 °C 退火溫度 XRD 圖。	245
圖 5.2.24 為氫氣與氮氣鍍製 FePd 薄膜經由 675 °C 退火溫度 XRD 圖。	246
圖 5.2.25 為氫氣與氮氣鍍製 FePd 薄膜經由 700 °C 退火溫度 XRD 圖。	247
圖 5.2.26 為氫氣與氮氣鍍製 FePd 薄膜經由 725 °C 退火溫度 XRD 圖。	248
圖 5.2.28 為氫氣與氮氣鍍製 FePd 薄膜經由 600 °C 退火溫度 XRD 圖。	249
圖 5.2.29 氮氣下改變靶距經由不同溫度退火飽和磁化量	250
圖 5.2.30 氮氣下改變靶距經由不同溫度退火殘餘磁化量	250
圖 5.2.31 氮氣下改變靶距經由不同溫度退火矯頑磁力變化圖	251
圖 5.2.32 氮氣下改變靶距經由不同溫度退火磁能積變化圖	251
圖 5.1.1 Cu/FePd (650 °C) 薄膜經不同退火溫度後退火之 XRD 圖。	256
圖 6.1.2 Cu/FePd (650 °C) 薄膜經不同退火溫度後退火之磁滯曲線圖	257
圖 6.1.3 Cu/FePd (650 °C) 薄膜飽和磁化量及殘餘磁化量隨不同後退火溫度之變化圖	259

圖 6.1.4 Cu/FePd (650 °C) 薄膜經不同溫度退火之水平矯頑磁力圖	259
圖 6.1.5 Cu/FePd (650 °C) 薄膜經不同溫度退火之磁能積變化圖	...260
圖 6.1.6 Cu/FePd (650 °C) 薄膜經不同溫度後退火之 SEM 圖	.....261
圖 6.2.1 Cu/FePd (675 °C) 薄膜經不同退火溫度後退火之 XRD 圖	...262
圖 6.2.1 Cu/FePd (675 °C) 薄膜經不同退火溫度後退火之磁滯曲線圖。	.....263
圖 6.2.3 Cu/FePd (675 °C) 薄膜飽和磁化量及殘餘磁化量隨不同後退火溫度之變化圖	.....265
圖 6.2.4 Cu/FePd (675 °C) 薄膜經不同溫度退火之水平矯頑磁力圖。	.....265
圖 6.2.5 Cu/FePd (675 °C) 薄膜經不同溫度退火之磁能積變化圖。	266
圖 6.1.6 Cu/FePd (675 °C) 薄膜經不同溫度後退火之 SEM 圖。	.....267
圖 6.3.1 Cu/FePd (700 °C) 薄膜經不同退火溫度後退火之 XRD 圖。	.....268
圖 6.3.2 Cu/FePd (700 °C) 薄膜經不同退火溫度後退火之磁滯曲線圖。	.....269
圖 6.3.3 Cu/FePd (700 °C) 薄膜飽和磁化量及殘餘磁化量隨不同後退火溫度之變化圖。	.....271
圖 6.3.4 Cu/FePd (700 °C) 薄膜經不同溫度退火之水平矯頑磁力圖。	.....271
圖 6.3.5 Cu/FePd (700 °C) 薄膜經不同溫度退火之磁能積變化圖。	272
圖 6.3.6 Cu/FePd (700 °C) 薄膜經不同溫度後退火之 SEM 圖。	.....272



圖 6.4.1 為加入銅頂層後經由不同溫度退火之矯頑力機制圖。 .....275



# 第一章 緒論

## 1.1 前言

隨著科技的進步，磁性材料應用不斷的進步，趕上文明發展的腳步，使人類可以從網路上傳遞、分享、和及收集多種類的資訊及知識。許多的研究學者努力不懈鑽研以提升磁性材料的性能，以降低開發成本及使用的資源，使磁性材料達到最高的經濟效益，是一項受關注的重要研究。

磁性儲存為現今重要儲存技術之一，其廣為人知就是使用資料儲存從最一開始的錄音影帶、電腦的軟硬碟，到現今的磁阻式隨機存取記憶體，這些都是將磁性材料薄膜化得到的結果。圖 1.1.1 為磁性材料分類以及不同的磁特性的應用。而磁性儲存方式分為水平讀寫或垂直式讀寫，當磁疇中磁矩的磁化方向是以平於磁碟面的話就稱為水平式讀寫。反之，磁矩垂直於膜面的就稱為垂直式讀寫。兩者的儲存方式不同影響了儲存的密度以穩定性的差異，材料磁矩大小和磁區壁寬度決定了磁儲存密度，如圖 1.1.2 所示。

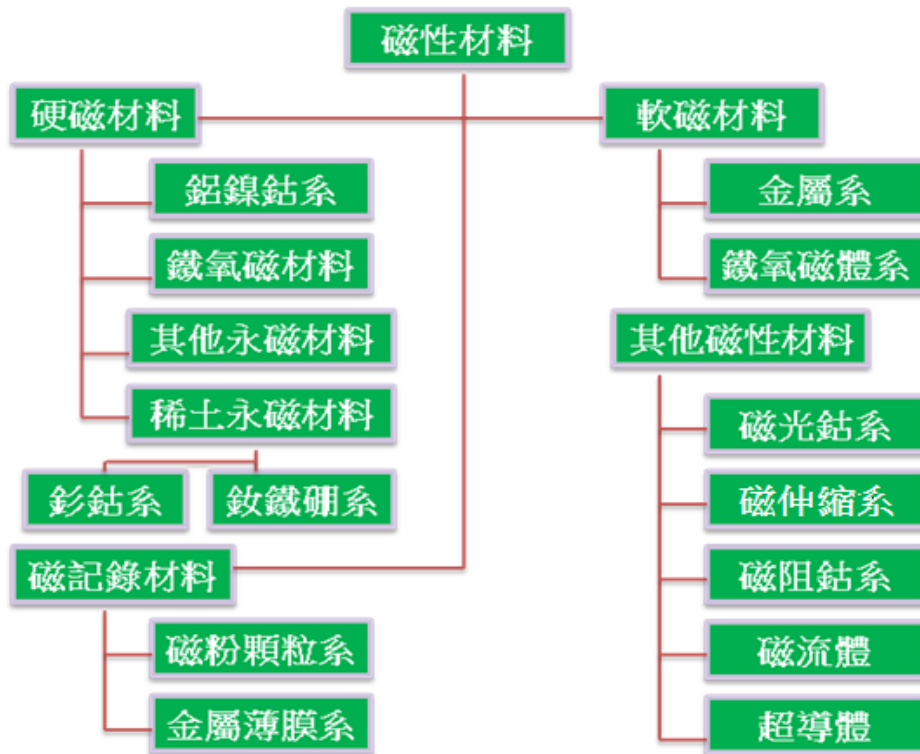


圖 1.1 磁性材料分類[1]。

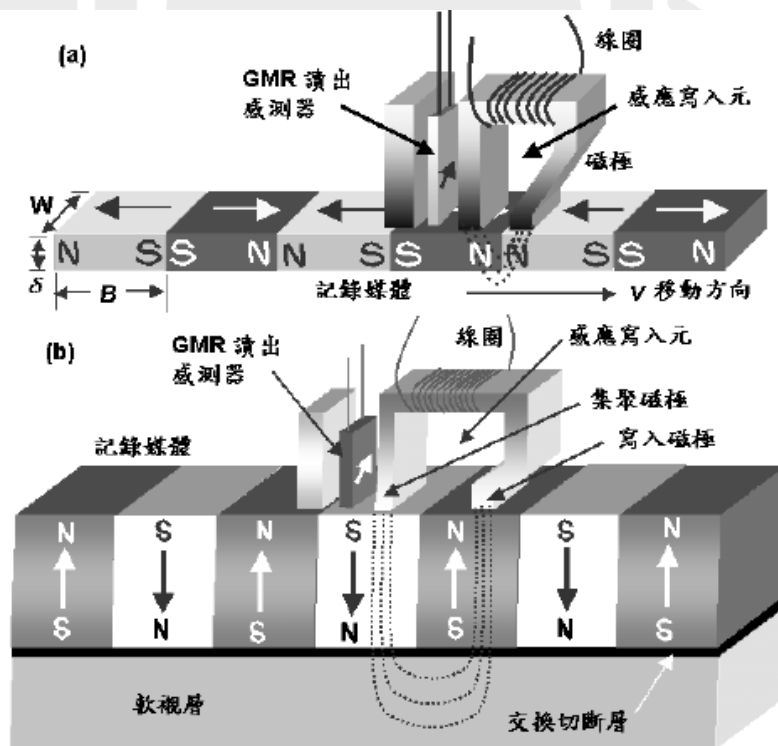


圖 1.2.1 水平記錄媒體與垂直記錄媒體比較[2]。

## 1.2 FePd 之簡介

L1<sub>0</sub> 鐵磁合金如 FePt 和 CoPt 以及 FePd 具有優異的耐腐蝕性和磁固有特性包括強的磁晶異向性和大的飽和磁化量以及高的居里溫度，因此在記錄介質、自旋電子器件、微機電系統應用有廣泛研究。而 L1<sub>0</sub> FePd 具有較低的磁異向性場為 37 kOe，以及與 FePt 相當的磁晶異向性能，因此備受到許多學者的關注。FePd 不僅具有低於 8 kOe 的適當矯頑磁力用於磁寫入，而且熱穩定性保持與 L1<sub>0</sub> FePd 相同的水平。

磁紀錄科技是現在最高效能的訊息記錄方式之一，將訊號輸入磁頭，磁頭再將訊號轉變為磁場，將記錄媒體磁化而寫入資訊。且因為它的紀錄方式是用利用材料之磁矩的翻轉，所以速度非常快，不但可以無限次數使用，而且可以保存很長的時間而不消失。FePd 具有許多優異的條件，使 L1<sub>0</sub> 系的材料更具有應用價值。

表 1.2.1 磁性合金材料特性[3]

alloy system	material	K <sub>u</sub> (10 <sup>7</sup> erg/cm <sup>3</sup> )	M <sub>S</sub> (emu/cm <sup>3</sup> )	H <sub>K</sub> (kOe)	T <sub>C</sub> (K)	δ <sub>w</sub> (Å)	γ (erg/cm <sup>3</sup> )	D <sub>C</sub> (μm)	D <sub>p</sub> (nm)
	CoPtCr	0.20	298	13.7	--	222	5.7	.89	10.4
Co-alloys	Co	0.45	1400	6.4	1404	148	8.5	.06	8.0
	Co <sub>3</sub> Pt	2.0	1100	36	--	70	18	.21	4.8
	FePd	1.8	1100	33	760	75	17	.20	5.0
L1 <sub>0</sub> phases	FePt	6.6-10	1140	116	750	39	32	.34	3.3-2.8
	CoPt	4.9	800	123	840	45	28	.61	3.6
	MnAl	1.7	560	69	650	77	16	.71	5.1
rare-earth	Fe <sub>14</sub> Nd <sub>2</sub> B	4.6	1270	73	585	46	27	.23	3.7
transition metals	SmCo <sub>5</sub>	11-20	910	240-400	1000	22-30	42-57	.71-.96	2.7-2.2

## 1-2-1 FePd 合金之晶體結構

FePd 的二元平衡相圖如圖 1.2.1 所示，在室溫時 FePd 呈現鐵磁性的面心立方結構 ( $\gamma_1$  相) (如圖 1.2.2)。當溫度在  $790^\circ\text{C}$  以前結構會由面心立方轉變為面心四方而溫度持續提升並超過  $790^\circ\text{C}$  時，序化結構會被破壞而轉變為面心立方的非序化結構 ( $\gamma$  相) (如圖 1.2.3)。在 Pd 含量較高的區域，室溫時呈現鐵鈮比 1:3 的面心立方序化結構 ( $\gamma_2$  相) (如圖 1.2.4)，生成  $\text{FePd}_3$  最高溫度為  $820^\circ\text{C}$  比 FePd 生成的最高溫度  $790^\circ\text{C}$  還高，且 Pd 含量 61.5% 時會有兩種序化相為  $760^\circ\text{C}$  且 FePd 和  $\text{FePd}_3$  間的兩相成分區間為 60.2% ~ 62.6% Pd 含量成分範圍內。

其與其他  $L1_0$  系的合金相比，例如 FePt 及 CoPt，其較不同的是，在鐵含量較多的區域沒有 3:1 相，是體心立方 (body-centered-cubic, bcc) 與序化  $\gamma_1$  相的混合區。和等原子比的 FePt 相比，FePd 相存在溫度約比 FePt 低約  $500^\circ\text{C}$ ，但其居里溫度 ( $490^\circ\text{C}$ ) 卻比 FePt 高約  $40^\circ\text{C}$ ，此一特性顯示 FePd 在磁記錄應用上與其它磁性材料相比有其應用的特點。

## 1-2-2 序化與非序化[4]

當溫度高於 FePd 的相存在溫度時，則會顯示非序化(disordered structure)的  $\gamma$  相(A1)，其穩定相為面心立方(face centered cubic, fcc)。其晶格常數為 3.80 Å。經過適當的熱處理溫度後，FePd 薄膜會形成有序(ordered structure)結構的  $\gamma_1$ (L1<sub>0</sub>)，為面心四方結構(face-centered tetragonak, fct)，如圖 1.2.2 所示。其晶體受到 Fe 及 Pd 兩者之間的原子半徑不同( $r_{\text{Fe}}=1.25$  Å,  $r_{\text{Pd}}=1.37$  Å)的影響，當其序化時，Fe 原子與 Pd 原子分別受到不同的內應力，這種應力的發生會沿著 c 軸產生形變，導致其 a 軸晶格常數拉伸至 3.85 Å [4]。

固溶合金超晶格，常見的三個主要金屬結構:

- (1) 面心立方晶系(fcc)，A1
- (2) 體心立方晶系(bcc)，A2
- (3) 六方最密晶系(cph)，A3

常見之結構轉變分別為， $A_1 \rightarrow L1_2$ 、 $A_2 \rightarrow B2$ 、 $A1 \rightarrow L1_0$ 、 $A1 \rightarrow L1_1$

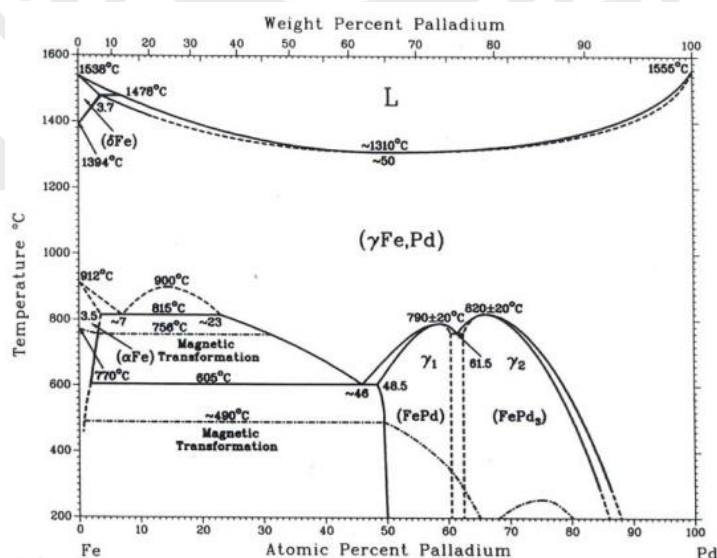


圖 1.2.1 FePd 二元相圖。[5]

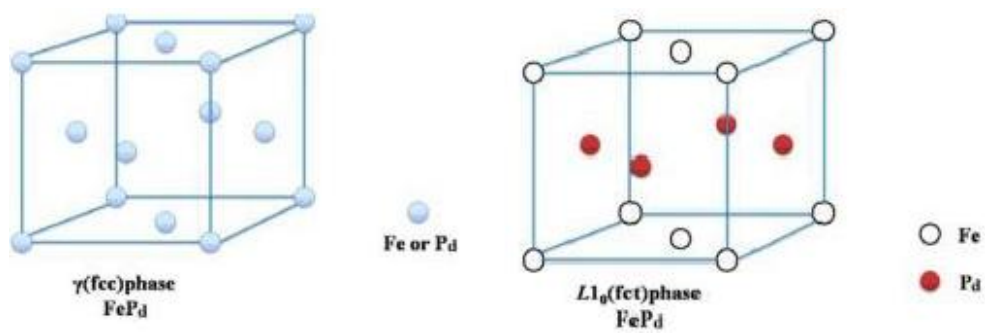
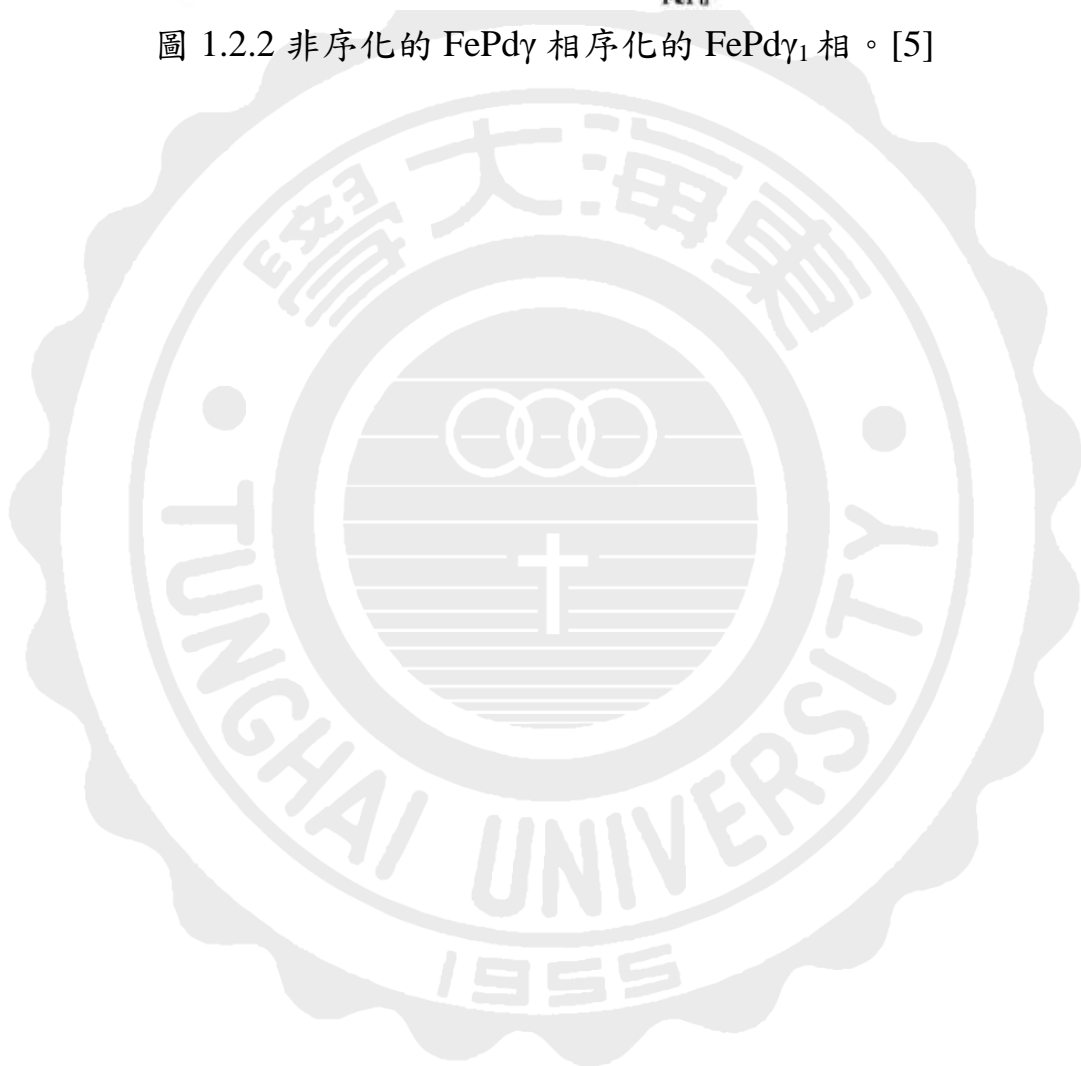


圖 1.2.2 非序化的 FePd $\gamma$  相序化的 FePd $\gamma_1$  相。[5]



### 1-3 文獻回顧

2003年，C. Clavero等人[6]使用磊晶方式將薄膜直接沉積在MgO基板上沉積過程邊加溫從室溫到700 °C，從XRD繞射峰算出序化度得知在450 °C有著最佳的序化，接著改變一系列厚度來優化FePd磁特性，發現到在 3 nm 序化度近100 % 有著高的矯頑磁力，矯頑磁力會隨著厚度下降而提升可能原因與表面有關。

表 1.3.1 為改變厚度下並且在沉積溫度為 450 °C 序化度及晶粒尺寸和 c/a 比[6]

	3 nm	7 nm	22 nm
Phase	$L1_0$	$L1_0$	$L1_0$
$a(\text{\AA})(\pm 0.001 \text{\AA})$	3.856	3.847	3.847
$c\text{\AA}(\pm 0.005 \text{\AA})$	3.707	3.714	3.697
Grain size $\text{\AA}(\pm 0.5 \text{\AA})$	30	62	130
Mosaic (deg) ( $\pm 0.01$ deg)	1.75	1.64	1.3
$S$	$0.58 \pm 0.04$	$0.67 \pm 0.04$	$0.62 \pm 0.06$
% $L1_0$ phase ( $\pm 1$ %)	100	71	93

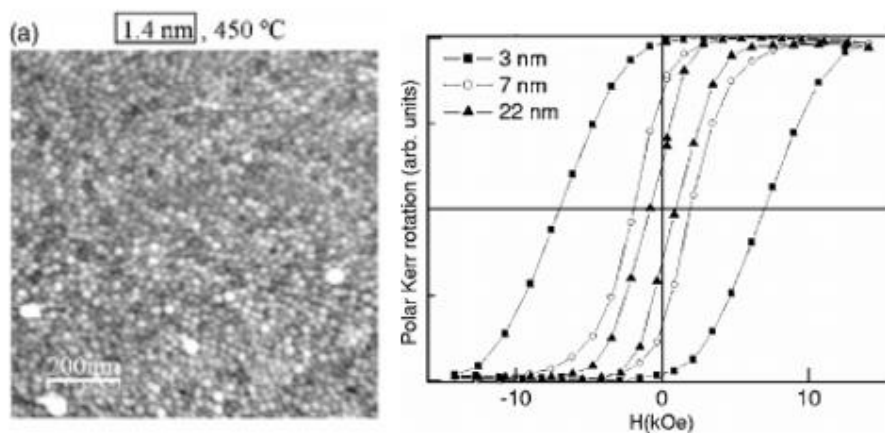




圖 1.3.1 為在沉積溫度為 450 °C 表面形貌與磁特性[6]

2010 年， Skuza 等人[7]使用磁控濺鍍法將薄膜直接沉積在MgO基板上(已先在溫度700 °C下後退火30分鐘)，並在頂層加上Au防止氧化及分析磁特性，選用450 °C(序化度最好)改變膜厚(5-80 nm)，發現膜厚、序化度與磁晶異向性有直接的關連。

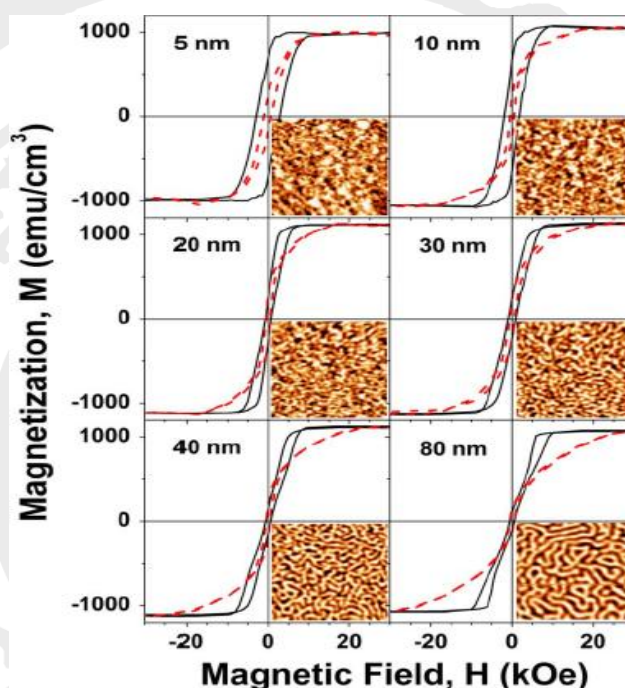


圖 1.3.2 450 °C FePd 薄膜變膜厚之水平(紅)與垂直(黑)磁滯曲線圖與 MFM 磁區結構圖(3 $\mu$ m x 3 $\mu$ m)。 [7]

2009 年，Wei 等人[8]在同樣條件下沉積 FePd 薄膜，其改變 FePd 靶材的成份，並對 Fe<sub>52</sub>Pd<sub>48</sub> 薄膜做兩種不同的製程，發現在溫度 400 °C 下沉積的 Fe<sub>52</sub>Pd<sub>48</sub> 薄膜的序化度是最佳的。其表面形貌為島狀，矯頑場達到 8 kOe，而初鍍態基板加熱溫度 100 °C 並在 400 °C 下做後退火

1 小時的  $\text{Fe}_{52}\text{Pd}_{48}$  薄膜，其表面形貌較為連續平整。



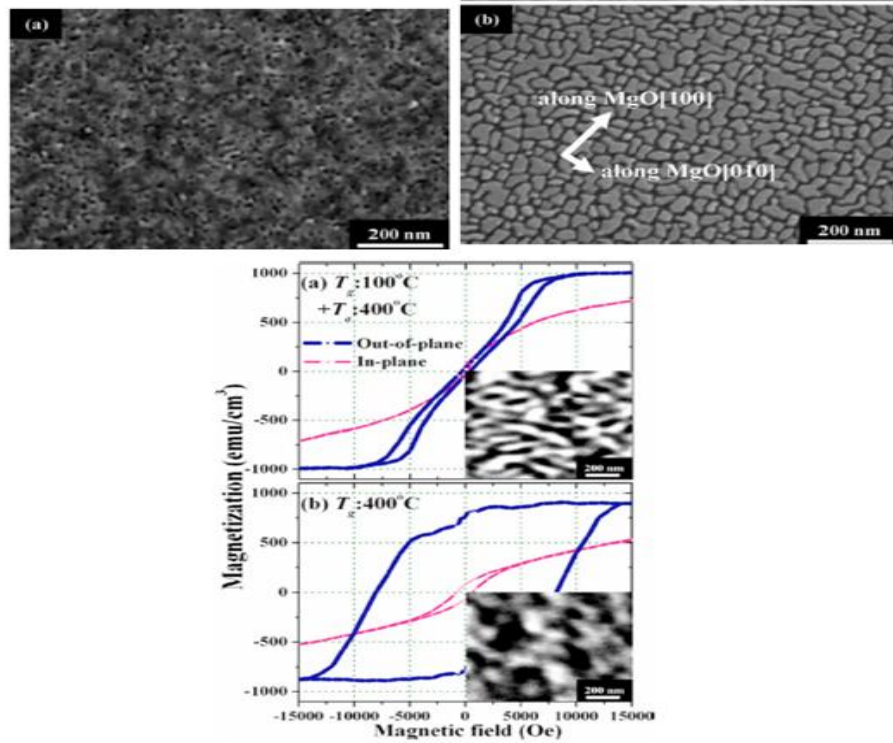


圖 1.3.3 熱處理下之 FePd 薄膜的表面形貌(SEM)，(a)沉積溫度  $100^{\circ}\text{C}$  再後退火  $400^{\circ}\text{C}$  一小時 (b) 沉積溫度為  $400^{\circ}\text{C}$  (c)其磁性與磁區。[8]

2012 年，Khan 等人[9]以磁控濺鍍製備  $L1_0$  序化結構的 FePd 薄膜，使用 MgO 基板上 FePd 層和 MgO 層中間插入 CoFeB 和提升厚度觀察，發現插入層可以提升序化並在厚度  $3.0\text{nm}$  時有明顯的變化，序化後飽和磁化量最高達到  $1100\text{ emu/cm}^3$ ，並降低了表面粗糙度。

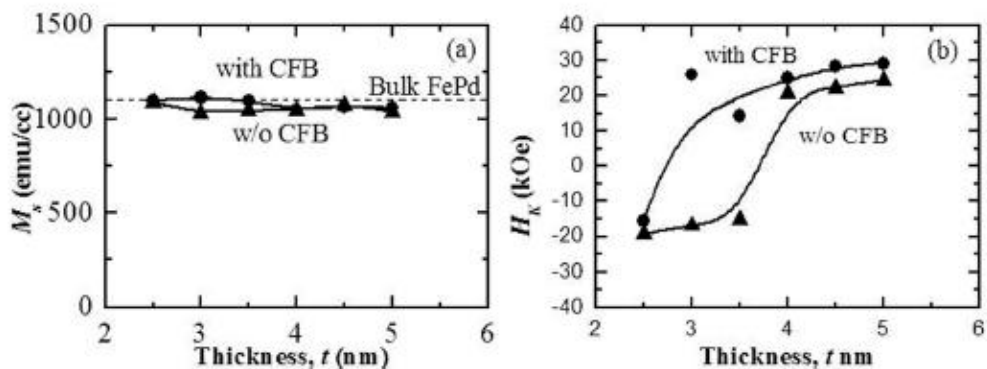


圖 1.3.4 加入 CoFeB 磁化量與磁滯曲線圖。[9]

2013 年，Liu 團隊[10]製備將 $[\text{Fe}(1 \text{ nm})/\text{Pd}(1.2\text{nm})]^{10}$  以磁控濺鍍製備  $L_{10}$  序化結構的 FePd 薄膜，銀的加入有助於提升矯頑磁力為 4. kOe 如圖 1.3.5、1.3.6 所示。從 TEM 上觀察到銀在晶界上抑制 FePd 晶粒間的交互耦合，使矯頑磁力達到大幅提升的效果。

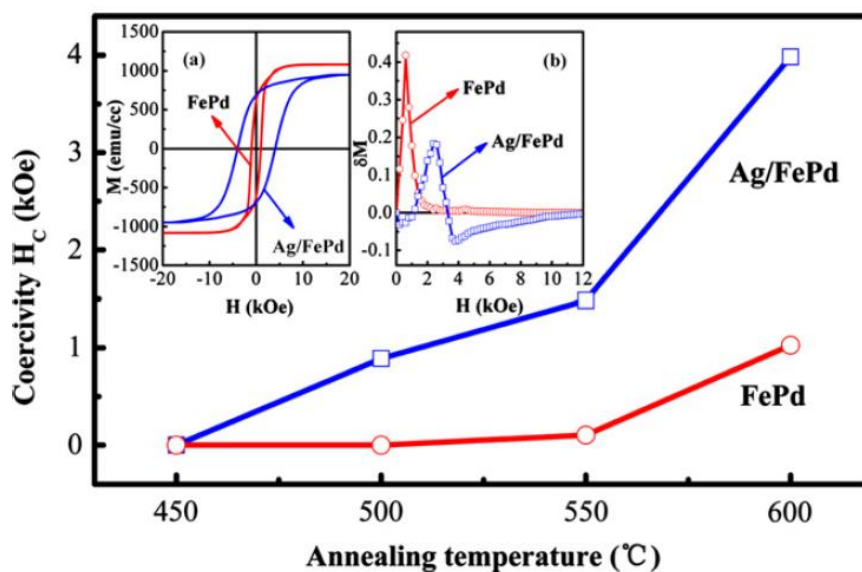


圖 1.3.5 FePd 薄膜加入 Ag 底層改善矯頑力[10]。

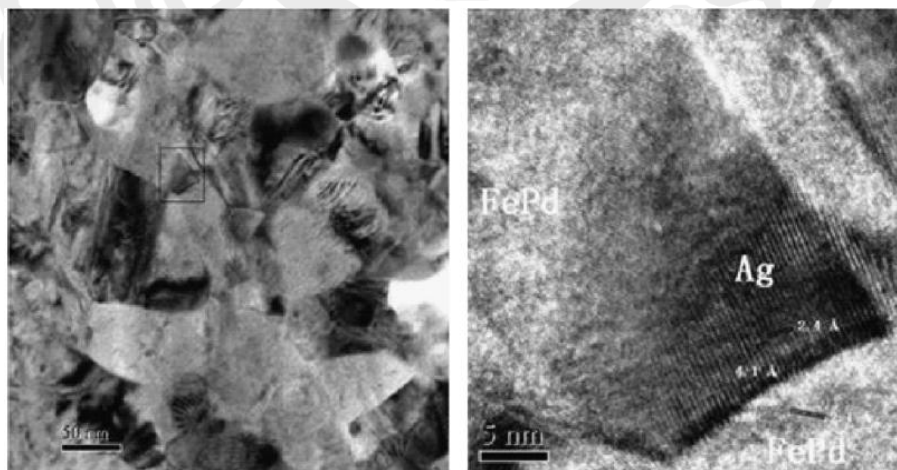


圖 1.3.6 FePd/Ag 的 plane-view TEM 圖[10]。

2015 年，Chang [11] 等人製備 FePd 的薄膜鍍製在有 W 緩衝層的玻璃基板上。W 的加入當退火溫度在 700 °C 退火後矯頑磁力為 3.8 kOe 並且有著較高的磁能積為 8.4 MGOe，引入 W 底層會使 FePd 晶粒細化以及磁區變多，使矯頑磁力上升。

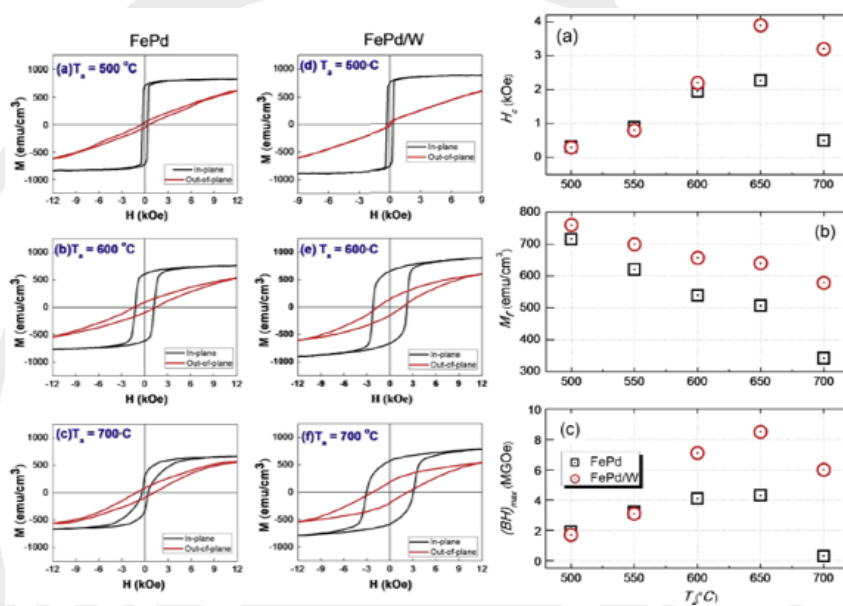


圖 1.3.7 FePd/W 薄膜經不同退火磁性之變化圖[11]。

2015 年，Pecko 等人[12]以電鍍法製備 FePd 奈米線並插入由濺鍍法鍍製的金底層，研究金底層對 FePd 奈米線磁特性的影響。從不同的外加場可以得知奈米線的鐵含量，再以後退火溫度( $T_a = 400 - 700$  °C)與持溫方式(1~5h)觀察不同溫度下奈米線變化，當退火 700 °C 到達 4 小時呈現出最好的矯頑力  $H_c \perp = 237$  kA/m、 $H_c \parallel = 267$  kA/m 且磁能積  $M_r / M_s \parallel = 0.85$ ，從 X 光繞射儀觀察在 600 °C 時持溫 1~5 小時繞射峰的強度變強且發現繞射峰分裂序化溫度長達 4 小時出現金原子的繞射峰，最後在把金底層去除掉和有金底層的奈米線做比較發現到兩者

都有序化且金底層有出現金的繞射峰。



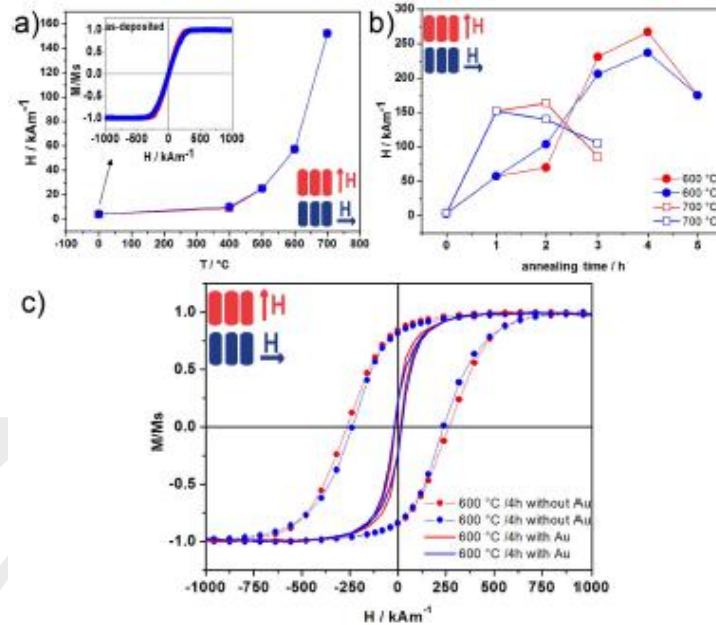


圖 1.3.8 加入金退火 700 °C 長時間退火之矯頑力變化圖[12]。

Ma 團隊[13]在鐵鈀薄膜頂層上加一層矽通氮藉由高溫退火後來觀看結構與磁性，在表面形貌上可以觀察到表面粗糙度為 1.67 nm 說明加入後表面均勻平坦且加入矽後晶粒有細化的現象。XRD 圖上呈現屬於鐵鈀  $L_{10}$  繞射峰而看不出有任何矽氮的繞射峰，表明矽氮相影響鐵鈀晶格並改變 Fct-FePd 的晶格且有抑制晶粒生長作用。從圖 1.3.9 磁性方面上看到在退火候沒加入矽氮頂層鐵鈀薄膜的  $H_c$  相較之下來得高但是加入矽氮後有明顯減少序化溫度，說明加入矽氮後有促進鐵鈀的序化。

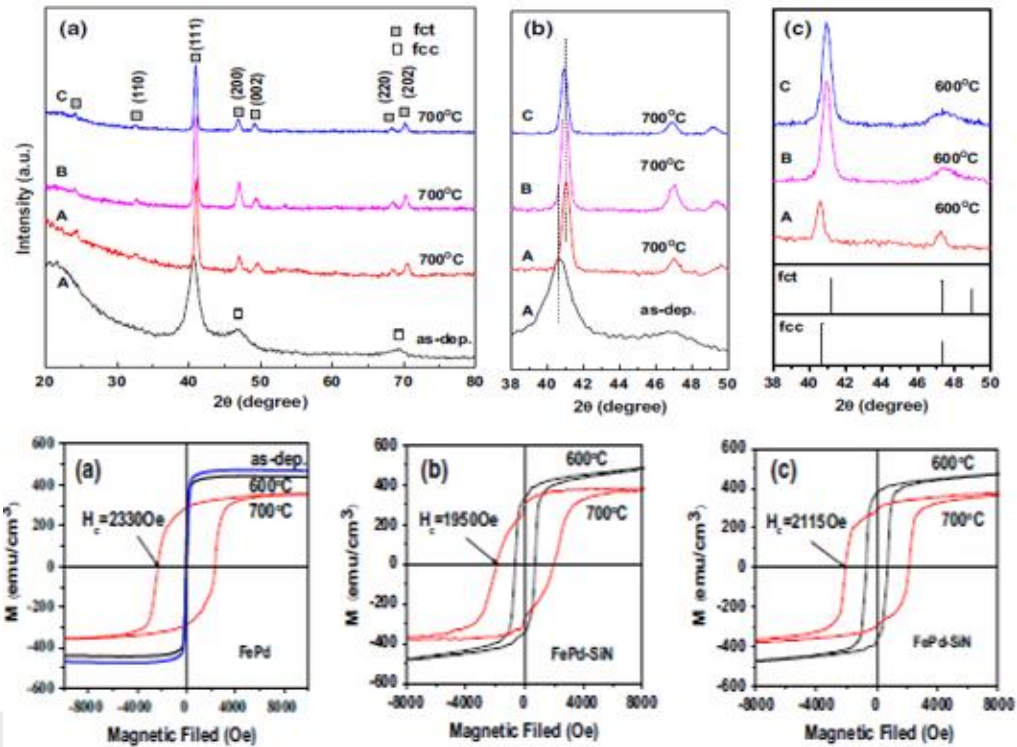


圖 1.3.9 為加入矽層通氮後並經由後退火後分析圖。[13]

Liu 團隊[14]藉由在 FePd 薄膜加入氮化矽來觀察結構與磁性影響，在加入和沒加入僅有屬於鐵鈮薄膜 Fct 的繞射峰，退火時間增長鐵鈮 (111)繞射峰強度有明顯提升且向右偏移。從表面粗糙度上可以觀察到加入後表面平坦均勻而沒加入氮化矽後的相較之下較為粗糙，在微結構上觀察到氮化矽分佈在鐵鈮的晶界上有抑制晶粒尺寸生長作用，而沒有加入的鐵鈮薄膜隨著退火溫度上升晶粒尺寸有明顯的增加。圖 1.3.10 上可以觀察到加入氮化矽後獲得 3.1 kOe 矯頑磁並且隨著退火時間的增長仍然保持高的磁性。



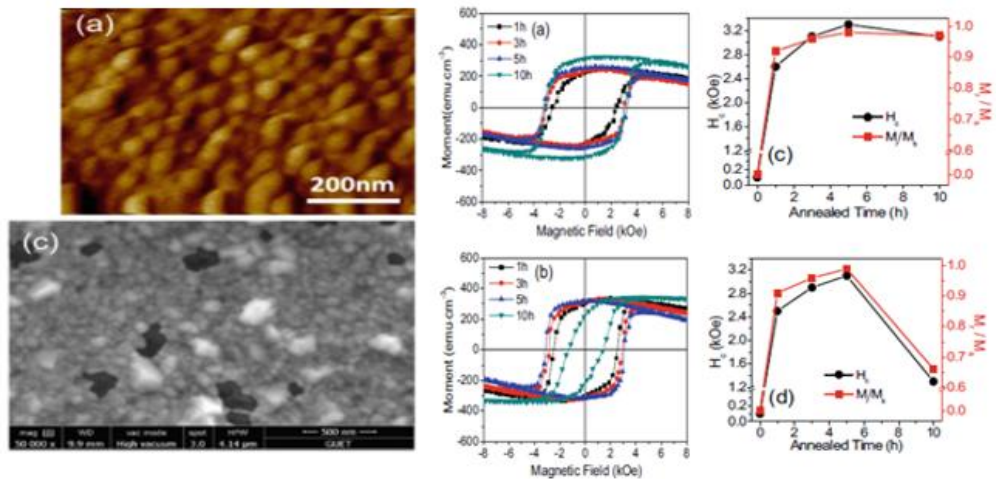


圖 1.3.10 為加入矽氮後並經由後退火後磁性以及表面形貌。[14]

Mufen 團隊[15]使用直流磁控濺射法在玻璃基板上製備了 FePdSi 和 FePdSiN 納米複合薄膜。在相同的製備參數下, FePdSi 和 FePdSiN 成份比會因為氮氣的加入而改變, 在微觀結構和磁性方面存在明顯差異。加入氮氣後會與 Si 優先組合在 FePd 納米顆粒之間形成非晶 Si-N 且會有較平坦的表面形貌, 其在 550 °C 熱處理後分別提高矯頑力, 最大磁能積和剩磁比達 2.8 kOe, 9.4 MGoe(磁能積錯誤在此修正為不到 1.0 MGoe) 和角形性為 0.99。

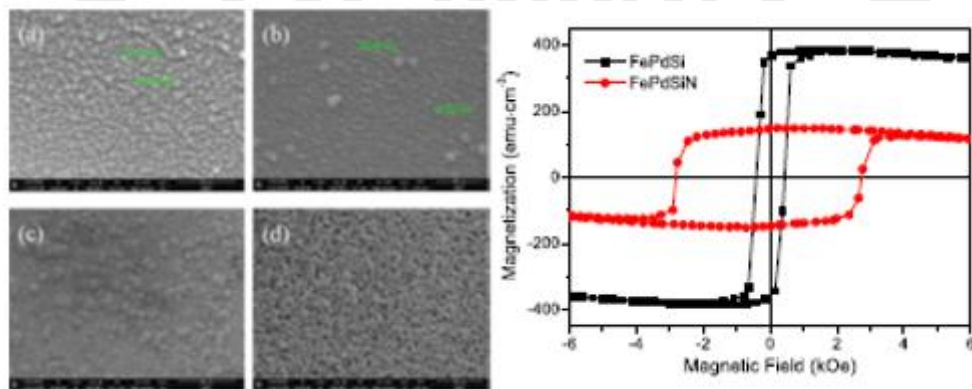


圖 1.3.11 為 FePdSi 加入氮氣經後退火 550 °C 表面形貌與磁性[15]。

Liu 團隊[16]通過直流磁控濺射在玻璃基板上製備多晶  $\text{Fe}_x\text{Pd}_{1-x}$  ( $x=37-64\text{at.}\%$ ) 薄膜，並經由後退火  $550^\circ\text{C}$  下退火 3 小時。研究了不同 Fe 含量下晶體結構和磁性的變化。對於 Pd 含量較多時會呈現出 A1 無序相和軟磁性。而 Fe 含量較高為 51% 的 FePd 膜更有利於形成有序的  $\text{L1}_0$  相，樣品在室溫下表現出最高的矯頑力，磁能積和剩磁比，分別對應於矯頑磁力為 3.5 kOe 和磁能積 17.6 MGOe (磁能積值在此修正為約不到 2.0 MGOe)，在 120 K 時測量發現磁性增加至 4.3 kOe 磁能積為 24.2(磁能積值在此修正為約 1.2) MGOe。

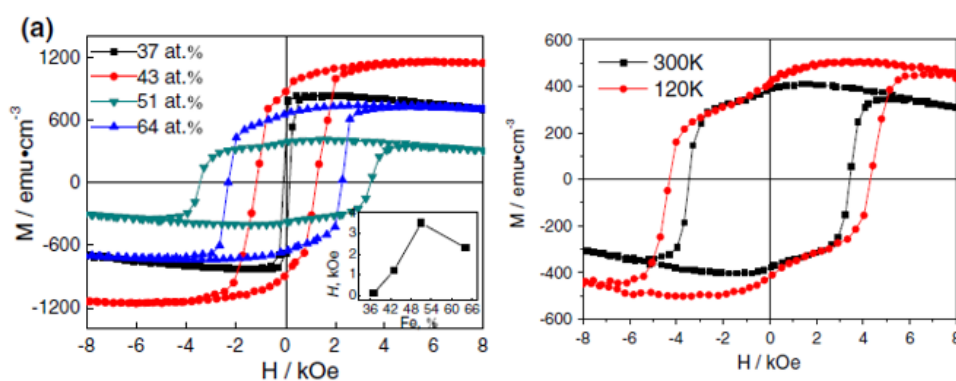


圖 1.3.12 為經由  $550^\circ\text{C}$  後退火和不同測量溫度的磁滯曲線圖[16]。

Xu 團隊[17]使用直流面磁控濺射法在室溫下在玻璃基板上製備 Ti / FePt / Fe 薄膜，研究 Ti 覆蓋層對 FePt 薄膜微觀結構和磁性能的影響。Ti 層加入會形成三元 TiFePt 和二元 PtTi 和 FeTi 合金。結果顯示在引入 Ti 覆蓋層之後會晶粒細化，降低表面粗糙度和提昇矯頑力及較佳矯形性。

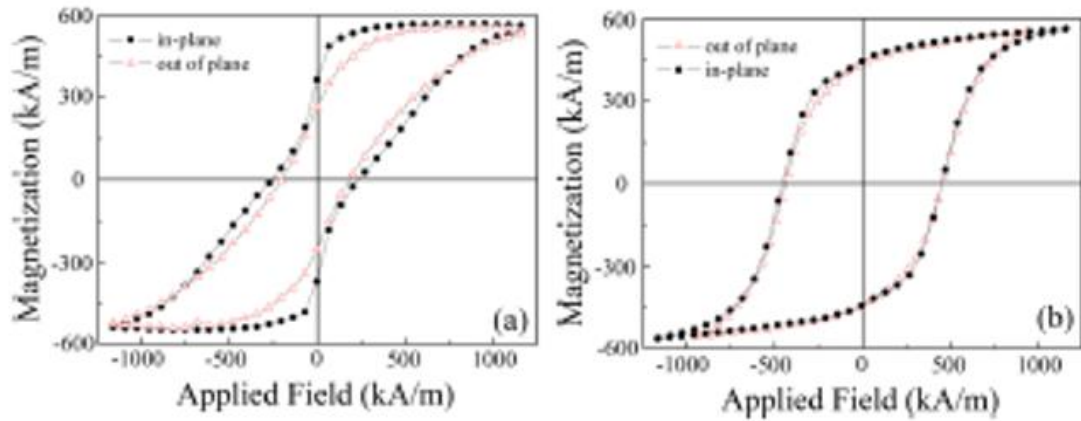


圖 1.3.13 為覆蓋 Ti 頂層後經由退火後磁滯曲線。[17]

Yuan 團隊[18]研究了底層擴散對 Au / Fe<sub>51</sub>Pt<sub>49</sub> 雙層薄膜磁性能的影響。樣品分為兩階段製備。首先，在石英基板上濺射 Fe<sub>51</sub>Pt<sub>49</sub> 並經由退火使結構轉變為 Fct。然後在將金覆蓋層沉積在 Fe<sub>51</sub>Pt<sub>49</sub> 膜上，接著在 300 – 800 °C 下後退火以促進界面擴散。從磁性方面測量發現 FePt 矯頑磁力大幅提升至 23.5 kOe 的高矯頑力。透過電子顯微鏡觀看發現到金會 FePt 晶粒改變。作者認為增強矯頑力的兩個因素主要為晶粒的分離和晶粒細化。

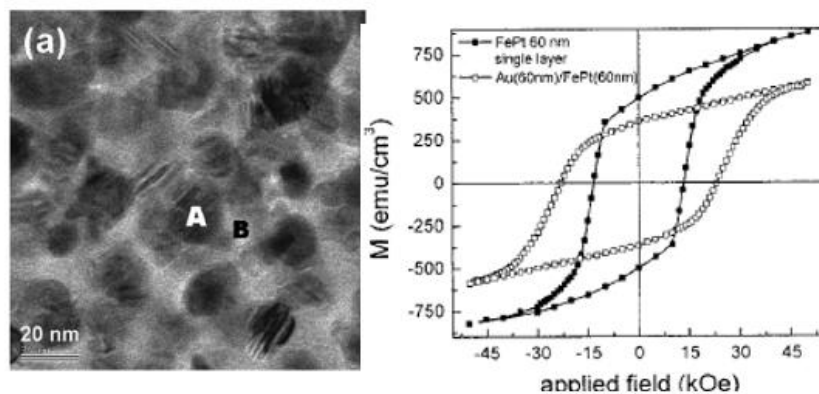


圖 1.3.14 為單層 FePt 覆蓋 Au 頂層後經由退火後磁滯曲線。[18]

## 1-4 研究動機

隨著科技進步，元件往高密度發展，且製備過程需要克服許多的問題，例如薄膜的厚度和熱擾動影響以及晶粒尺寸的控制。而具有高磁晶異向 $L1_0$ 合金系列的FePt、CoPt、FePd有較佳的發展潛力[19-21]。而在許多的 $L1_0$ 合金中，以 FePt 最為熱門，此材料有較大的飽和磁化量以及磁晶異向性能皆較CoPt高。

至於FePd，其磁晶異向性能略低於FePt，仍屬於同一數量級，而FePd具有許多優點包括高的居禮溫度及化學穩定性，當晶粒尺寸越小時也能維持穩定磁化，也因此備受矚目。且近幾年來有很多團隊研究過關於 FePd 的奈米顆粒、共濺鍍、或者多層膜結構的議題、以及摻雜、緩衝層等等對 FePd 磁性、結構、晶粒、退火溫度對 FePd 薄膜的影響。

本文研究了不同濺鍍方法來製備 FePd 薄膜 並經由不同退火溫度對磁性的影響。實驗上所使用直流濺鍍和射頻濺鍍，最後使用脈衝直流方式鍍製 FePd，其條件分別為頻率為 20、35、50 kHz 在以不同脈衝持續時間 10 %、20 %、50 %、80 % 沉積，並由不同退火溫度觀察結構及磁性變化。藉此改變濺鍍氣體以直流濺鍍和射頻濺鍍製備薄膜並探討 FePd 結構與磁性變化

接著以改變濺鍍氣體為氮氣，並使用直流濺鍍和射頻濺鍍來製備薄膜且經由不同溫度後退火探討，因氮原子較小在初始狀態晶格間距

與應力的不同相較與氫氣不同，藉此觀看氮氣的沉積是否有助於使矯頑磁力達到提升的效果。

最後使用覆蓋頂層在低溫退火並使頂層與 FePd 層相互擴散方式，使頂層元素能擴散進 FePd 薄膜之晶界，抑制 FePd 晶粒間的交互作用，冀能提升其磁性。



## 第二章 文獻探討

### 2-1 磁性來源[22]

一般而言，磁性的起源自於電子所提供的磁矩，主要有兩種，一種是電子繞原子核運動產生的軌道磁矩(Orbital magnetic moment)，一種是電子本身的自旋磁矩(spin magnetic moment)，如圖 2.1。另外，因原子核運動產生的磁矩與電子相比太小，一般情況是可以忽略的。

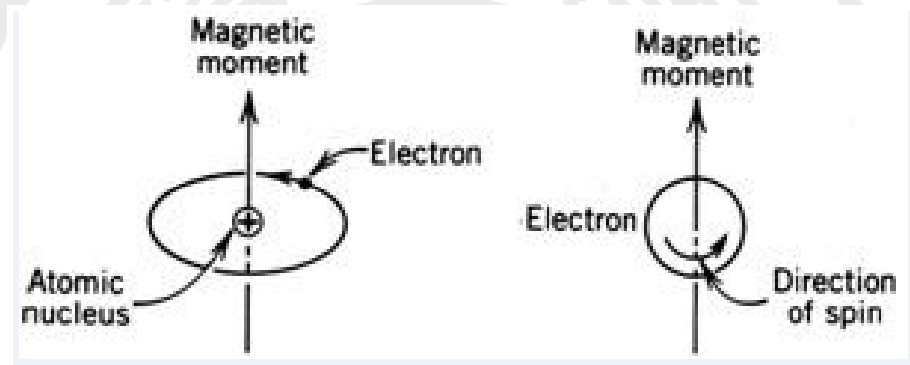


圖 2.1 軌道磁矩及電子自旋磁矩。

## 2-1-2 磁性物質分類[23]

當物質置於外加場時，其磁化強度會產生變化，兩者之間關係可表示為： $M = \chi H$ ； $\chi$  為物質磁化率 (magnetic susceptibility)，其表示為物質被磁化的難易強度，物質會依照磁化率大小可分為順磁性 (Para-magnetic)、反磁性 (Dia-magnetic)、反鐵磁性 (Anti-ferromagnetic)、陶鐵磁性 (Ferri-magnetic)、鐵磁性 (Ferro-magnetic) 等。前三者為弱磁性，後兩者為強磁性，以下分別簡介之：

### 順磁性 (paramagnetism)

順磁性物質有著極微弱原子磁矩間的交互耦合作用 (Exchange interaction)，在沒有施加外加場時，其磁矩為隨機排列 (random) 且沒有靜磁矩。當提供外加場時則可感測出較微弱的磁化量，其磁化率大都為  $10^{-3} \sim 10^{-6}$  量級。而順磁性物質的磁化率較易受到溫度影響，且遵守物理中的  $\chi = C/T$  (Curie's Law)，其中， $C$  代表居禮常數， $T$  為絕對溫度。磁矩會受到熱擾動影響而打亂磁矩間排列，因此在固定場下，提高溫度將可以降低磁化率。而常見的順磁性物質有二氧化氮 ( $\text{NO}_2$ )、氧氣 ( $\text{O}_2$ )、銅 ( $\text{Cu}$ )、金 ( $\text{Au}$ ) 等。

## 反磁性 (diamagnetism)

反磁性的材料特徵為在外施加磁場  $H$  情況下，會出現與磁場方向相反的磁化量，且有負的磁化率，與溫度較無關係，所有物質都具有反磁性，只是一般反磁性物質  $\chi$  很小，所以若物質同時具有其他特性下。反磁性就會被遮蔽，呈現出其他種磁特性。

## 鐵磁性 (ferrimagnetism)

鐵磁性材料自發(spontaneous)磁化和磁滯(hysteresis)現象，且具有數量級高達 $10^6$ 之正磁化率，只需很小外加磁場就能使其達到磁化飽和。鐵磁性物質的磁矩成平行排列，但其  $M$  與  $H$  有著複雜的非線性關係。但是，在溫度超過居禮溫度(Curie temperature,  $T_C$ )時，磁矩排列受熱擾動影響，而由鐵磁性轉變成順磁性( $\chi = \frac{C}{T-T_C}$ )。鐵磁性元素僅存在於 3d 及 4f 族之元素中，一般常見的鐵磁性材料有鐵、鈷、鎳、釷及其之合金。

## 反鐵磁性 (antiferromagnetism)

反鐵磁性的材料特性與順磁相比有著相似的地方，與順磁性不同的是，反鐵磁性有尼爾溫度  $T_N$ (Neel temperature)，當在尼爾溫度之下時， $\chi$  逐漸降低，最後趨於穩定，鄰近原子的磁矩呈現出反平行排列，且淨磁矩為零。當在尼爾溫度之上時， $\chi$  逐漸提高，磁矩呈現出散亂狀， $\chi$  與  $T$  的表現與順磁性相同，顯示較小磁化係數。這是因為兩種晶格磁矩成反平行排列，使其相互抵消所導致。



## 陶鐵磁性 (ferrimagnetism)

陶鐵磁又稱為亞鐵磁，其特徵與鐵磁性物質相同，有正的磁化率，不過磁化量低於鐵磁性物質，而微觀現象與反鐵磁類似，其磁矩排列方向與反鐵磁一樣呈反向排列，但磁矩依舊無法完全抵銷，而當溫度大於 $T_c$ 時，磁矩會因受熱擾動影響而成出現混亂的排列並呈順磁性。常見之陶鐵磁性物質有氧化鐵系列如： $\text{CoO}$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Fe}_3\text{O}_4$ 、 $\text{BaO}$  等。

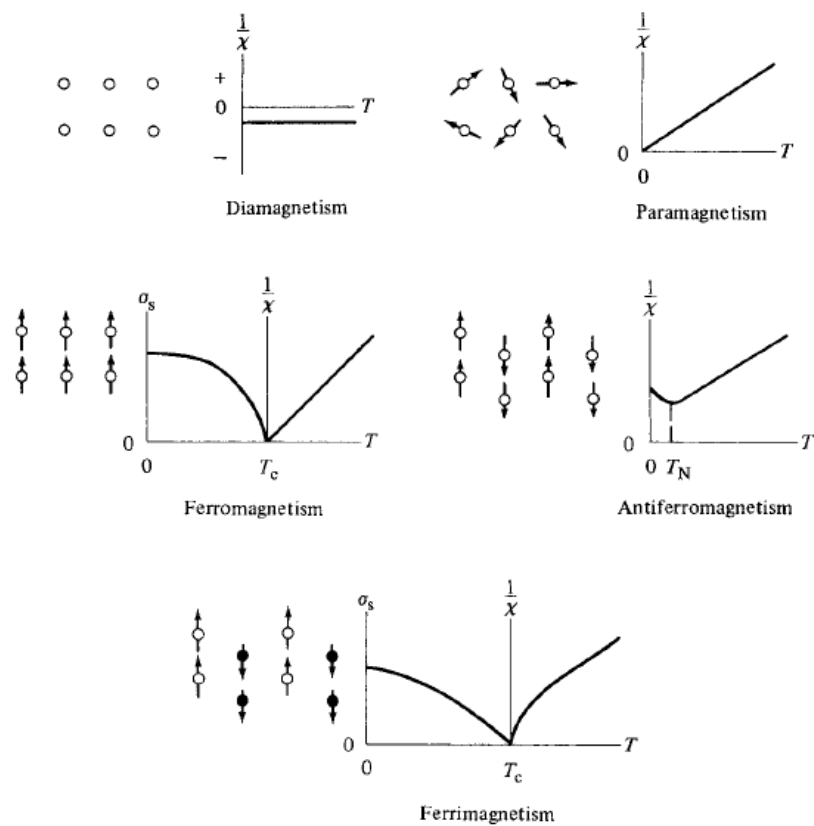


圖 2.1.2 磁性物質的分類[23]。

## 2-2 磁異向性(magnetic anisotropy)[24]

磁異向性表示磁性材料在不同方向下磁化過程度難易不同。

磁異向包括下列幾種:

1. 磁晶異向性(Magnetocrystalline anisotropy)
2. 形狀異向性(Shape anisotropy)
3. 應力異向性(Stress anisotropy)
4. 交換異向性(Exchange anisotropy)
5. 誘導異向性 (Induced anisotropy) ，由磁場退火 (Magnetic annealing)、塑性變化(plastic deformation)及輻射照射(irradiation)來誘發產生。

## 2-2-1 磁晶異向性[25-27]

磁晶異向性與材料的本質特性有關，磁性體磁化方向容易沿著特定結晶方向排列之特性，即稱為磁晶異向性。

以單晶鎳、鐵為例、立方晶系鎳、鐵磁晶異向性能  $E_k$  可用下式表示：

$$E_k = K_0 + K_1(\alpha_1^2\alpha_2^2 + \alpha_2^2\alpha_3^2 + \alpha_3^2\alpha_1^2) + K_2\alpha_1^2\alpha_2^2\alpha_3^2$$

其中， $K_0$  與方向無關， $K_1$ 、 $K_2$  為第一與第二磁晶異向性常數， $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$ 、 $\alpha_3$  為磁化方向與三個立方晶軸夾角的餘弦值[28]。

由上式 2.7 可知，雖然鎳與鐵一樣為立方晶系，但磁晶異向性常數的差異，會使得兩者磁性行為截然不同，如圖 2.2.1 所示。

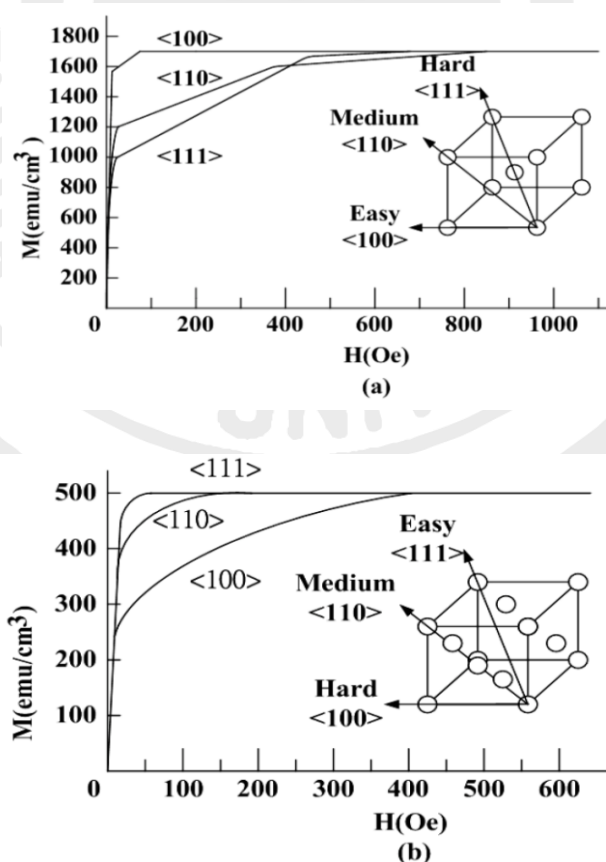


圖 2.2.1 單晶(a)鐵(b)鎳之磁化曲線[29]。

### 2-2-2 形狀異向性[30]

形狀異向性和去磁場效應有關，當磁性薄膜樣品為非圓形且被磁化過後，例如：橢圓形，則樣品的長軸將比短軸較易磁化，這是因為短軸方向的消磁場( $H_d$ )比長軸方向大，故沿短軸方向需要較高的磁場。

### 2-2-3 應力異向性[31]

當磁性材料在於磁場中，磁化過程會造成材料尺寸的改變，此效應稱為磁致伸縮(magnetostriction)。當材料受某單方向應力作用時，磁化強度將改變到特定的方向以降低磁彈性能(magnetoelastic energy)，而在施予外加磁場作用下，造成增加磁化強度的變化，進而所使材料磁滯曲線的改變，此種效應稱為反磁致伸縮(inverse magnetostriction)。對常見立方晶系來說，若不存在其他外在異向性因素，則由磁晶異向性決定磁矩方向；但若存在應力作用時，將由磁晶異向性與應力常數決定飽和磁化方向。

### 2-2-4 交換異向性[32,33]

鐵磁性物質和反鐵磁性物質之界面間形成交換耦合所產生的一種單方向異向性現象，使得磁滯曲線偏移不是呈現左右對稱。

### 2-2-5 誘導異向性[34]

在材料的製備過程中，所誘發的磁異向性為誘導異向性，會因為影響的方式不同分為以下三種：

1. 磁退火 (magnetic annealing)
2. 塑性變形 (plastic deformation)
3. 輻射照射 (irradiation)



## 2-3 磁區

磁性原子有著強的交互作用使磁原子與磁性原子間形成有序的排列，形成區域狀的區塊，故此區塊稱為磁區(Magnetic domain)，一般情形下的磁區的磁化量是維持在飽和狀態的，而形狀在自然情況下不會改變，每個磁區的大小不會一樣，磁區與磁區之間會由磁區壁(Domain wall)做分隔，如圖 2.3.1 所示。磁區壁一般有兩種型式，一種為布洛赫壁(Bloch wall)，另一種為尼爾壁(Neel wall)，布洛赫壁(Bloch wall)主要會在較厚的磁性體，尼爾壁(Neel wall)則發生在較薄的磁區性體，而翻轉機制也不一樣。如圖 2.3.2 所示。

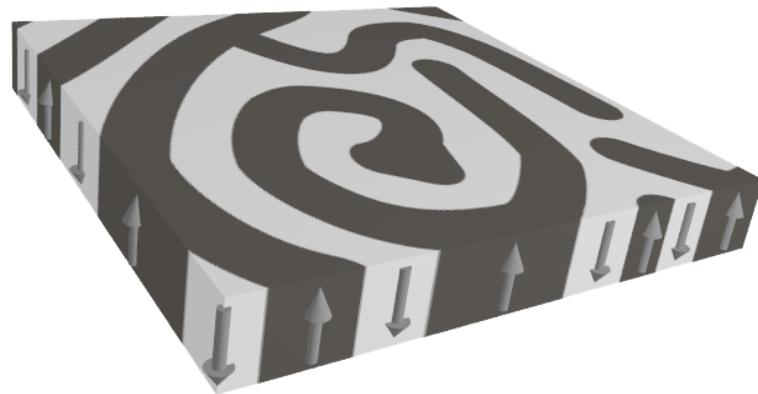


圖 2.3.1 磁區與磁區壁[35]。

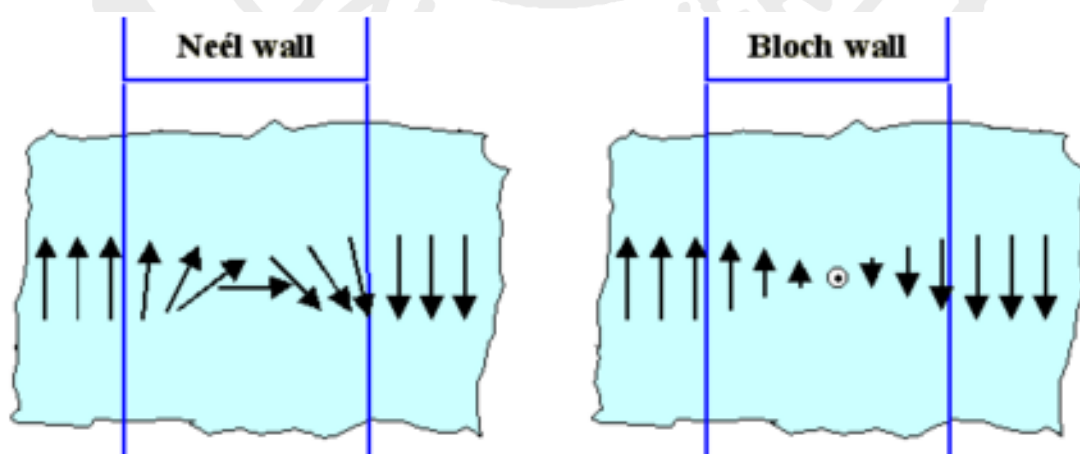


圖 2.3.2 尼爾壁(Neel wall)和布洛赫壁(Bloch wall)[36]。

鐵磁材料的磁區會受到外加磁場的影響而進行移動，對一個鐵磁材料施加場時，會與外加場方向不同磁區之磁矩會因承受較高之能量，使得磁區方向旋轉到與外加場同方向，與外加場反向的磁區則會逐漸消失，而相同方向的磁區則會持續增加體積，則兩磁區間的磁區壁會慢慢移動進而變成單一磁區。但此時的磁化方向不會與外加場相同，若接連增加外加場大小後，磁區的內部因為飽和而發生磁化轉動，這是需要很大外加場去克服磁晶異向性。如圖 2.3.3 所示[37]。

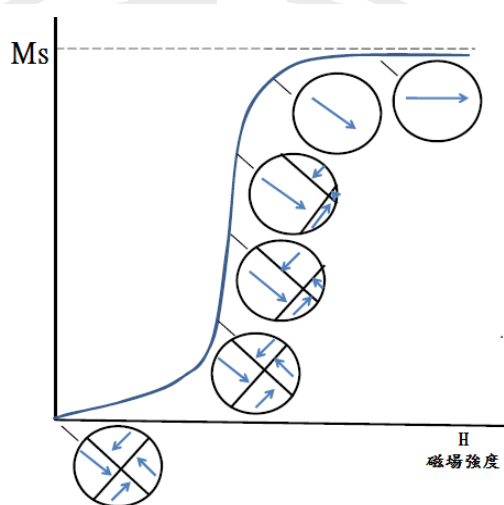


圖 2.3.3 鐵磁性材料磁區受外在磁場移動示意圖[37]。

## 2-4 磁滯曲線

當鐵磁性物質受到漸強的外加磁場的作用時，磁化的現象並不會逐漸增加，而是在到達飽和磁化量( $M_s$ )後停止，當外加場由飽和磁化量反向至零，磁化量會保有一定的值，稱為殘餘磁化量( $M_r$ )。而要使樣品的磁化量降至零，需要大小為矯頑磁力( $H_c$ )反向磁場，若繼續增加負場，會再次達到磁化飽和，磁場會再次反向後，會與先前的曲線形成對稱的曲線，稱之為磁滯曲線(Hysteresis loop)。

磁滯曲線有兩種模式，一種為 B-H 曲線，另一種為 M-H 曲線，B-H 曲線與 M-H 曲線的關係式如下：

$$B = H + 4\pi M \quad (2.6)$$

B 為磁束密度，將  $4\pi M$  曲線加上由每個點所測得之外加磁場的大小即可獲得 B-H 曲線，並可以求得磁能積(Energy product)： $(BH)_{\max}$ ，此為單位體積內所能儲存的磁能，其值也等同於 B-H 曲線下在第二象限所圍成之最大面積，如圖 2.4.1 所示。



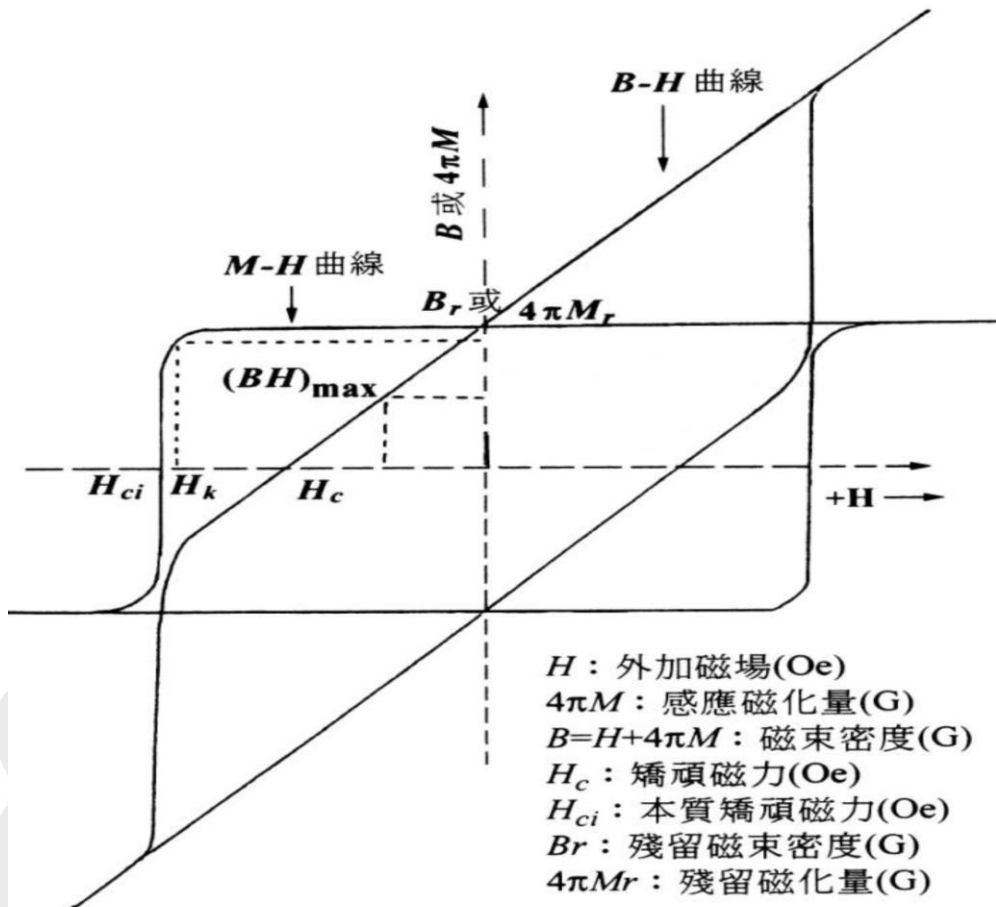


圖 2.4.1 M-H 曲線與 B-H 曲線之關係圖[38]。

## 2-5 薄膜沉積原理[39-44]

濺鍍時，基板表面將吸附(Absorption)轟擊靶材所產生的氣態原子(分子)與離子化濺鍍物，而形成薄膜前將經過：成核(Nucleation)、晶粒成長(Grain Growth)、晶粒團聚(Coalescence)、縫道填補(Filling of Channels)等過程，如圖 2.5.1 所示，下面將詳述各行為。

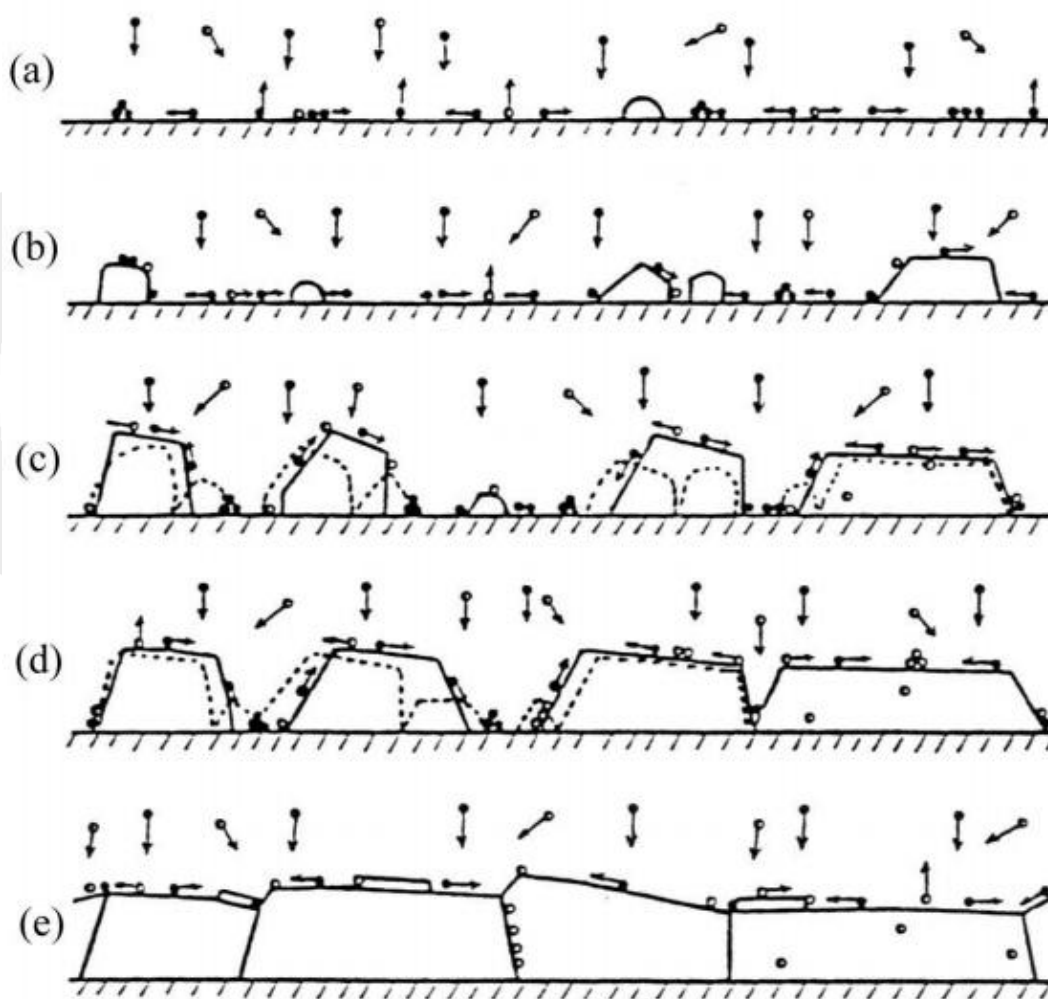


圖 2.5.1 薄膜成長過程：(a)成核(b)晶粒成長(c)晶粒團聚(d)縫道填補(e)薄膜生長[45]。

#### (a) 成核

藉由離子轟擊靶材後，會由不同的原子(分子)將擁有不同的動能，可能是垂直掉落或則是撞擊基板，而這些原子(分子)還存在相當程度的動能，這會導致基板沒有辦法直接做吸附的動作，而造成原子(分子)在基板表面移動擴散，當原子接觸時，將形成一穩定之核團吸附在基板上。

#### (b) 晶粒成長

核團穩定吸附在基板上後，會繼續吸附轟擊下來之原子(分子)外，也會直接吸附氣相得到原子(分子)，逐漸成長為晶粒狀。

#### (c) 晶粒團聚

當不同的晶粒成長相互觸碰時，會產生晶粒凝聚現象，而這是為了減少晶粒與晶粒間的表面能，晶粒間擴散作用於晶粒周圍，接著層層往上覆蓋，最後團聚成新顆粒，順帶一提的是，如果兩團聚晶粒的結構不同，而團聚的同時會產生再結晶的行為。

#### (d) 縫道填補

在晶粒團聚過程中，基板並不是所有位子都有吸附的晶粒存在，會由轟擊的原子(分子)將填補晶粒之間縫隙。而當開始填補縫道後，將形成薄膜的雛形。

(e) 薄膜成長

當縫道填補完成時，基板已完成平坦的薄膜，此後薄膜成長速率會比較快，會因沉積方式將不限於晶粒成長與團聚，也可以直接吸附下落中的原子，而原子(分子)也將從膜面上方往膜面下方擴散以保持已達到平衡。



## 2-6 磁控濺鍍系統[46-51]

### 2-6-1 直流磁控濺鍍(DC magnetron sputtering)

一般濺鍍方式多在兩極間施加予直流電壓，因此稱為直流濺鍍，通常是利用氣體的輝光放電效應，產生正離子束撞擊靶原子。直流濺鍍不能使用來濺鍍絕緣體，故在直流濺鍍時，撞擊陰極靶材的離子所帶的電荷不能被中和而停留在靶面上，使靶材變成帶正電而阻止正電荷離子靠近。

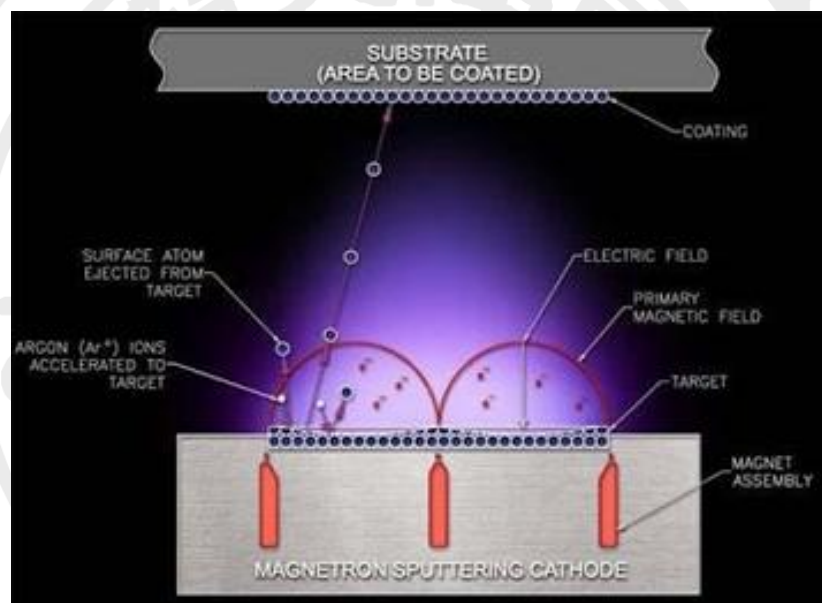


圖 2.6.1 Dc 直流示意圖[52]。

## 2-6-2 射頻磁控濺鍍(RF magnetron sputtering)

射頻濺鍍系統必須運作再在高真空環境中，在真空腔體內通入工作氣體(氬氣)，藉由互相對應的陰極(靶材)和陽極(基板)，施加特定頻率的交流電壓於此系統內，使得真空腔體內產生電漿，由於產生偏壓效應，電漿中的正離子會因受到負電壓吸引加速，具有高能量後，轟擊陰極靶材表面，將離子動量轉移給靶材原子，靶材原子獲得動能後逸出靶材表面，附著在基板上。在功能上，射頻磁控濺鍍系統與直流濺鍍系統的目的是一樣，但直流濺鍍系統只能製備金屬薄膜，射頻濺鍍系統在金屬物或氧化物均可製備，原因在於直流濺鍍系統會有正電荷累積在氧化物靶材上的問題，而射頻濺鍍系統使用交流電源，正負電壓相互切換，電子會受到正電壓吸引往靶材方向移動，在靶材上中和掉正電荷，解決正電荷累積在介質靶材上的問題。射頻磁控濺鍍系統是在射頻濺鍍系統加裝磁控裝置，藉由磁場與電場間的電磁效應，使產生的電磁力影響電漿內電子的移動，使得電子將進行螺旋式的運動。電子從電漿裡消失前所行經的距離拉長，增加電子與氣體分子間的碰撞次數，而使得氣體分子離子化的機率大增，便會有更多的離子撞擊靶材，濺射出更多的粒子沉積於基板上，因此磁控濺鍍比一般濺鍍的鍍率來的還要快。

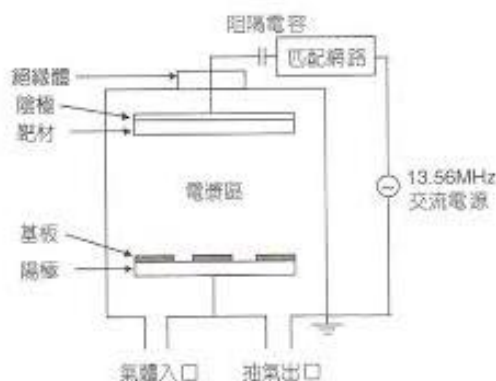


圖 2.6.2 RF 磁控濺鍍示意圖。[53]



### 2-6-3 脈衝直流磁控濺鍍系統

脈衝電源技術的正反向電壓除了可去除電荷的累積，也可使電漿密度增加。脈衝可分為單極(Unipolar)脈衝、雙極(Bipolar)脈衝或脈衝包(Pulse Packet)三種。

(1) 單極脈衝:極性保持不變，可用於單靶或雙靶。雙靶時脈衝可獨立亦可同步。

(2) 雙極脈衝:適用於雙靶，其極性週期性的改變，正負電壓交錯在兩個靶上，輪流為陰極或陽極，因此不易發生陽極消失的問題，而脈衝波形[54]稱或非對稱。

(3) 脈衝包:一個靶材接受特定數量的脈衝激發後，轉向力一個靶接受特衝激發。脈衝磁控濺鍍的特徵是使用極短的脈衝電源。

它的原理是當脈衝開啟時(On-time)，靶材會承受很大的負值電壓，而呈負電位電壓，同時會引來正離子氣體轟擊靶材進行濺鍍，當脈衝反向時(Off-time)，靶材電壓瞬間轉為正值，此時可去除累積的電荷，脈衝波形如圖 2.6.3。

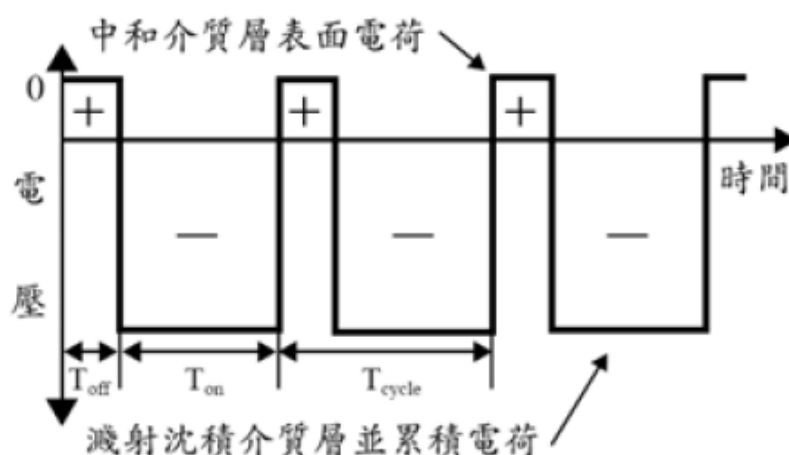


圖 2.6.3 脈衝波形示意圖[54]。



脈衝直流濺鍍法的缺點以下幾點:

- (1)離子的生成效率不易提高.(2)從靶材被濺射出的原子，被放電氣體原子散亂，到達基板的原子比例減少，到達基板機會較少(到達基板後又被打出來無法成核)，因此成膜數率慢。利用放電空間，同時附加電場與磁場，此及磁控濺鍍法(magnetron sputtering)，可以改善此情形為了放電集中在靶與基板與垂直方向加裝磁場。其特徵: (1)放電氣體壓力可降到  $10^{-1} \sim 10^{-2}$  Pa 以下，減少薄膜原子被散亂。(2)離子化為高能量電子，在靶材附近使起迴旋運動效果，促使離子的生成效率提高。因此磁場使用時電子會被封在靶材附近的空間，電子在 Y 軸上迴旋運動如圖 2.6.4 所示。而實際的磁控濺鍍如圖 2.6.1 所示。

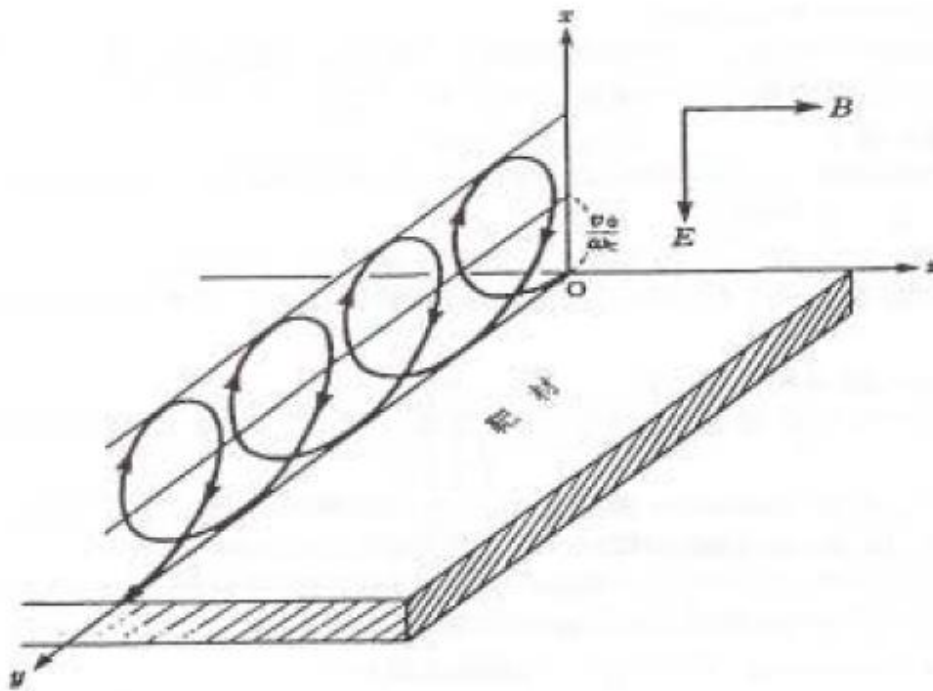


圖 2.6.4 磁場效應下電子在 Y 軸上的迴旋運。[54]

## 第三章 研究方法

### 3-1 實驗流程

本實驗使用 FePd 合金靶以磁控濺鍍法製備 FePd 薄膜，實驗中改變不同靶距製備出 FePd 薄膜。濺鍍完成後，經過快速熱退火處理完成樣品，探討其特性的改變，詳細流程圖 3.1。

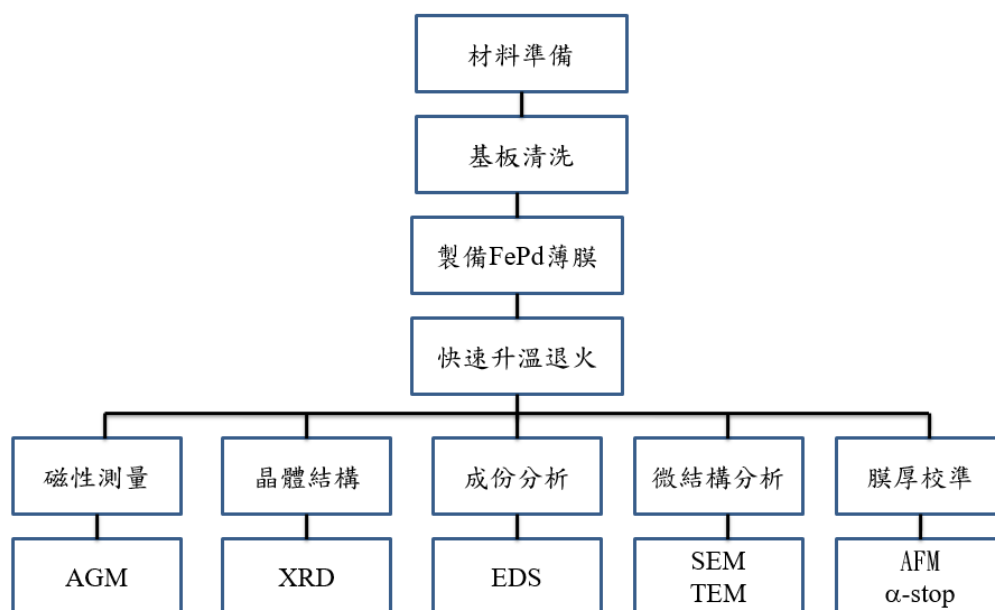


圖 3.1 實驗流程圖。

## 3-2 實驗製備及參數

### 3-2-1 實驗材料

靶材使用向為偉斯企業股份有限公司購買的 FePd 合金靶，基板來源為台灣格雷蒙公司購入玻璃基板，在交由式企公司將基板切割至 0.7 cm × 0.7 cm 大小，工作氣體購買為昞暉氣體有限公司，為高純度氬氣，相關規格如表 3.2.1。

表 3.2.1 實驗相關用材

靶材選擇	FePd 合金靶 2 吋、2 nm
玻璃基板	Corning 1737
工作氬氣	高純度氬氣 99.97 %

### 3-2-2 基板清洗流程

因基板在切割、研磨、拋光時，表面會殘留油漬、蠟等不潔物質，故基板的清潔度會對薄膜之成長有影響，會間接對薄膜的特性造成改變，因此基板的清潔也是實驗中重要的環節。

基板的清洗流程如圖 3.2.1 所示，其中，步驟為將基板放入燒杯中並加入指定之有機溶液並放入超音波震洗機震洗十五分鐘，最後再將震洗完之基板放入 99.5 % 之無水酒精中保存，欲使用時再利用高純度氮氣吹乾。

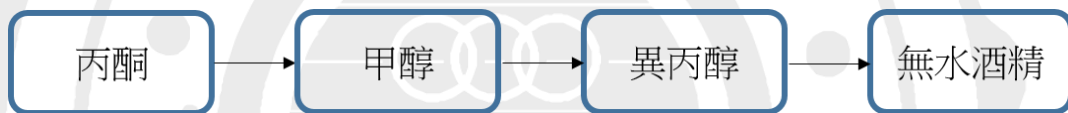


圖 3.2.1 基板清洗流程圖。

### 3-2-3 濺鍍流程

將玻璃基板清洗吹乾後，放置於固定樣品載台上，接著傳送腔送入主腔體，如圖 3.2.2 所示，藉此維持主腔體的真空狀態，再利用旋轉式幫浦(Rotary Pump)配合渦輪分子幫浦(Turbo Molecular Pump)將主腔體抽至高真空狀態，抽到所需真空度時，利用流量控制器通入工作氣體( $\text{Ar}^+$ )，並開啟直流電源供應器裝置後導出電漿，實驗之膜層結構以及實驗參數。

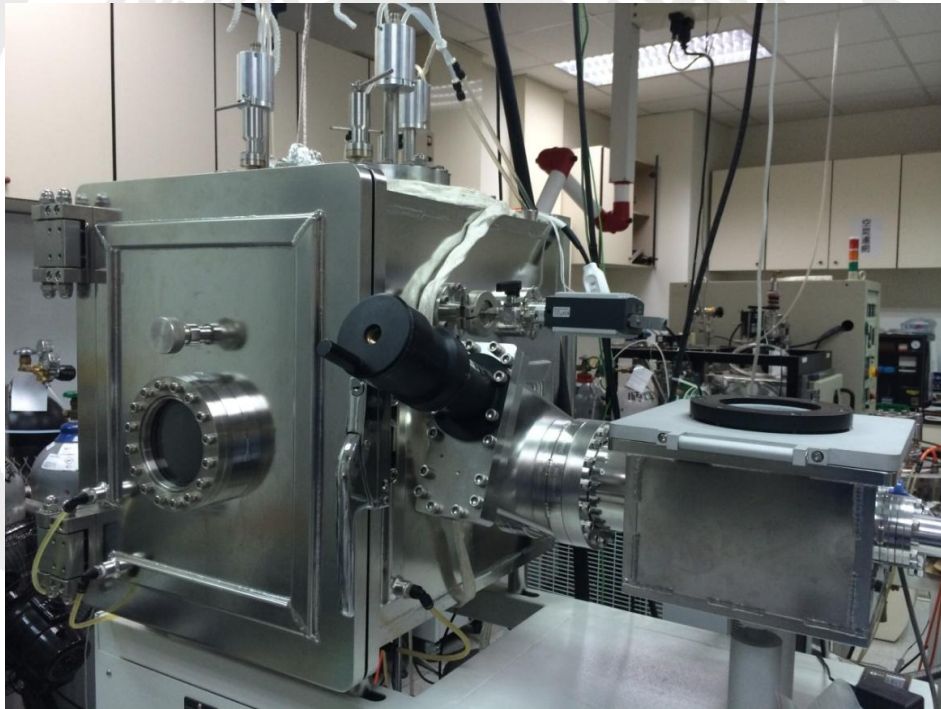


圖 3.2.2 濺鍍系統。

### 3-2-4 製備薄膜底層以及緩衝層之參數

基板以氮氣吹乾後，放進腔體，隨即以旋式幫浦及渦輪分子幫浦將系統排氣至高真空狀態。此時，啟動流量控制器，壓力調整至實驗預達工作壓力下。壓力穩定後，以製備單層膜層並改變不同濺鍍來探討。詳細製程參數如下表 3.2.2 所示。

表 3.2.2 實驗參數表

實驗條件	參數
背景壓力(Torr)	$5 \times 10^{-7}$
工作壓力(mTorr)	FePd film :10 mTorr
厚度(nm)	FePd film : 30 nm
濺鍍功率(W)	FePd film:30 W

### 3-3 快速升溫退火系統

本實驗熱處理方式使用快速升溫退火爐，升溫速率比一般熱處理快，加熱溫度及持溫時間皆可經由內建控制。當鍍製完成的薄膜取出後，放入退火爐內，使用真空系統將抽至  $5 \times 10^{-6}$  Torr 以下，再使用加熱燈泡加熱。退火過程的工作包含三階段：升溫、持溫、冷卻。當升溫到一定溫度時會受到外在施加能量的影響，產生結晶的過程，而在持溫狀態下是為了使結晶的原子達到排列平衡，冷卻後則是會對材料的內應力造成影響，退火參數同樣列至圖 3.3.1



圖 3.3.1 MILA-3000 型快速升溫退火爐。

表 3.3.1 退火參數

退火條件	參數
溫度(°C)	500 °C ~750°C
升溫速率(°C/s)	80 °C /s

### 3-4 晶體結構分析[55]

本實驗使用 X 光繞射分析儀(X-ray Diffractometer)來分析薄膜晶體結構，此方式為利用布拉格繞射觀察晶面間距，其規格如表 3.4.1 所示。光管中的燈絲產生電子束，再將電子束加速並射入 Cu 靶，當電子轟擊靶材時，會激發低殼層電子躍遷到高殼層軌域。當原子恢復穩定態，電子會回到低軌域，將以 X 光型式釋放出能量。當 X 光經樣品晶面反射時，會因為上下晶面間距產生光程差，當光程差為波長之整數倍，將產生建設性干涉，這符合布拉格繞射定律(Bragg's law):

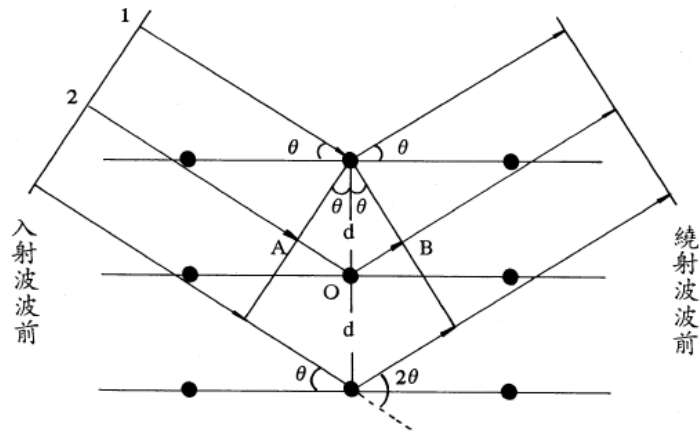
$$2d\sin\theta = n\lambda \quad (3.1)$$

其中， $d$  為鄰近原子晶面( $h, k, l$ )間距， $\theta$  為入射 X 光與平面夾角， $n$  為一任意整數， $\lambda$  為 X 光波長，其示意圖如圖 3.4.1 所示。接著可由繞射峰圖形位置對照 JCPDS card 來分析其晶體優選方向或由半高寬推得晶粒尺寸等。

表 3.4.1 X 光繞射分析儀規格表。

儀器型號	PHILIPS X'Pert Pro MPD
光源	$K_{\alpha, Cu}$ ( $\lambda=1.5418 \text{ \AA}$ )
輸出電壓/電流	45 KV/40 mA





$d$  : 反射原子面(hkl)之間距  
 $\theta$  : 入(反)射光與原子面之夾角  
 $n$  : 繞射階次  
 $\lambda$  : X光波長

圖 3.4.1 晶體繞射 X 光與布拉格繞射之幾何關係[56]。



### 3-5 表面形貌分析[57,58]

在本實驗中將使用原子力顯微鏡(Atomic Force Microscopy,AFM)來觀測樣品之表面形貌。此種顯微鏡與掃描式穿隧電子顯微鏡最大的差別在於並非利用電子穿隧效應，而是利用原子間的凡德瓦力(Van Der Waals Force)作用來表現出樣品的表面形貌。其原理為假設有兩個原子，一個在懸臂(cantilever)的探針尖端，另一個在樣品的表面，它們間的交互作用力會隨著距離的變化而受到改變，其作用力與距離的關係如圖 3.5.1 所示，當原子與原子間距很小時，彼此電子雲排斥的作用力大於原子核與電子雲之間的吸引力作用，所以總體淨力表現出斥力的作用，反之，若兩原子分開到一定距離時，其電子雲排斥之作用力小於彼此原子核與電子雲之間的吸引力，故總體淨力表現出引力的作用，如圖 3.5.2 所示。

在原子力顯微鏡的系統中，是利用微小探針與樣品間之交互作用力，來呈現樣品表面之物理特性。

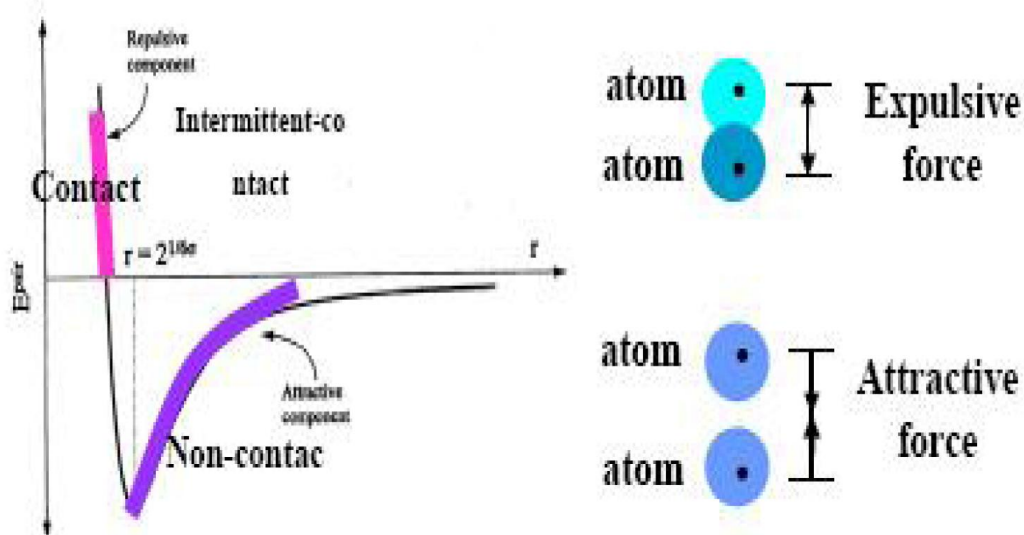


圖 3.5.1 原子與原子間交互作用力示意圖[59]。

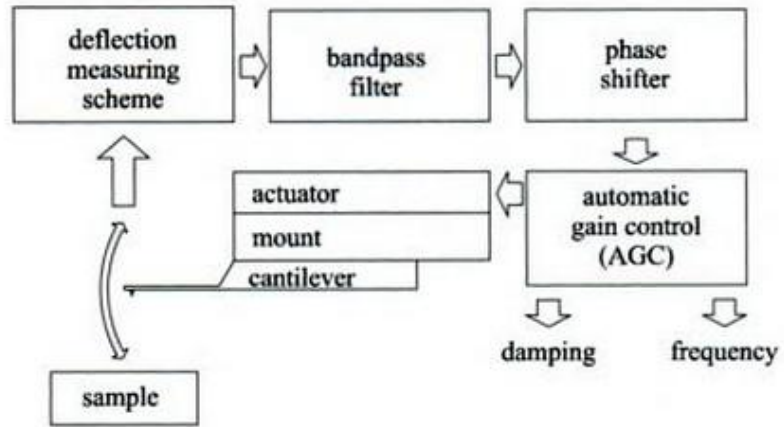


圖 3.5.2 原子力顯微鏡量測原理[60]。



### 3-6 磁性量測[61]

本實驗使用交流梯度磁力量測儀 (Alternating Gradient Magnetometer, AGM) 來量測樣品磁性，型號為 MicroMag™ 2900(圖 3.6.1)。其原理為在一個置於可變或靜磁場之樣品，透過調節交替式梯度場驅動頻率，使得壓電晶片與樣品處於共振狀態並且利用壓電材料製成的碳棒來量測電位差求出相關數值，藉由調整施予外加場大小後可以測得樣品磁矩變化[62]。

在此特別感謝彰化師大物理系洪連輝老師實驗室 AGM 的協助。

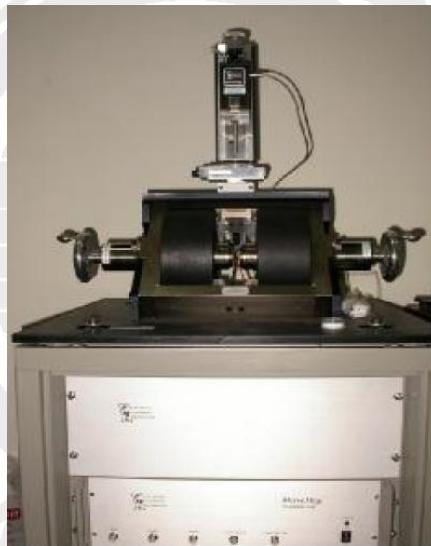


圖 3.6.1 AGM 系統[63]。

### 3-7 掃描式電子顯微鏡(SEM)薄膜微結構分析[64]

本實驗將使用掃描式電子顯微鏡(Scanning Electron Microscope, SEM)來觀察樣品之微結構，型號為 JEOL JSM-6500F。SEM 的結構如圖 3.7.1 所示，大致可分為電子槍系統、電磁透鏡組及掃描線圈等，其主要工作原理為電子槍透過熱游離燈絲或場發射原理激發出高能量電子束，其電子束經過電磁透鏡組聚焦後，再將電子束聚集並投射於樣品表面上，再利用掃描線圈偏折電子束，使其可以在樣品表面上做二維之掃描。

當電子束打在樣品表面時，其會產生各種不同的電子訊號，如二次電子(SEI)、背向散射電子(BEI)、穿透電子、X 光、歐傑(Auger)電子...等。在一般掃描式電子顯微鏡的使用上，主要是偵測二次電子與背向散射電子的訊號，因這些電子訊號經過接收器的接收後再經由放大器處理即可描繪出樣品表面之影像；而 X 光則可經由能量分散光譜儀(Energy Dispersive Spectroscopy, EDS)偵測，並對樣品作元素分析。

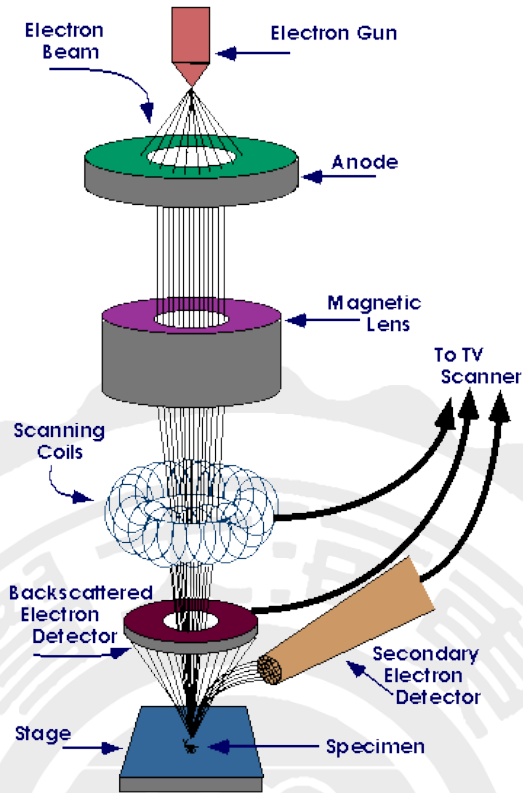


圖 3.7.1 掃描式電子顯微鏡結構圖[65]。

### 3-8 TEM 樣品製備

由於 TEM 之樣品有一定的規格，樣品需黏上直徑 3 mm 之銅環，且需要一定的薄度，所以本實驗以研磨機製備樣品，其詳細流程如下：

1. 將樣品利用鑽石刀切割為  $7 \times 3.5 \text{ mm}^2$  大小。
2. 將切割後的兩樣品使用 AB 膠以膜面對膜面方式相互貼黏。
3. 將取出之樣品黏貼於載玻片上，同時在兩側黏貼墊片，接著開始研磨，試片研磨流程如圖 3.8.1。
4. 研磨至與墊片同高後，利用加熱平板翻面，同時在兩側黏貼一層墊片。
5. 開始研磨第二面，研磨流程如圖 3.8.2。
6. 樣品可均勻透光後，利用拋光液及絨布將細小刮痕去除，且薄至出現彩虹界面，即可上銅環。

砂紙號數	轉速(rpm)	工具	停止點
180	70	圓形 Holder	塊根墊片一樣
400	100	圓形 Holder	磨至墊片五分之一厚
800	100	圓形 Holder	手摸還有一點點厚度
1200	80	用手稍微施加壓力	墊片邊緣開始被磨損、摸不出厚度
2000	70	用手稍微施加壓力	墊片均勻透光、試片兩頭透紅光
2500	80	用手不施力	將刮痕變細
4000	80	用手不施力	將刮痕變細

圖 3.8.1 研磨流程。



### 3-9 穿透式電子顯微鏡(TEM) [66]

穿透式電子顯微鏡(Transmission Electron Microscope, TEM)之基本構造如圖 3.8.2 所示，其原理與 SEM 不同，TEM 是用高能量電子束(200 keV)穿透樣品(厚度 $<100\text{nm}$ )，並在穿過程過程中產生不同程度散射，進而產生明暗對比，並由螢光板呈現對比形成微結構影像。因此，TEM 主要所接收之訊號為穿透電子(Transmitted Electron)及彈性散射電子(Elastic Scattered Electron)之成像，或可形成繞射圖形(Diffraction Pattern；DP)進而對樣品的微結構組織與晶體結構做分析。

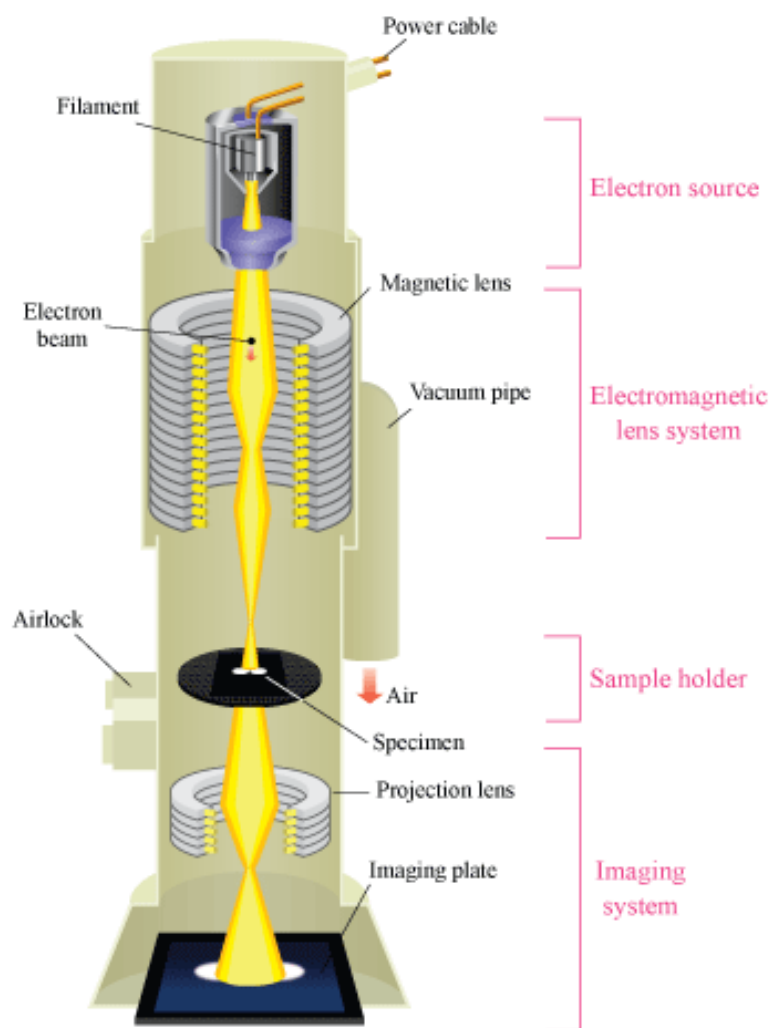


圖 3.9.1 穿透式電子顯微鏡之結構示意圖。[66]



### 3-10 成份分析[49]

本實驗所使用之能量光譜儀(Energy Dispersive Spectrometer, EDS)測量樣品內的元素種類。原理為當電子束射入樣品時，會產生 X 光波段的特徵輻射，再以矽晶感測器收集 X 光訊號，根據其 X 光頻率之不同可以對元素作判別，圖 3.10.1 為 EDS 電路圖。

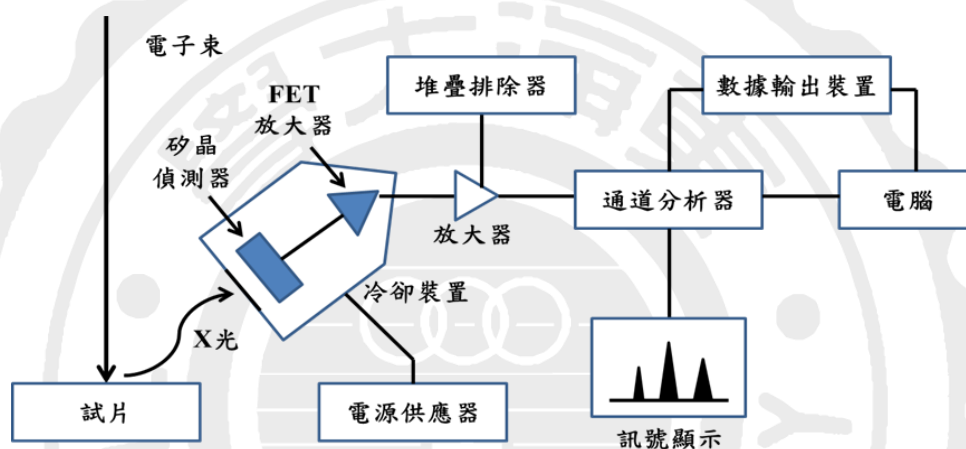


圖 3.10.1 偵測 X-光子示意圖。

## 第四章 以不同磁控濺鍍法製備 FePd 薄膜磁性之研究

本實驗以三種不同磁控濺鍍法並改變靶距下製備 FePd 薄膜於玻璃基板上，研究 FePd 薄膜經不同溫度後退火之磁性。並討論不同濺鍍法在退火溫度( $T_a = 500 - 750\text{ }^\circ\text{C}$ )對 FePd 薄膜磁性的影響。

實驗結果分以下四部分：

1. 使用射頻濺鍍沉積 30 nm Fe<sub>50</sub>Pd<sub>50</sub> 薄膜於玻璃基板，研究不同濺鍍靶距與退火溫度對其結構及磁性之影響。
2. 使用直流濺鍍沉積 30 nm Fe<sub>50</sub>Pd<sub>50</sub> 薄膜於玻璃基板，研究不同濺鍍靶距與退火溫度對其結構及磁性之影響。
3. 使用脈衝式直流濺鍍沉積 30 nm Fe<sub>50</sub>Pd<sub>50</sub> 薄膜於玻璃基板，研究不同濺鍍參數與退火溫度對其結構及磁性之影響。
4. 磁控濺鍍法並改變靶距效應對於沉積 FePd 薄膜結構與磁性之探討。

## 4-1 靶距效應對於以射頻濺鍍法製備的 $\text{Fe}_{50}\text{Pd}_{50}$ 薄膜結構與磁性之影響

本節以射頻濺鍍法製備單層 30 nm FePd 薄膜，改變製成條件為濺鍍靶材與基板之間的距離，並進行不同溫度後退火，探討不同靶距對 FePd 薄膜結構及磁性之影響。實驗參數如表 4.1.1:

表 4.1.1 實驗參數

濺鍍法	濺鍍功率 (W)/工作壓力 (mTorr)	改變靶距	氣體
射頻濺鍍法 (RF)	30/10	5 cm	氬氣(Ar)
		10 cm	
		12.5 cm	

#### 4-1-1 靶距 5 cm 下以射頻濺鍍沉積 FePd 薄膜經由不同溫度後退火之結構及磁性研究

圖 4.1.1 為靶距 5 cm 鍍製 Fe<sub>50</sub>Pd<sub>50</sub> 薄膜經不同退火溫度之 XRD 圖。在初鍍態時，FePd 薄膜僅出現(111)繞射峰，當退火溫度高於 600 °C，才出現(200)繞射峰。隨著退火溫度升高，(111)及(200)繞射峰強度隨之增強。

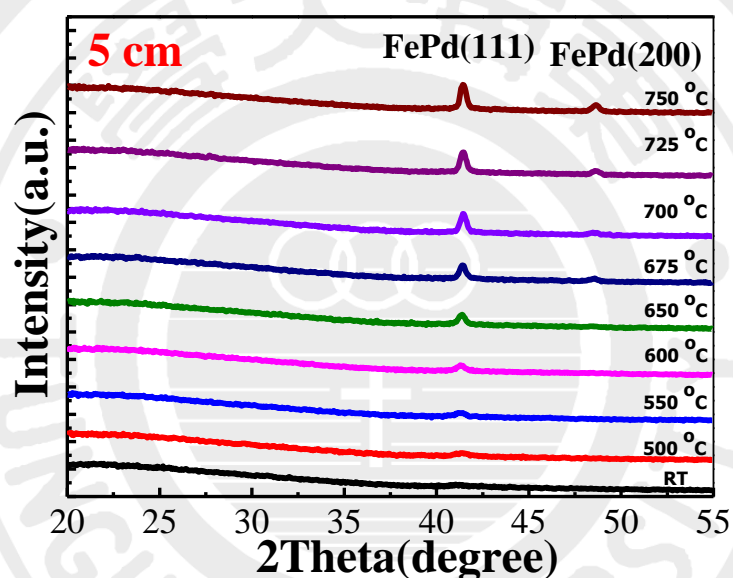


圖 4.1.1 靶距 5 cm FePd 薄膜經不同退火溫度後退火之 XRD 圖。

圖 4.1.2 為靶距 5 cm 鍍製 Fe<sub>50</sub>Pd<sub>50</sub> 薄膜於玻璃基板經不同溫度後退火之磁滯曲線圖。由圖可知，在靶距為 5 cm 鍍製 FePd 薄膜皆呈現出水平磁異向性，且矯頑磁力低。

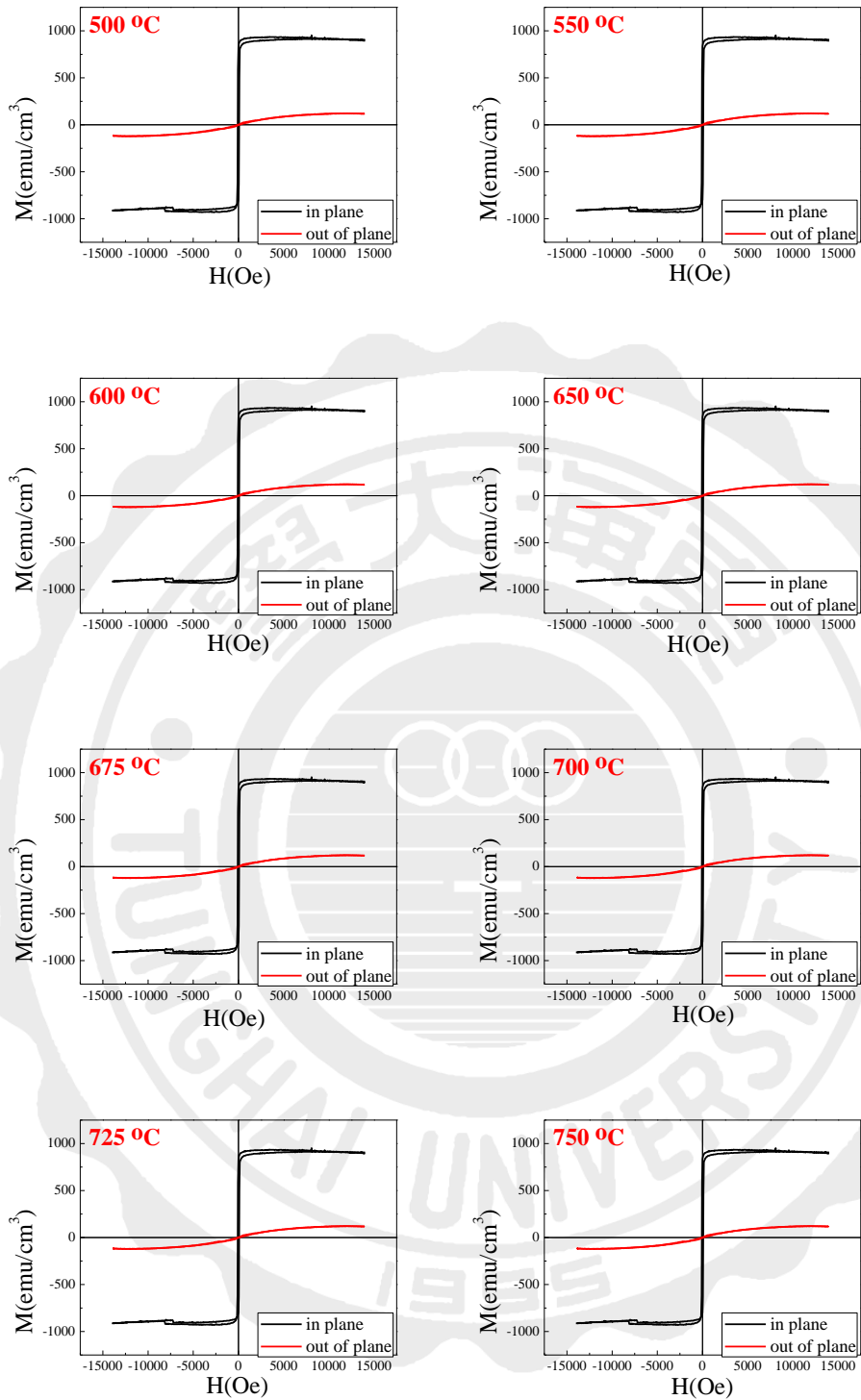


圖 4.1.2 靶距 5 cm 之 FePd 薄膜經不同後退火溫度之磁滯曲線

圖。

根據圖 4.1.2 作分析彙整其磁性圖於表 4.1.2。圖 4.1.3 為靶距 5 cm FePd 薄膜之飽和磁化量和殘餘磁化量。從圖中可以觀察到，隨著溫度提高，飽和磁化量和殘餘磁化量隨之慢慢下降。圖 4.1.4 為矯頑磁力隨後退火溫度變化圖。矯頑磁力隨後退火溫度提升而稍微提升。圖 4.1.5 為磁能積隨後退火溫度變化圖。從 4.1.4 - 4.1.5 觀察出磁能積皆很低，需進一步改善。

表 4.1.2 靶距 5 cm 之 FePd 薄膜經不同溫度後退火之飽和磁化量、殘餘磁化量、矯頑磁力及磁能積一覽表

$D = 5 \text{ ,Ar}$	$M_s \text{ (emu/cm}^3\text{)}$	$M_r \text{ (emu/cm}^3\text{)}$	$H_c \text{ (Oe)}$	$(BH)_{\max} \text{ (MGOe)}$
500 °C	987	892	50	0.4
550 °C	985	890	340	1.7
600 °C	984	888	260	0.9
650 °C	982	885	240	0.8
675 °C	979	882	200	0.6
700 °C	978	881	180	0.4
725 °C	977	880	150	0.3
750 °C	976	878	80	0.2



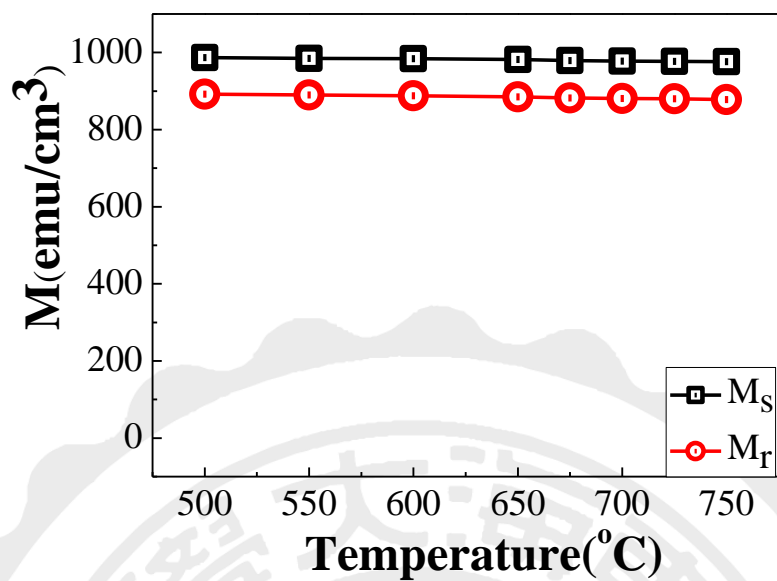


圖 4.1.3 靶距 5 cm 之 FePd 薄膜飽和磁化量及殘餘磁化量隨後退火溫度變化圖。

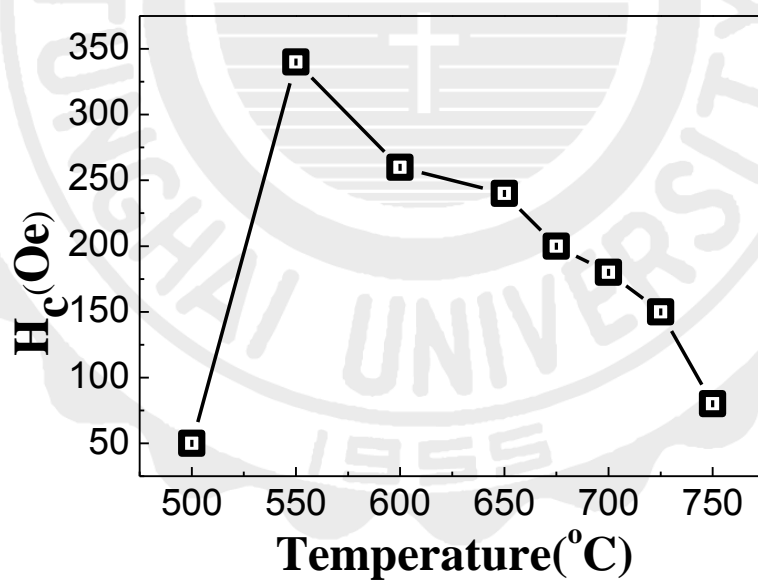


圖 4.1.4 靶距 5 cm 之 FePd 薄膜水平矯頑磁力隨後退火溫度變化圖。

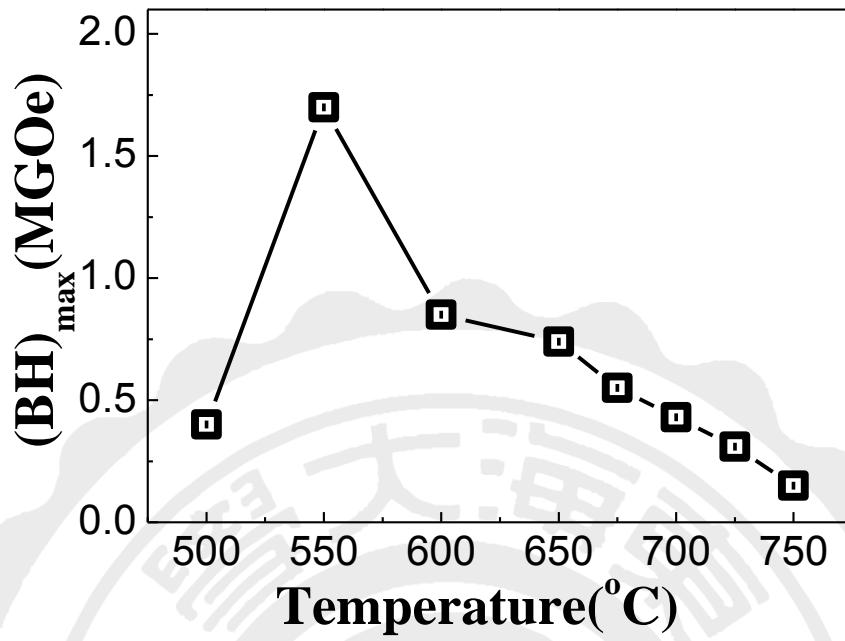


圖 4.1.5 靶距 5 cm 之 FePd 薄膜磁能積隨後退火溫度變化圖。

#### 4-1-2 靶距 10 cm 下以射頻濺鍍沉積 FePd 薄膜經由不同溫度後退火之結構及磁性研究

圖 4.1.6 為靶距 10 cm 鍍製 Fe<sub>50</sub>Pd<sub>50</sub> 薄膜經不同溫度後退火之 XRD 圖。在初鍍態時，FePd 薄膜僅出現(111)繞射峰，當退火溫度高於 650 °C，才出現(200)繞射峰。

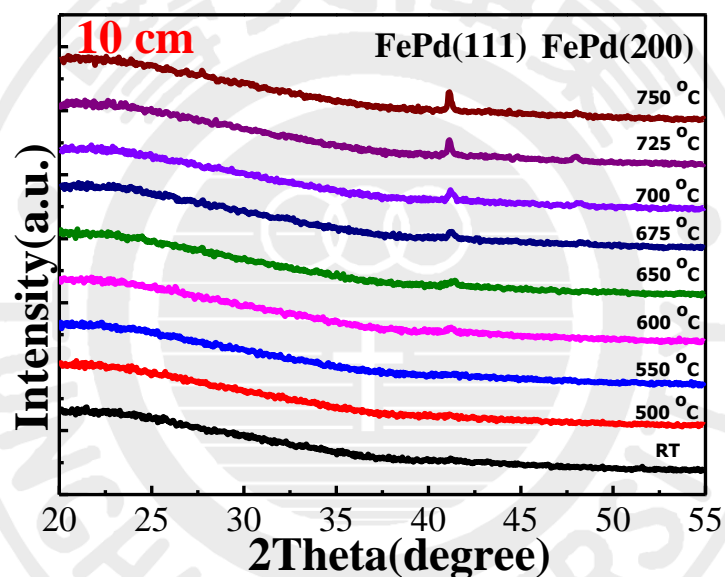


圖 4.1.6 靶距 10 cm FePd 薄膜經不同退火溫度後退火之 XRD 圖。

圖 4.1.7 為靶距 10 cm FePd 薄膜經不同溫度後退火之磁滯曲線圖。與靶距 5 cm 鍍製的 FePd 相比，除了在退火溫度 650 °C 下有較高的水平矯頑磁力( $H_c = 2.2$  kOe)外，隨溫度進一步上升，其矯頑磁力明顯下降。

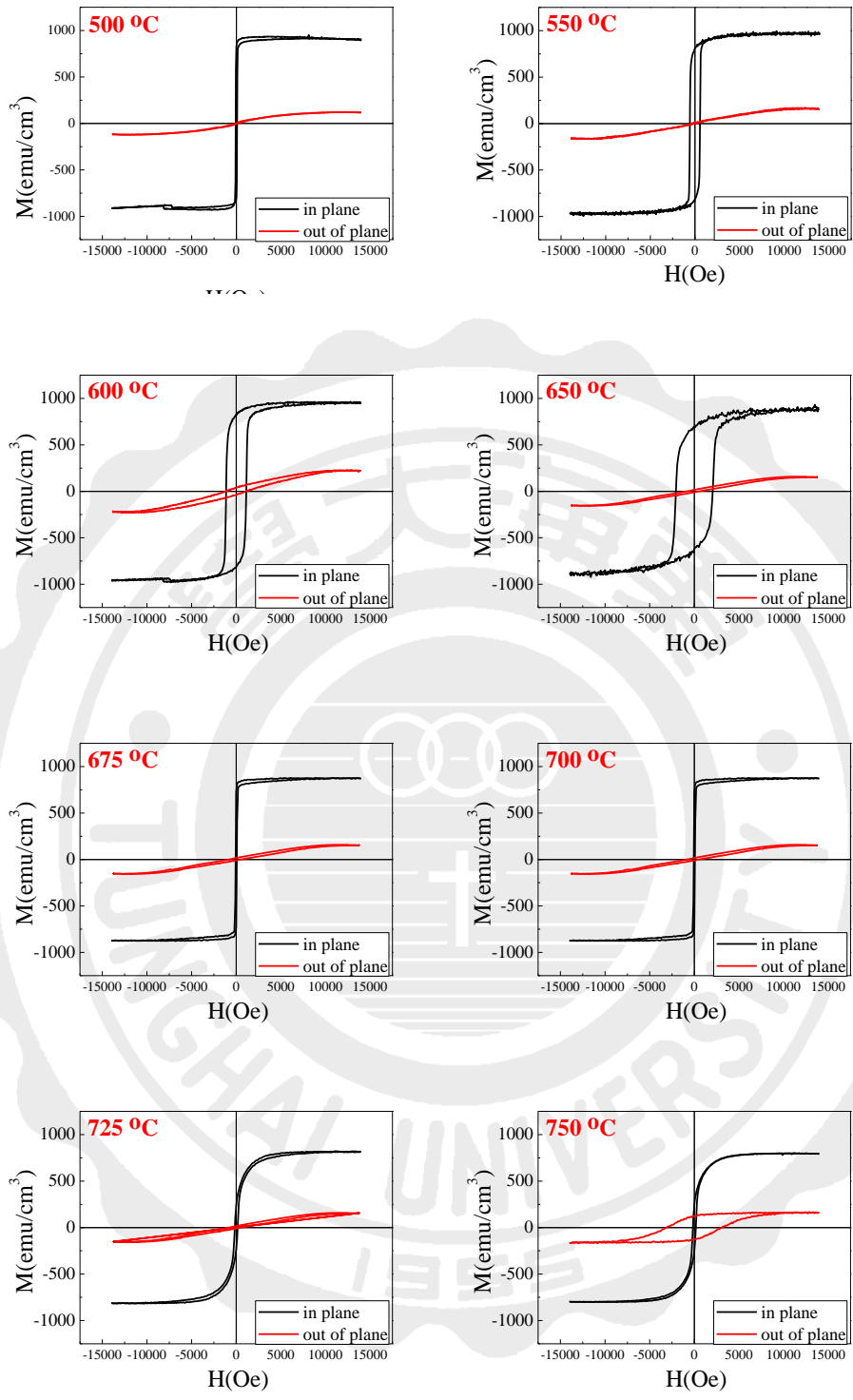


圖 4.1.7 靶距 10 cm FePd 薄膜經不同退火溫度後退火之磁滯曲線圖。

根據 4.1.7 作分析彙整其磁性表 4.1.3。圖 4.1.8 為靶距 10 cm 之 FePd 薄膜之飽和與殘餘磁化量隨不同後退火溫度之變化圖。由圖可知，兩磁化量都隨之下降。而圖 4.1.9 矯頑磁力隨不同後退火溫度之變化圖。此可看到矯頑磁力隨退火溫度提升而明顯提高，當退火溫度在 650 °C 時呈現出最高矯頑磁力。圖 4.1.10 為磁能積隨不同後退火溫度之變化圖。磁能積隨著退火溫度上升而也有所提升，在 650 °C 時，其因有高矯頑磁力而呈較高磁能積為 7.1 MGOe。

表 4.1.3 靶距 10 cm 之 FePd 薄膜經不同溫度退火之飽和磁化量和殘餘磁化量及矯頑磁力、磁能積一覽表

D = 10 ,Ar	$M_s$ (emu/cm <sup>3</sup> )	$M_r$ (emu/cm <sup>3</sup> )	$H_c$ (Oe)	(BH) <sub>max</sub> (MGOe)
500 °C	993	850	50	0.1
550 °C	974	835	600	3.4
600 °C	950	832	1150	6.1
650 °C	883	735	2200	7.1
675 °C	869	728	200	0.4
700 °C	833	720	180	0.3
725 °C	818	333	160	0.2
750 °C	796	310	80	0.1

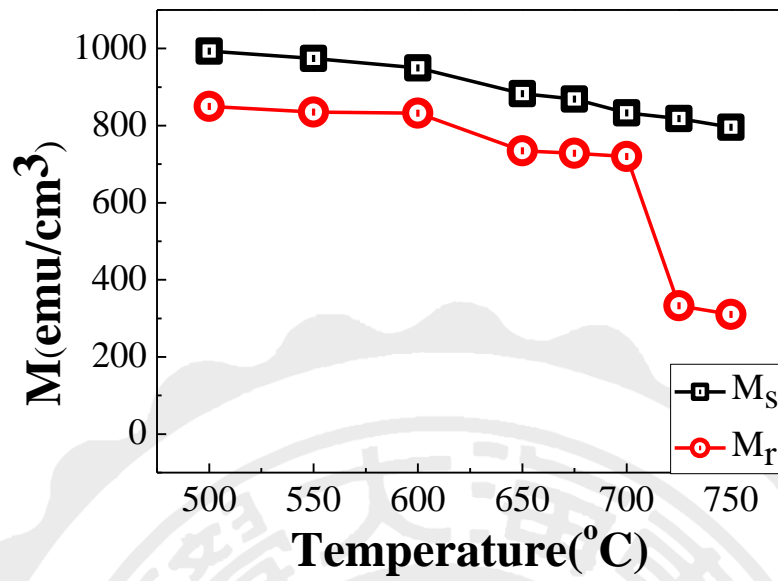


圖 4.1.8 靶距 10 cm 之 FePd 薄膜飽和磁化量及殘餘磁化量隨不同後退火溫度之變化圖。

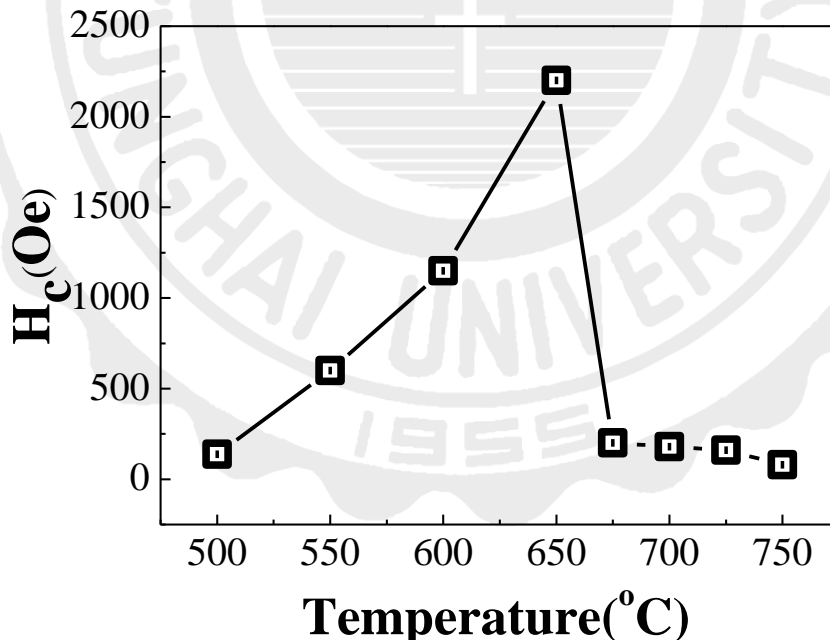


圖 4.1.9 靶距 10 cm 之 FePd 薄膜經不同溫度退火之水平矯頑磁力圖。

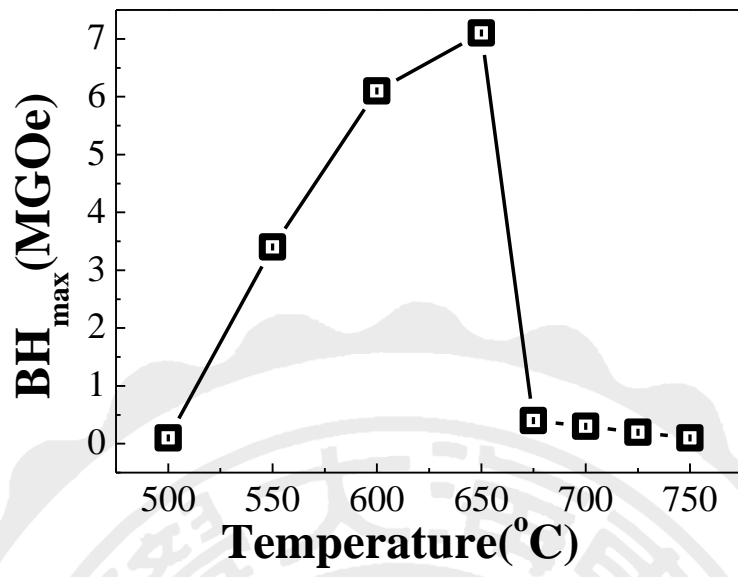


圖 4.1.10 靶距 10 cm 之 FePd 經不同溫度退火之磁能積變化圖。

### 4-1-3 靶距 12.5 cm 下以射頻濺鍍沉積 FePd 薄膜經由不同溫度後退火之結構及磁性研究

圖 4.1.11 為靶距 12.5 cm 鍍製 Fe<sub>50</sub>Pd<sub>50</sub> 薄膜經不同後退火溫度之 XRD 圖。在初鍍態時呈現(111)繞射峰，隨著退火溫度升高，(111)繞射峰有明顯增強趨勢。

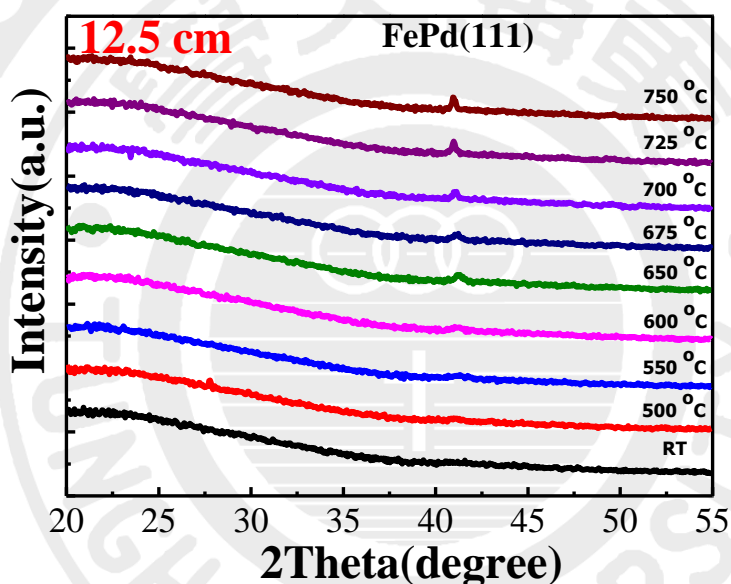


圖 4.1.11 靶距 12.5 cm FePd 薄膜經不同退火溫度後退火之 XRD 圖。

圖 4.1.12 為靶距 12.5 cm 之 FePd 薄膜經不同溫度後退火之磁滯曲線圖。當靶距提高到 12.5 cm 時，溫度達到 650 °C 時，可獲得較高水平矯頑磁力，達 3.5 kOe，FePd 薄膜在此溫度都產生序化，使其矯頑磁力上升。而退火溫度 700 - 750 °C 時，矯頑磁力維持高值。



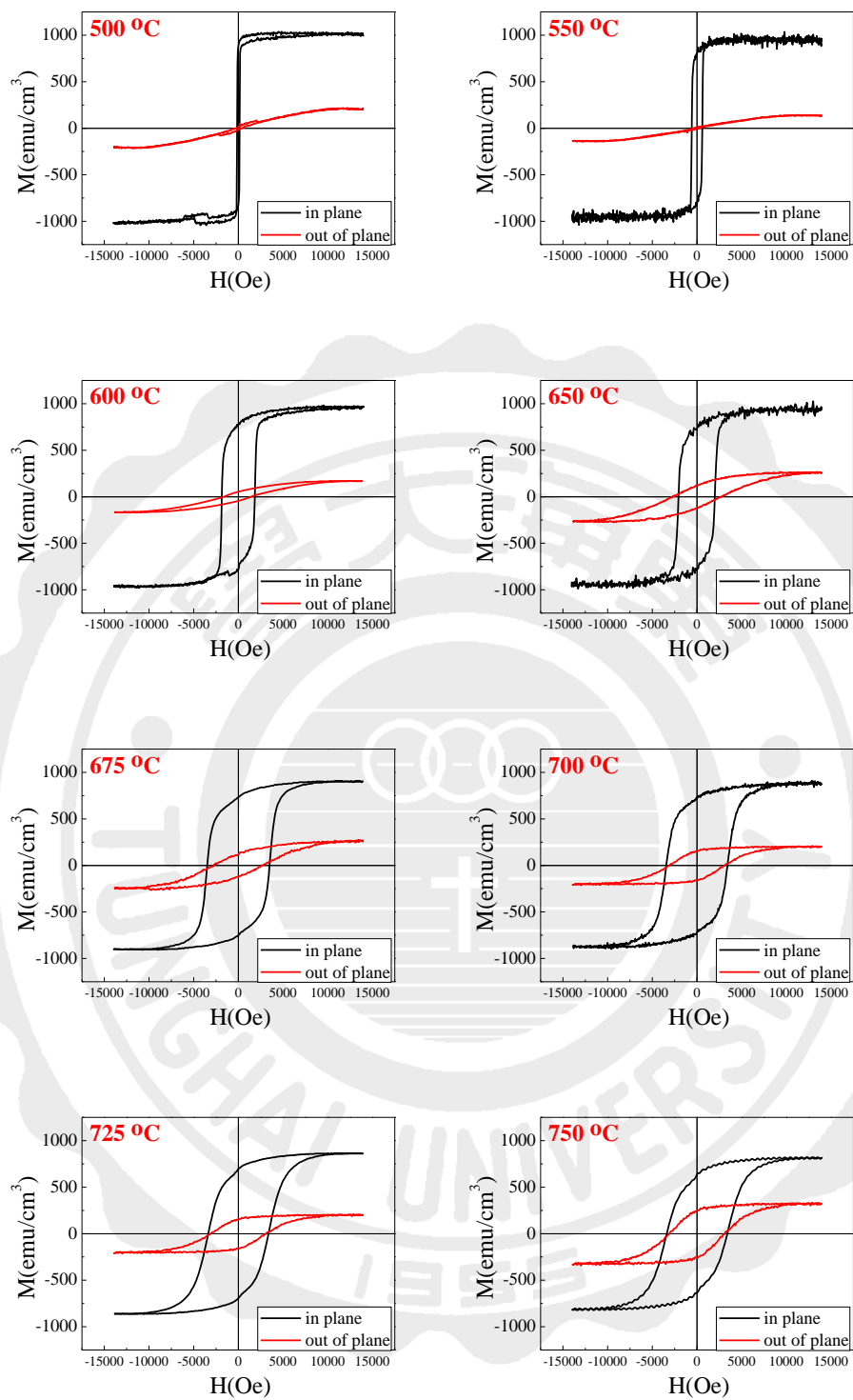


圖 4.1.12 靶距 12.5 cm 之 FePd 薄膜經不同後退火溫度之磁滯曲線圖。

根據 4.1.12 作分析彙整其磁性表 4.1.4。圖 4.1.13 為靶距為 12.5 cm 之 FePd 薄膜之飽和及殘餘磁化量。兩磁化量皆隨溫度提高而下降。圖 4.1.14 為矯頑磁力隨退火溫度之變化圖。由圖可知，矯頑磁力隨著退火溫度提升而明顯提高，當退火溫度在 675 °C 時，呈現出最高矯頑磁力為 3.5 kOe，而溫度持續提升到 725 °C 時，矯頑磁力稍稍下降。圖 4.1.15 為磁能積隨退火溫度變化圖。磁能積隨著退火溫度上升也有所提升，並且在 675 °C 時，其因有高矯頑磁力，故可獲得相當高的磁能積為 10.5 MGOe。

表 4.1.3 靶距 12.5 cm 之 FePd 薄膜經不同後退火溫度之飽和磁化量、殘餘磁化量、矯頑磁力及磁能積一覽表

$D = 12.5, \text{Ar}$	$M_s$ (emu/cm <sup>3</sup> )	$M_r$ (emu/cm <sup>3</sup> )	$H_c$ (Oe)	$(BH)_{\max}$ (MGOe)
500 °C	990	888	155	0.4
550 °C	975	811	600	3.3
600 °C	959	776	1900	8.1
650 °C	928	732	2100	8.5
675 °C	903	730	3500	10.5
700 °C	885	713	3500	10.4
725 °C	861	695	3400	8.2
750 °C	822	640	3400	6.7



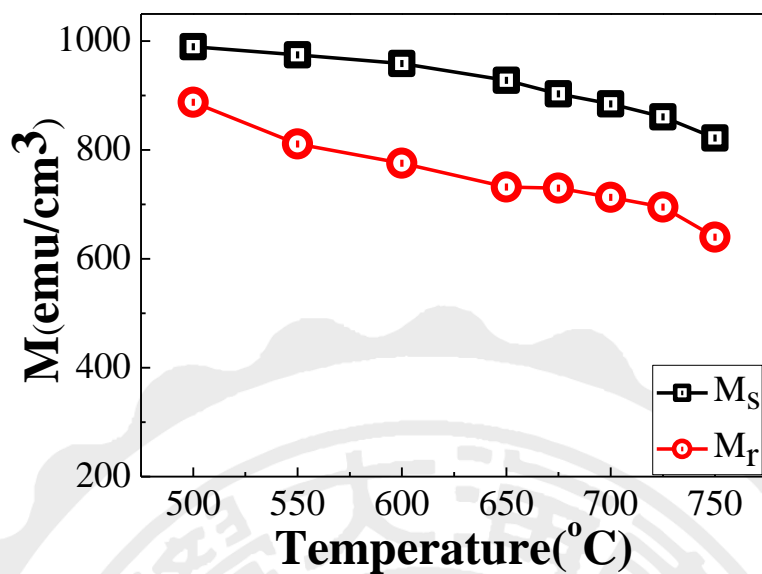


圖 4.1.13 靶距 12.5 cm 之 FePd 薄膜飽和磁化量及殘餘磁化量隨不同後退火溫度之變化圖。

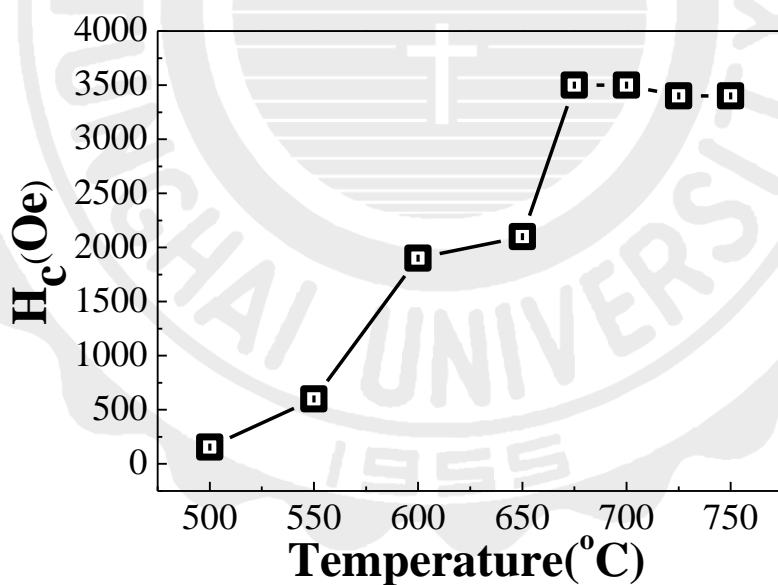


圖 4.1.14 靶距 12.5 cm 之 FePd 薄膜經不同溫度後退火水平矯頑磁力變化圖。

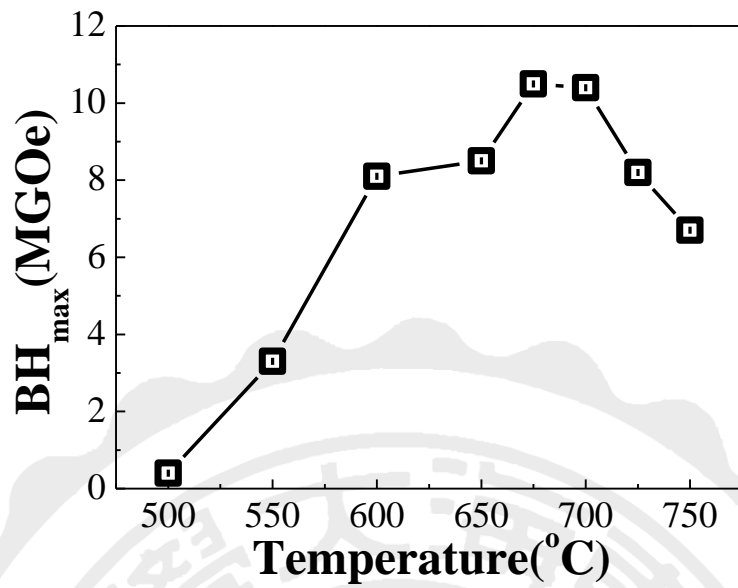


圖 4.1.15 靶距 12.5 cm 之 FePd 薄膜經不同溫度後退火之磁能積圖。

圖 4.1.16 為靶距 12.5 cm 之 FePd 薄膜經不同溫度後退火之磁區圖。隨著退火溫度增加，磁區隨之增大。

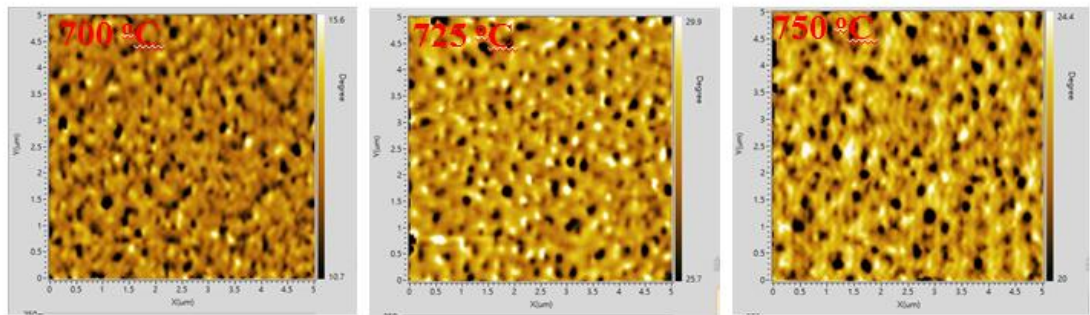


圖 4.1.16 靶距 12.5 cm 之 FePd 薄膜經不同溫度後退火之磁區圖。

#### 4-1-4 靶距效應對於射頻磁控濺鍍 FePd 薄膜綜合探討

本節實驗以射頻濺鍍法製備了 Fe<sub>50</sub>Pd<sub>50</sub> 薄膜，並探討不同退火溫度對於 Fe<sub>50</sub>Pd<sub>50</sub> 薄膜結構及磁性之影響。在靶距為 5 cm 的單層 Fe<sub>50</sub>Pd<sub>50</sub> 薄膜於不同溫度下退火時，樣品藉由 XRD 分析皆呈現(111)繞射峰，繞射峰隨溫度升高之增強，並且在退火溫度為 700 °C 時，FePd 薄膜出現(200)繞射峰，在磁滯曲線上可以觀察隨著溫度提升矯頑磁力皆很低，最高值出現在 550 °C，為 340 Oe，其磁能積僅 1.7 MGOe。

當靶距為 10 cm 時，樣品有很弱(111)及(200)繞射峰值，隨著退火溫度增加至 600°C - 650 °C 時，因有較佳的序化度，而有較高矯頑磁力，為 2.2 kOe。與靶距 5 cm 相比，其有較高的矯頑磁力與磁能積，能積為 7.1 MGOe，而退火溫度為 675°C，都有明顯下降的趨勢。

當靶距為 12.5 cm 時，樣品有著微弱的(111)，退火溫度增加(111)及有繞射峰位移的現象，隨著溫度提升，FePd 結構從 A1 轉變為 L1<sub>0</sub>，由軟磁轉變為硬磁。其磁性皆有明顯的增加而最高的矯頑磁力，在靶距為 12.5 cm，當退火溫度為 675 °C，其有大的矯頑磁力為 3.5 kOe 及最高的磁能積 10.5 MGOe，且另外發現，當溫度在 750 °C 仍保持有較大的矯頑磁力。

藉由室溫下 XRD 圖 FePd(111)繞射峰算出(111)晶面間距，由表 4.1.4 可以看出，靶距越遠，初鍍態 FePd 膜壓縮應力越大，並且在退火後可以發現在靶距越遠下，其可在較低溫度下序化，如圖 4.1.17 - 4.1.20 所示，隨著高溫退火後應力釋放並可達到較好磁性。

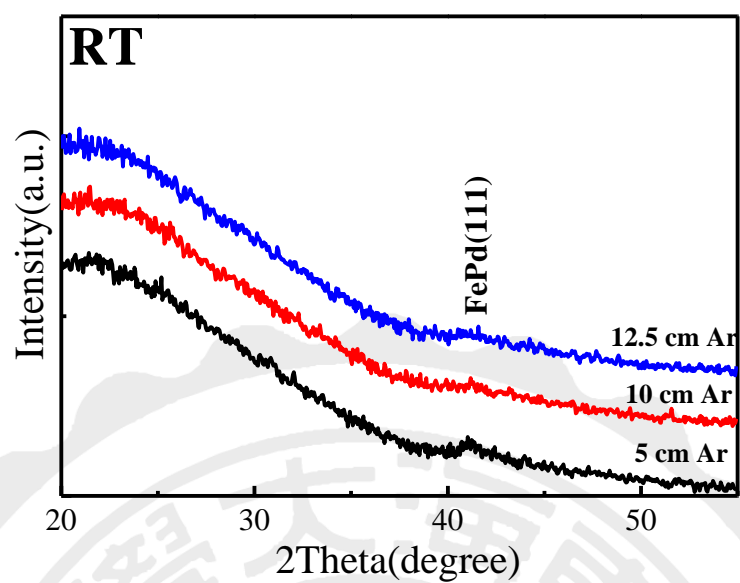


圖 4.1.16 改變靶距在室溫下 XRD 圖。

表 4.1.4 不同靶距初鍍態之 FePd(111) 晶面間距

Temperature(°C)	FePd(111)	
	Peak(111) (°)	$d_{111}$ (Å)
D= 5 cm	40.516	2.184
D= 10 cm	40.833	2.209
D= 12.5 cm	40.959	2.211

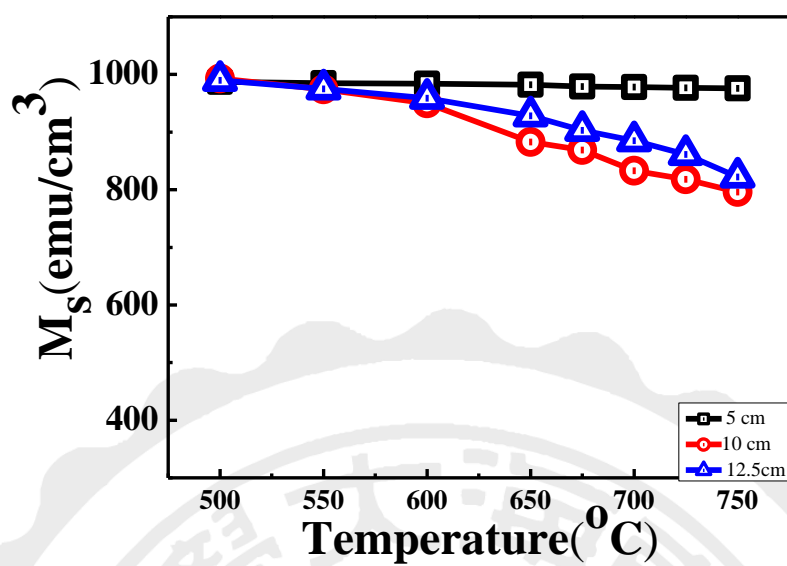


圖 4.1.17 不同靶距之 FePd 膜經由不同溫度後退火之飽和磁化量。

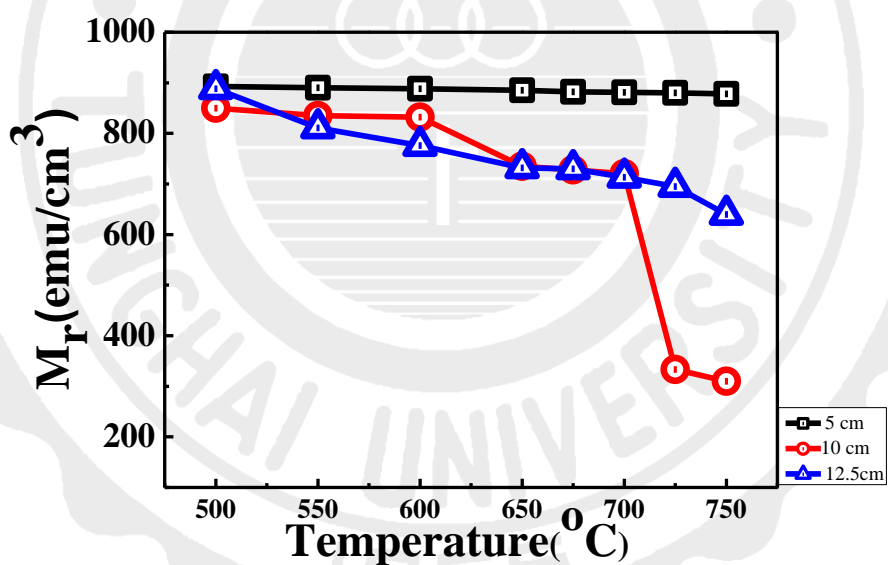


圖 4.1.18 不同靶距之 FePd 膜經由不同溫度後退火之殘餘磁化量。



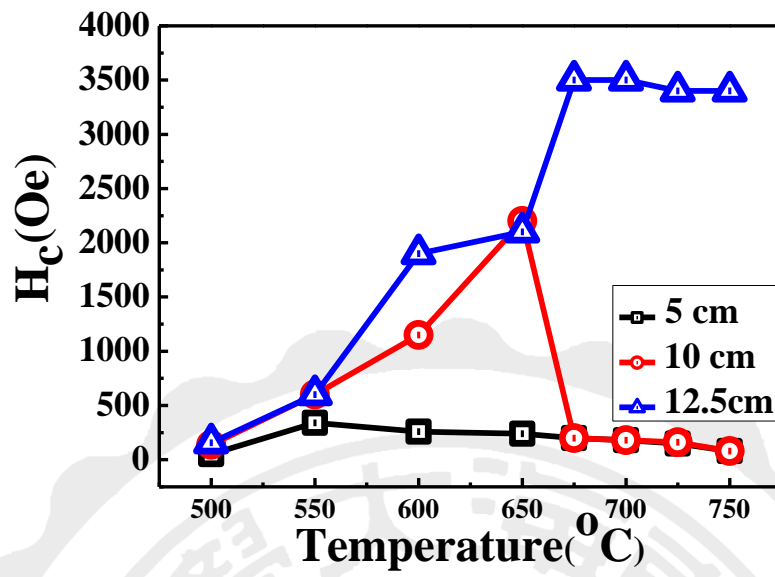


圖 4.1.19 不同靶距之 FePd 膜經由不同溫度後退火之矯頑磁力圖。

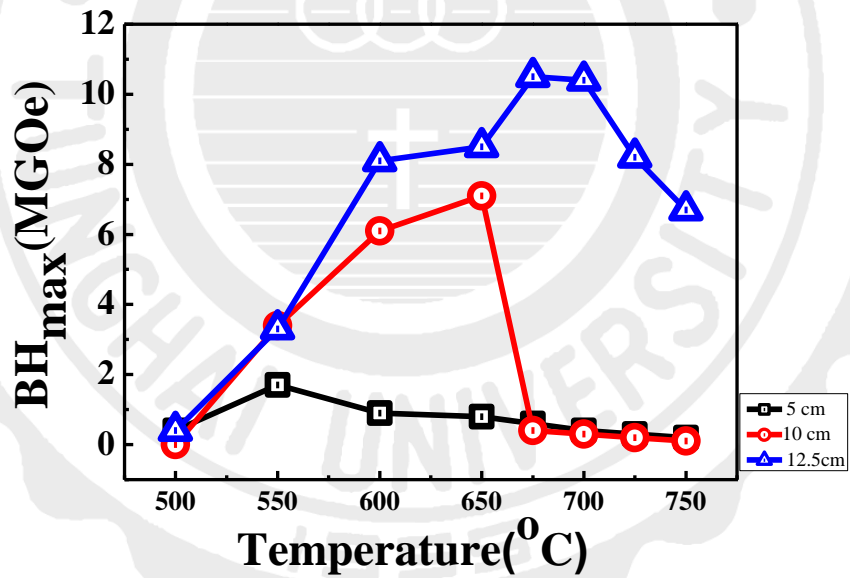


圖 4.1.20 不同靶距之 FePd 膜經由不同溫度後退火之磁能積圖。

## 4-2 靶距效應對於以直流濺鍍法製備的 $\text{Fe}_{50}\text{Pd}_{50}$ 薄膜結構與磁性之影響

本節以直流濺鍍法製備單層 30 nm FePd 薄膜，改變製程條件為濺鍍靶材與基板之間的距離，並進行不同溫度後退火，探討不同靶距對 FePd 薄膜結構及磁性之影響。實驗參數如表 4.1.1:

表 4.2.1 實驗參數

濺鍍法	濺鍍功率 (W)/ 工作壓力 (mTorr)	改變靶距	氣體
直流濺鍍法 (Dc)	30/10	5 cm	氬氣(Ar)
		10 cm	
		12.5 cm	

#### 4-2-1 靶距 5 cm 下以直流濺鍍沉積 FePd 薄膜經由不同溫度後退火之結構及磁性研究

圖 4.2.1 為靶距 5 cm 鍍製 Fe<sub>50</sub>Pd<sub>50</sub> 薄膜經不同後退火溫度之 XRD 圖。在初鍍態時，FePd 薄膜僅出現(111)繞射峰，當退火溫度高於 600 °C 時，才出現(200)繞射峰。此外，(111)繞射峰隨溫度提高向高角度偏移，此與 L1<sub>0</sub>相之序化有關。隨著退火溫度升高(111)和(200)繞射峰強度都隨之增強。

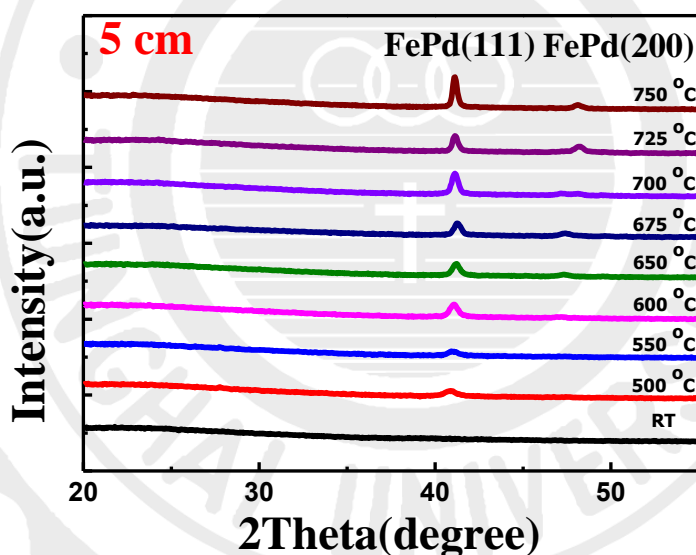


圖 4.2.1 靶距 5 cm FePd 薄膜經不同退火溫度後退火之 XRD 圖。

圖 4.2.2 為靶距 5 cm 鍍製 Fe<sub>50</sub>Pd<sub>50</sub> 薄膜於玻璃基板經不同溫度後退火之磁滯曲線圖。由圖可知，在靶距為 5 cm 鍍製 FePd 薄膜皆呈現出水平磁異向性，且矯頑磁力低。

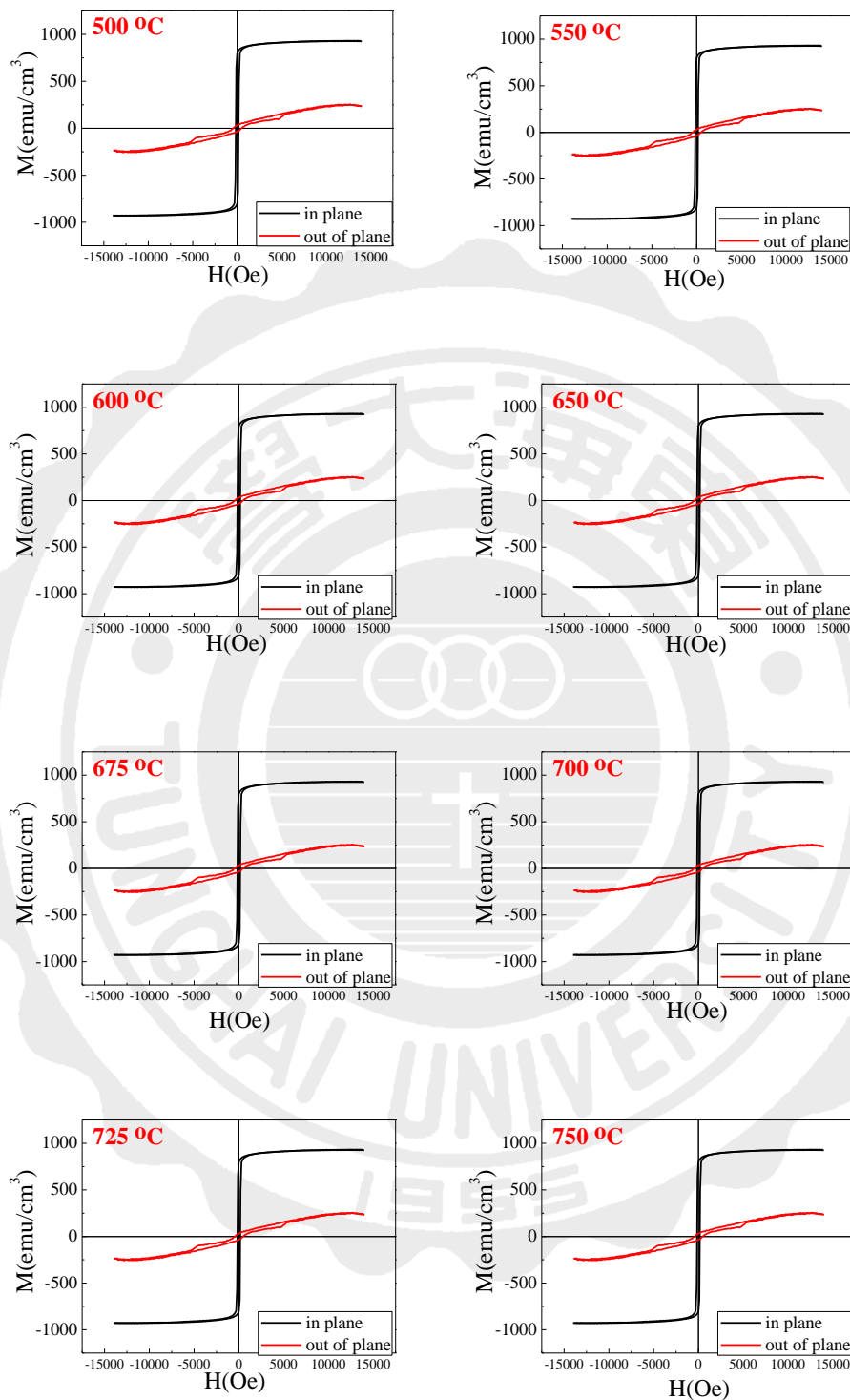


圖 4.1.2 靶距 5 cm 之 FePd 薄膜經不同後退火溫度之磁滯曲線

圖。

根據圖 4.2.2 作分析彙整其磁性圖於表 4.2.2。圖 4.2.3 為靶距 5 cm FePd 薄膜之飽和磁化量和殘餘磁化量。從圖中可以觀察到，隨著溫度提高，飽和磁化量和殘餘磁化量隨之慢慢下降。圖 4.2.4 為矯頑磁力隨後退火溫度變化圖。矯頑磁力隨後退火溫度提升而稍微提升。圖 4.2.5 為磁能積隨後退火溫度變化圖。從 4.2.4 - 4.2.5 觀察出磁能積皆很低。

表 4.2.2 靶距 5 cm 之 FePd 薄膜經不同溫度後退火之飽和磁化量、殘餘磁化量、矯頑磁力及磁能積一覽表

D = 5 ,Ar	$M_s$ (emu/cm <sup>3</sup> )	$M_r$ (emu/cm <sup>3</sup> )	$H_c$ (Oe)	(BH) <sub>max</sub> (MGOe)
500 °C	988	888	160	0.8
550 °C	986	886	400	2
600 °C	984	884	130	1.1
650 °C	983	883	105	0.6
675 °C	982	881	73	0.1
700 °C	980	879	66	0.03
725 °C	979	878	40	0.01
750 °C	977	876	30	0.01

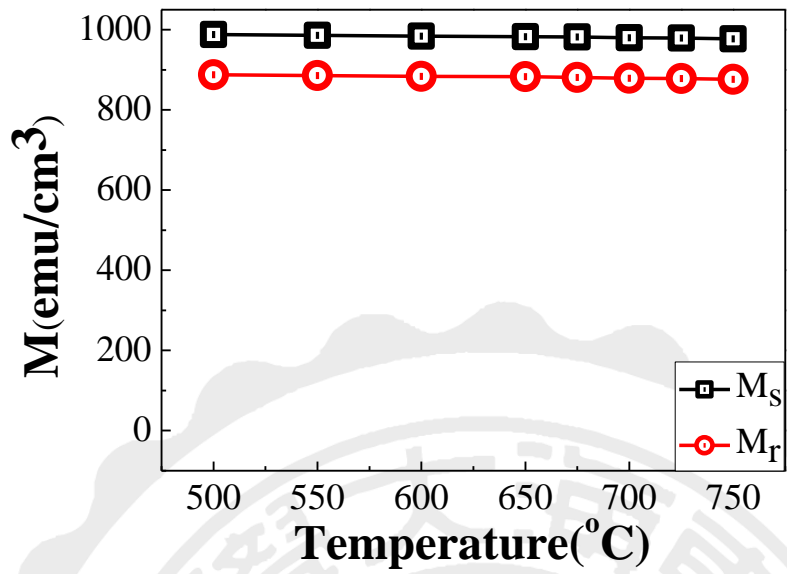


圖 4.2.3 靶距 5 cm 之 FePd 薄膜飽和磁化量及殘餘磁化量隨後退火溫度變化圖。

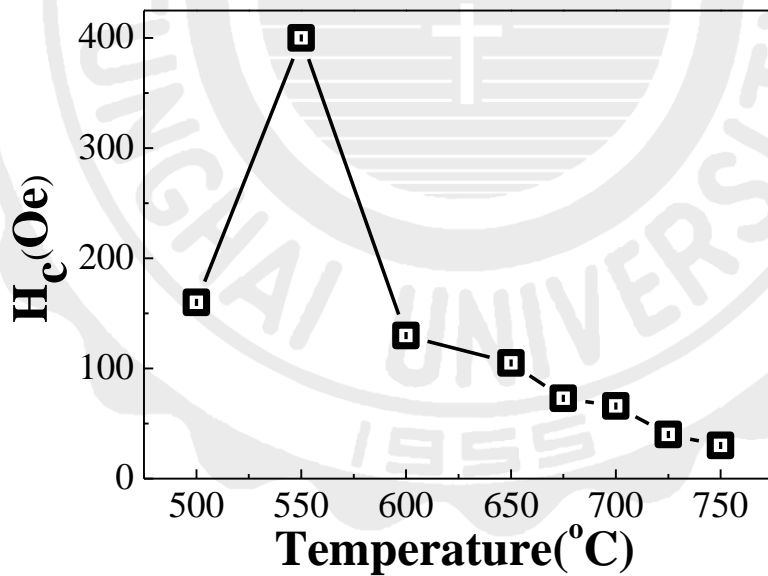


圖 4.2.4 靶距 5 cm 之 FePd 薄膜水平矯頑磁力隨後退火溫度變化圖。

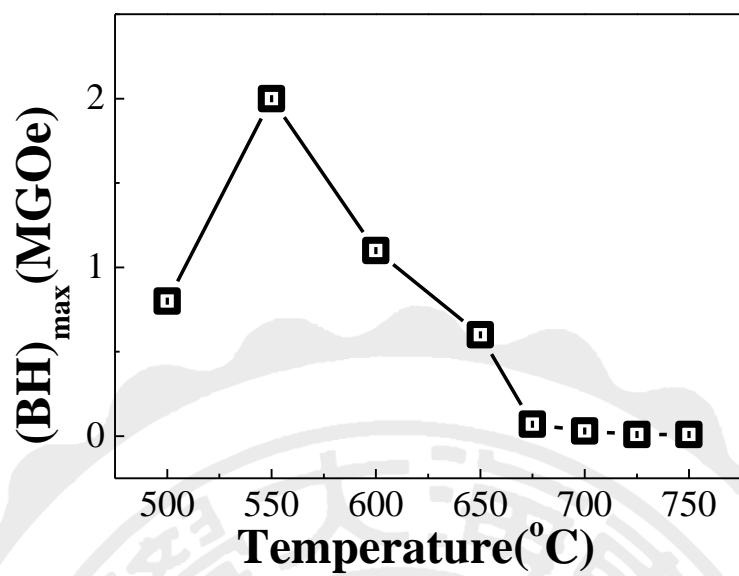


圖 4.2.5 靶距 5 cm 之 FePd 薄膜磁能積隨後退火溫度變化圖。

#### 4-2-2 靶距 10 cm 下以直流濺鍍沉積 FePd 薄膜經由不同溫度後退火之結構及磁性研究

圖 4.2.6 為靶距 10 cm 鍍製 Fe<sub>50</sub>Pd<sub>50</sub> 薄膜經不同溫度後退火之 XRD 圖。在初鍍態時，FePd 薄膜僅出現(111)繞射峰，隨著溫度提升，(111)隨之增強。與之前其他靶距不同是當退火溫度上升至 700 °C 時，(111)繞射峰有明顯的向左偏移，其表示結構由序化的 L1<sub>0</sub> 相漸漸轉變為無序的結構。

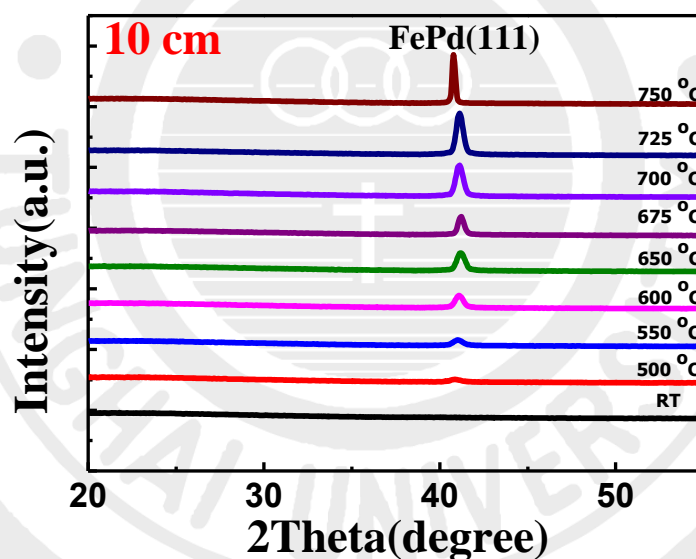


圖 4.2.6 靶距 10 cm FePd 薄膜經不同退火溫度後退火之 XRD 圖。

圖 4.2.7 為靶距 10 cm FePd 薄膜經不同溫度後退火之磁滯曲線圖。與靶距 5 cm 鍍製的 FePd 相比，除了在退火溫度 650 °C 下有較高的水平矯頑磁力( $H_c = 2.9$  kOe)外，溫度到達 700 °C 矯頑磁力有明顯下降趨勢



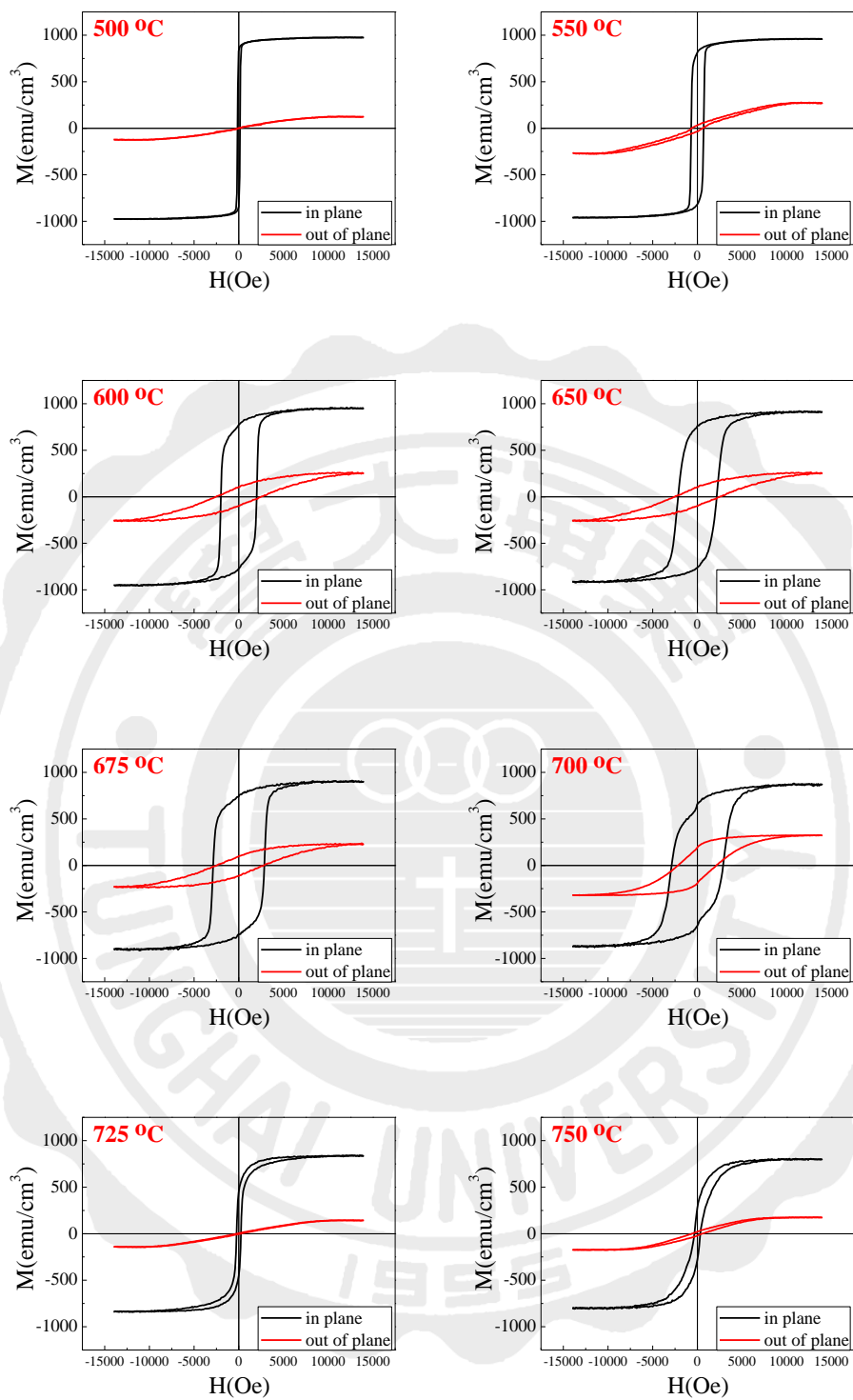


圖 4.2.7 靶距 10 cm FePd 薄膜經不同退火溫度後退火之磁滯曲線圖。

根據 4.2.7 作分析彙整其磁性圖於表 4.2.3。圖 4.2.8 為靶距 10 cm 之 FePd 薄膜之飽和與殘餘磁化量隨不同後退火溫度之變化圖。由圖可知，兩磁化量都隨之下降。圖 4.1.9 矯頑磁力隨不同後退火溫度之變化圖。當靶距為 10 cm 可以發現到矯頑磁力有顯著的提升。圖 4.1.10 為磁能積隨不同後退火溫度之變化圖。當其退火溫度在 675 °C 時，矯頑磁力為 2.9 kOe 磁能積為 10.4 MGOe。

表 4.2.3 靶距 10 cm 之 FePd 薄膜經不同溫度退火之飽和磁化量和殘餘磁化量及矯頑磁力、磁能積一覽表

$D = 10 \text{ ,Ar}$	$M_s \text{ (emu/cm}^3\text{)}$	$M_r \text{ (emu/cm}^3\text{)}$	$H_c \text{ (Oe)}$	$(BH)_{\max} \text{ (MGOe)}$
500 °C	974	844	150	0.1
550 °C	960	813	731	4.0
600 °C	948	771	2000	8.4
650 °C	914	762	2200	9.0
675 °C	894	758	2900	10.4
700 °C	867	662	2850	6.5
725 °C	836	460	350	0.5
750 °C	801	287	316	0.2

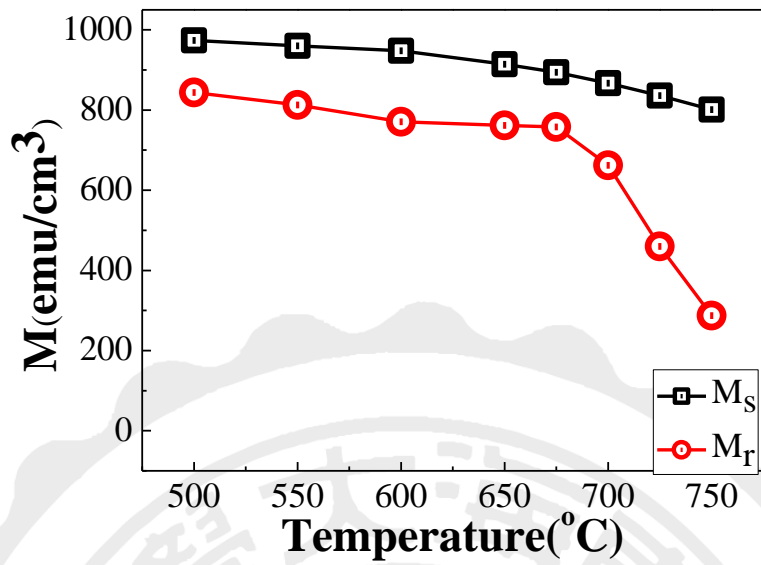


圖 4.2.8 靶距 10 cm 之 FePd 薄膜飽和磁化量及殘餘磁化量隨不同後退火溫度之變化圖。

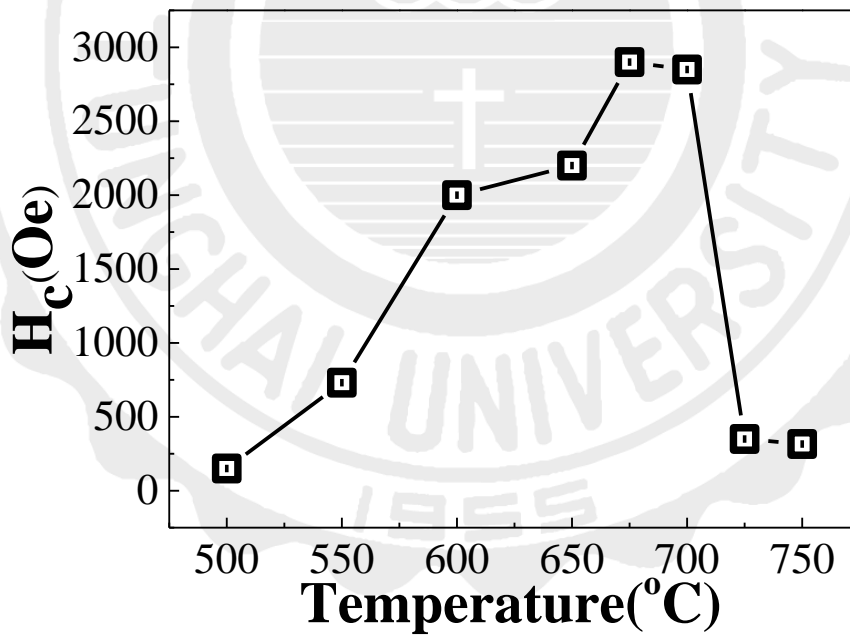


圖 4.2.9 靶距 10 cm 之 FePd 薄膜經不同溫度退火之水平矯頑磁力圖。

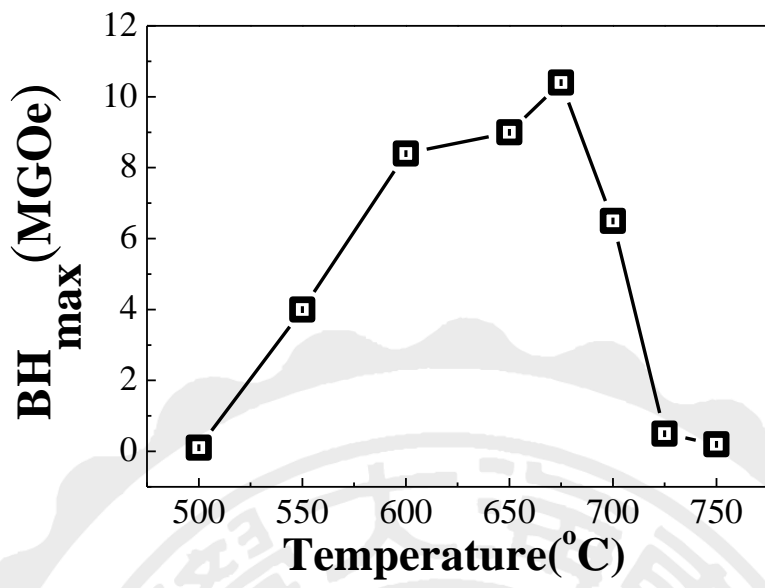


圖 4.2.10 靶距 10 cm 之 FePd 薄膜經不同溫度退火之磁能積變化圖。

### 4-2-3 靶距 12.5 cm 下以直流濺鍍沉積 FePd 薄膜經由不同溫度後退火之結構及磁性研究

圖 4.2.11 為靶距 12.5 cm 鍍製 Fe<sub>50</sub>Pd<sub>50</sub> 薄膜經不同後退火溫度之 XRD 圖。在初鍍態時呈現(111)繞射峰，隨著退火溫度升高，(111)繞射峰有明顯增強趨勢，表示結晶性變佳，晶粒大小隨之增加。

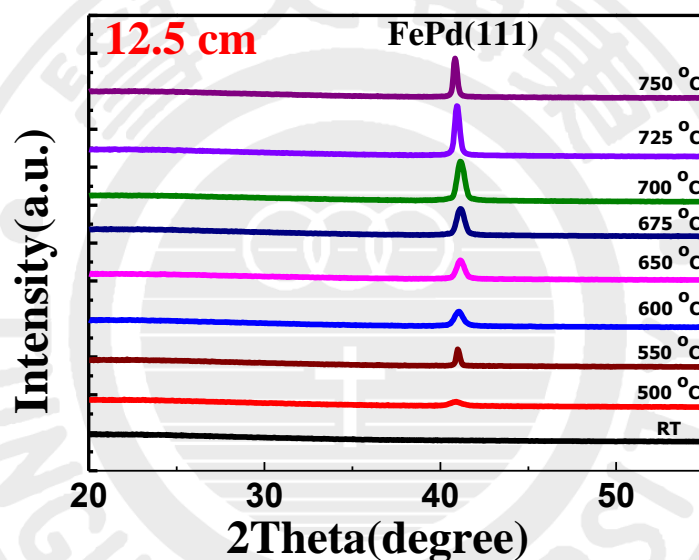


圖 4.2.11 靶距 12.5 cm FePd 薄膜經不同退火溫度後退火之 XRD 圖。

圖 4.2.12 為靶距 12.5 cm 之 FePd 薄膜經不同溫度後退火之磁滯曲線圖。當靶距拉到 12.5 cm 時，溫度達到 650 °C 時，可獲得較高水平矯頑磁力達 3.5 kOe，FePd 結構轉為 fct 時，使其矯頑磁力上升。而退火溫度 700 - 750 °C 矯頑磁力有稍微下降。

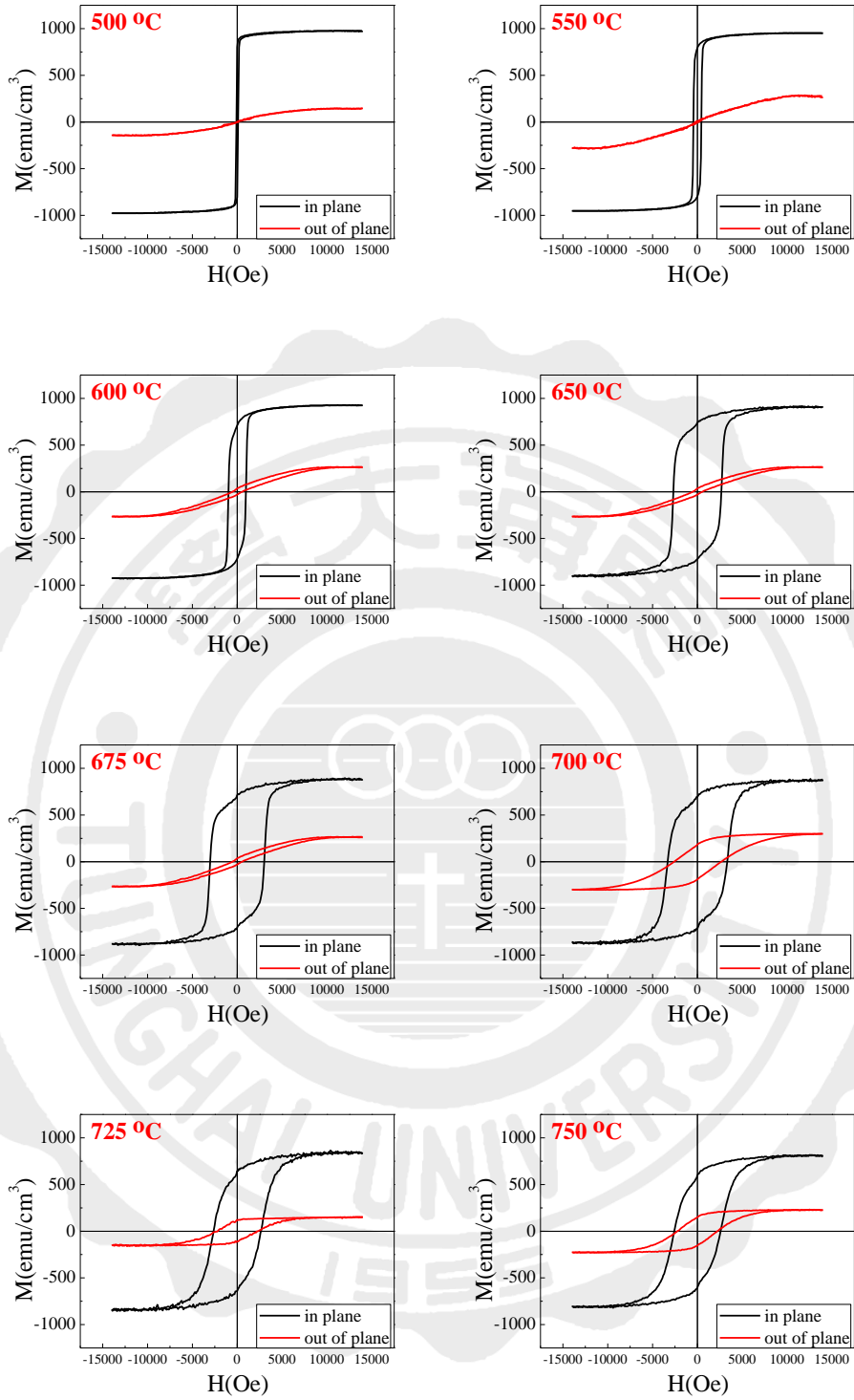


圖 4.1.12 靶距 12.5 cm 之 FePd 薄膜經不同後退火溫度之磁滯曲線圖。

根據 4.2.12 作分析彙整其磁性圖於表 4.2.4。圖 4.1.13 為靶距為 12.5 cm 之 FePd 薄膜之飽和及殘餘磁化量。兩磁化量皆隨溫度提高而下降。圖 4.2.14 為矯頑磁力隨退火溫度之變化圖。當靶距提升到 12.5 cm 時，獲得較高的矯頑磁力為 3.3 kOe。圖 4.2.15 為磁能積隨退火溫度變化圖，磁能積隨著退火溫度上升也有所提升，當退火溫度在 650 °C 時，有較佳的表現。

表 4.2.4 靶距 12.5 cm 之 FePd 薄膜經不同後退火溫度之飽和磁化量、殘餘磁化量、矯頑磁力及磁能積一覽表

D = 12.5 cm, Ar	$M_s$ (emu/cm <sup>3</sup> )	$M_r$ (emu/cm <sup>3</sup> )	$H_c$ (Oe)	(BH) <sub>max</sub> (MGoe)
500 °C	970	815	90	0.1
550 °C	952	798	450	2.5
600 °C	926	745	1000	4.0
650 °C	905	740	2600	9.6
675 °C	881	714	3000	9.2
700 °C	865	696	3300	8.8
725 °C	834	642	2700	5.8
750 °C	805	599	2600	4.9

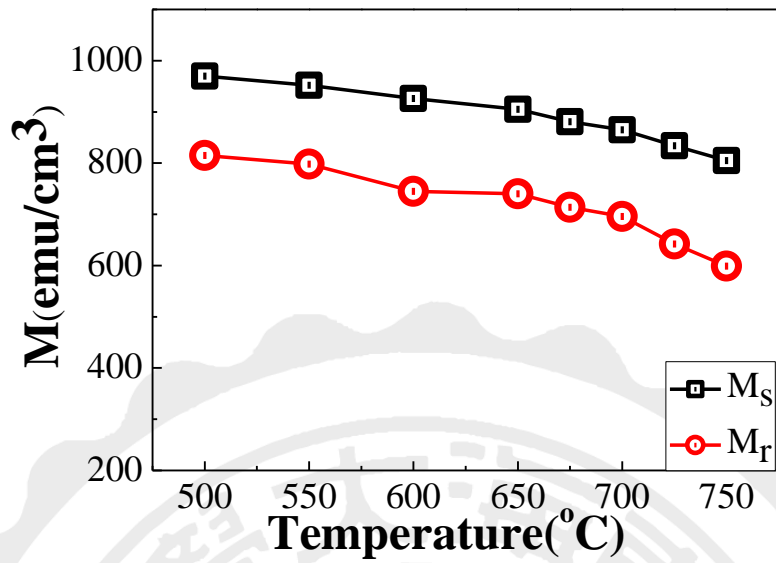


圖 4.2.13 靶距 12.5 cm 之 FePd 薄膜飽和磁化量及殘餘磁化量隨不同後退火溫度之變化圖。

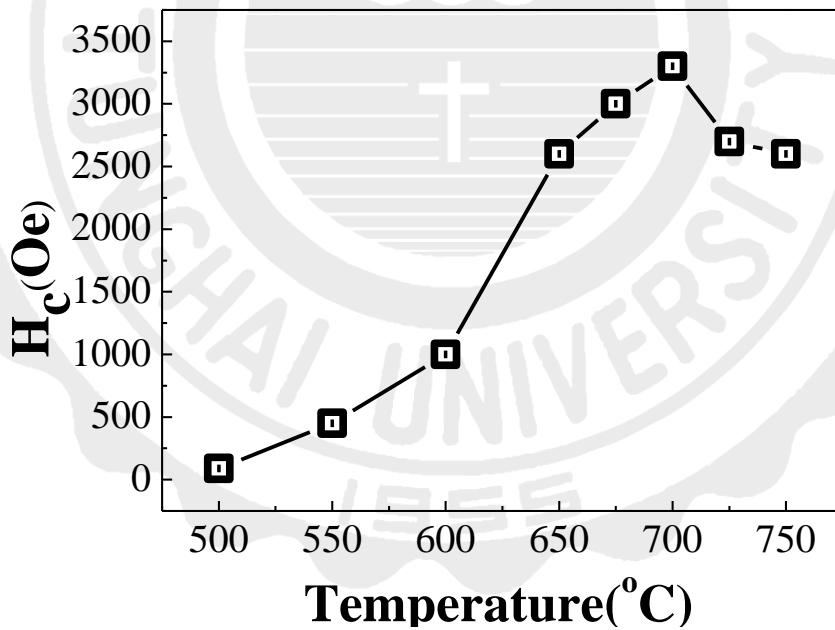


圖 4.2.14 靶距 12.5 cm 之 FePd 薄膜經不同溫度後退火水平矯頑磁力變化圖。



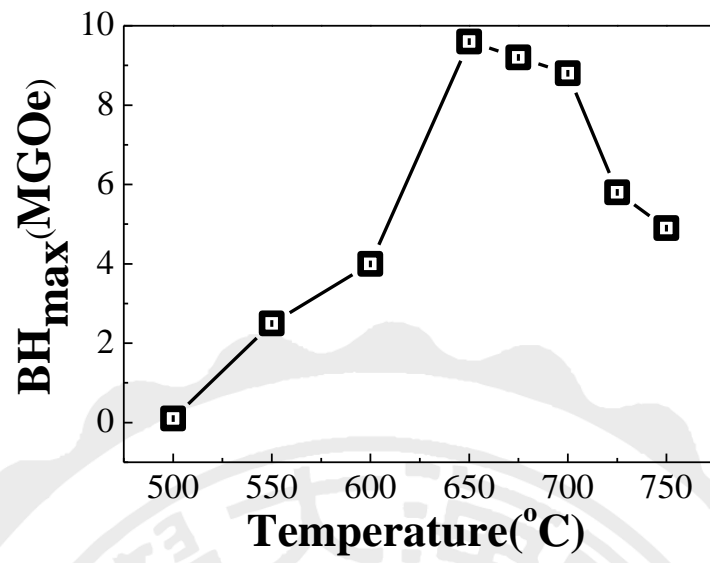


圖 4.2.15 靶距 12.5 cm 之 FePd 薄膜經不同溫度後退火之磁能積圖。

#### 4-2-4 靶距效應對於射頻濺鍍 FePd 薄膜綜合探討

本節實驗以直流濺鍍法製備了 Fe<sub>50</sub>Pd<sub>50</sub> 薄膜，並探討不同退火溫度對於 Fe<sub>50</sub>Pd<sub>50</sub> 薄膜結構及磁性之影響。在靶距為 5 cm 的單層 Fe<sub>50</sub>Pd<sub>50</sub> 薄膜於不同溫度下退火時，樣品藉由 XRD 分析皆呈現(111)繞射峰，繞射峰隨之增強，並且在退火溫度為 700 °C 時，FePd 薄膜出現(200)繞射峰，在磁滯曲線上可以觀察隨著溫度提升矯頑磁力皆很低。當靶距 5 cm 時，矯頑磁力最高值出現在 550 °C，為 400 Oe 磁能積為 2.0 MGOe，與射頻濺鍍靶距 5 cm 時獲得的結果相似。

在靶距為 10 cm 時，樣品有較強 (111)繞射峰，隨著退火溫度增加在退火溫度為 600°C - 650 °C 因有較好的序化，而有較高矯頑磁力，為 2.9 kOe。在靶距為 10 cm 退火溫度為 650 °C，其有出現較高的磁能積，最大能積為 10.4 MGOe，而退火溫度為 700 °C，都有下降的趨勢。

當靶距為 12.5 cm 時，樣品有著微弱的(111)，退火溫度增加(111)及有繞射峰位移的現象，隨著溫度提升，FePd 結構從面心立方轉變為面心四方，磁滯曲線上可以觀察到磁性質有著明顯的增加而最高的矯頑磁力為靶距為 12.5 cm，當退火溫度為 700 °C，其有大的矯頑磁力為 3.3 kOe 及最高的磁能積 8.8 MGOe。

在先前 4-1 小節可以看出由 XRD 圖算出的 FePd(111)晶面間距會隨著靶距的改變，由表 4.2.4 可以看出在靶距越遠時初始狀態顯著的不同當靶距為 12.5 cm 時所得出的晶面間距值為最大，表示著在初始狀態時就有著較大的應力，並藉由退火後應力釋放有著較高矯頑磁力，並且與射頻濺鍍得到類似結果隨著靶距的改變會使序化溫度下降，

如圖 4.2.17 - 4.2.20，隨著高溫退火後序化度之提高因而可獲較高矯頑磁力磁性，由圖 4.2.21 不同溫度退火繞射峰趨勢圖。FePd 薄膜經熱處理過，其晶粒的平面間距會改變，使其從面心立方結構轉變為面心四方結構，成分接近  $\text{Fe}_{50}\text{Pd}_{50}$ ，FePd 薄膜越易序化，此結果與 FePt 薄膜研究結果相似[68,69,70]，當結構轉變其中 a 軸會受到拉伸導致其變大，c 軸則會受到壓縮導致其縮小[71,72,73]，由表 4.2.6 可知繞射峰位置會隨著溫度提升向右偏移，當溫度到達  $750^\circ\text{C}$ 。繞射峰明顯的向左回偏代表 FePd 薄膜由序化的  $\text{L1}_0$  逐漸轉變為 fcc 結構[74]。



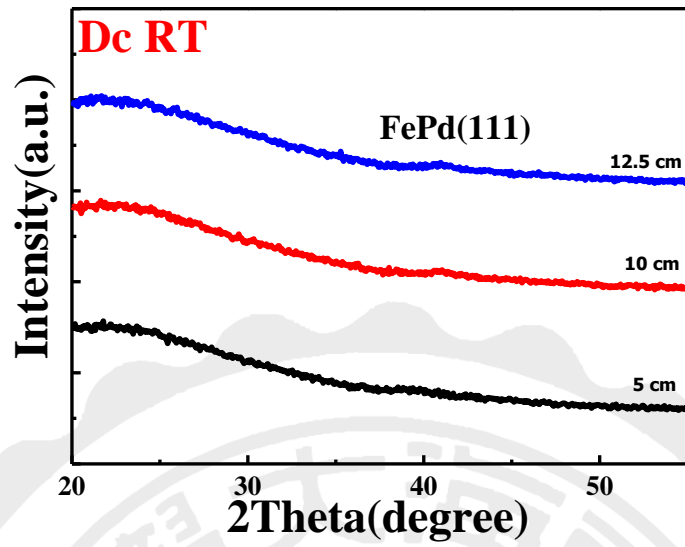


圖 4.2.16 改變靶距在室溫下 XRD 圖。

表 4.2.5 不同靶距初鍍態之 FePd(111) 晶面間距

Temperature(°C)	FePd(111)	
	Peak(111) (°)	$d_{111}$ (Å)
RT		
D= 5 cm	40.119	2.184
D= 10 cm	40.822	2.207
D= 12.5 cm	40.838	2.208

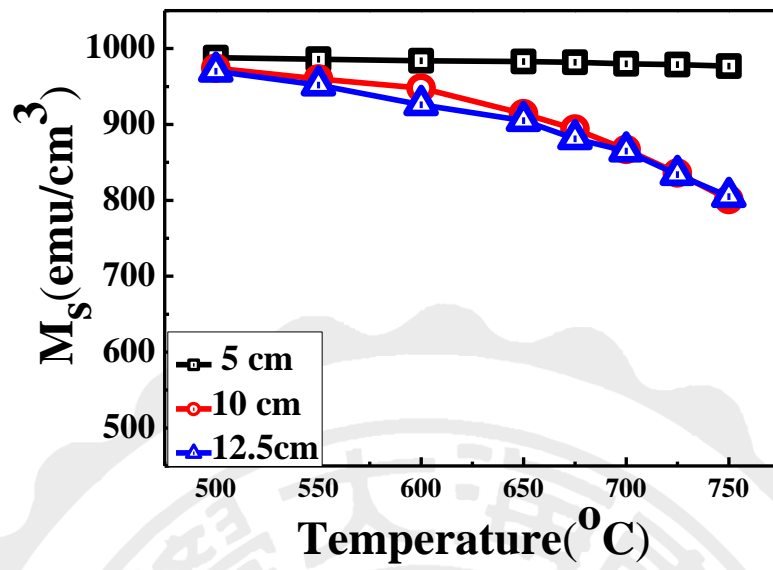


圖 4.2.17 不同靶距之 FePd 膜經由不同溫度後退火之飽和磁化量。

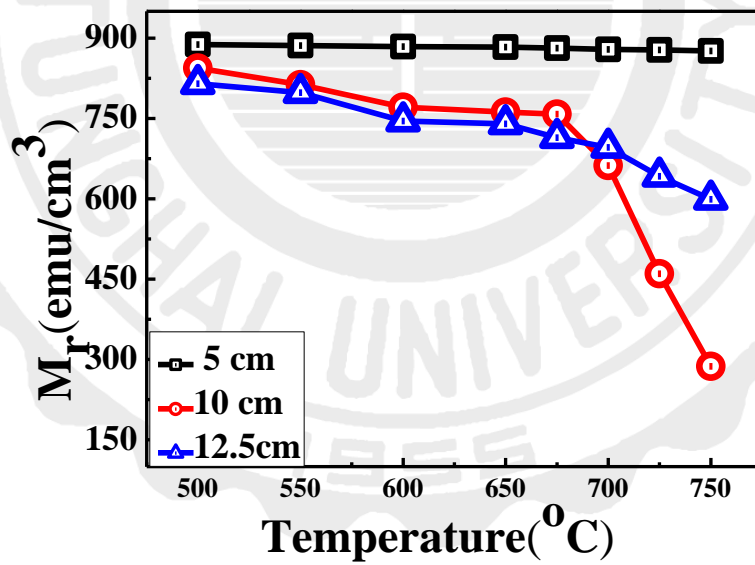


圖 4.2.18 不同靶距之 FePd 膜經由不同溫度後退火之殘餘磁化量。

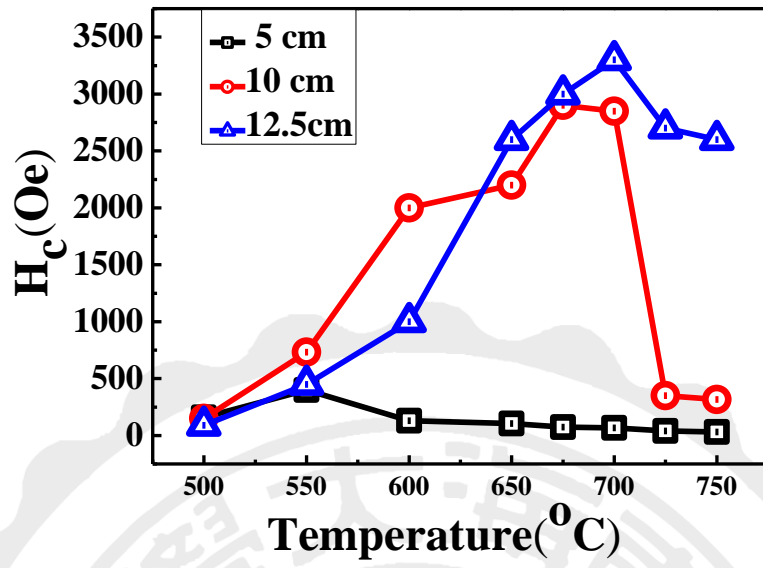


圖 4.2.19 不同靶距之 FePd 膜經由不同溫度後退火之矯頑磁力圖。

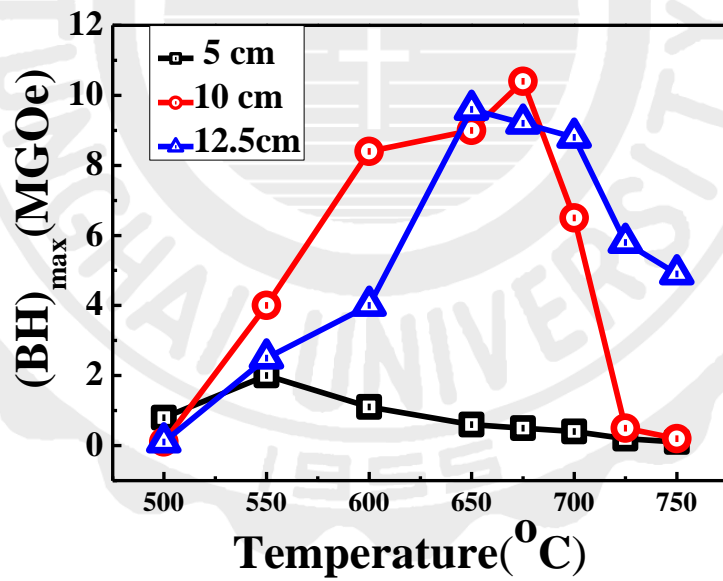


圖 4.2.20 不同靶距之 FePd 膜經由不同溫度後退火之磁能積圖。

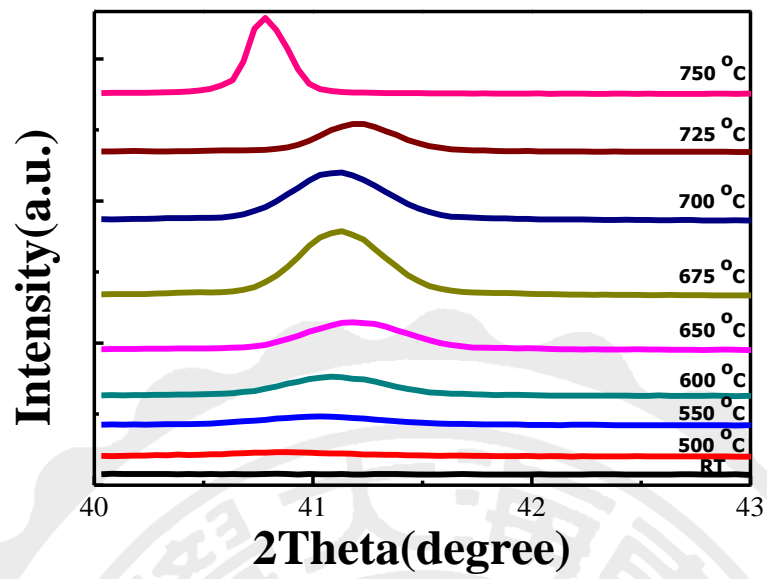


圖 4.2.21 靶距 10 cm FePd(111)薄膜經不同退火溫度後退火之 XRD 變化圖。

表 4.2.6 為 FePd(111)繞射峰值

Temperature(°C)	FePd(111)	Temperature(°C)	FePd(111)
10 cm	Peak(111)	10 cm	Peak(111)
500 °C	39.997	675 °C	41.130
550 °C	40.879	700 °C	41.203
600 °C	41.037	720 °C	41.232
650 °C	41.128	750 °C	40.791

### 4-3 靶距效應對以脈衝直流濺鍍法製備的 Fe<sub>50</sub>Pd<sub>50</sub> 薄膜結構與磁性之影響

本節以脈衝直流濺鍍法在靶距 5 cm 製備單層 30 nm FePd 薄膜，改變製程條件包含：脈衝頻率(20 - 50 kHz)及脈衝持續時間(10 - 80 %)，並進行不同後退火溫度，探討不同脈衝頻率及脈衝持續時間對 FePd 薄膜結構及磁性之影響。實驗參數如表 4.3.1：

表 4.3.1 實驗參數

濺鍍法	濺鍍功率(W) / 工作壓力 (mTorr)	改變靶距	氣體
脈衝直流濺鍍法 (Pulse Dc)	30/10	5 cm	氬氣(Ar)
脈衝頻率(kHz)	脈衝持續時間比率(%)		
20、35、50	10		
	20		
	50		
	80		



#### 4-3-1 固定脈衝頻率 20 kHz 並改變脈衝持續時間(10 – 80%)

圖 4.3.1 為 20 kHz 10 % 鍍製  $\text{Fe}_{50}\text{Pd}_{50}$  薄膜經不同後退火溫度之 XRD 圖。在初鍍態時，FePd 薄膜僅出現(111)繞射峰，當退火溫度高於 700 °C 時，才出現(200)繞射峰。隨著退火溫度升高，(111)及(200)繞射峰強度都隨之增強。

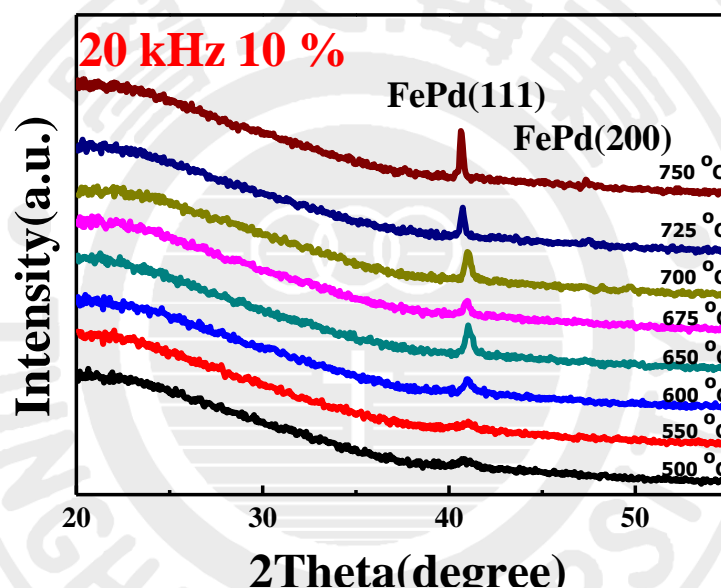


圖 4.3.1 為 20 kHz 10 %  $\text{FePd}$  薄膜經不同退火溫度後退火之 XRD 圖。

圖 4.3.2 為 20 kHz 10 % 鍍製  $\text{Fe}_{50}\text{Pd}_{50}$  薄膜於玻璃基板經不同溫度後退火之磁滯曲線圖。由圖可知其水平矯頑磁力隨退火溫度上升而提高，最高值出現在退火溫度 700 °C 為 2.0 kOe。

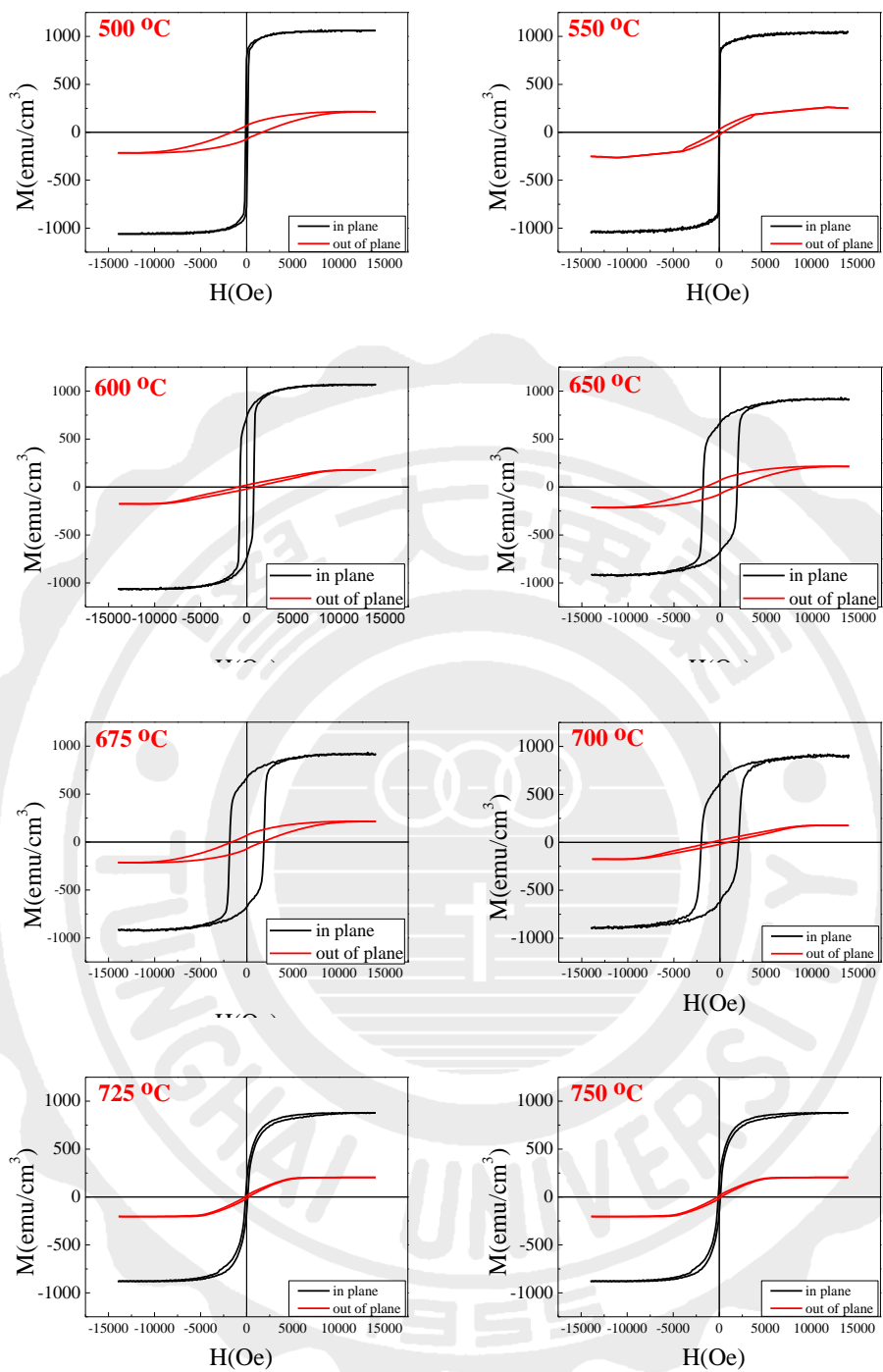


圖 4.3.2 為 20 kHz 10 % 之 FePd 薄膜經不同後退火溫度之磁滯曲線圖。

根據圖 4.3.2 作分析彙整其磁性圖於表 4.3.2。圖 4.3.3 為 20 kHz 10 % FePd 薄膜之飽和磁化量和殘餘磁化量。從圖中可以觀察到，隨著溫度提高，飽和磁化量和殘餘磁化量隨之慢慢下降。圖 4.3.4 為矯頑磁力隨後退火溫度變化圖。隨著退火溫度提升，當溫度為 650 °C 其矯頑力有明顯的提升，有先升後降的趨勢。圖 4.3.5 為磁能積隨後退火溫度變化圖。從 4.3.3 - 4.3.4 觀察得出磁能積會依賴於殘餘磁化量及矯頑磁力，在退火 650 °C 時達到 2.0 kOe 而磁能積為 6.5 MGOe。

表 4.3.2 為 20 kHz 10 % FePd 薄膜經不同溫度後退火之飽和磁化量、

殘餘磁化量、矯頑磁力及磁能積一覽表

20 kHz , 10 %	$M_s$ (emu/cm <sup>3</sup> )	$M_r$ (emu/cm <sup>3</sup> )	$H_c$ (Oe)	(BH) <sub>max</sub> (MGOe)
500 °C	985	830	22	0.1
550 °C	967	790	112	0.1
600 °C	943	705	750	3.5
650 °C	920	650	1900	6.5
675 °C	905	643	2000	6.4
700 °C	891	622	2000	5.4
725 °C	879	200	150	0.2
750 °C	855	150	90	0.1

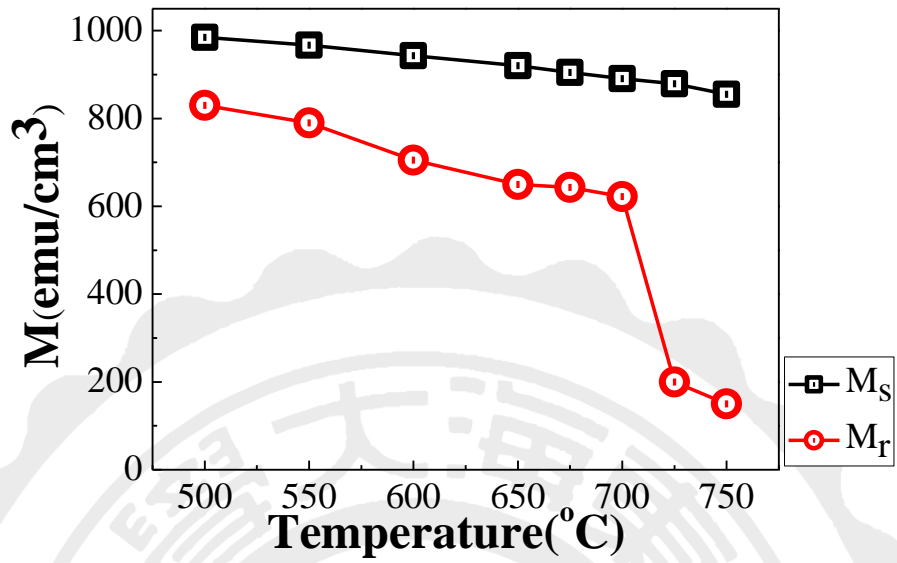


圖 4.3.3 為 20 kHz 10 之 FePd 薄膜飽和磁化量及殘餘磁化量隨後退火溫度變化圖。

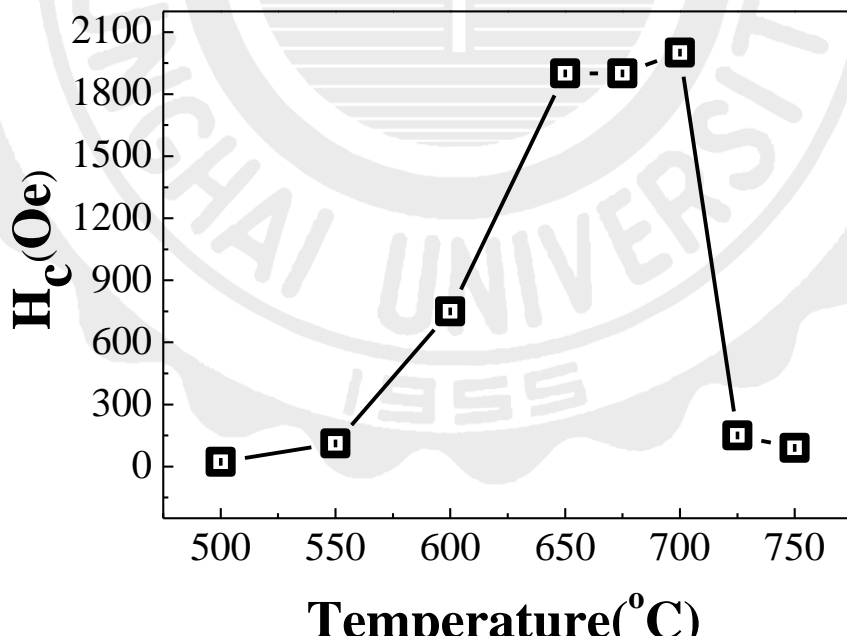


圖 4.3.4 為 20 kHz 10 % 之 FePd 薄膜水平矯頑磁力隨後退火溫度變化圖。

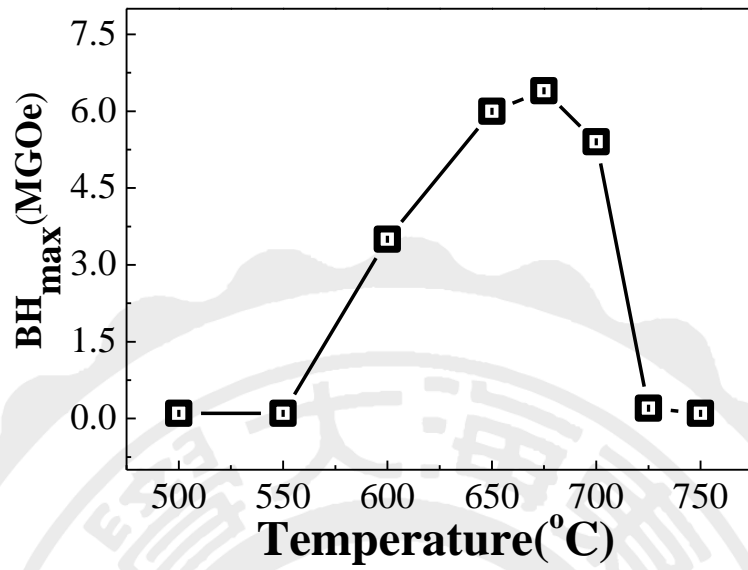


圖 4.3.5 為 20 kHz 10 % 之 FePd 薄膜磁能積隨後退火溫度變化圖。

圖 4.3.6 為 20 kHz 20 % 鍍製  $\text{Fe}_{50}\text{Pd}_{50}$  薄膜經不同後退火溫度之 XRD 圖。在初鍍態時，FePd 薄膜僅出現(111)繞射峰，當退火溫度高於 650 °C 時，才出現(200)繞射峰。隨著退火溫度升高，(111)繞射峰隨之增強。

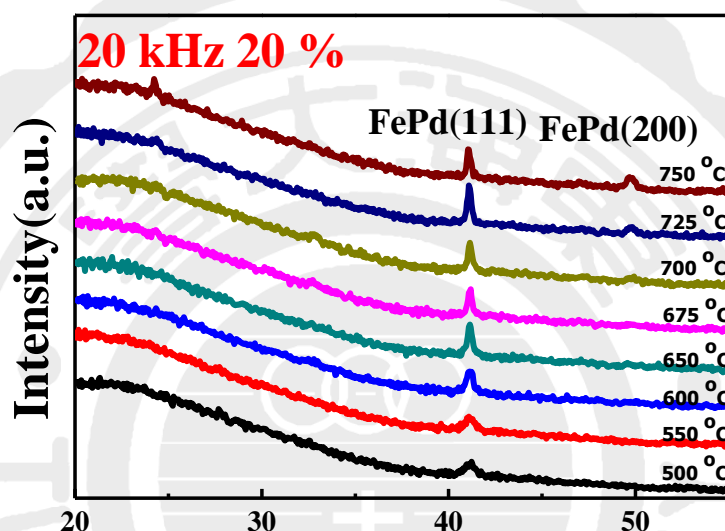


圖 4.3.6 為 20 kHz 20 % FePd 薄膜經不同退火溫度後退火之 XRD 圖。

圖 4.3.7 為 20 kHz 20 % 鍍製  $\text{Fe}_{50}\text{Pd}_{50}$  薄膜於玻璃基板經不同溫度後退火之磁滯曲線圖。由圖可知其水平矯頑磁力隨退火溫度上升而提高，最高值出現在退火溫度 700 °C 為 2.5 kOe。

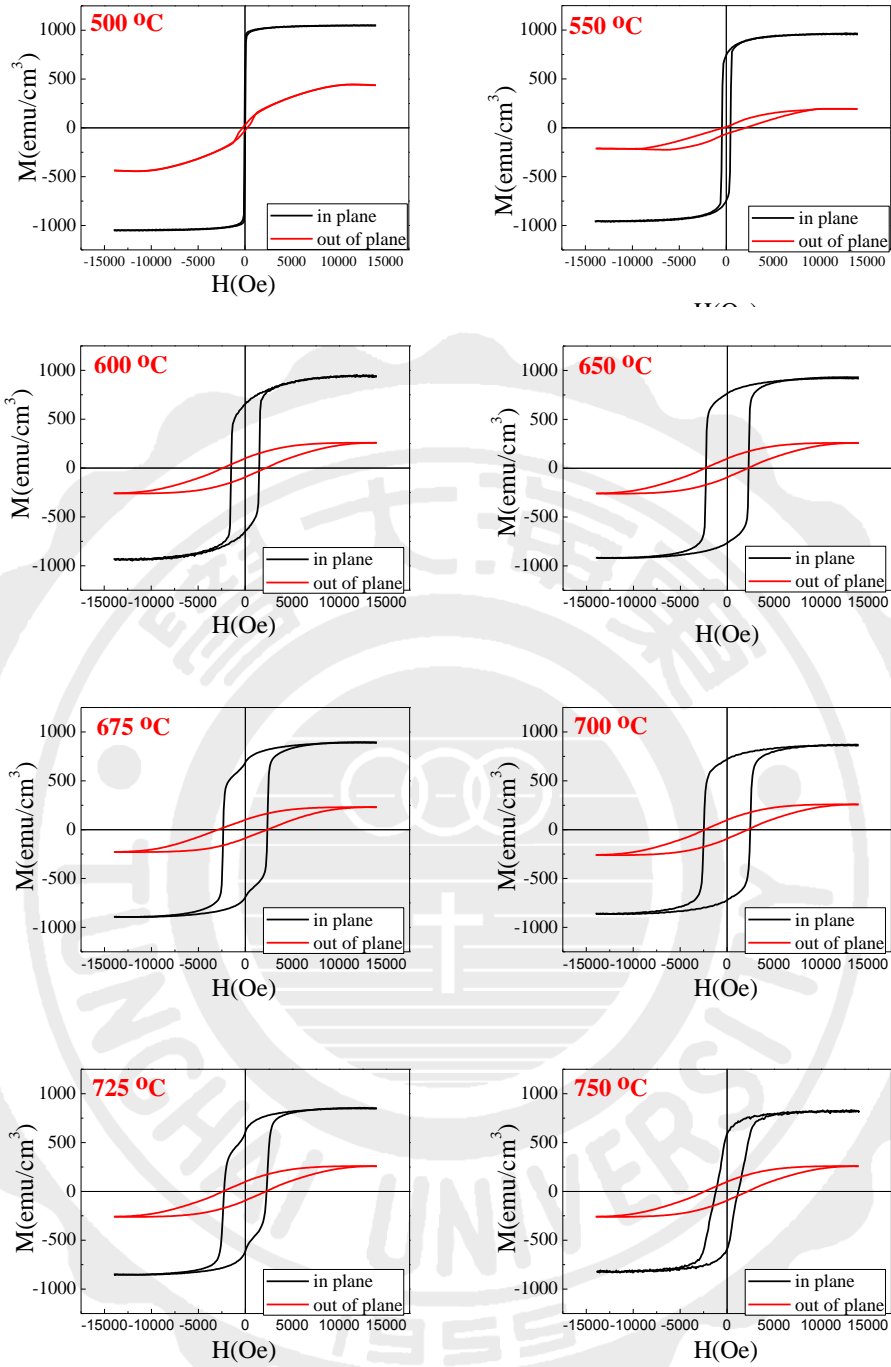


圖 4.3.7 為 20 kHz 20 % 之 FePd 薄膜經不同後退火溫度之磁滯曲線圖。

根據圖 4.3.7 作分析彙整其磁性表 4.3.3。圖 4.3.8 為 20 kHz 10 % FePd 薄膜之飽和與殘餘磁化量隨不同後退火溫度之變化圖。由圖可知，兩磁化量都隨之下降。圖 4.3.9 矯頑磁力隨後退火溫度變化圖。隨著退火溫度提升，當退火溫度為 650 °C 矯頑力有明顯的提升，有先升後降的趨勢，圖 4.3.10 為磁能積隨後退火溫度變化圖。可以觀察到隨著退火溫度升高，矯頑磁力慢慢提升，磁能積伴隨著矯頑磁力提升皆有變高。

表 4.3.3 為 20 kHz 20 % FePd 薄膜經不同溫度後退火之飽和磁化量、殘餘磁化量、矯頑磁力及磁能積一覽表

20 kHz, 20%	$M_s$ (emu/cm <sup>3</sup> )	$M_r$ (emu/cm <sup>3</sup> )	$H_c$ (Oe)	$(BH)_{max}$ (MGOe)
500 °C	988	820	53	0.1
550 °C	958	792	500	2.8
600 °C	936	771	1500	5.9
650 °C	917	763	2300	7.5
675 °C	887	715	2300	8.0
700 °C	859	710	2500	10.2
725 °C	846	610	2200	5.0
750 °C	821	594	1200	2.0



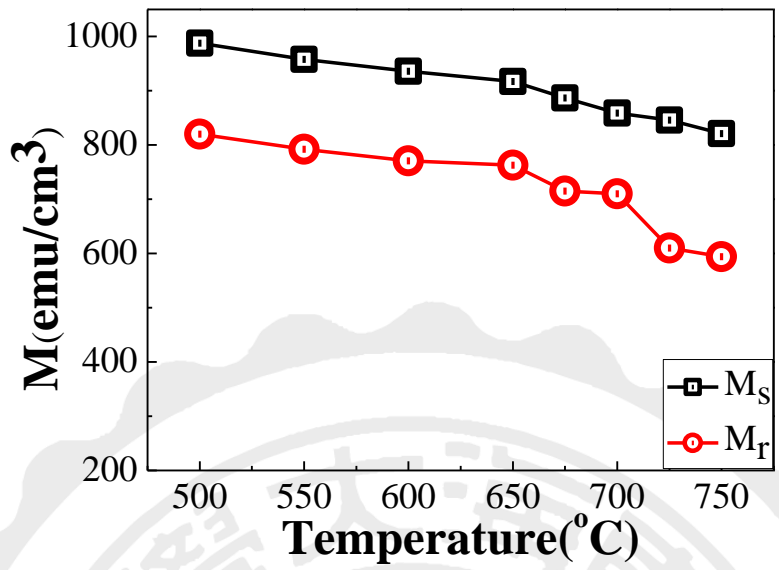


圖 4.3.8 為 20 kHz 20 之 FePd 薄膜飽和磁化量及殘餘磁化量隨後退火溫度變化圖。

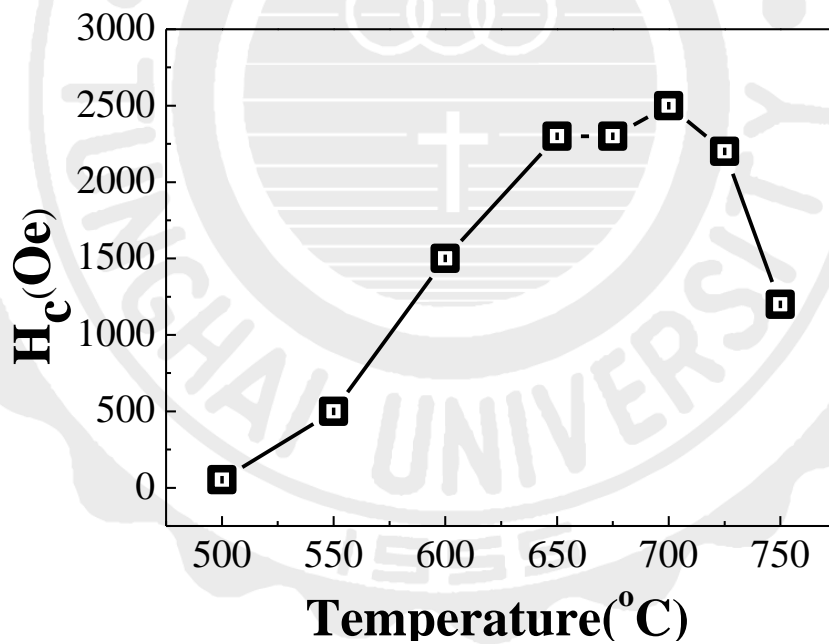


圖 4.3.9 為 20 kHz 20 % 之 FePd 薄膜水平矯頑磁力隨後退火溫度變化圖。

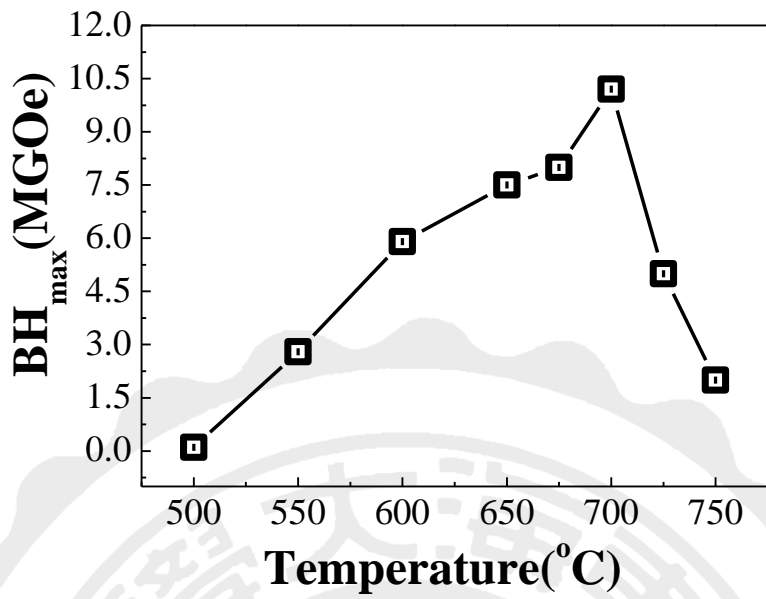


圖 4.3.9 為 20 kHz 20 % 之 FePd 薄膜磁能積隨後退火溫度變化圖。

圖 4.3.10 為 20 kHz 20 % 沉積 FePd 薄膜經不同退後退火之 SEM 圖。退火溫度為 500 °C 時表面呈現出平坦，隨著溫度提升表面顆粒尺寸隨之增大。

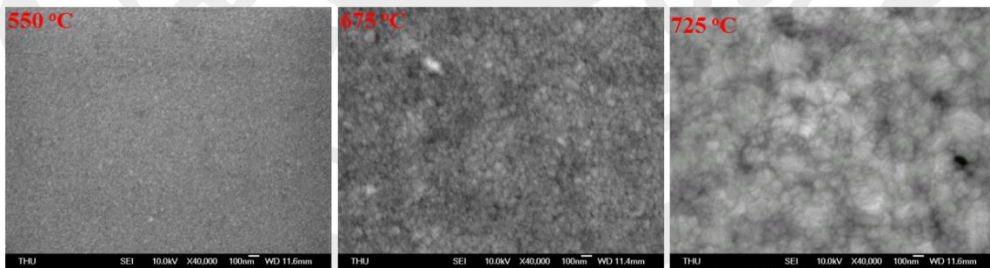


圖 4.3.10 為 20 kHz 10 % 之 FePd 薄膜經不同後退火溫度 SEM 圖。

圖 4.3.11 為 20 kHz 20 % 沉積 FePd 薄膜經不同退後退火之 TEM 圖。由圖可知，FePd 薄膜在經 600 °C 退火後其晶粒大小約在 50 nm，隨著溫提升晶粒尺寸有明顯的增加，溫度達到 700 °C 大約 50 – 100 nm。

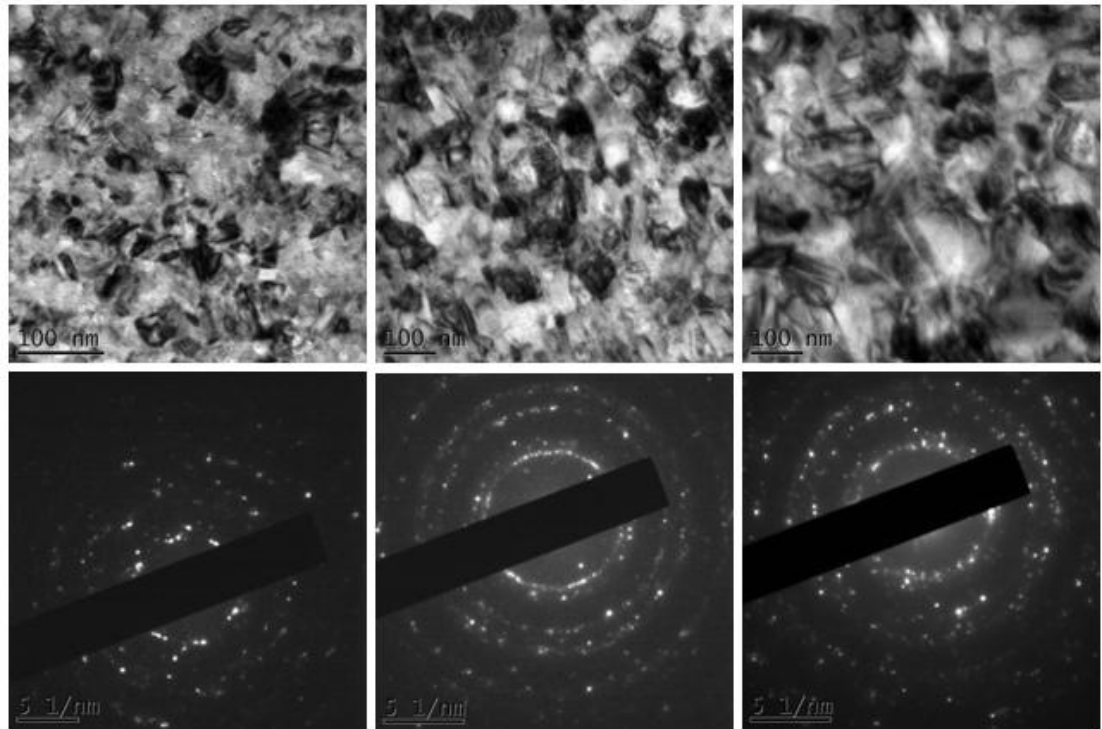


圖 4.3.11 為 20 kHz 20 % 之 FePd 薄膜經不同後退火溫度 TEM 圖。

圖 4.3.12 為 20 kHz 20 % 沉積 FePd 薄膜經不同退後退火之 MFM 圖。由圖可知，隨著退火溫度提升，磁區隨之增大。

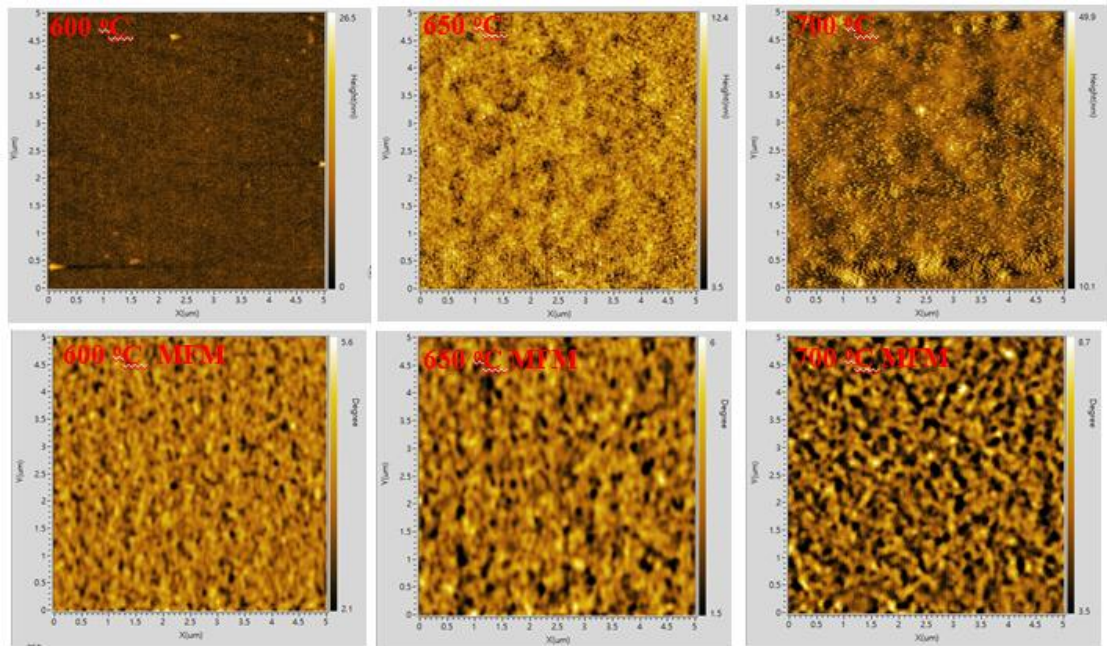


圖 4.3.12 為 20 kHz 20 % 之 FePd 薄膜經不同後退火溫度 MFM 圖。

圖 4.3.13 為 20 kHz 50 % 鍍製  $\text{Fe}_{50}\text{Pd}_{50}$  薄膜經不同後退火溫度之 XRD 圖。在初鍍態時，FePd 薄膜僅出現(111)繞射峰，當退火溫度高於  $700\text{ }^{\circ}\text{C}$  時，才出現(200)繞射峰。

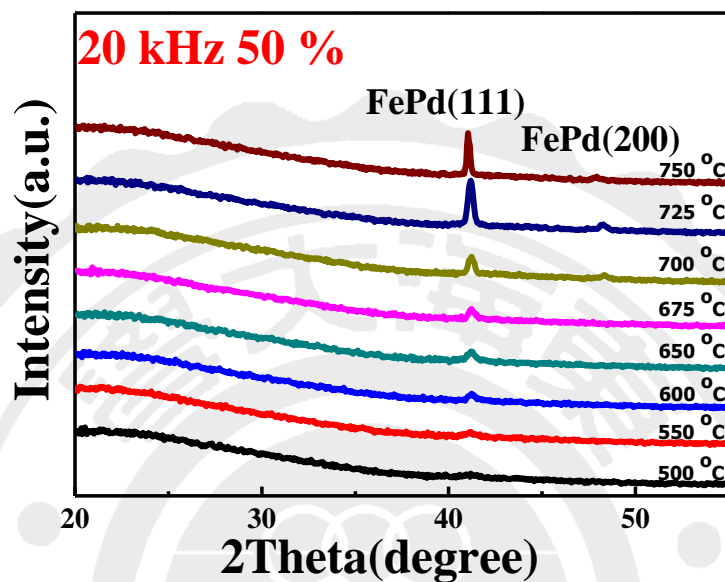


圖 4.3.13 為 20 kHz 50 % FePd 薄膜經不同退火溫度後退火之 XRD 圖。

圖 4.3.14 為 20 kHz 50 % 鍍製  $\text{Fe}_{50}\text{Pd}_{50}$  薄膜於玻璃基板經不同溫度後退火之磁滯曲線圖。由圖可知其水平矯頑磁力隨退火溫度上升而提高，最高值出現在退火溫度  $600\text{ }^{\circ}\text{C}$  為  $1.8\text{ kOe}$ ，在退火  $650\text{ }^{\circ}\text{C}$  時矯頑磁力逐漸下降可能與 fcc 相出現有關。

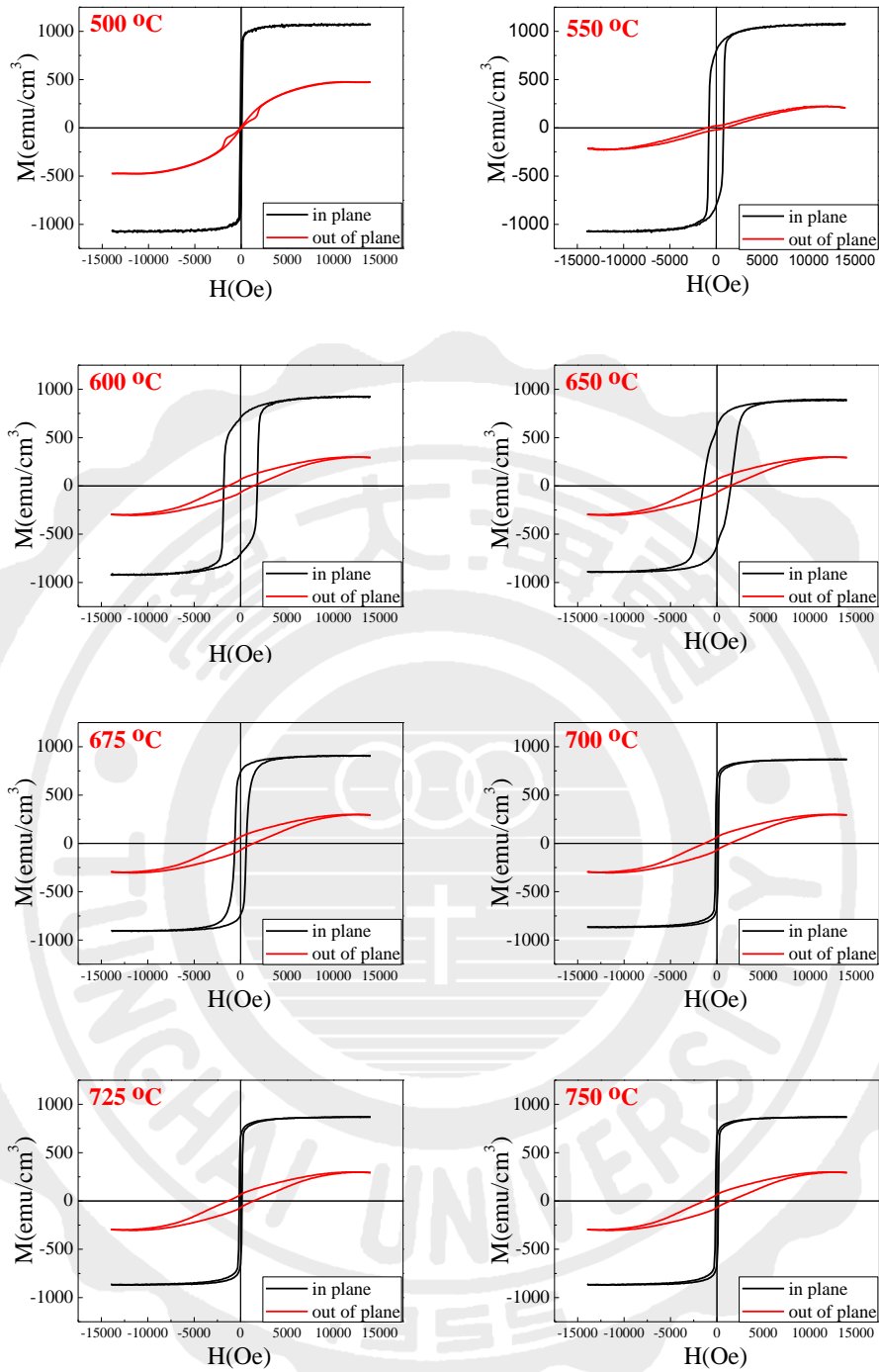


圖 4.3.14 為 20 kHz 50 % 之 FePd 薄膜經不同後退火溫度磁滯曲線圖。

根據 4.3.14 作分析彙整其磁性圖於表 4.3.4。圖 4.3.15 為 20 kHz 50 % FePd 薄膜之飽和磁化量和殘餘磁化量。從圖中可以觀察到，隨著溫度提高，飽和磁化量和殘餘磁化量隨之慢慢下降。圖 4.3.16 為矯頑磁力隨後退火溫度變化圖。由圖可知，矯頑磁力隨著退火溫度提升，當退火溫度在 600 °C 時為最高值，溫度高於 650 °C 矯頑力有明顯的下降，圖 4.3.17 為磁能積隨後退火溫度變化圖。當溫度在 600 °C 時出現最大值為 7.0 MGOe，而相對的在矯頑磁力較低的薄膜出現很小的磁能積。

表 4.3.2 為 20 kHz 50 % FePd 薄膜經不同溫度後退火之飽和磁化量、殘餘磁化量、矯頑磁力及磁能積一覽表

20 kHz , 50 %	$M_s$ (emu/cm <sup>3</sup> )	$M_r$ (emu/cm <sup>3</sup> )	$H_c$ (Oe)	$(BH)_{max}$ (MGOe)
500 °C	984	859	78	0.1
550 °C	953	790	750	4
600 °C	920	745	1800	7
650 °C	908	742	1500	3.8
675 °C	883	701	700	3.3
700 °C	864	668	147	0.3
725 °C	855	653	140	0.3
750 °C	821	644	120	0.1

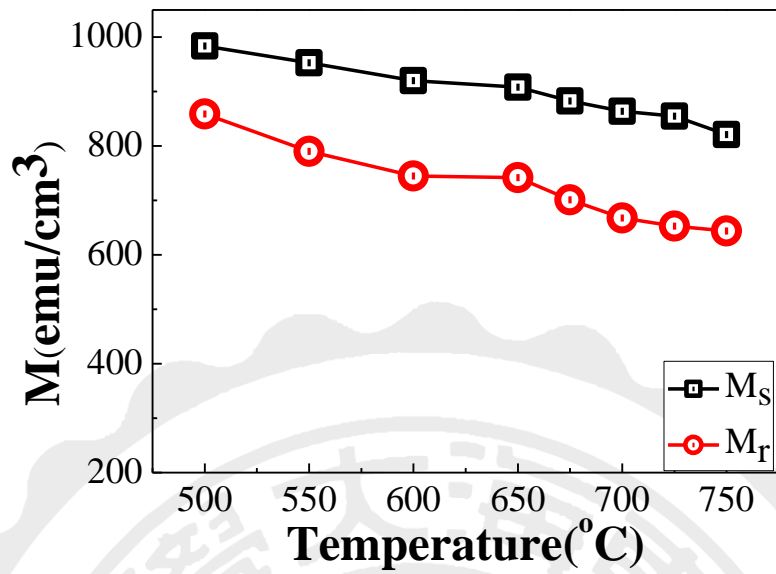


圖 4.3.15 為 20 kHz 50 之 FePd 薄膜飽和磁化量及殘餘磁化量隨後退火溫度變化圖。

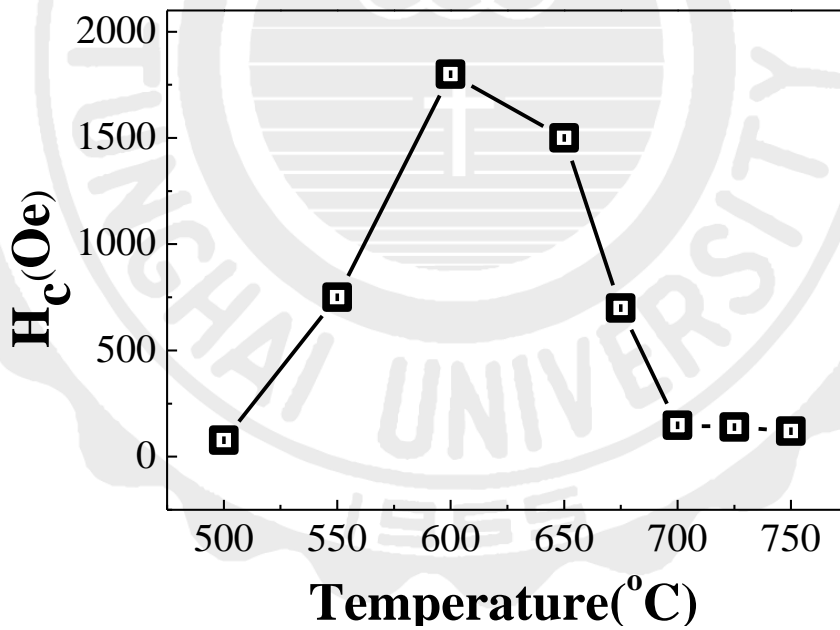


圖 4.3.16 為 20 kHz 50 % 之 FePd 薄膜水平矯頑磁力隨後退火溫度變化圖。



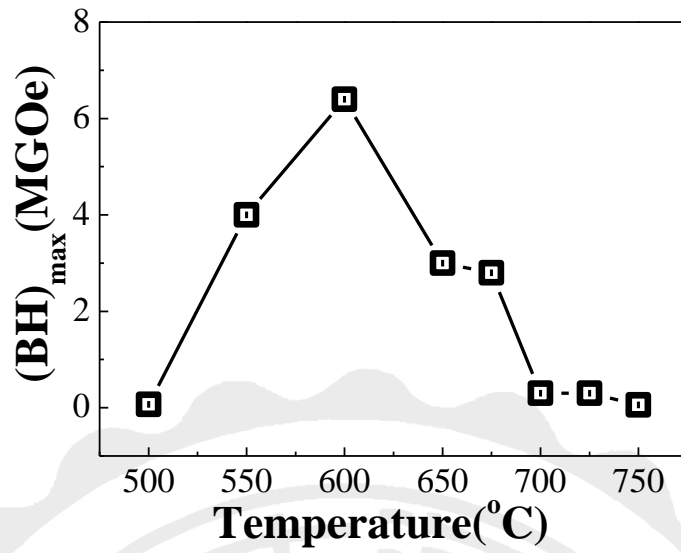


圖 4.3.17 為 20 kHz 50 % 之 FePd 薄膜磁能積隨後退火溫度變化圖。

圖 4.3.18 為 20 kHz 80 % 鍍製  $\text{Fe}_{50}\text{Pd}_{50}$  薄膜經不同後退火溫度之 XRD 圖。在初鍍態時，FePd 薄膜僅出現(111)繞射峰，隨著退火溫度升高，(111)繞射峰明顯的增強趨勢，當退火溫度高於  $700^\circ\text{C}$ ，出現(200)繞射峰。此外觀察(111)繞射峰發現，隨著退火溫度從  $500^\circ\text{C}$  上升至  $750^\circ\text{C}$ ，繞射峰角度有偏移現象，此指出 FePd 薄膜由 fcc 結構漸轉變為 fct 結構時，c 軸產生壓縮所導致。

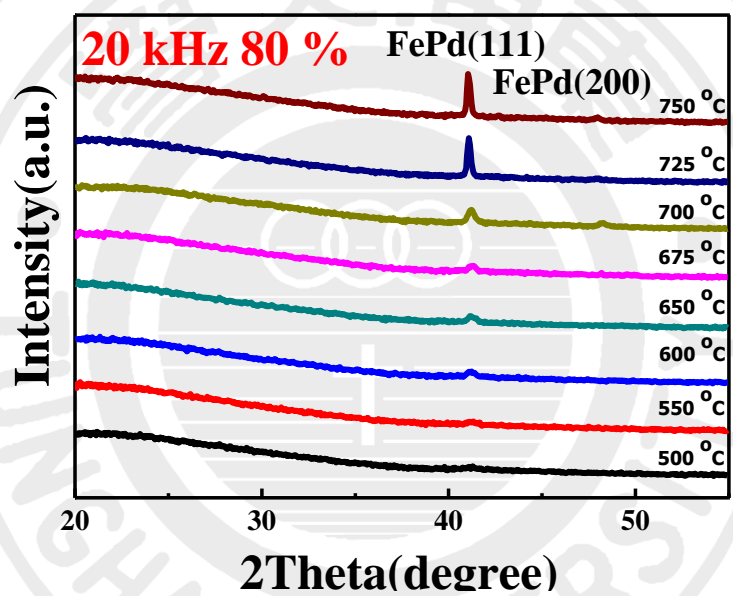


圖 4.3.18 為 20 kHz 80 % FePd 薄膜經不同退火溫度後退火之 XRD 圖。

圖 4.3.19 為 20 kHz 80 % 鍍製  $\text{Fe}_{50}\text{Pd}_{50}$  薄膜於玻璃基板經不同溫度後退火之磁滯曲線圖。由圖可知其水平矯頑磁力隨退火溫度上升而提高，最高值出現在退火溫度  $600^\circ\text{C}$  時矯頑磁力為 1.9 kOe，在退火  $650^\circ\text{C}$  時矯頑磁力下降到 1.1 kOe， $700^\circ\text{C}$  時呈現出很低水平矯頑力。此結果指出了後退火溫度對其矯頑力之增加有所幫助。

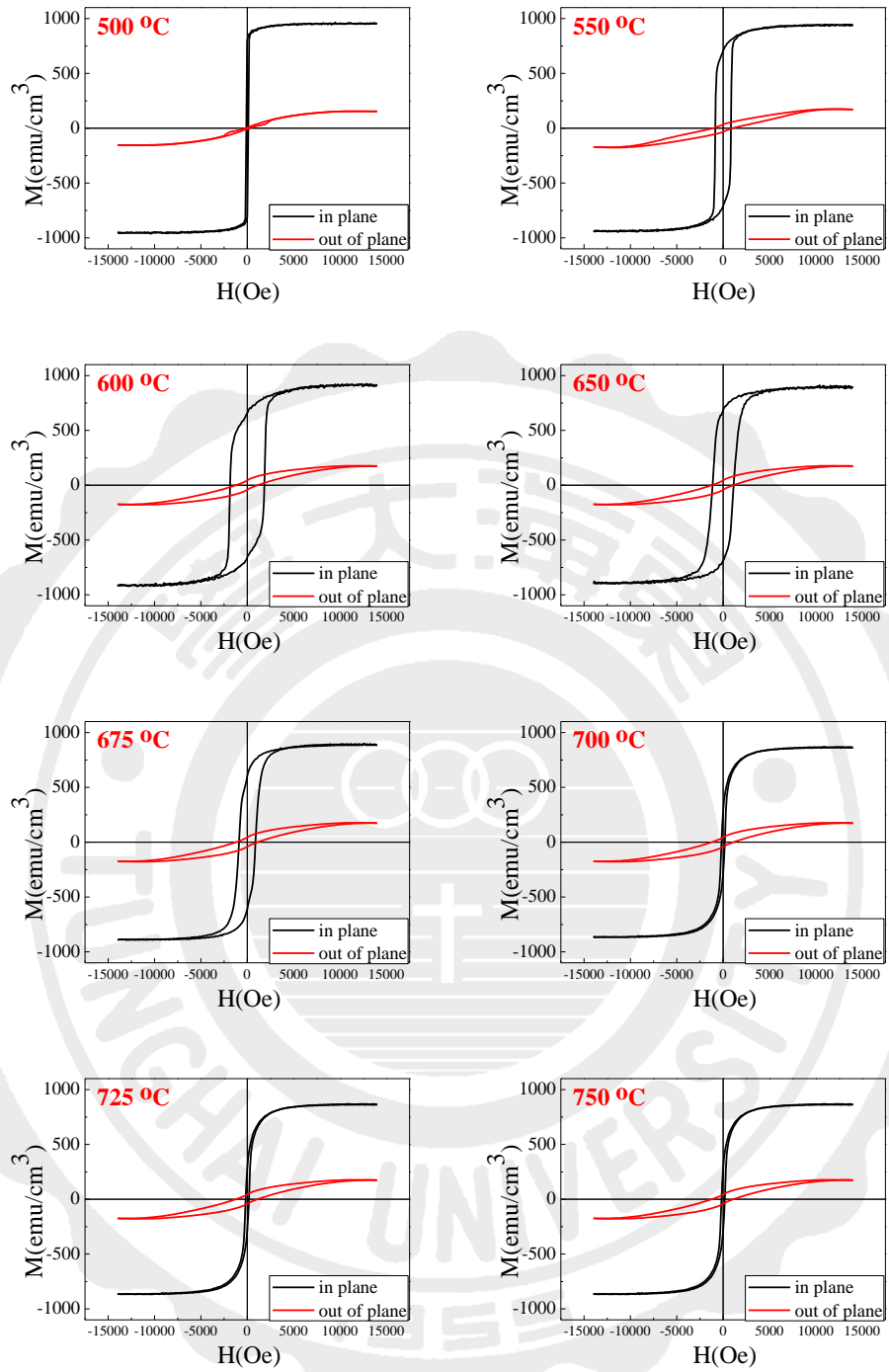


圖 4.3.19 為 20 kHz 80 % 之  $\text{FePd}$  薄膜經不同後退火溫度磁滯曲線圖。

根據 4.3.19 作分析彙整其磁性圖於表 4.3.5。圖 4.3.20 為 20 kHz 80 % FePd 薄膜之飽和磁化量和殘餘磁化量。從圖中可以觀察到，隨著溫度提高，飽和磁化量和殘餘磁化量隨之慢慢下降。圖 4.3.21 為矯頑磁力隨後退火溫度變化圖。隨著退火溫度提升，當退火溫度在 600 °C 時為 1.9 kOe，溫度高於 650 °C 出現很低水平矯頑力，圖 4.3.22 為磁能積隨後退火溫度變化圖。從圖可以觀察到磁能積隨著退火溫度升高而下降，雖然殘餘磁化量經過相轉變逐漸轉為硬磁相，但整體來看本系統中皆由矯頑磁力主導。

表 4.3.5 為 20 kHz 80 % FePd 薄膜經不同溫度後退火之飽和磁化量、殘餘磁化量、矯頑磁力及磁能積一覽表

20 kHz, 80 %	$M_s$ (emu/cm <sup>3</sup> )	$M_r$ (emu/cm <sup>3</sup> )	$H_c$ (Oe)	$(BH)_{max}$ (MGOe)
500 °C	965	830	128	0.7
550 °C	934	709	850	4
600 °C	913	685	1900	6.0
650 °C	893	680	1100	4
675 °C	884	611	900	2.5
700 °C	867	370	174	0.5
725 °C	855	360	160	0.3
750 °C	831	350	150	0.1



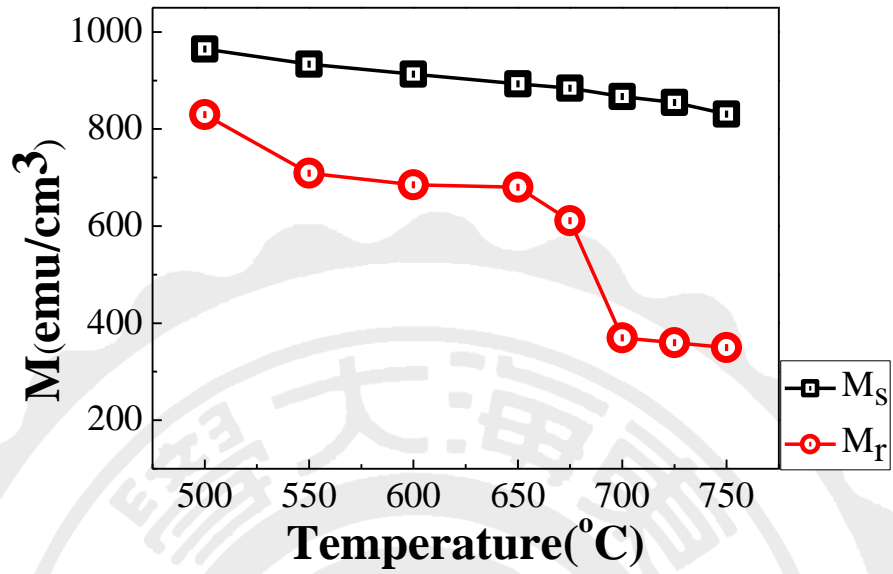


圖 4.3.20 為 20 kHz 80 % 之 FePd 薄膜飽和磁化量及殘餘磁化量隨後退火溫度變化圖。

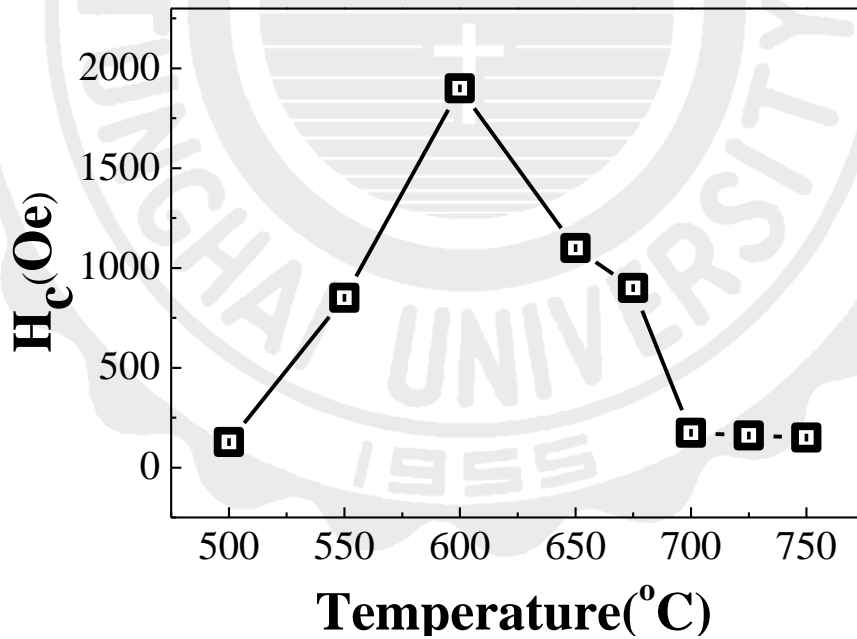


圖 4.3.21 為 20 kHz 80 % 之 FePd 薄膜水平矯頑磁力隨後退火溫度變化圖。

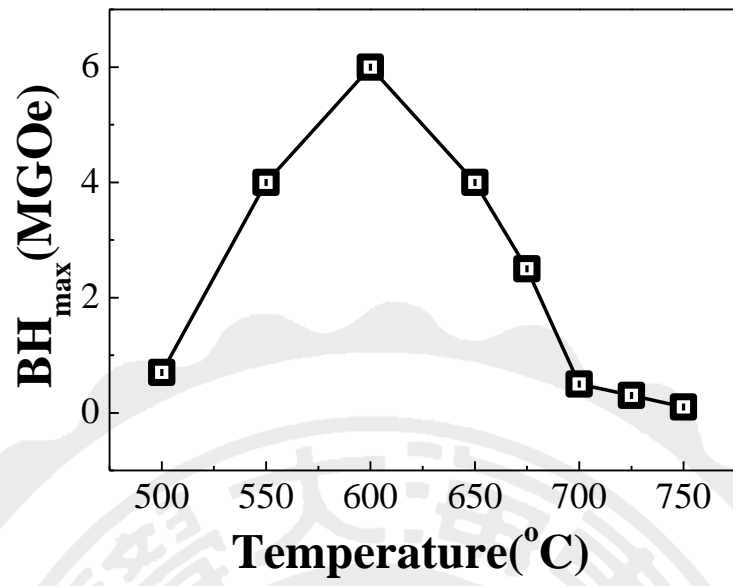
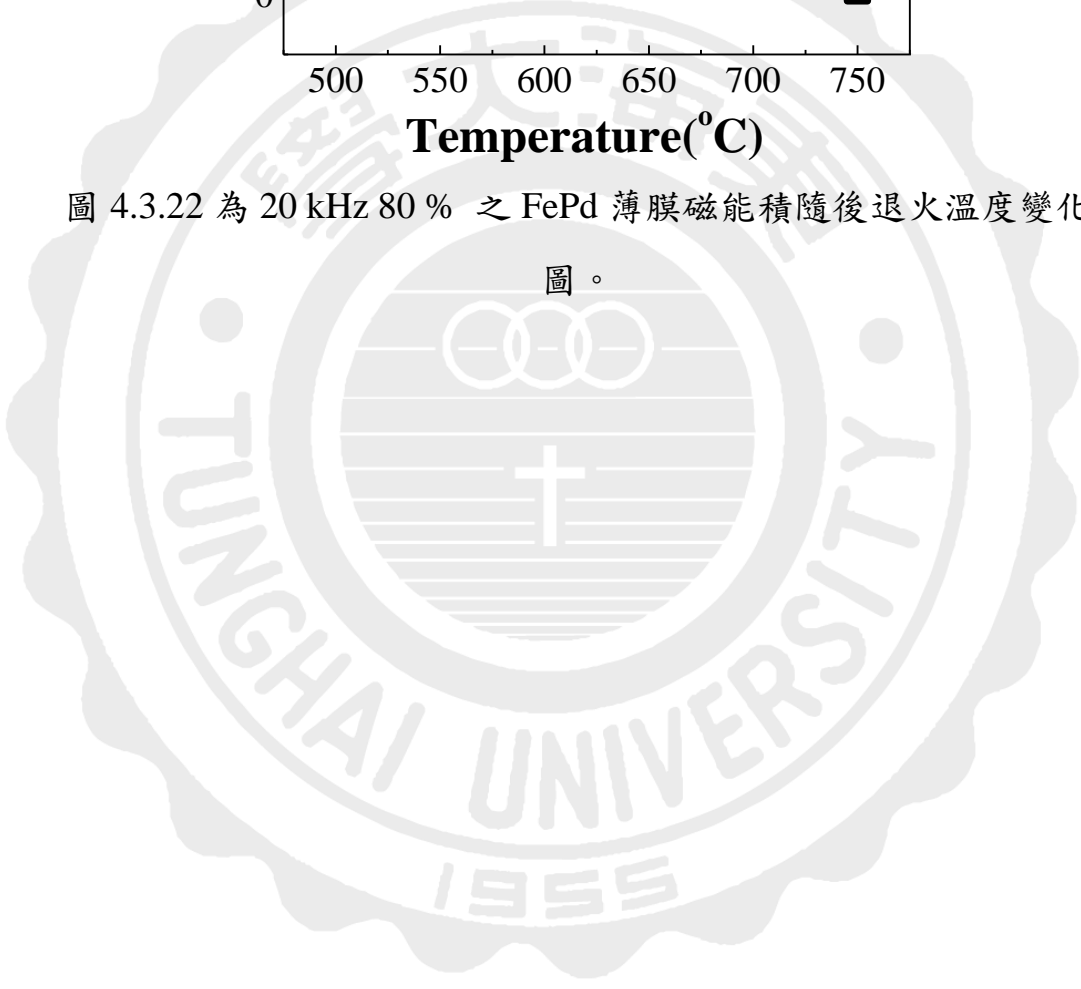


圖 4.3.22 為 20 kHz 80 % 之 FePd 薄膜磁能積隨後退火溫度變化圖。



### 4-3-2 固定脈衝頻率 35 kHz 並改變脈衝持續時間(10 – 80%)

圖 4.3.23 用 35 kHz 10 % 沉積 FePd 薄膜經不同退後退火之 XRD 圖。在退火溫度在 500 °C 以上時出現(111)繞射峰，隨著退火溫度升高，(111)繞射峰明顯的增強趨勢，當退火溫度高於 650 °C，出現很小的(200)繞射峰。

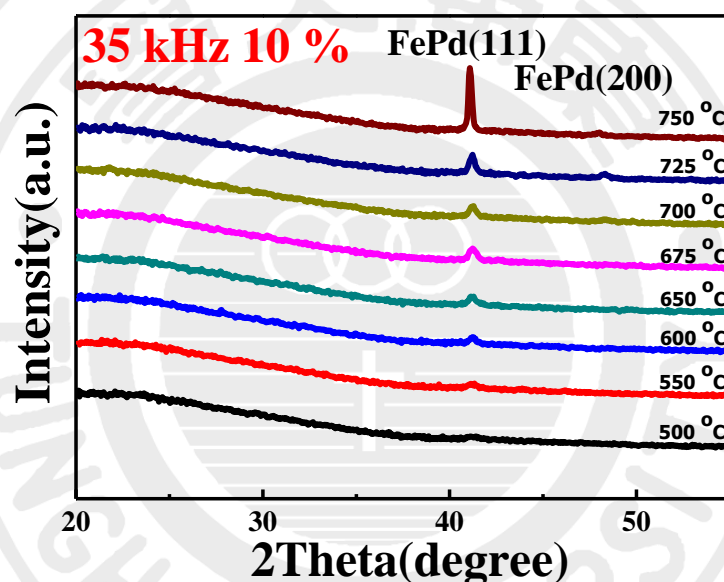


圖 4.3.23 為 35 kHz 10 % FePd 薄膜經不同退火溫度後退火之 XRD 圖。

圖 4.3.24 為 35 kHz 10 % 鍍製 Fe<sub>50</sub>Pd<sub>50</sub> 薄膜於玻璃基板經不同溫度後退火之磁滯曲線圖。由圖可知其矯頑磁力隨退火溫度上升而提高，最高值出現在退火溫度 650 °C 為 2.5 kOe，當 700 °C 時呈現很低水平矯頑磁力。



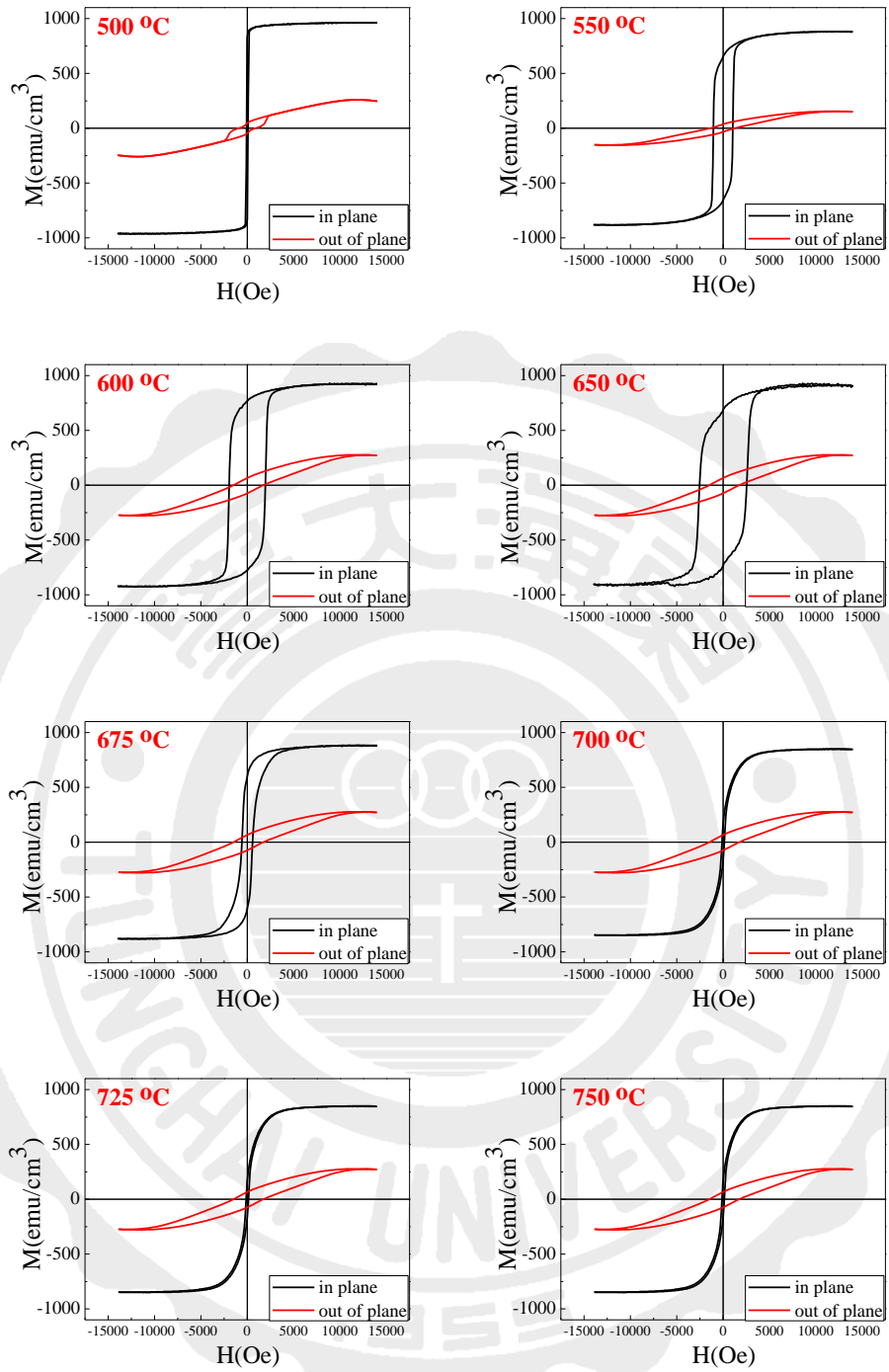


圖 4.3.24 為 35 kHz 10 % 之 FePd 薄膜經不同後退火溫度磁滯曲線圖。

根據 4.3.24 作分析彙整其磁性圖於表 4.3.6。圖 4.3.25 為 35 kHz 10 % FePd 薄膜之飽和磁化量和殘餘磁化量。從圖中可以觀察到，隨著溫度提高，飽和磁化量和殘餘磁化量隨之慢慢下降。圖 4.3.26 為矯頑磁力隨後退火溫度變化圖。可以看到隨著退火溫度 650 °C 矯頑力有明顯的提升，有先升後降的趨勢，圖 4.3.27 為磁能積隨後退火溫度變化圖。在退火溫度為 650 °C 時呈現出最高矯頑磁力 2.5 kOe 和磁能積 8.6 MGOe，而退火溫度在 700 °C 時矯頑磁力大幅的下降，而也呈現出很小的磁能積。

表 4.3.6 為 35 kHz 10 % FePd 薄膜經不同溫度後退火之飽和磁化量、殘餘磁化量、矯頑磁力及磁能積一覽表

35 kHz , 10%	$M_s$ (emu/cm <sup>3</sup> )	$M_r$ (emu/cm <sup>3</sup> )	$H_c$ (Oe)	$(BH)_{max}$ (MGOe)
500 °C	963	839	80	0.4
550 °C	946	770	1030	4.7
600 °C	927	769	2000	8.6
650 °C	902	684	2500	7.5
675 °C	862	612	600	1.7
700 °C	854	200	150	0.3
725 °C	839	180	130	0.2
750 °C	822	170	110	0.1

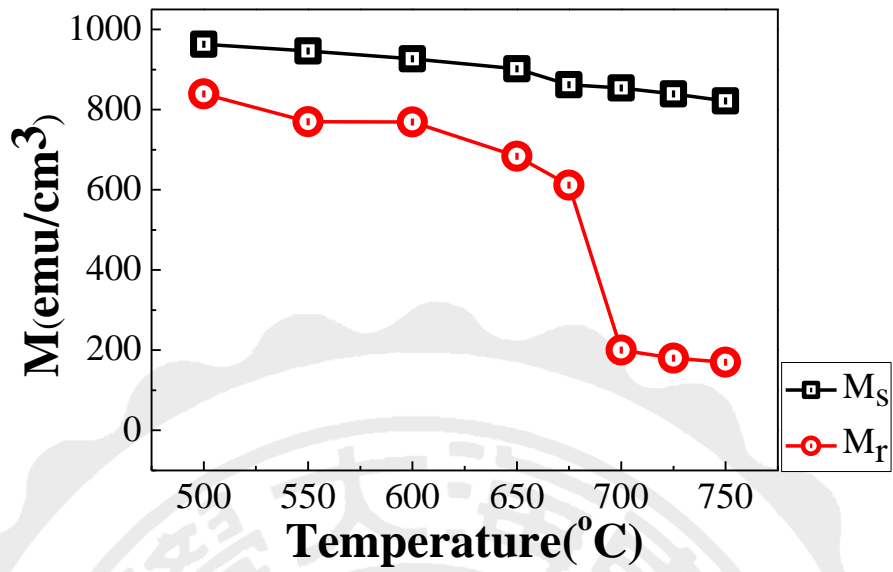


圖 4.3.25 為 35 kHz 10 之 FePd 薄膜飽和磁化量及殘餘磁化量隨後退火溫度變化圖。

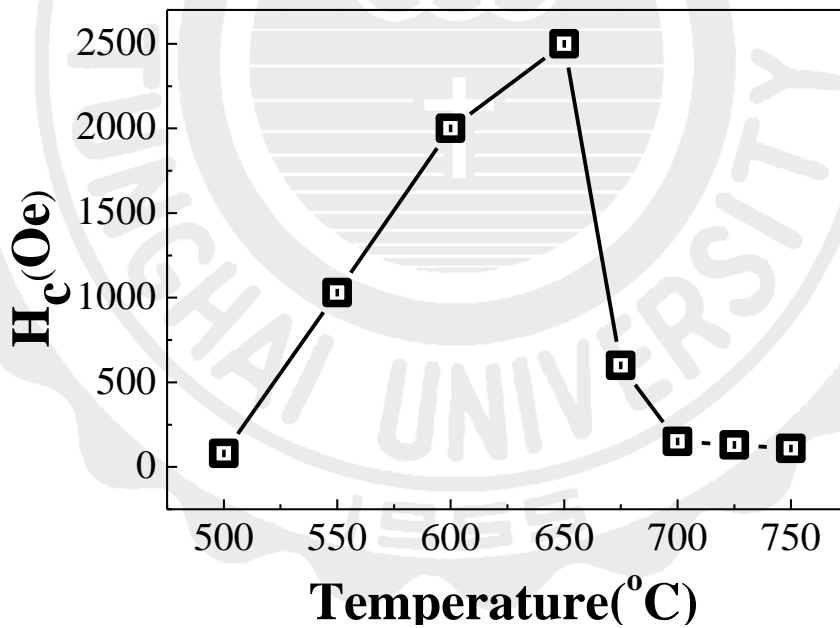


圖 4.3.26 為 35 kHz 10 % 之 FePd 薄膜水平矯頑磁力隨後退火溫度變化圖。

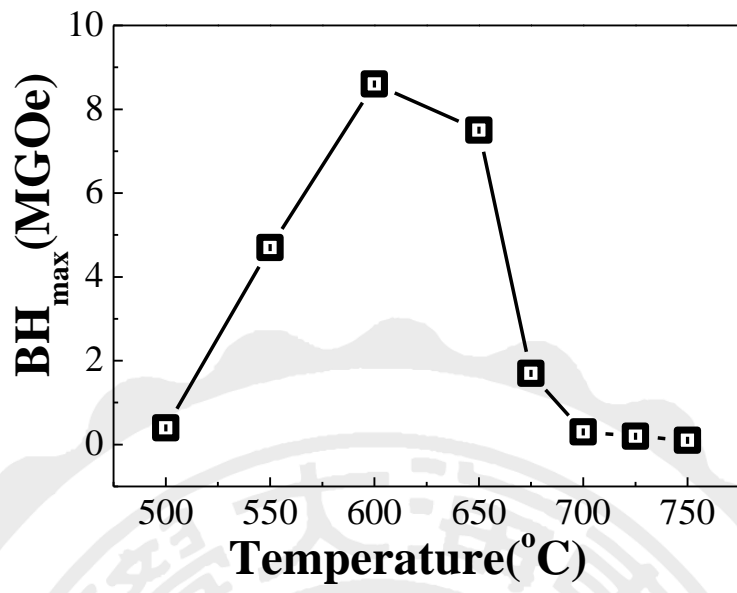


圖 4.3.27 為 35 kHz 10 % 之 FePd 薄膜磁能積隨後退火溫度變化圖。

圖 4.3.28 為 35 kHz 20 % 鍍製  $\text{Fe}_{50}\text{Pd}_{50}$  薄膜經不同後退火溫度之 XRD 圖。在初鍍態時，FePd 薄膜僅出現(111)繞射峰，隨著溫度提升(111)逐漸增強，當溫度上升至 700 °C 時，出現(001)超晶格峰及(002)基本峰，並且(111)繞射峰有往高角度片偏移的趨勢，退火溫度上升至 750 °C 時，(001)及(002)繞射峰有些為增強。

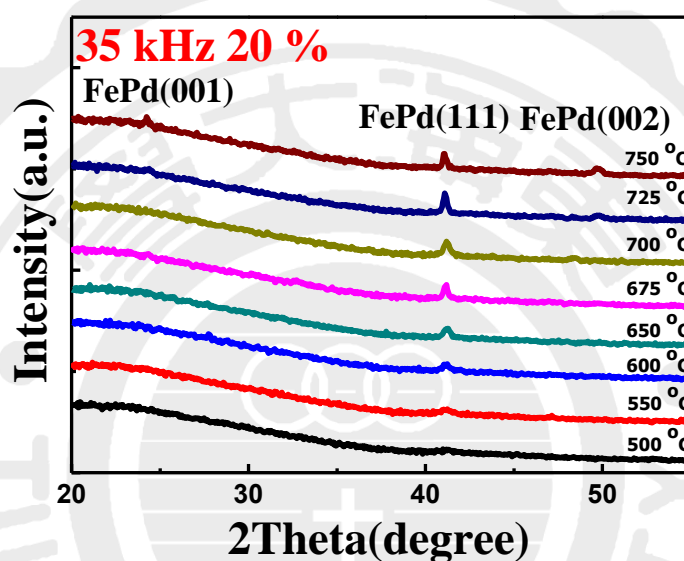


圖 4.3.28 為 35 kHz 20 % FePd 薄膜經不同退火溫度後退火之 XRD 圖。

圖 4.3.29 為 35 kHz 20 % 鍍製  $\text{Fe}_{50}\text{Pd}_{50}$  薄膜於玻璃基板經不同溫度後退火之磁滯曲線圖。由圖可知其水平矯頑磁力隨退火溫度上升而提高，最高值出現在退火溫度 650 °C 矯頑磁力為 2.7 kOe，當 700 °C 時呈現出很低水平矯頑磁力。

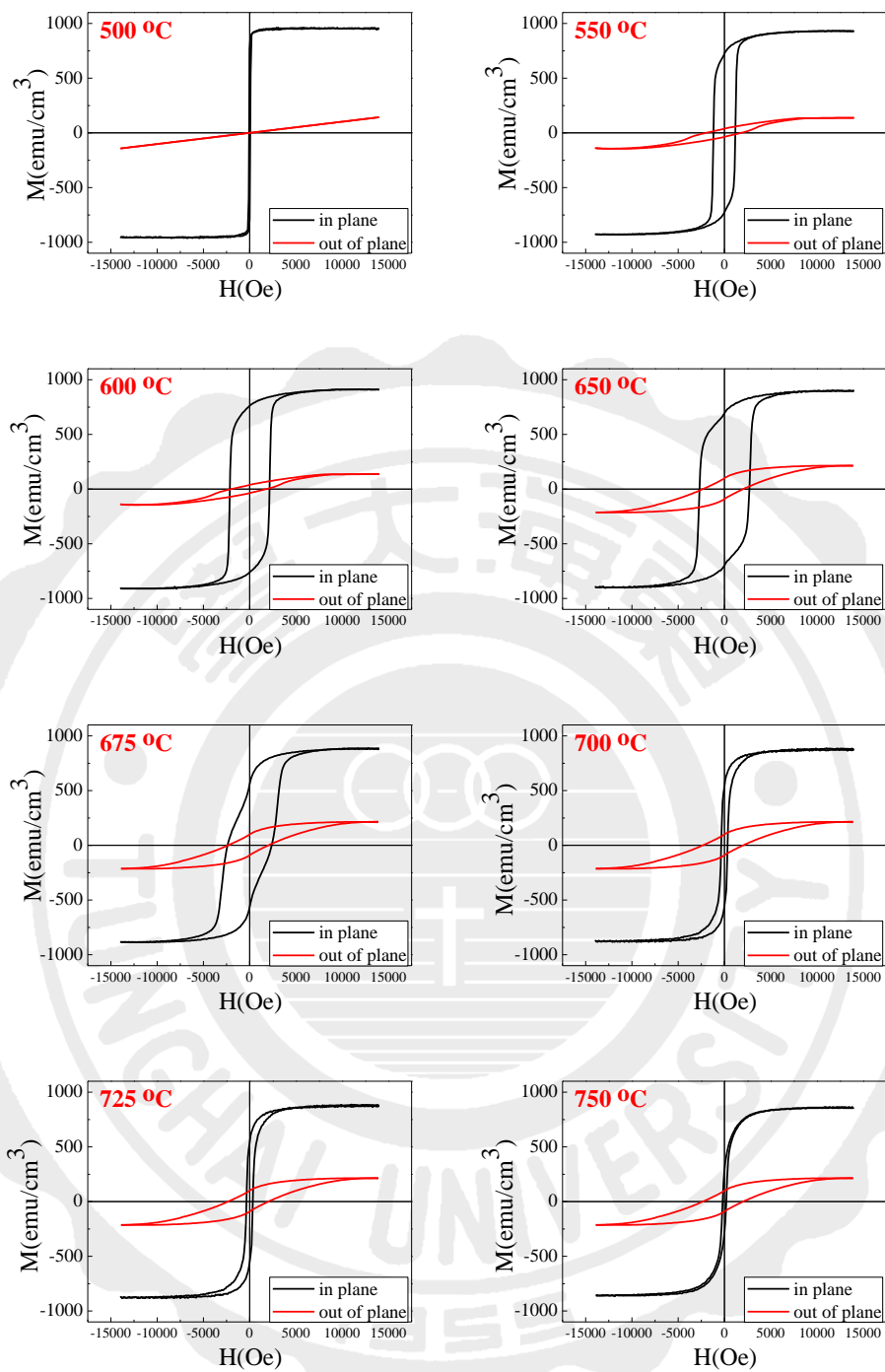


圖 4.3.29 為 35 kHz 20 % 之 FePd 薄膜經不同後退火溫度磁滯曲線圖。

根據 4.3.29 作分析彙整其磁性圖於表 4.3.7。圖 4.3.30 為 35 kHz 20% FePd 薄膜之飽和磁化量和殘餘磁化量。從圖中可以觀察到，隨著溫度提高，飽和磁化量和殘餘磁化量隨之慢慢下降。而圖 4.3.31 為矯頑磁力隨後退火溫度變化圖。隨著退火溫度提升矯頑力有明顯的提升，當退火溫度為 650 °C 時其矯頑力有 2.7 kOe，溫度提升至 750 °C 矯頑力僅剩 200 Oe，而圖 4.3.32 為磁能積隨後退火溫度變化圖。從上述可以觀察到不同退火溫度磁能積皆有所改變。

表 4.3.7 為 35 kHz 20 % FePd 薄膜經不同溫度後退火之飽和磁化量、殘餘磁化量、矯頑磁力及磁能積一覽表

35 kHz , 20 %	$M_s$ (emu/cm <sup>3</sup> )	$M_r$ (emu/cm <sup>3</sup> )	$H_c$ (Oe)	(BH) <sub>max</sub> (MGOe)
500 °C	955	779	60	0.1
550 °C	928	768	1200	5.4
600 °C	909	762	2200	9.1
650 °C	893	693	2700	8.3
675 °C	881	564	2300	2.9
700 °C	872	555	366	1
725 °C	861	545	350	0.5
750 °C	844	300	200	0.1

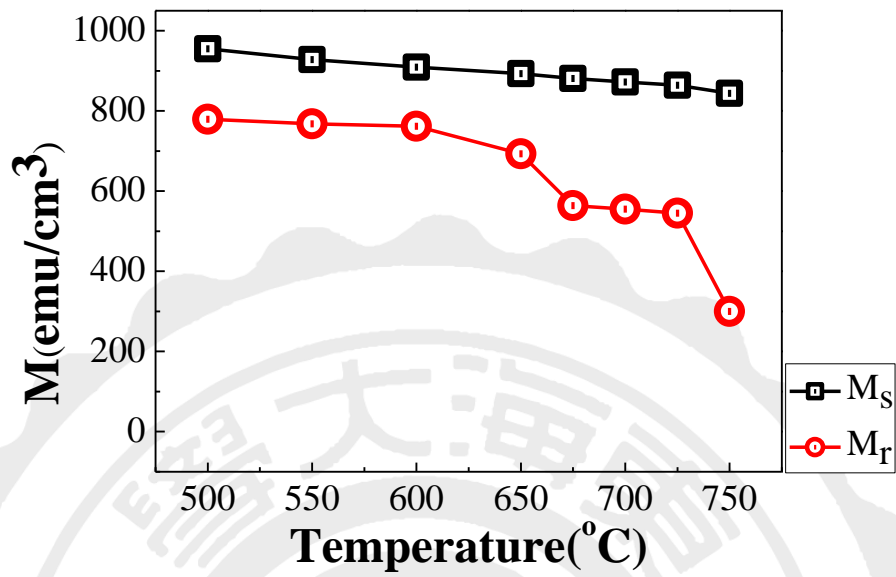


圖 4.3.30 為 35 kHz 20 之 FePd 薄膜飽和磁化量及殘餘磁化量隨後退火溫度變化圖。

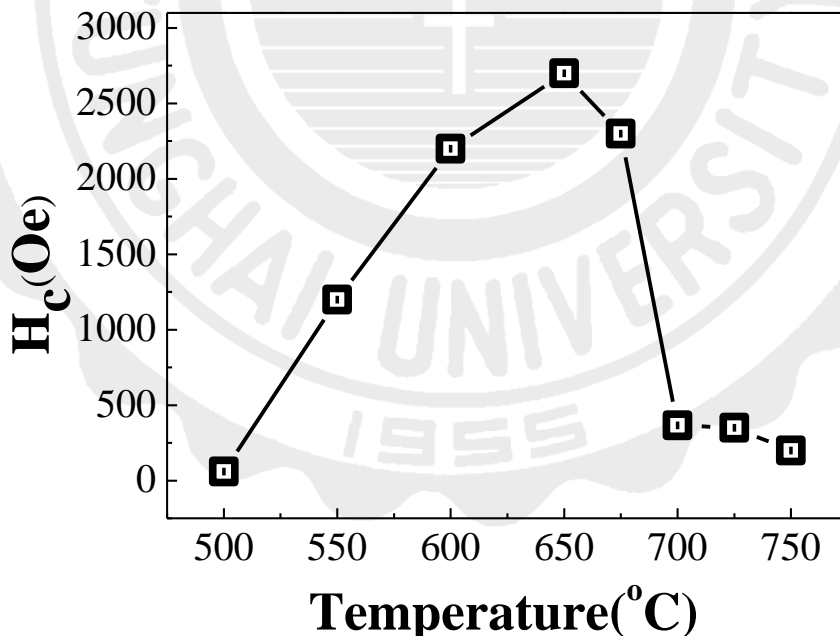


圖 4.3.31 為 35 kHz 20 % 之 FePd 薄膜水平矯頑磁力隨後退火溫度變化圖。



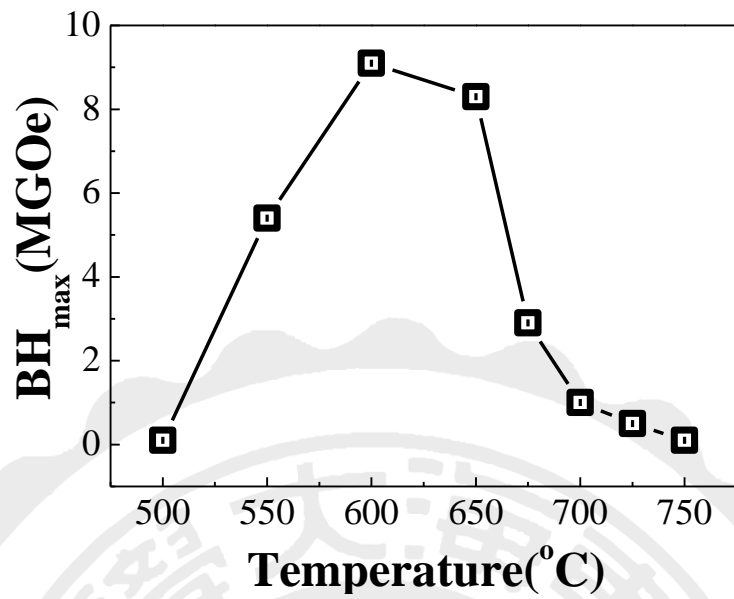


圖 4.3.32 為 35 kHz 20 % 之 FePd 薄膜磁能積隨後退火溫度變化圖。

圖 4.3.33 為 35 kHz 20 % 鍍製 Fe<sub>50</sub>Pd<sub>50</sub> 薄膜經不同後退火溫度之 SEM 圖。由圖可知，晶粒會隨著退火溫度提高而變大。

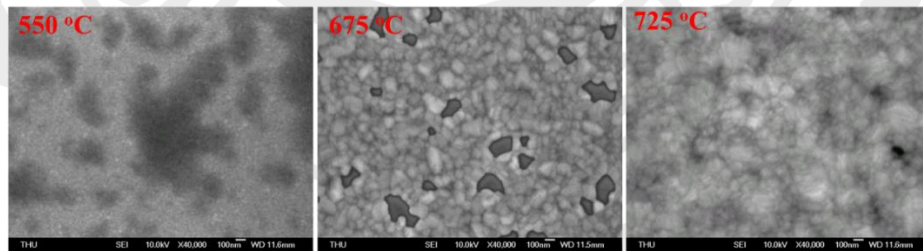


圖 4.3.33 為 35 kHz 20 % 之 FePd 薄膜經不同後退火溫度 SEM 圖。

圖 4.3.34 為 35 kHz 20 % 鍍製  $\text{Fe}_{50}\text{Pd}_{50}$  薄膜經不同後退火溫度之 TEM 圖。由圖可知，FePd 薄膜經退火後其晶粒大小都在 50 - 80 nm 左右。

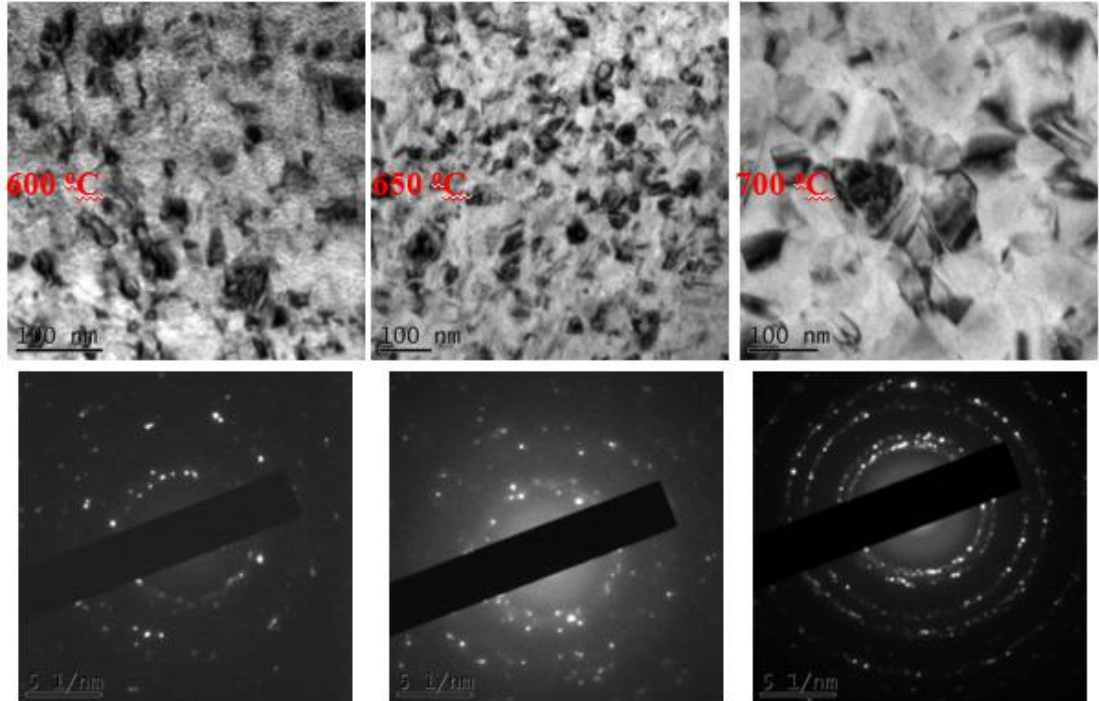


圖 4.3.34 為 35 kHz 20 % 之  $\text{FePd}$  薄膜經不同後退火溫度 TEM 圖。

圖 4.3.35 為 35 kHz 20 % 鍍製  $\text{Fe}_{50}\text{Pd}_{50}$  薄膜經不同後退火溫度之 MFM 圖。隨著退火溫度提升，磁區隨之增大。

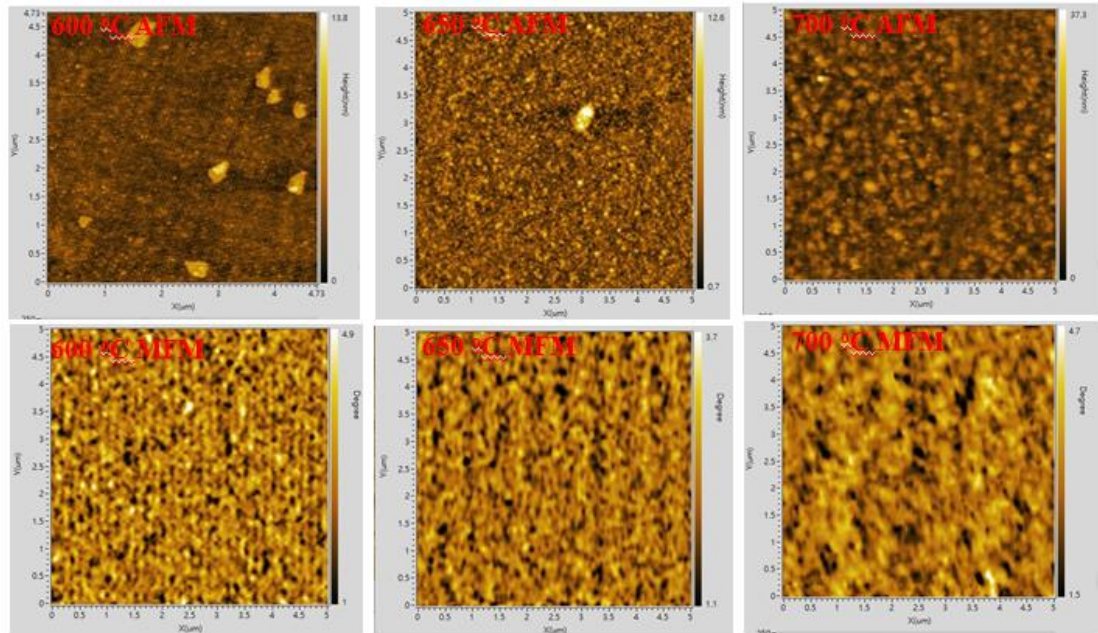


圖 4.3.35 為 35 kHz 20 % 之  $\text{FePd}$  薄膜經不同後退火溫度 MFM 圖。

圖 4.3.36 為 35 kHz 50 % 鍍製  $\text{Fe}_{50}\text{Pd}_{50}$  薄膜經不同後退火溫度之 XRD 圖。在初鍍態時，FePd 薄膜僅出現(111)繞射峰，隨著退火溫度升高，(111)繞射峰強度隨之提升，表示 FePd 結晶性隨之變佳，當退火溫度高於  $700^\circ\text{C}$  時，才出現(200)繞射峰。

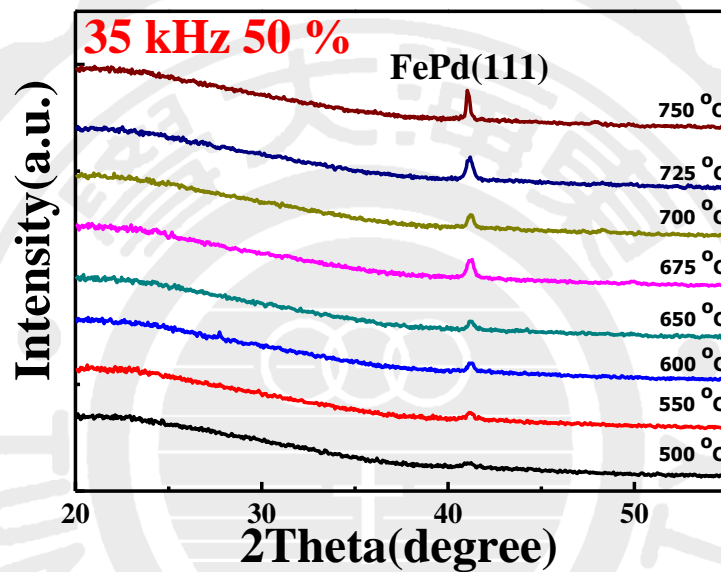


圖 4.3.36 為 35 kHz 50 % FePd 薄膜經不同退火溫度後退火之 XRD 圖。

圖 4.3.37 為 35 kHz 50 % 鍍製  $\text{Fe}_{50}\text{Pd}_{50}$  薄膜於玻璃基板經不同溫度後退火之磁滯曲線圖。由圖可知其水平矯頑磁力隨退火溫度上升而提高，當溫度在  $550^\circ\text{C}$  其開始序化矯頑磁力為 1.2 kOe，並且最好序化的溫度  $600^\circ\text{C}$  矯頑磁力為 1.8 kOe，退火溫度提升至  $700^\circ\text{C}$  時呈現出很低水平矯頑磁力。

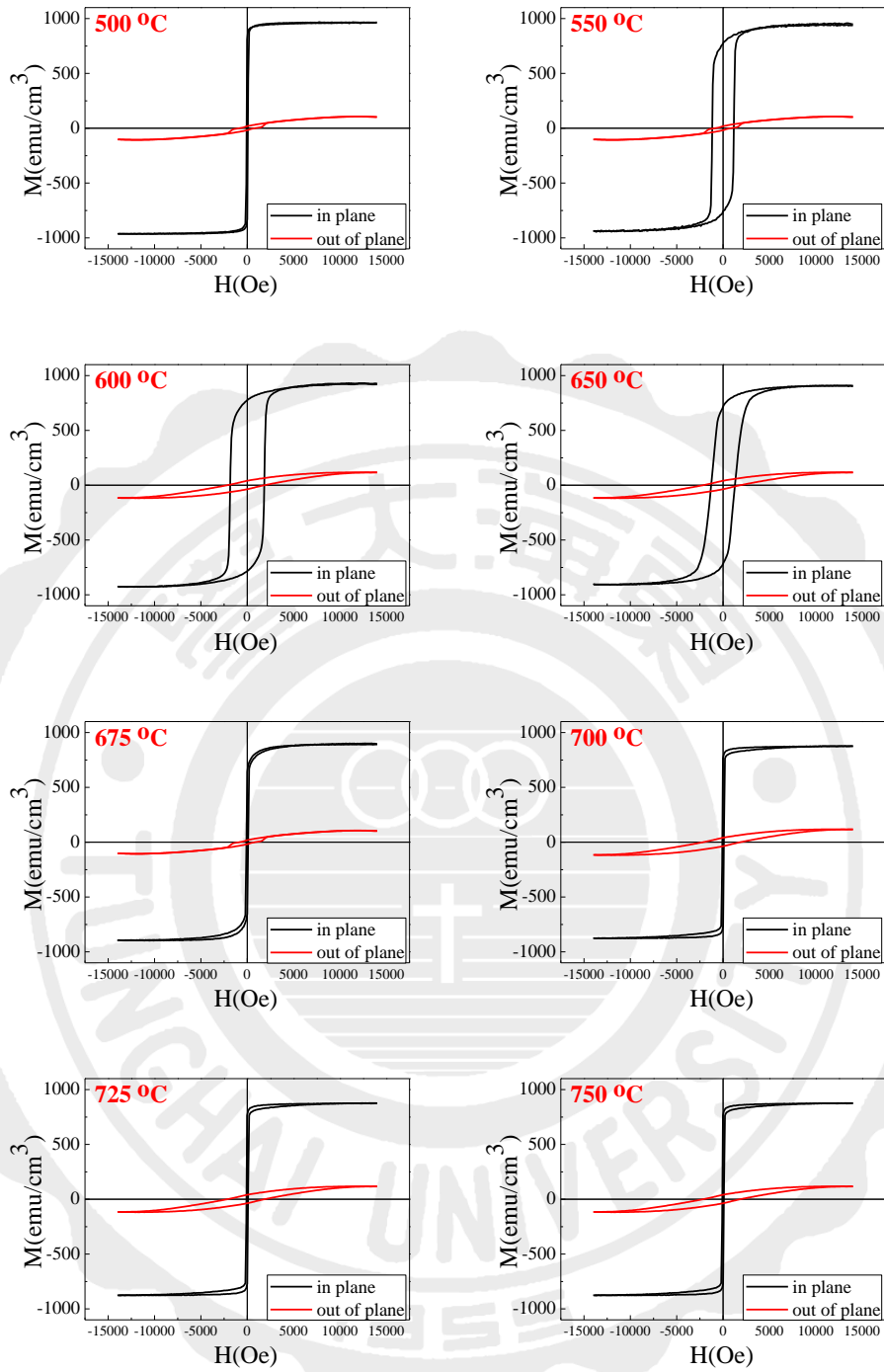


圖 4.3.37 為 35 kHz 50 % 之 FePd 薄膜經不同後退火溫度磁滯曲線圖。

根據 4.3.37 作分析彙整其磁性圖於表 4.3.8。圖 4.3.38 為 35 kHz 50% FePd 薄膜之飽和磁化量和殘餘磁化量。從圖中可以觀察到，隨著溫度提高，飽和磁化量和殘餘磁化量隨之慢慢下降。圖 4.3.39 矯頑磁力隨後退火溫度變化圖。隨著退火溫度提升矯頑力有明顯提升，當退火溫度為 600 °C 時矯頑力為 1.8 kOe。從圖 4.3.40 為磁能積隨後退火溫度變化圖。隨著退火溫度上升，磁能積有上升的趨勢，最高值為 8.6 MGOe。

表 4.3.8 為 35 kHz 50 % FePd 薄膜經不同溫度後退火之飽和磁化量、殘餘磁化量、矯頑磁力及磁能積一覽表

35 kHz, 50 %	$M_s$ (emu/cm <sup>3</sup> )	$M_r$ (emu/cm <sup>3</sup> )	$H_c$ (Oe)	(BH) <sub>max</sub> (MGOe)
500 °C	962	816	73	0.9
550 °C	938	774	1200	6.4
600 °C	920	772	1800	8.6
650 °C	906	718	1300	4.1
675 °C	893	668	400	1.4
700 °C	875	652	88	0.2
725 °C	866	641	85	0.2
750 °C	845	622	80	0.1

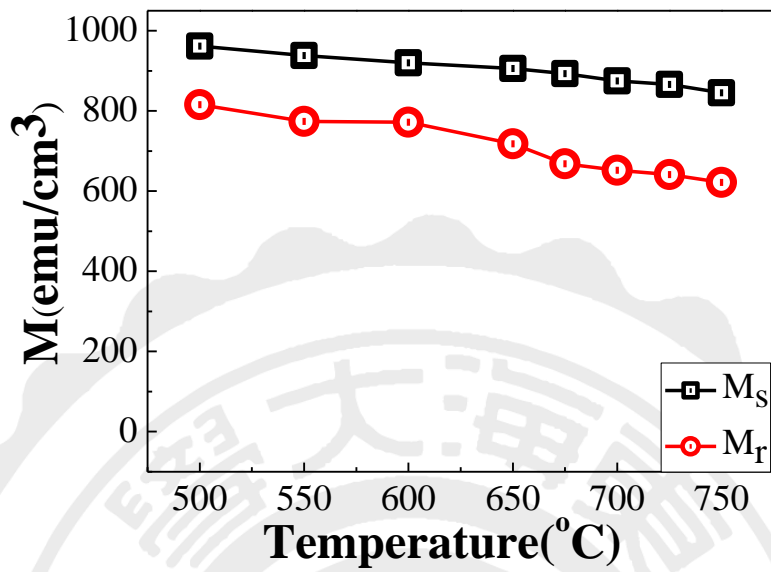


圖 4.3.38 為 35 kHz 50 之 FePd 薄膜飽和磁化量及殘餘磁化量隨後退火溫度變化圖。

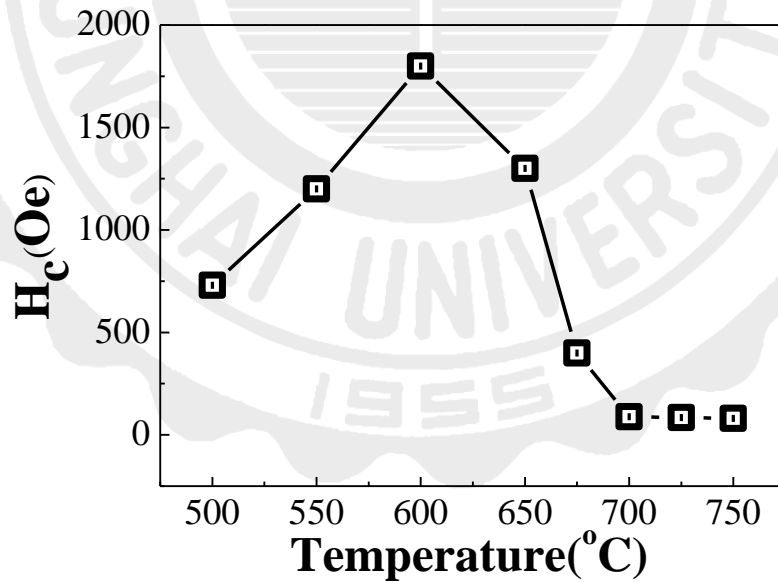


圖 4.3.39 為 35 kHz 50 % 之 FePd 薄膜水平矯頑磁力隨後退火溫度變化圖。

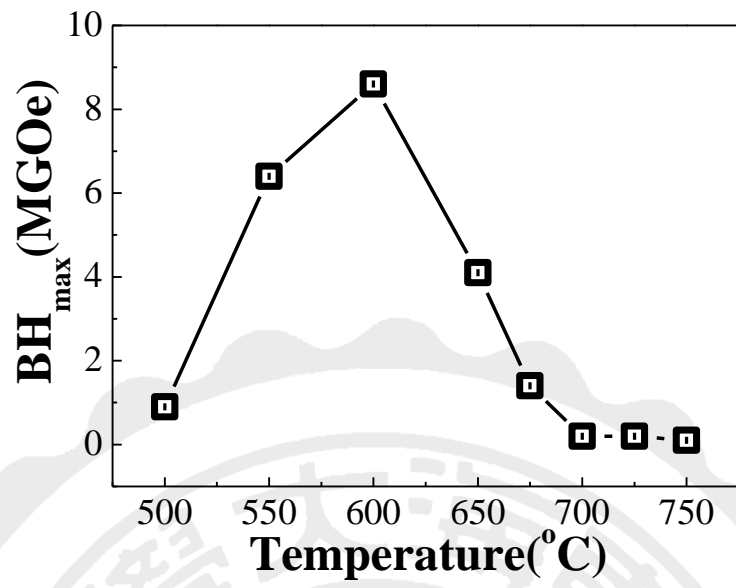


圖 4.3.40 為 35 kHz 50 % 之 FePd 薄膜磁能積隨後退火溫度變化圖。



圖 4.3.41 為 35 kHz 80 % 鍍製  $\text{Fe}_{50}\text{Pd}_{50}$  薄膜經不同後退火溫度之 XRD 圖。在初鍍態時，FePd 薄膜僅出現(111)繞射峰，當退火溫度高於 700 °C 時，才出現(200)繞射峰。隨著退火溫度升高，(111)及(200)繞射峰強度都隨之增強。

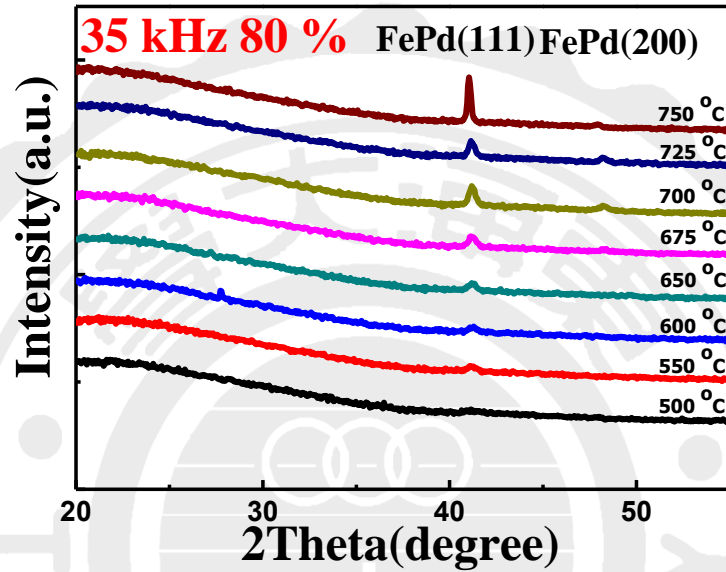


圖 4.3.41 為 35 kHz 80 % FePd 薄膜經不同退火溫度後退火之 XRD 圖。

圖 4.3.42 為 35 kHz 80 % 鍍製  $\text{Fe}_{50}\text{Pd}_{50}$  薄膜於玻璃基板經不同溫度後退火之磁滯曲線圖。隨著退火溫度上升而提高，當退火溫度 600 °C 與 650 °C 呈現出接近一樣的矯頑力為 1.8 kOe，溫度提升至 700 °C 時出現很低的水平矯頑力。

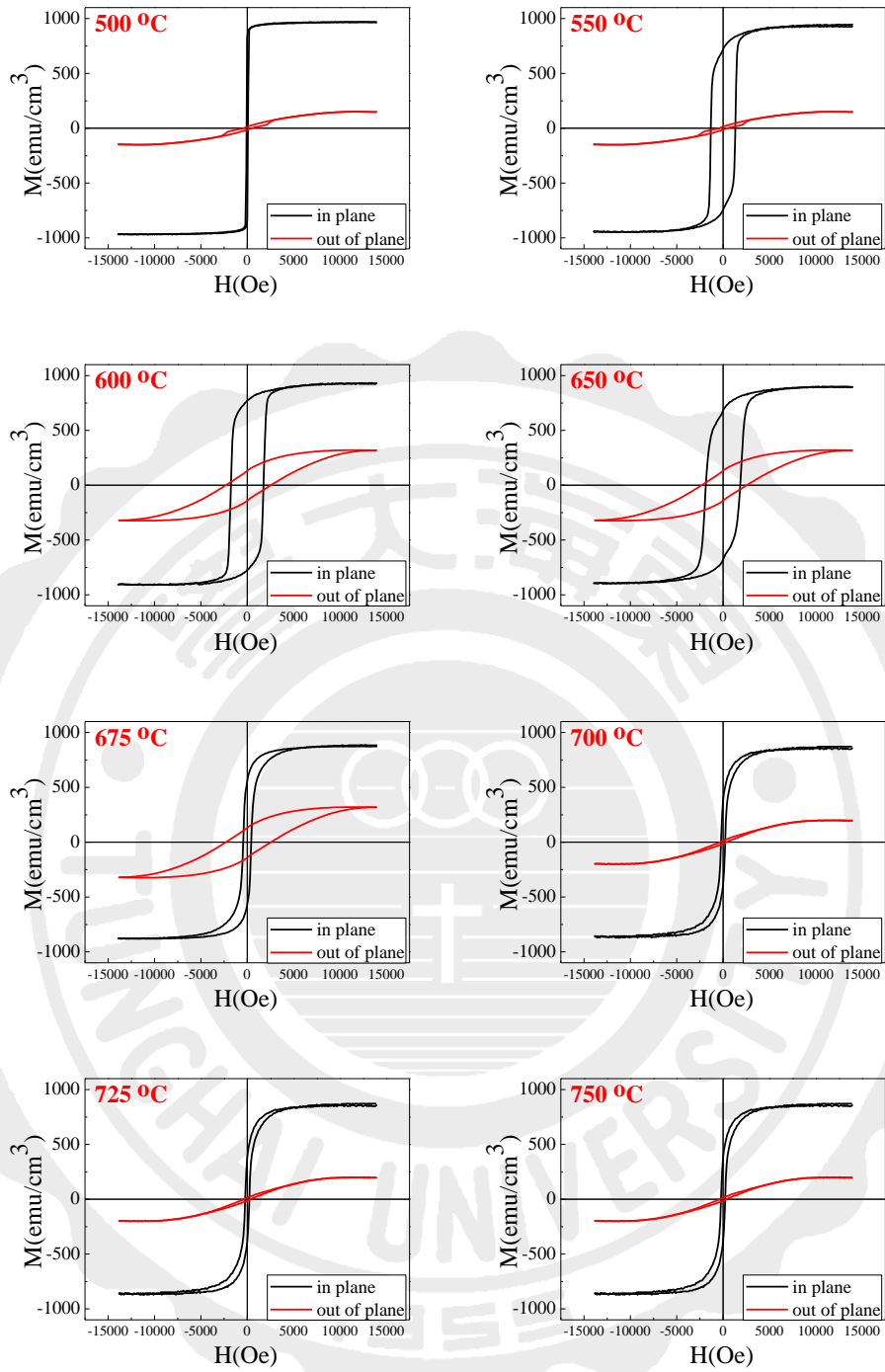


圖 4.3.42 為 35 kHz 80 % 之 FePd 薄膜經不同後退火溫度磁滯曲線圖。

根據 4.3.42 作分析彙整其磁性圖於表 4.3.9。圖 4.3.43 為 35 kHz 80 % FePd 薄膜之飽和磁化量和殘餘磁化量。從圖中可以觀察到，隨著溫度提高，飽和磁化量和殘餘磁化量隨之慢慢下降。圖 4.3.44 為矯頑磁力隨後退火溫度變化圖。隨著退火溫度提升矯頑力有明顯的提升，當退火溫度在 600 °C – 650 °C 有出現穩定的矯頑力為 1.8 kOe，圖 4.3.45 為磁能積隨後退火溫度變化圖。從圖可以觀察磁能積會隨著退火溫度上升而提升，而在 650 °C 時隨著退火溫度下降。

表 4.3.9 為 35 kHz 80 % FePd 薄膜經不同溫度後退火之飽和磁化量、殘餘磁化量、矯頑磁力及磁能積一覽表

35 kHz , 80 %	$M_s$ (emu/cm <sup>3</sup> )	$M_r$ (emu/cm <sup>3</sup> )	$H_c$ (Oe)	$(BH)_{max}$ (MGOe)
500 °C	967	836	73	0.1
550 °C	943	770	1300	5.6
600 °C	927	766	1750	8.2
650 °C	893	687	1800	5.3
675 °C	873	593	400	1.1
700 °C	861	420	203	0.2
725 °C	849	413	200	0.2
750 °C	818	406	180	0.1

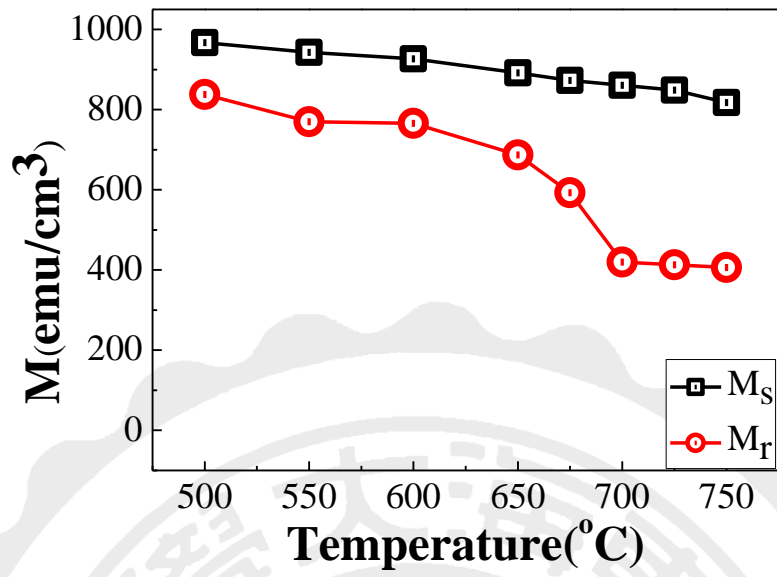


圖 4.3.43 為 35 kHz 80 之 FePd 薄膜飽和磁化量及殘餘磁化量隨後退火溫度變化圖。

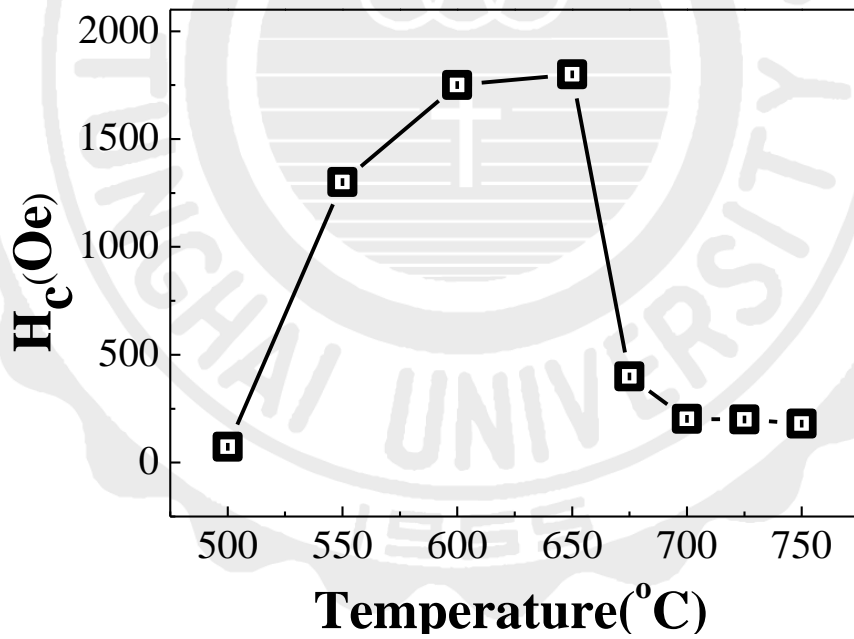


圖 4.3.44 為 35 kHz 80 % 之 FePd 薄膜水平矯頑磁力隨後退火溫度變化圖。

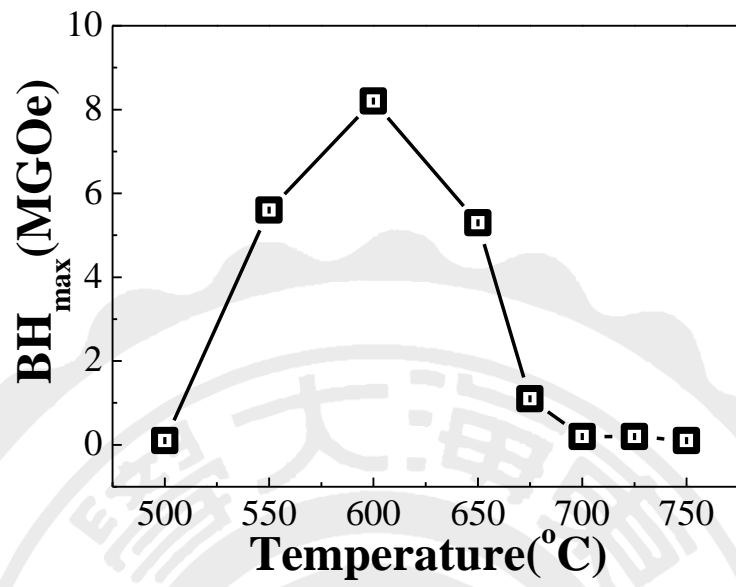


圖 4.3.45 為 35 kHz 80 % 之 FePd 薄膜磁能積隨後退火溫度變化圖。

### 4-3-3 固定脈衝頻率 50 kHz 並改變脈衝持續時間(10 – 80%)

圖 4.3.46 為 50 kHz 10 % 鍍製  $\text{Fe}_{50}\text{Pd}_{50}$  薄膜經不同後退火溫度之 XRD 圖。在初鍍態時，FePd 薄膜僅出現(111)繞射峰，隨著退火溫度升高，(111)繞射峰強度都隨之增強。

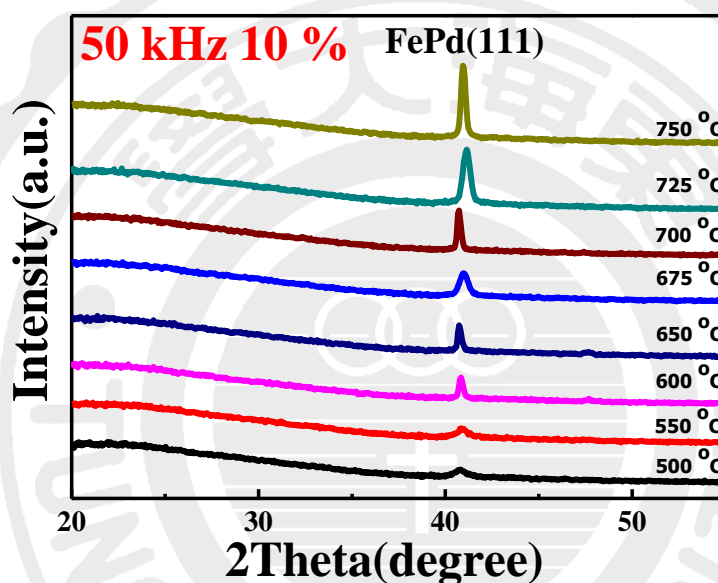


圖 4.3.46 實驗參數為 50 kHz 10 % FePd 薄膜經不同退火之 XRD 圖。

圖 4.3.47 為 50 kHz 10 % 鍍製  $\text{Fe}_{50}\text{Pd}_{50}$  薄膜於玻璃基板經不同溫度後退火之磁滯曲線圖。由圖可知其水平矯頑磁力隨退火溫度上升而提高，最高值達到 3 kOe，當退火溫度上升至 700 °C 時，其矯頑磁力稍稍下降。此外，磁滯曲線第二象限有些微陡降之現象發生，代表著兩相耦合不良所造成之結果。

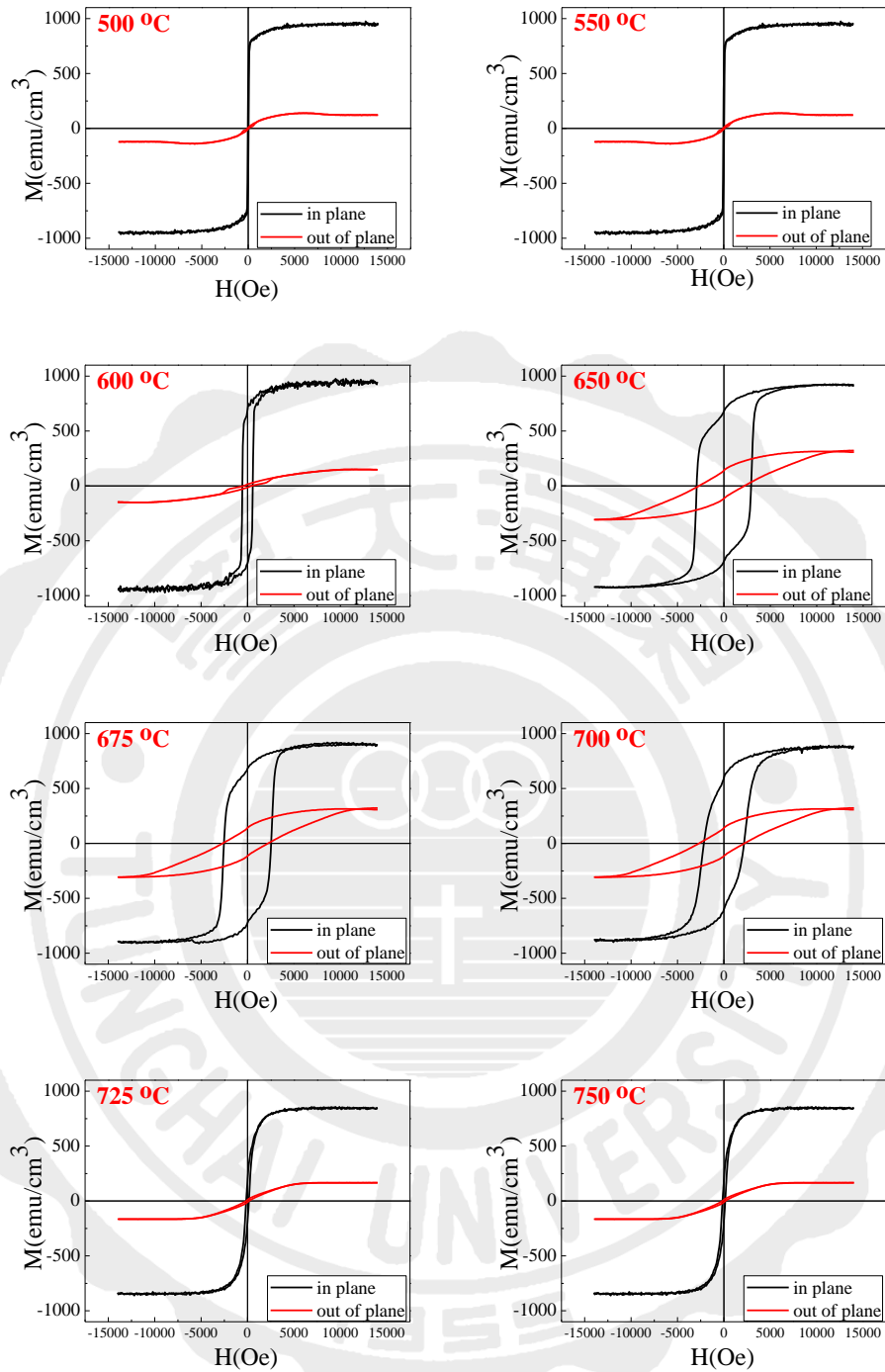


圖 4.3.47 為 50 kHz 10 % 之 FePd 薄膜經不同後退火溫度磁滯曲線圖。

根據 4.3.47 作分析彙整其磁性圖於表 4.3.10。圖 4.3.48 為 35 kHz 80 % FePd 薄膜之飽和磁化量和殘餘磁化量。從圖中可以觀察到，隨著溫度提高，飽和磁化量和殘餘磁化量隨之慢慢下降。圖 4.3.49 為矯頑磁力隨後退火溫度變化圖。可以看到隨著退火溫度提升矯頑力有明顯的增加，當退火溫度為 650 °C 時，有出現最高的矯頑力 3 kOe。圖 4.3.50 為磁能積隨後退火溫度變化圖。從磁制曲線圖得知最高的矯頑磁力出現最高的磁能積為 7.9 MGOe。

表 4.3.10 為 50 kHz 10 % FePd 薄膜經不同溫度後退火之飽和磁化量、殘餘磁化量、矯頑磁力及磁能積一覽表

50 kHz , 10 %	$M_s$ (emu/cm <sup>3</sup> )	$M_r$ (emu/cm <sup>3</sup> )	$H_c$ (Oe)	(BH) <sub>max</sub> (MGOe)
500 °C	975	792	47	0.1
550 °C	965	730	50	0.1
600 °C	943	710	550	2.7
650 °C	921	682	3000	7.9
675 °C	893	678	2550	7.5
700 °C	884	600	2200	4.6
725 °C	849	225	300	0.2
750 °C	831	211	250	0.1



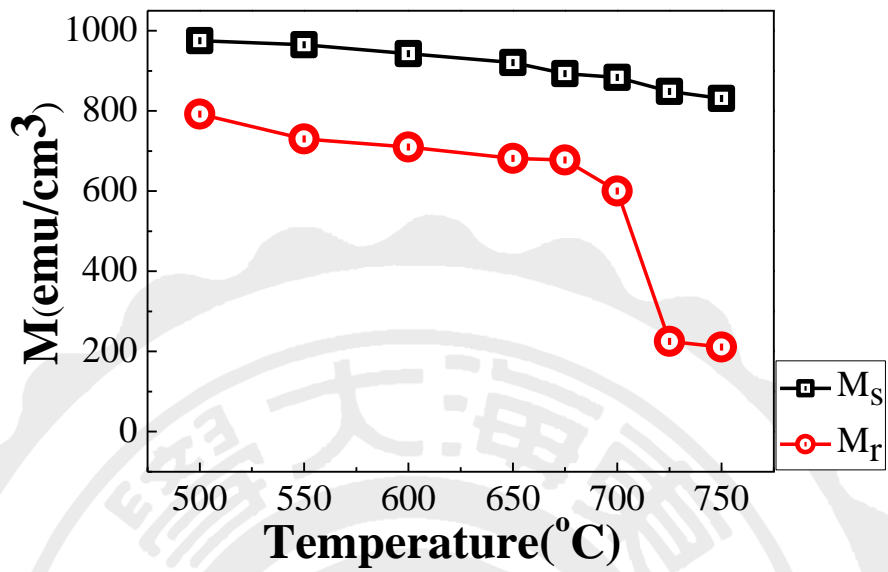


圖 4.3.48 為 50 kHz 10 之 FePd 薄膜飽和磁化量及殘餘磁化量隨後退火溫度變化圖。

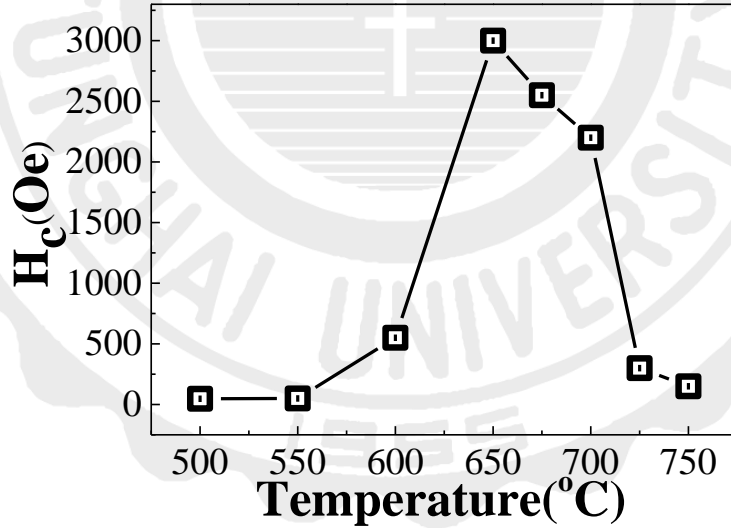


圖 4.3.49 為 50 kHz 10 % 之 FePd 薄膜水平矯頑磁力隨後退火溫度變化圖。

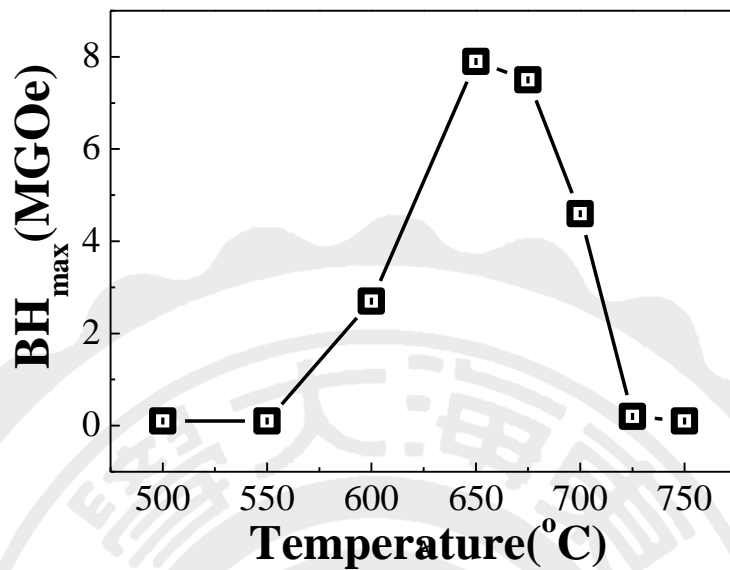


圖 4.3.50 為 50 kHz 10 % 之 FePd 薄膜磁能積隨後退火溫度變化圖。

圖 4.3.51 為 50 kHz 10 % 鍍製 Fe<sub>50</sub>Pd<sub>50</sub> 薄膜經不同後退火溫度之 SEM 圖。退火溫度為 550 °C 時表面呈現出平坦，當退火溫度提升至 675 °C 時，有較大的顆粒產生。

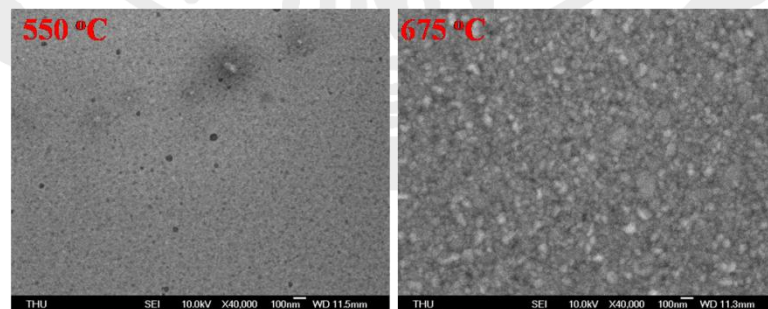


圖 4.3.51 為 50 kHz 10 % 之 FePd 薄膜經不同溫度退火 SEM 圖。

圖 4.3.52 為 50 kHz 10 % 鍍製  $\text{Fe}_{50}\text{Pd}_{50}$  薄膜經不同後退火溫度之 TEM 圖。由圖可知在退火溫度為  $650^\circ\text{C}$  晶粒大小約在 100 nm 以下，溫度提升到  $700^\circ\text{C}$  時出現較大不規則的孔洞。

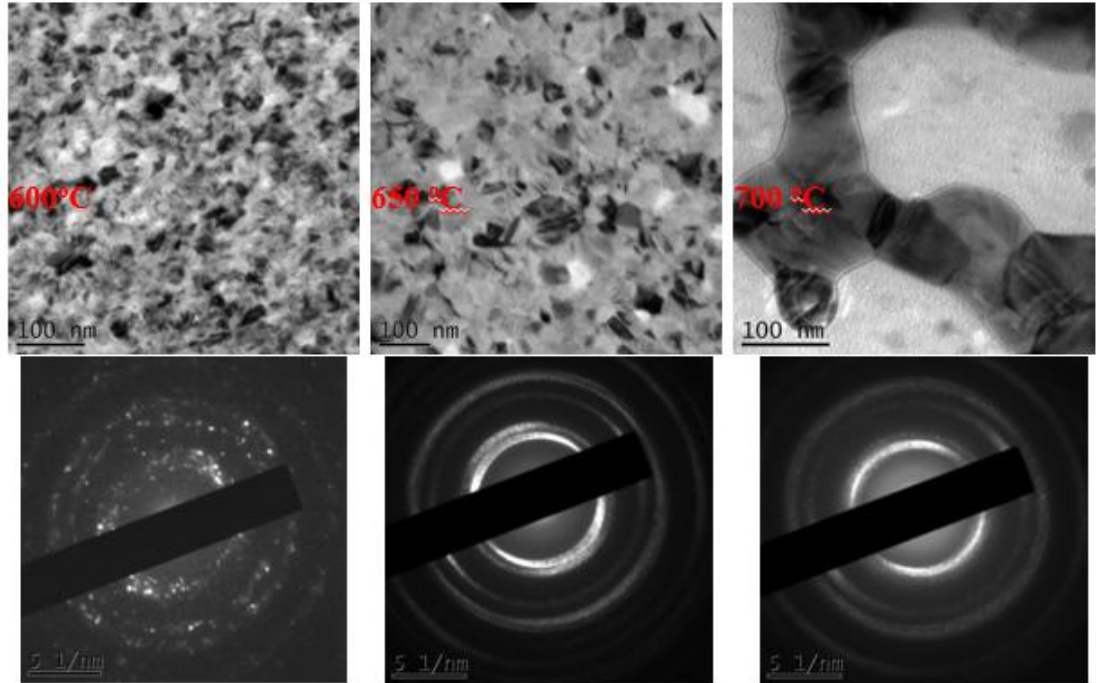


圖 4.3.52 為 50 kHz 10 % 之  $\text{FePd}$  薄膜經不同溫度退火 TEM 圖。

圖 4.3.53 為 50 kHz 10 % 鍍製  $\text{Fe}_{50}\text{Pd}_{50}$  薄膜經不同後退火溫度之 MFM 圖。由圖可知，隨著溫度提升，磁區隨之增大

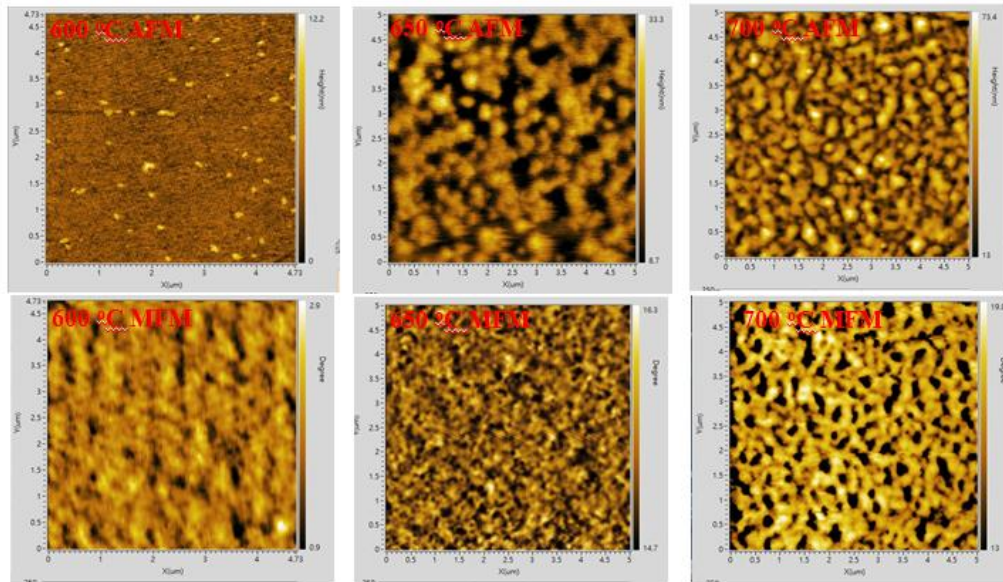


圖 4.3.53 為 50 kHz 10 % 之  $\text{FePd}$  薄膜經不同溫度退火 MFM 圖。

圖 4.3.54 為 50 kHz 20 % 鍍製  $\text{Fe}_{50}\text{Pd}_{50}$  薄膜經不同後退火溫度之 XRD 圖。在初鍍態時，FePd 薄膜僅出現(111)繞射峰，當退火溫度高於 700 °C 時，才出現(200)繞射峰。隨著退火溫度升高，(111)及(200)繞射峰強度都隨之增強。

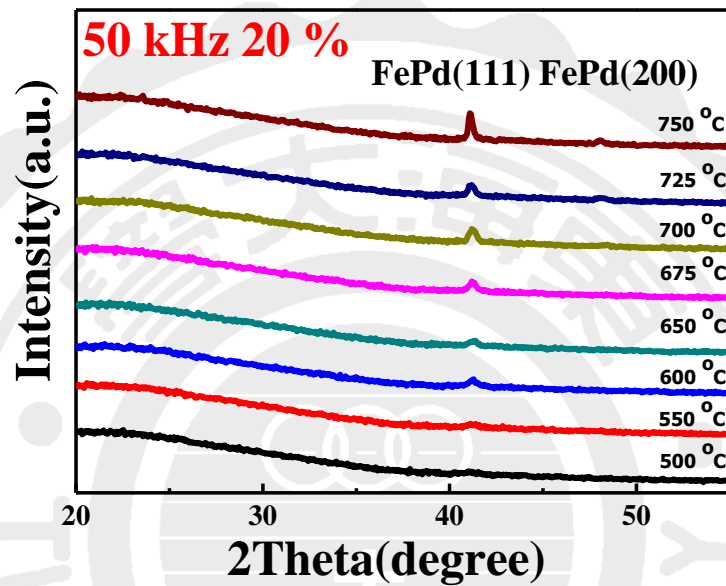


圖 4.3.54 為 50 kHz 20 % FePd 薄膜經不同退火溫度後退火之 XRD 圖。

圖 4.3.55 為 50 kHz 20 % 鍍製  $\text{Fe}_{50}\text{Pd}_{50}$  薄膜於玻璃基板經不同溫度後退火之磁滯曲線圖。隨著退火溫度上升而提高，最高值出現在退火溫度 650 °C，其矯頑磁力為 1.7 kOe。

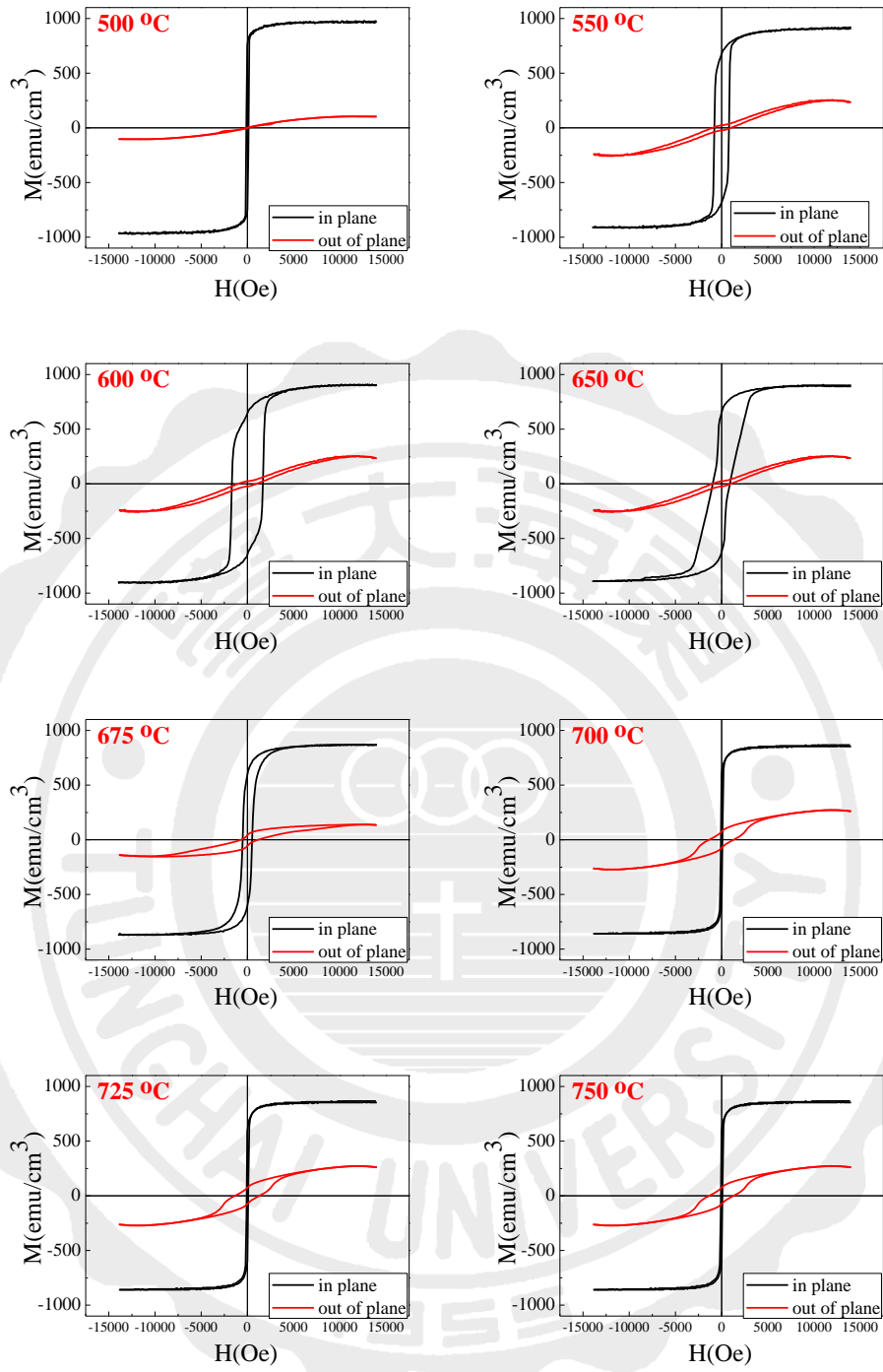


圖 4.3.55 為 50 kHz 20 % 之 FePd 薄膜經不同後退火溫度磁滯曲線圖。

根據 4.3.55 作分析彙整其磁性圖於表 4.3.11。圖 4.3.56 為 50 kHz 20 % FePd 薄膜之飽和磁化量和殘餘磁化量。從圖中可以觀察到，隨著溫度提高，飽和磁化量和殘餘磁化量隨之慢慢下降。圖 4.3.57 為矯頑磁力隨後退火溫度變化圖。隨著退火溫度提升矯頑力有明顯的提升，當退火溫度為 650 °C 時有著較高的矯頑力為 1.7 koe。圖 4.3.58 為磁能積隨後退火溫度變化圖。當退火溫度在 600 °C 時，有較高的表現，而經由殘餘磁化量經過相轉變逐漸轉為硬磁相後呈現出最小的能積。

表 4.3.11 為 50 kHz 20 % FePd 薄膜經不同溫度後退火之飽和磁化量、殘餘磁化量、矯頑磁力及磁能積一覽表

50 kHz , 20 %	$M_s$ (emu/cm <sup>3</sup> )	$M_r$ (emu/cm <sup>3</sup> )	$H_c$ (Oe)	$(BH)_{max}$ (MGOe)
500 °C	964	771	114	0.1
550 °C	935	705	800	3.5
600 °C	905	665	1700	5.2
650 °C	891	660	1000	2.0
675 °C	865	622	500	1.6
700 °C	851	612	170	0.2
725 °C	833	610	150	0.1
750 °C	820	605	140	0.1

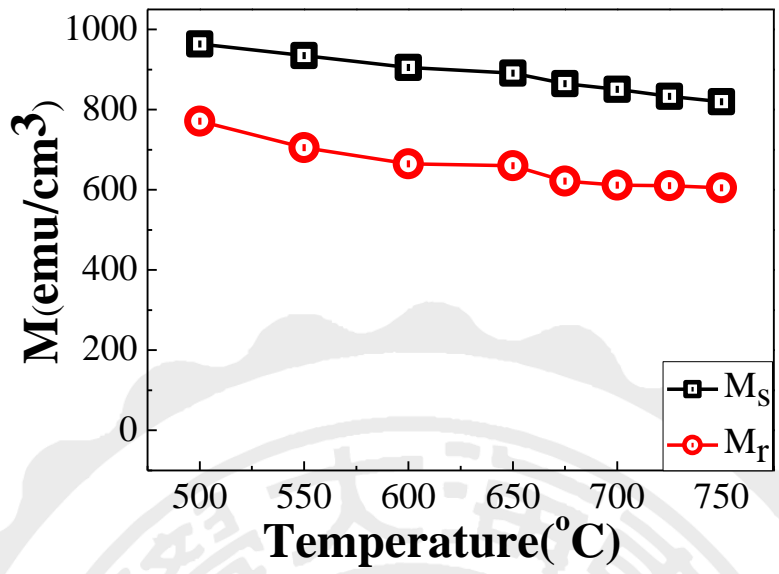


圖 4.3.56 為 50 kHz 20 之 FePd 薄膜飽和磁化量及殘餘磁化量隨後退火溫度變化圖。

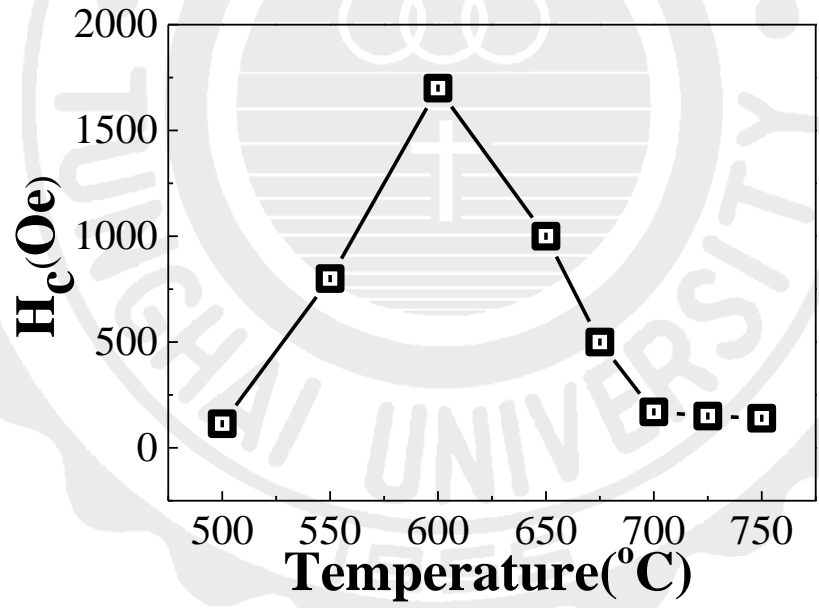


圖 4.3.57 為 50 kHz 20 % 之 FePd 薄膜水平矯頑磁力隨後退火溫度變化圖。



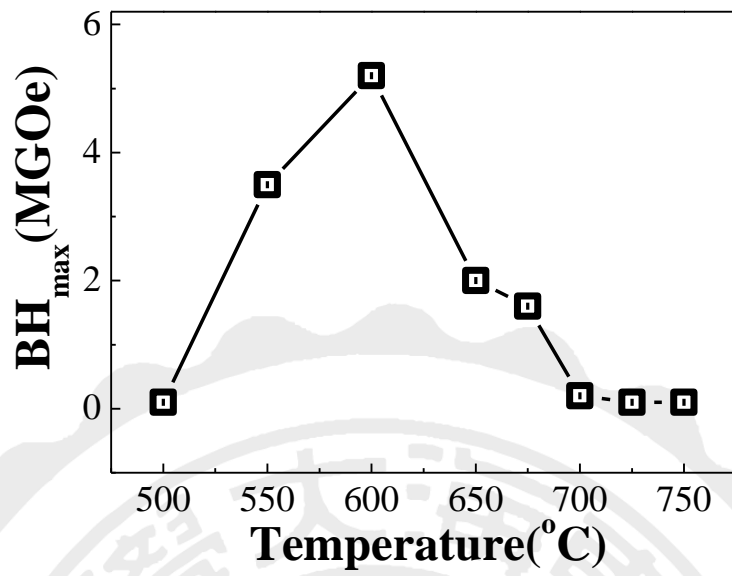


圖 4.3.58 為 50 kHz 20 % 之 FePd 薄膜磁能積隨後退火溫度變化圖。

圖 4.3.59 為 50 kHz 50 % 鍍製  $\text{Fe}_{50}\text{Pd}_{50}$  薄膜經不同後退火溫度之 XRD 圖。在初鍍態時，FePd 薄膜僅出現(111)繞射峰，當退火溫度高於 700 °C 時，才出現(200)繞射峰。隨著退火溫度升高，(111)繞射峰強度隨之增強。

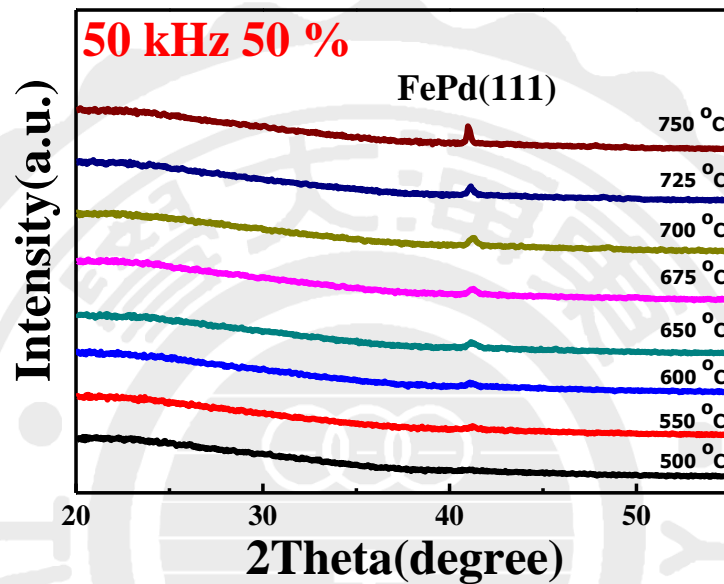


圖 4.3.59 為 50 kHz 50 % FePd 薄膜經不同退火溫度後退火之 XRD 圖。

圖 4.3.60 為 50 kHz 50 % 鍍製  $\text{Fe}_{50}\text{Pd}_{50}$  薄膜於玻璃基板經不同溫度後退火之磁滯曲線圖。由圖可知其水平矯頑磁力隨退火溫度上升而提高，最高值出現在退火溫度 600 °C 時，其矯頑磁力為 1.9 kOe，退火溫度提升至 650 °C 時，有明顯的下降到 1.4 kOe，而溫度為 700 °C 時，呈現很低的水平矯頑力。

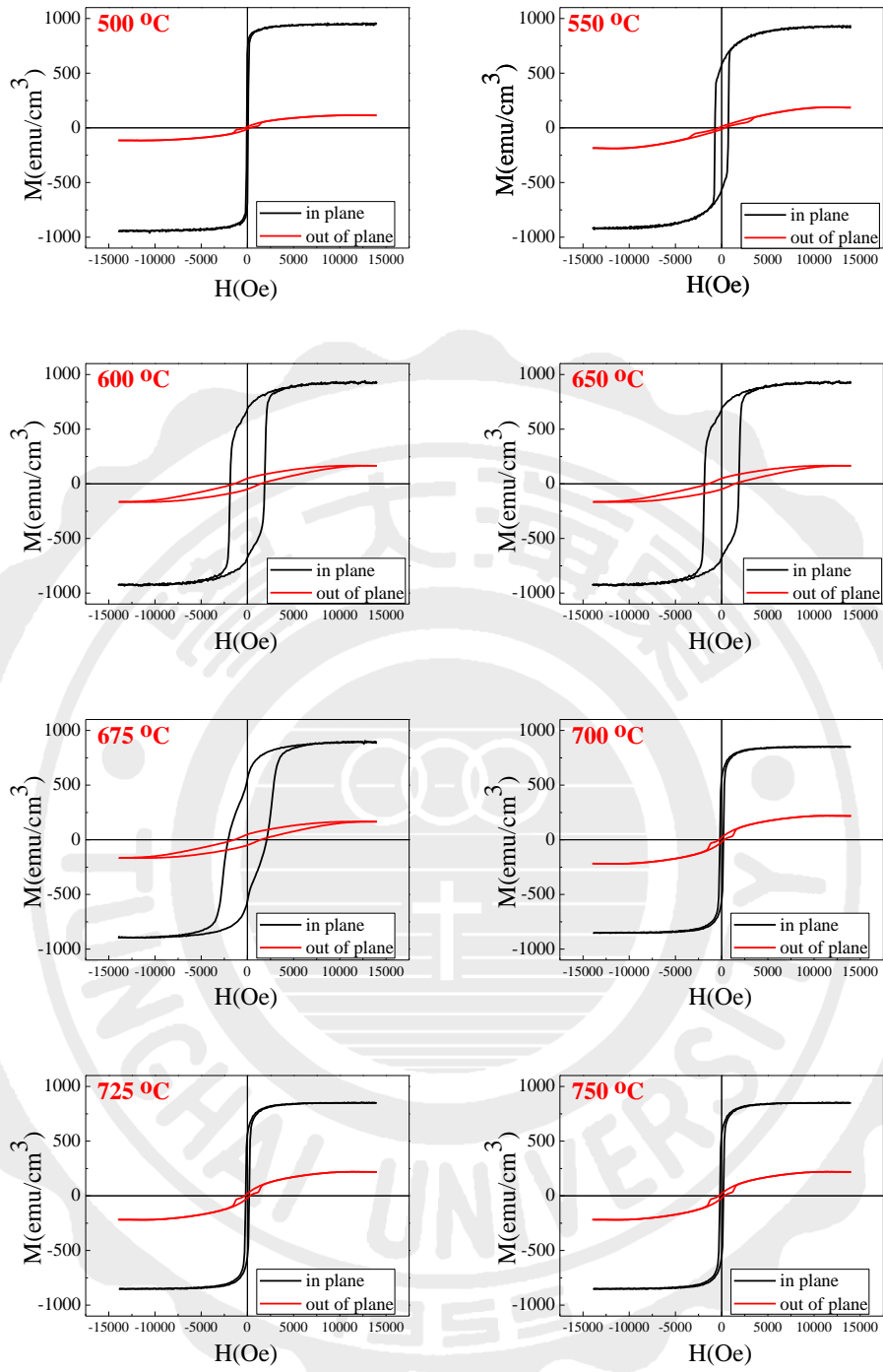


圖 4.3.60 為 50 kHz 50 % 之 FePd 薄膜經不同後退火溫度磁滯曲線圖。

根據 4.3.60 作分析彙整其磁性圖於表 4.3.12。圖 4.3.61 為 50 kHz 50 % FePd 薄膜之飽和與殘餘磁化量隨不同後退火溫度之變化圖。由圖可知，兩磁化量都隨之下降。圖 4.3.62 矯頑磁力隨不同後退火溫度之變化圖。此可看到矯頑磁力隨退火溫度提升而明顯提高，當退火溫度在 600 °C 時呈現出最高矯頑磁力。圖 4.3.63 為磁能積隨不同後退火溫度之變化圖。當退火溫度在 600 °C 時，有較高的表現。

表 4.3.12 為 50 kHz 50 % FePd 薄膜經不同溫度後退火之飽和磁化量、殘餘磁化量、矯頑磁力及磁能積一覽表

50 kHz , 50 %	$M_s$ (emu/cm <sup>3</sup> )	$M_r$ (emu/cm <sup>3</sup> )	$H_c$ (Oe)	(BH) <sub>max</sub> (MGOe)
500 °C	970	812	70	0.1
550 °C	932	782	850	4.5
600 °C	917	682	1900	6.2
650 °C	907	680	1950	4.0
675 °C	886	563	2000	2.9
700 °C	862	550	300	1
725 °C	851	540	250	0.9
750 °C	831	525	200	0.5

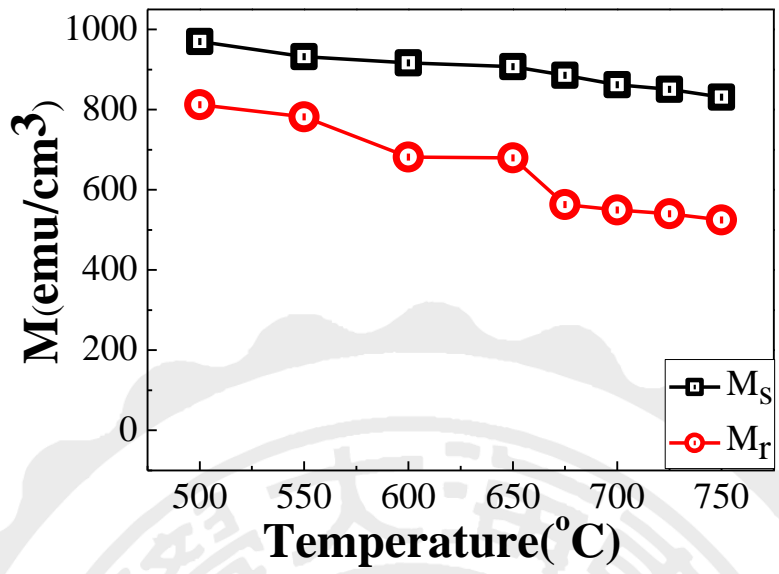


圖 4.3.61 為 50 kHz 50 之 FePd 薄膜飽和磁化量及殘餘磁化量隨後退火溫度變化圖。

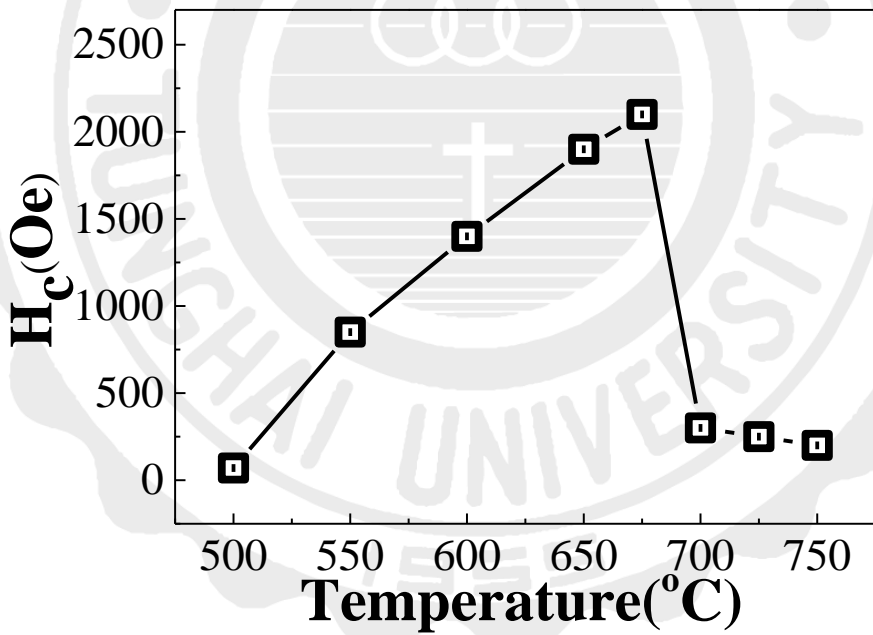


圖 4.3.62 為 50 kHz 50 % 之 FePd 薄膜水平矯頑磁力隨後退火溫度變化圖。

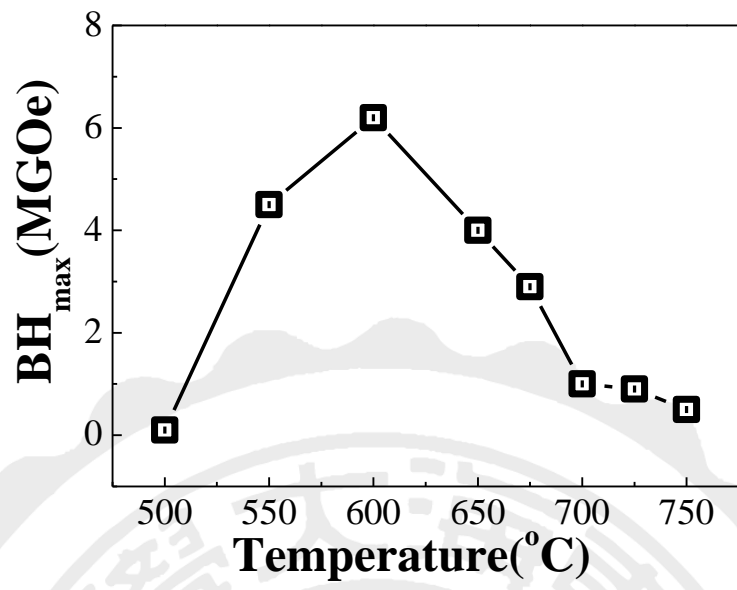


圖 4.3.63 為 50 kHz 50 % 之 FePd 薄膜磁能積隨後退火溫度變化圖。

圖 4.3.64 為 50 kHz 80 % 鍍製  $\text{Fe}_{50}\text{Pd}_{50}$  薄膜經不同後退火溫度之 XRD 圖。在初鍍態時，FePd 薄膜僅出現(111)繞射峰，當退火溫度高於 700 °C 時，才出現(200)繞射峰。隨著退火溫度升高，繞射峰皆隨之提升。

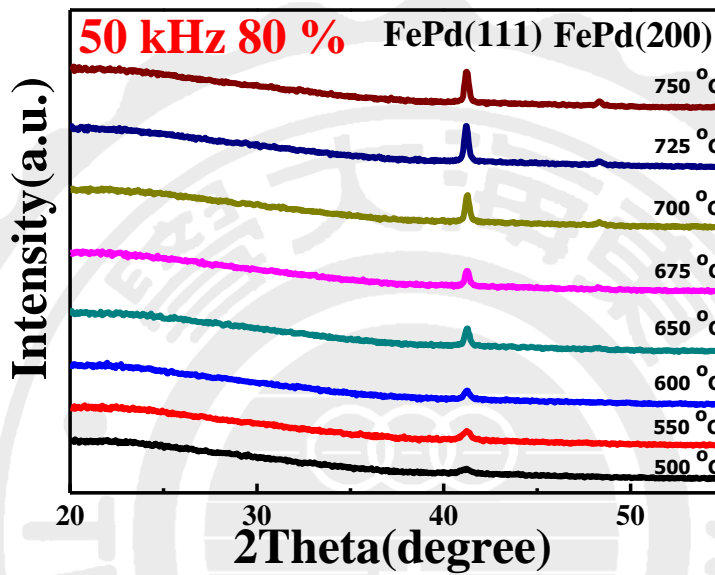


圖 4.3.64 為 50 kHz 80 % FePd 薄膜經不同退火溫度後退火之 XRD 圖。

圖 4.3.65 為 50 kHz 80 % 鍍製  $\text{Fe}_{50}\text{Pd}_{50}$  薄膜於玻璃基板經不同溫度後退火之磁滯曲線圖。隨著退火提升，當溫度達到 650 °C 時，可獲得較高水平矯頑磁力，達 1.5 kOe。

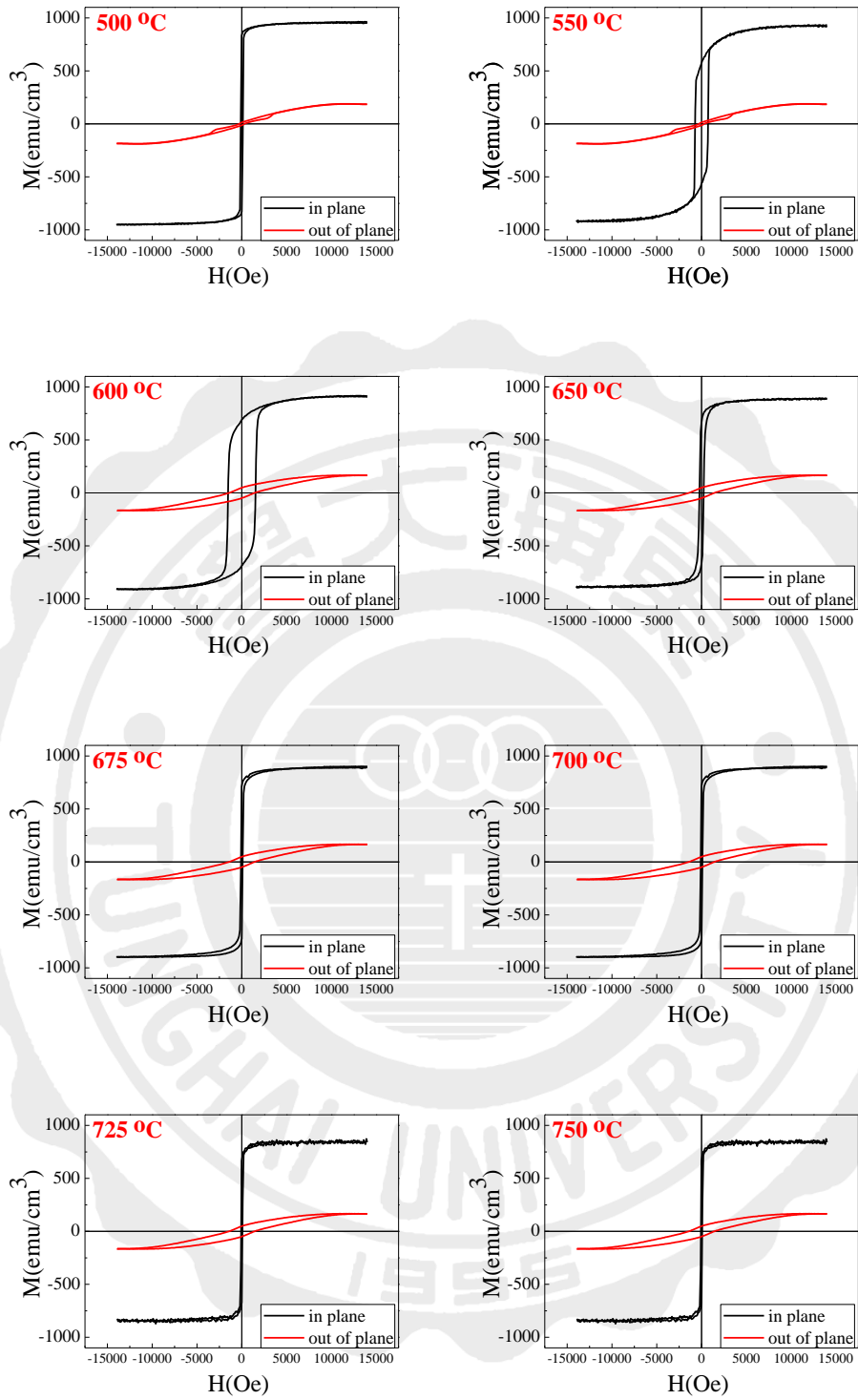


圖 4.3.65 為 50 kHz 80 % 之 FePd 薄膜經不同後退火溫度之磁滯曲線圖。



根據 4.3.65 作分析彙整其磁性圖於表 4.3.13。圖 4.3.66 為 50 kHz 80 % FePd 薄膜之飽和磁化量和殘餘磁化量。從圖中可以觀察到，隨著溫度提高，飽和磁化量和殘餘磁化量隨之慢慢下降。圖 4.3.67 矯頑磁力隨後退火溫度變化圖。此可看到隨著退火溫度提升矯頑力有明顯的提高，當退火溫度達到 600 °C 有出現最高的矯頑力為 1.5 koe，溫度提升至高於 650 °C 開始慢慢下降，其矯頑磁力皆很低，圖 4.3.68 為磁能積隨後退火溫度變化圖。隨著退火溫度上升，有先升後降的趨勢。

表 4.3.13 為 50 kHz 80 % FePd 薄膜經不同溫度後退火之飽和磁化量、殘餘磁化量、矯頑磁力及磁能積一覽表

50 kHz , 80 %	$M_s$ (emu/cm <sup>3</sup> )	$M_r$ (emu/cm <sup>3</sup> )	$H_c$ (Oe)	$(BH)_{max}$ (MGOe)
500 °C	952	837	108	0.2
550 °C	925	705	700	2.7
600 °C	909	688	1500	6.0
650 °C	886	670	250	1.0
675 °C	864	660	120	0.5
700 °C	855	655	100	0.3
725 °C	833	642	80	0.1
750 °C	825	633	75	0.1

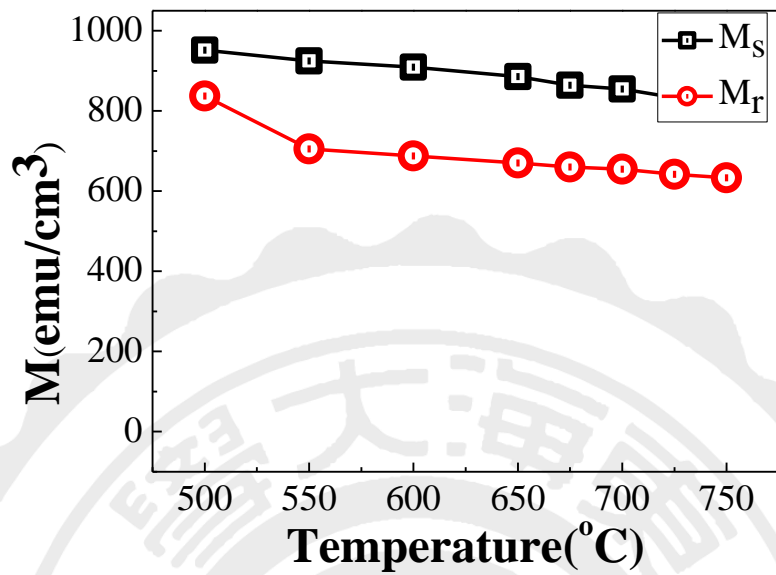


圖 4.3.66 為 50 kHz 80 之 FePd 薄膜飽和磁化量及殘餘磁化量隨  
後退火溫度變化圖。

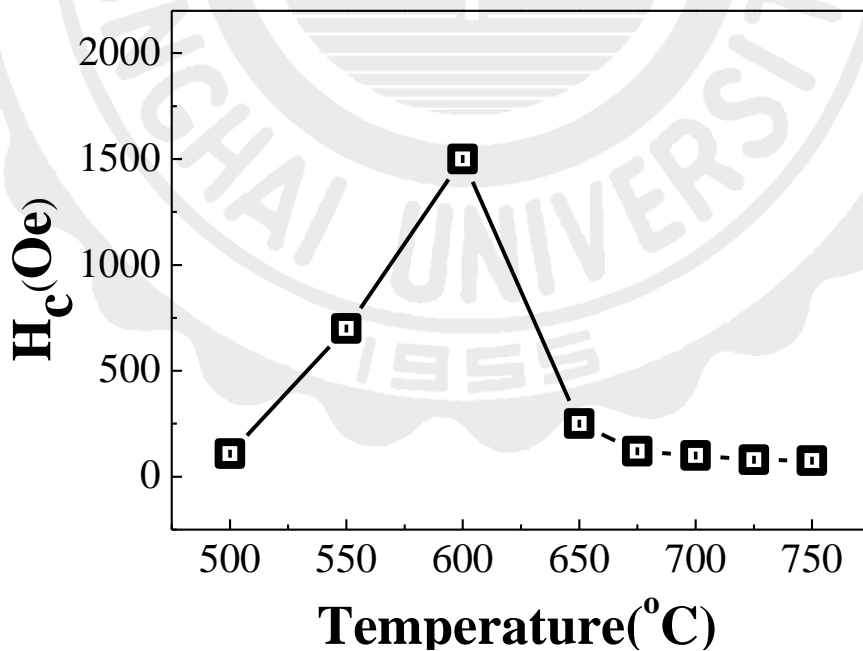


圖 4.3.67 為 50 kHz 80 % 之 FePd 薄膜水平矯頑磁力隨後退火溫  
度變化圖。

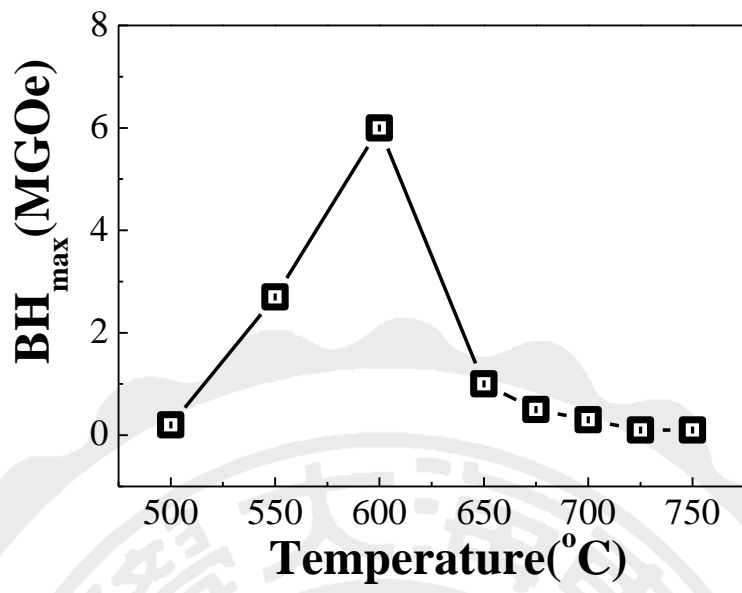


圖 4.3.68 為 50 kHz 80 % 之 FePd 薄膜磁能積隨後退火溫度變化圖。

#### 4-3-4 小結

本節實驗以脈衝濺鍍法製備了 Fe<sub>50</sub>Pd<sub>50</sub> 薄膜，並探討不同退火溫度對於 Fe<sub>50</sub>Pd<sub>50</sub> 薄膜結構及磁性之影響。在工作頻率為 20 kHz 的單層 Fe<sub>50</sub>Pd<sub>50</sub> 薄膜於不同溫度下退火時，樣品藉由 XRD 分析皆呈現(111)繞射峰，繞射峰隨之增強，並且在退火溫度為 700 °C 時，FePd 薄膜出現(200)繞射峰，在磁滯曲線上可以觀察隨著溫度提升矯頑磁力皆有明顯的增加，最高值出現在脈衝持續時間 20 % 當退火溫度為 700 °C，其有大的矯頑磁力為 2.5 kOe 及最高的磁能積 10.2 MGOe。

當頻率為 35 kHz 時樣品由 XRD 分析有著(111)及(200)繞射峰值，隨著退火溫度增加在退火溫度為 600 °C - 650 °C 有較佳的序化溫度其矯頑磁力為 2.7 kOe，且退火溫度為 600 °C，皆有出現最高的磁能積，最大能積為 9.1 MGOe，而退火溫度為 700 °C，都有明顯下降的趨勢。

頻率為 50 kHz 從 XRD 上有著很強的(111)繞射峰及微弱的(200)繞射峰，退火溫度增加(111)結晶性有變佳的現象，隨著溫度提升，FePd 結構從 A1 轉變為 L1<sub>0</sub> 由軟磁轉變為硬磁，磁滯曲線上可以觀察到磁性質皆有明顯的增加而最高的矯頑磁力在脈衝持續時間為 10 % 有著大的矯頑磁力為 3.0 kOe 及最高的磁能積為 7.9 MGOe，本研究所得之矯頑磁力與 Sakuma 等人製備的 FePd 奈米粒子的 3.0 kOe[75]相近。

藉由不同室溫下 XRD 圖 4.3.81 - 4.3.83 和表 4.3.14 - 4.3.16 FePd(111)繞射峰算出(111)晶面間距，發現到在相同為靶距為 5 cm 時，矯頑磁力及磁能積皆比射頻濺鍍和直流濺鍍相對較好，可能原因為脈衝直流濺鍍所製備初鍍態 FePd 壓縮應力較大，在短的鍍製靶距條件

下也能獲得較佳的結果。

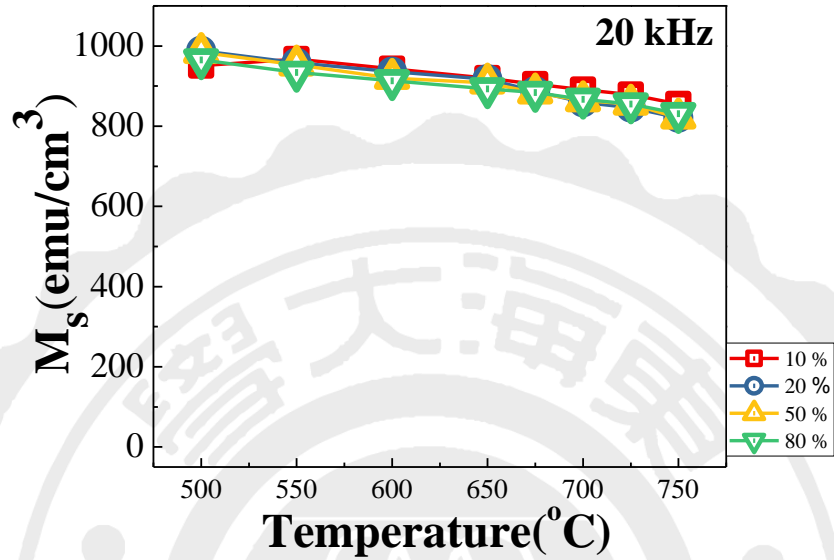


圖 4.3.69 為 20 kHz 不同頻率之 FePd 薄膜飽和磁化量隨後退火溫度變化圖。

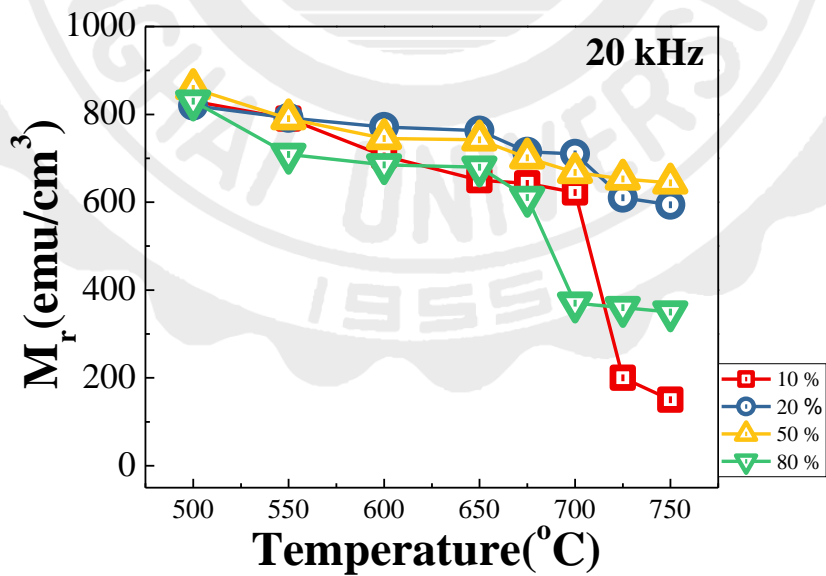


圖 4.3.70 為 20 kHz 不同頻率之 FePd 薄膜殘餘磁化量隨後退火溫度

變化圖。



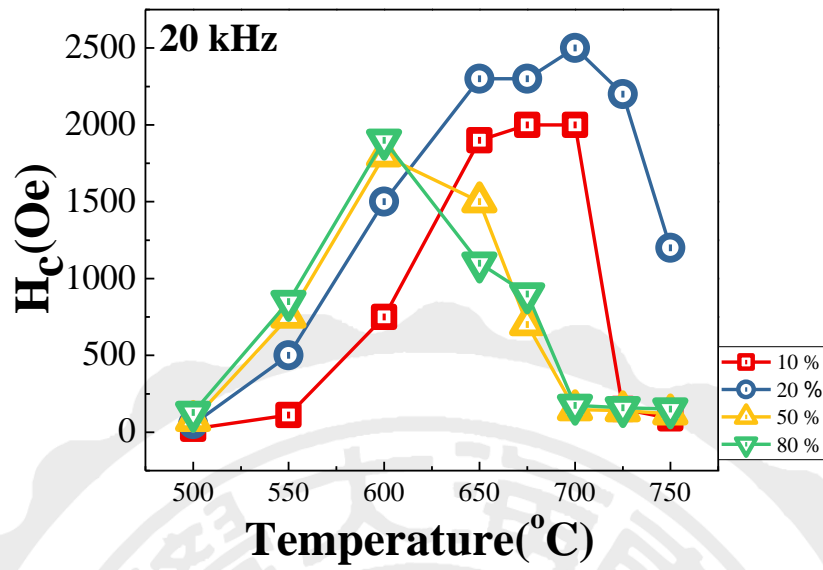


圖 4.3.71 為 20 kHz 不同頻率之 FePd 薄膜水平矯頑磁力隨後退火溫度變化圖。

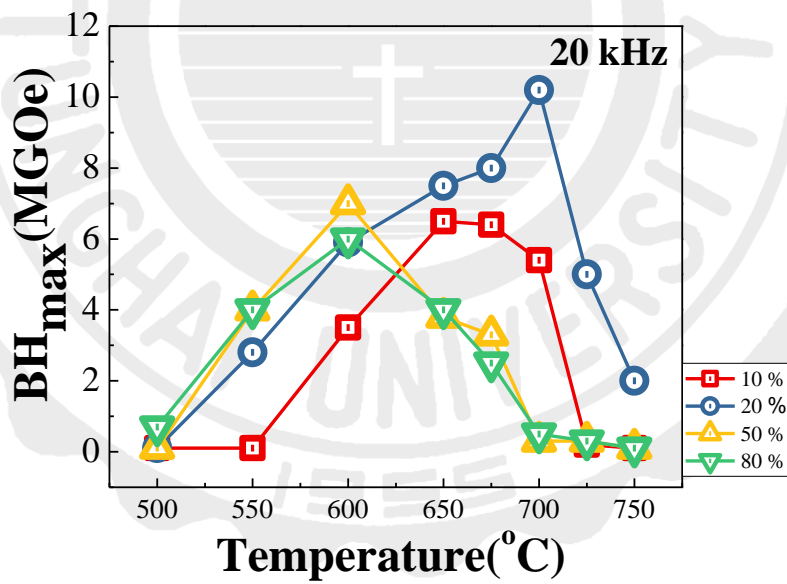


圖 4.3.72 為 20 kHz 不同頻率之 FePd 薄膜磁能積隨後退火溫度變化圖。

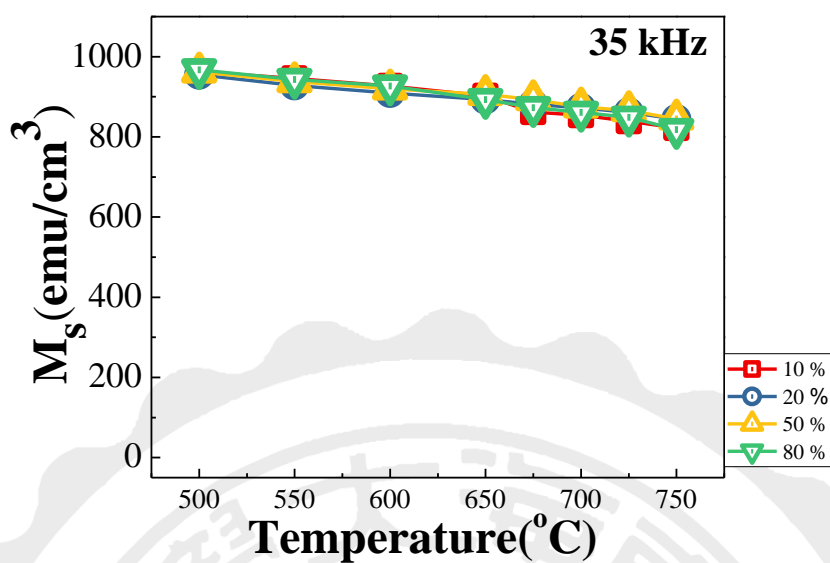


圖 4.3.73 為 35 kHz 不同頻率之 FePd 薄膜飽和磁化量隨後退火溫度變化圖。

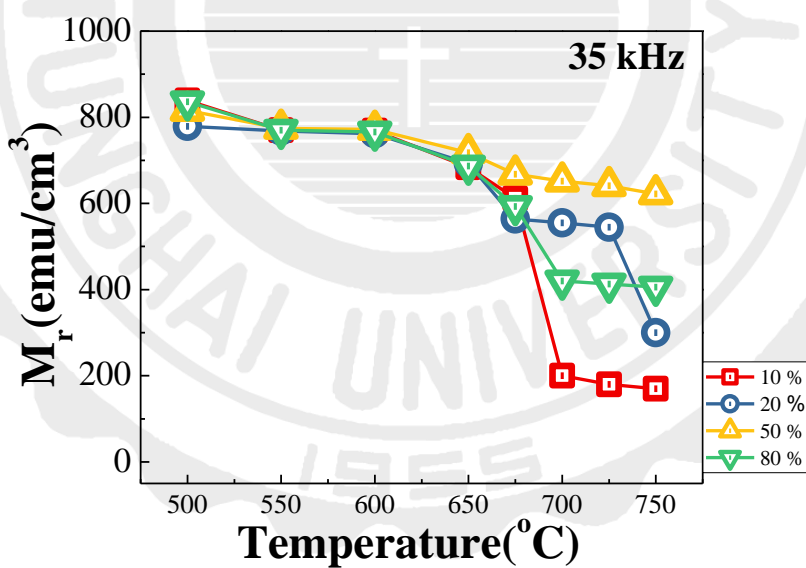


圖 4.3.74 為 35 kHz 不同頻率之 FePd 薄膜殘餘磁化量隨後退火溫度變化圖。



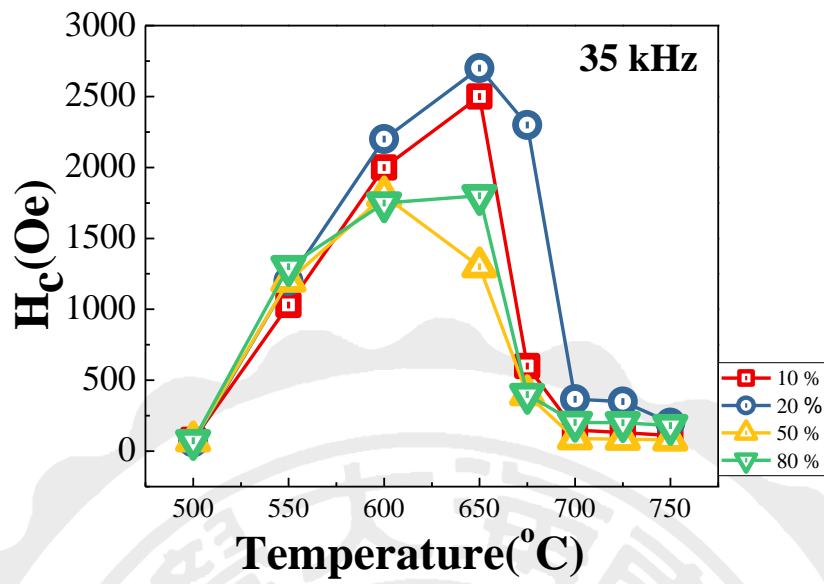


圖 4.3.75 為 35 kHz 不同頻率之 FePd 薄膜水平矯頑磁力隨後退火溫度變化圖。

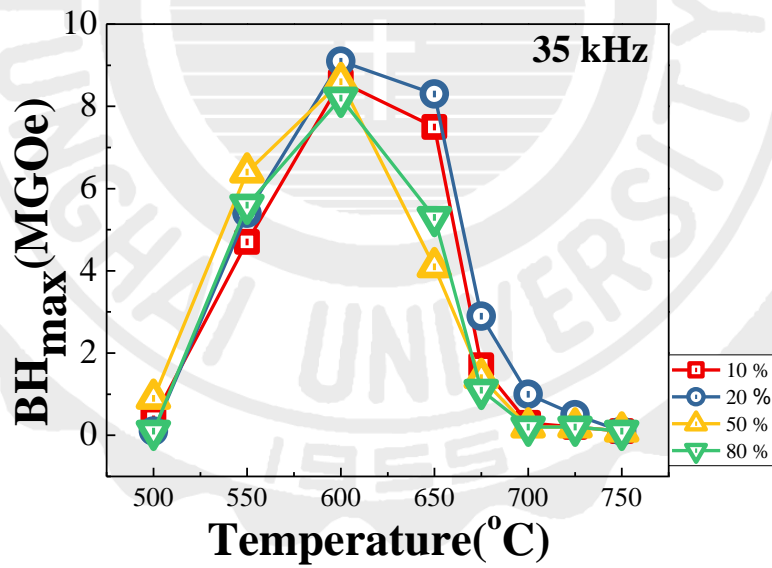


圖 4.3.76 為 35 kHz 不同頻率之 FePd 薄膜磁能積隨後退火溫度變化圖。

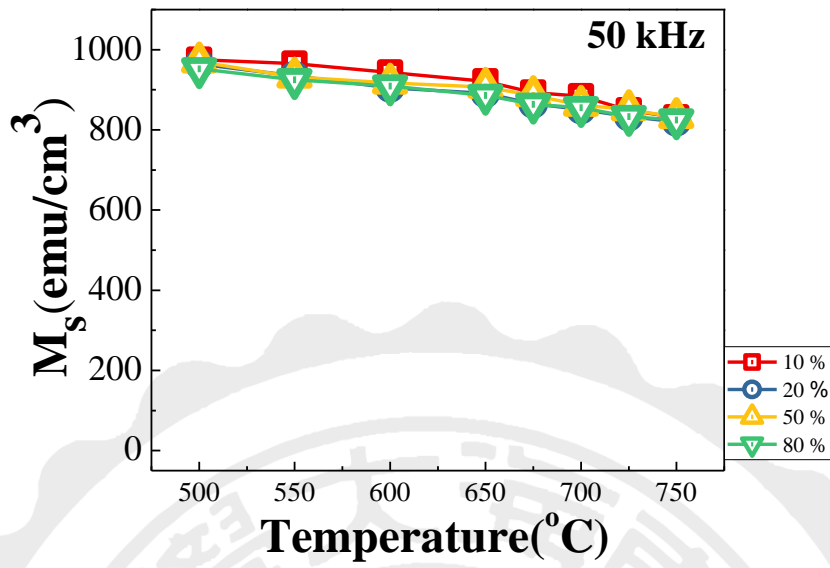


圖 4.3.77 為 50 kHz 不同頻率之 FePd 薄膜飽和磁化量隨後退火溫度變化圖。

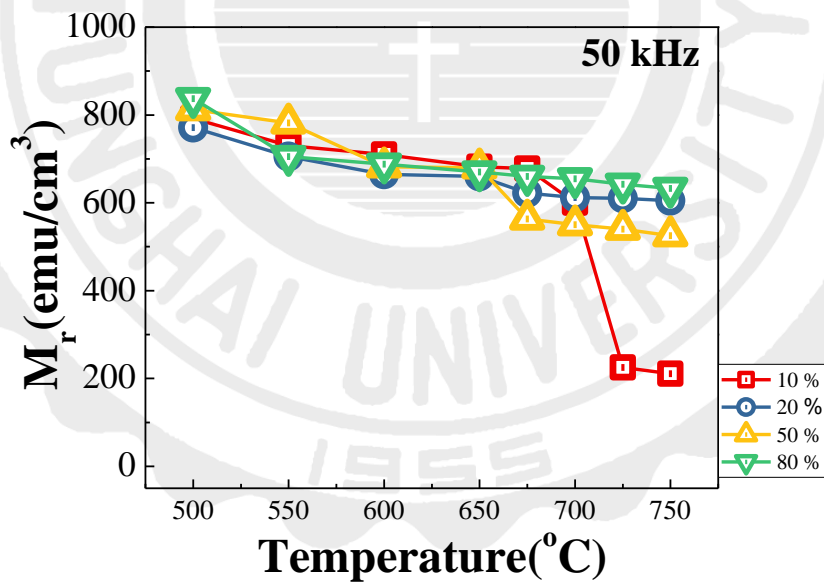


圖 4.3.78 為 50 kHz 不同頻率之 FePd 薄膜殘餘磁化量隨後退火溫度變化圖。

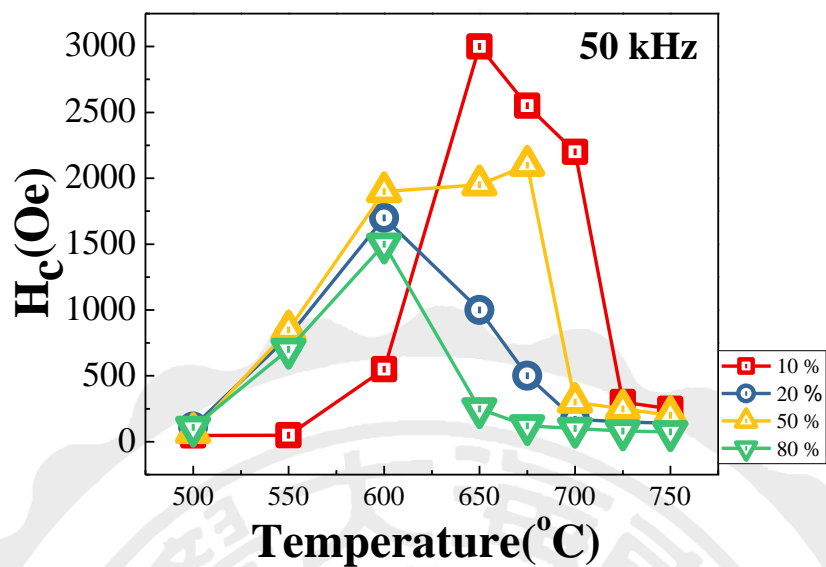


圖 4.3.79 為 50 kHz 不同頻率之 FePd 薄膜水平矯頑磁力隨後退火溫度變化圖。

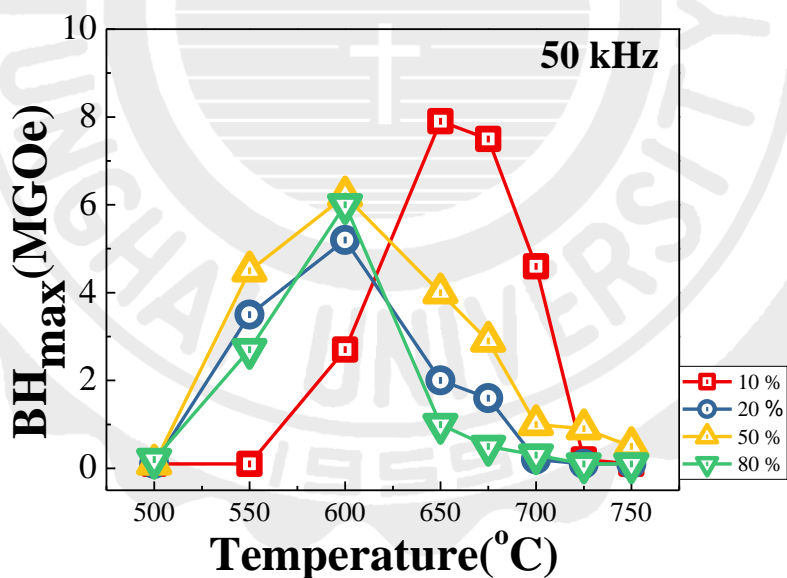


圖 4.3.80 為 50 kHz 不同頻率之 FePd 薄膜磁能積隨後退火溫度變化圖。

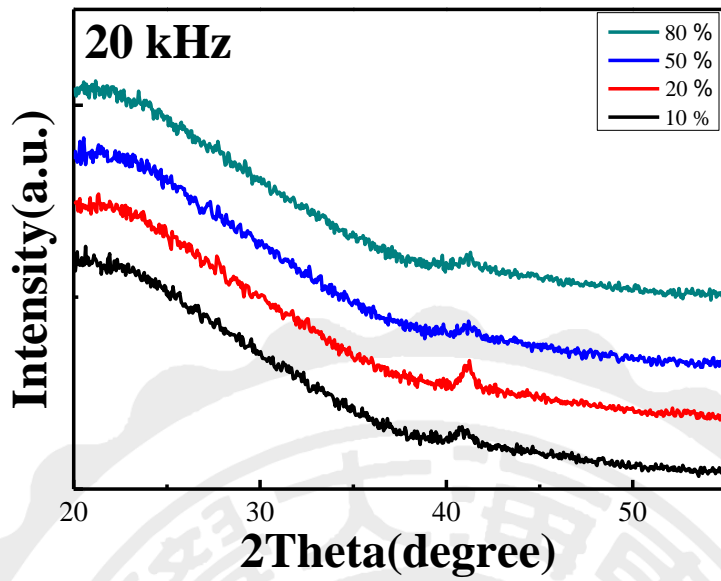


圖 4.3.81 為 20 kHz 不同頻率在室溫下 XRD 圖。

表 4.3.14 為 20 kHz 不同頻率之 FePd(111) 晶面間距

Temperature(°C)	FePd(111)	
20 kHz RT	Peak(111) (°)	$d_{111}$ (Å)
10 %	40.820	2.189
20 %	41.094	2.196
50 %	41.071	2.188
80 %	41.056	2.191

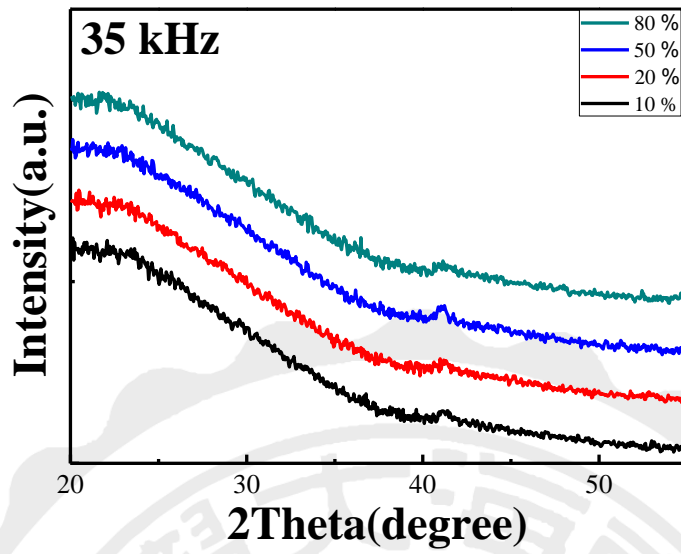


圖 4.3.82 為 35 kHz 不同頻率在室溫下 XRD 圖。

表 4.3.15 為 35 kHz 不同頻率之 FePd(111) 晶面間距

Temperature(°C)	FePd(111)	
35 kHz RT	Peak(111) (°)	$d_{111}$ (Å)
10 %	41.141	2.195
20 %	41.137	2.199
50 %	41.064	2.194
80 %	41.033	2.192

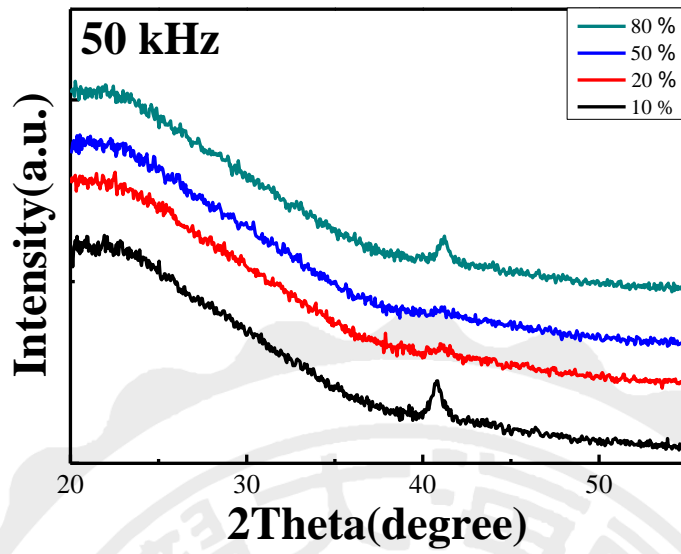


圖 4.3.83 為 50 kHz 不同頻率在室溫下 XRD 圖。

表 4.3.16 為 50 kHz 不同頻率之 FePd(111) 晶面間距

Temperature(°C)	FePd(111)	
	Peak(111) (°)	$d_{111}$ (Å)
50 kHz RT		
10 %	40.989	2.210
20 %	40.905	2.204
50 %	40.953	2.201
80 %	40.888	2.192

## 4-4 不同磁控濺鍍法製備 FePd 薄膜磁性之實驗結果與討論

以不同濺鍍法所製備單層 30 nm Fe<sub>50</sub>Pd<sub>50</sub> 薄膜於玻璃基板上，並以不同退火溫度( $T_a = 500\text{ }^\circ\text{C} - 750\text{ }^\circ\text{C}$ )，並以研究其磁性。FePd 薄膜經過退火後，其晶粒的平面間距會改變，從 XRD 會觀察到(111) 繞射峰明顯向右偏移，表示著 FePd 開始序化，此時結構從面心立方晶轉變至面心立方晶之變化，使其矯頑磁力會上升。

由於濺鍍法不同由表 4.4.1 發現到在相同的靶距為 5 cm 時最為顯著，而脈衝濺鍍所呈現出較好的數值可能原因為成膜機制的不同，當靶材被濺射出的原子，被放電性氣體原子散亂，此時到達基板原子比例減少，因此成膜較慢，而在初始應力下相較較高，經應力釋放後皆有較高的矯頑磁力。

以上結果可知，若在進一步優化製程參數，例如改變靶距、氣體、調整脈衝頻率、脈衝持續時間等，可以再進一步優化，進而提高其磁性。本節實驗結果提供了研製 FePd 薄膜之方法的有用訊息。

表 4.4.1 以不同濺鍍法鍍製 FePd 薄膜經不同退火溫度矯頑磁力及磁能積一覽表

Method	Gas	Distance	T(°C)	$M_s$ (emu/cm <sup>3</sup> )	$M_r$ (emu/cm <sup>3</sup> )	$H_c$ (Oe)	(BH) <sub>max</sub> (MGOe)	RT (d <sub>111</sub> )
Rf sputtering	Ar	5 cm	550	925	792	340	1.7	2.194
		10 cm	650	763	599	2200	5.9	2.207
		12.5 cm	675	728	592	3500	7.8	2.208
Dc sputtering	Ar	5 cm	600	867	752	400	2	2.194
		10 cm	675	704	584	2900	7.5	2.207
		12.5 cm	700	683	550	3300	4.9	2.208
Pulse DC sputtering	Ar	20 kHz 5 cm	700	586	510	2500	6.0	2.196
		35 kHz 5 cm	650	748	570	2700	6.0	2.199
		50 kHz 5 cm	650	804	591	3000	6.5	2.210





## 第五章 氮氣效應以濺鍍研製 FePd 薄膜

從先前的章節，研究了以不同磁控濺鍍法並改變靶距下製備 FePd 薄膜於玻璃基板上並進一步探討改變濺鍍氣氛，本節討論在氮氣的氣氛下鍍製 FePd 薄膜並在退火溫度( $T_a = 500 - 750 \text{ }^\circ\text{C}$ )對 FePd 薄膜磁性與及結構的影響。

本章實驗結果分以下三部分：

1. 氮氣效應對於以射頻濺鍍法製備的  $\text{Fe}_{50}\text{Pd}_{50}$  薄膜結構與磁性之影響。
2. 氮氣效應對於以射頻濺鍍法製備的  $\text{Fe}_{50}\text{Pd}_{50}$  薄膜結構與磁性之影響
3. 氮氣效應對於改變靶距沉積 FePd 薄膜結構與磁性影響之探討。

## 5-1 氮氣效應對於以射頻濺鍍法製備的 $\text{Fe}_{50}\text{Pd}_{50}$ 薄膜結構與磁性之影響

本節以射頻濺鍍法製備單層 30 nm FePd 薄膜，改變製成條件為濺鍍靶材與基板之間的距離以及濺鍍氣氛，並進行不同溫度後退火，探討不同靶距對 FePd 薄膜結構及磁性之影響。實驗參數如表 5.1.1:

表 5.1.1 實驗參數

濺鍍法	濺鍍功率 (W)/工作壓力 (mTorr)	改變靶距	氣體
射頻濺鍍法 (RF)	30/10	5 cm	氮氣( $\text{N}_2$ )
		10 cm	
		12.5 cm	

### 5-1-1 靶距 5 cm，在氮氣下以射頻濺鍍沉積 FePd 薄膜經由不同溫度後退火之結構及磁性研究

圖 5.1.1 為靶距 5 cm 氮氣鍍製鍍製 Fe<sub>50</sub>Pd<sub>50</sub> 薄膜經不同後退火溫度之 XRD 圖。在初鍍態時，FePd 薄膜僅出現(111)繞射峰，當退火溫度高於 600 °C，才出現(200)繞射峰。隨著退火溫度升高，(111)繞射峰強度隨之增強。

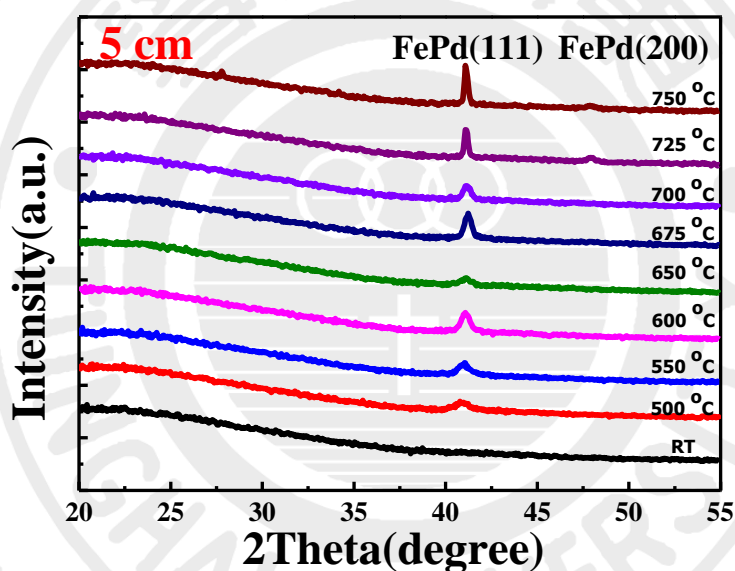


圖 5.1.1 氮氣下靶距 5 cm FePd 薄膜經不同退火溫度後退火之 XRD 圖。

圖 5.1.2 為靶距 5 cm 鍍製 Fe<sub>50</sub>Pd<sub>50</sub> 薄膜於玻璃基板經不同溫度後退火之磁滯曲線圖。由圖可知，藉由改變濺度氣氛在靶距 5 cm 時，比使用氮氣鍍製較好，磁滯曲線上可以發現到藉由氮氣的置入矯頑磁力都有大幅的提升。

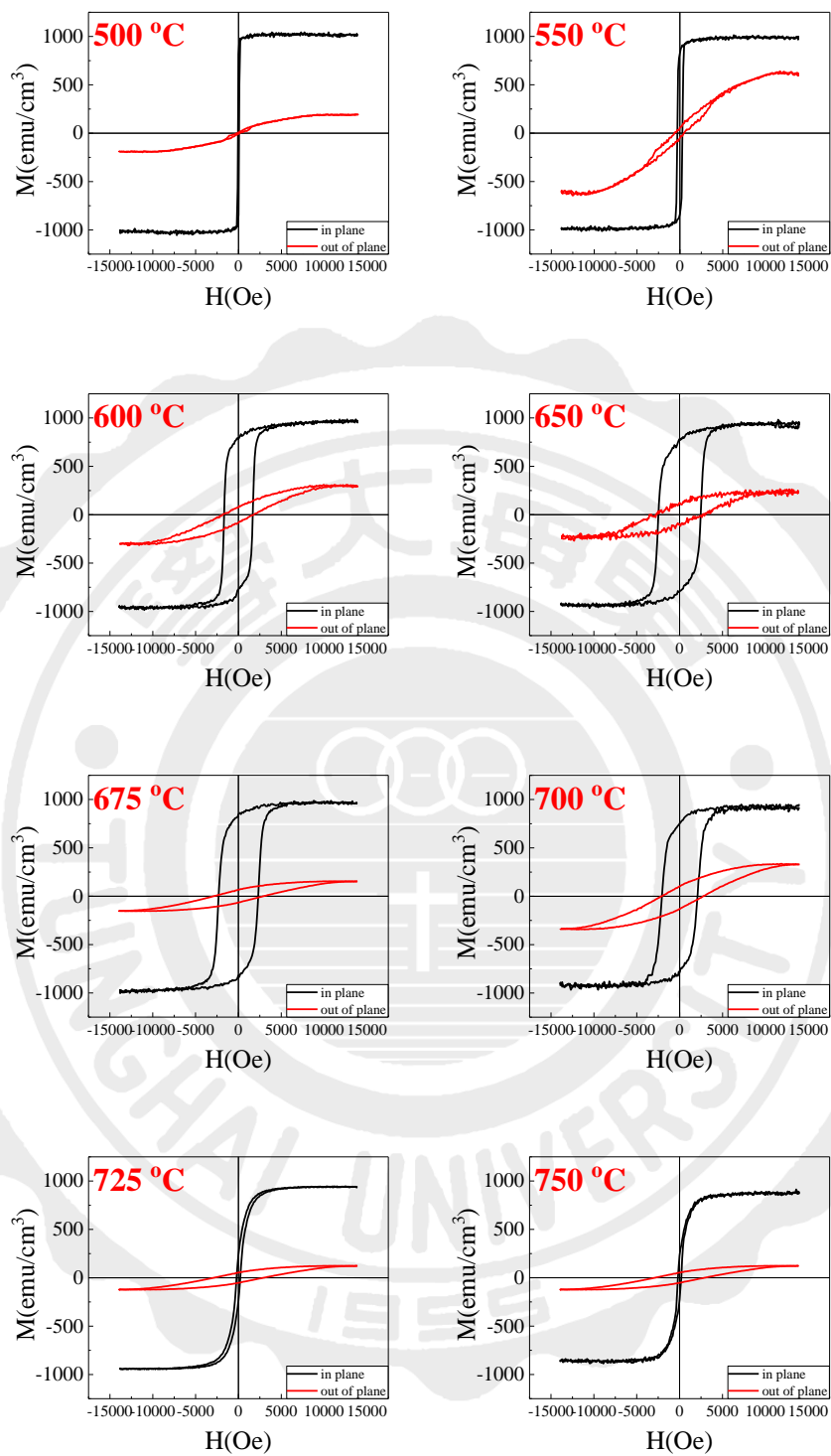


圖 5.1.2 為氮氣下靶距 5 cm 之 FePd 薄膜經不同後退火溫度之磁滯曲線圖。

根據 5.1.2 作分析彙整其磁性圖於表 5.1.2。圖 5.1.3 為氮氣後 FePd 薄膜之飽和與殘餘磁化量隨不同後退火溫度之變化圖。由圖可知，兩磁化量都隨之下降。圖 5.1.4 矯頑磁力隨不同後退火溫度之變化圖。此可看到矯頑磁力隨退火溫度提升而明顯提高，當退火溫度在 650 °C 時呈現出最高矯頑磁力。圖 5.1.5 為磁能積隨不同後退火溫度之變化圖。磁能積隨著退火溫度上升而也有所提升，在 650 °C 時，其因有高矯頑磁力而呈較高磁能積為 9.8 MGOe。

表 5.1.2 氮氣下靶距 5 cm 之 FePd 薄膜經不同溫度後退火之飽和磁化量、殘餘磁化量、矯頑磁力及磁能積一覽表

$D=5$ $,N^2$	$M_s(\text{emu/cm}^3)$	$M_r(\text{emu/cm}^3)$	$H_c(\text{Oe})$	$BH_{\max}(\text{MGOe})$
500 °C	997	920	70	0.7
550 °C	979	850	340	1.6
600 °C	955	800	1670	7.6
650 °C	931	780	2490	9.2
675 °C	911	770	2310	9.8
700 °C	898	750	2080	7.9
725 °C	877	290	240	0.5
750 °C	864	250	200	0.2

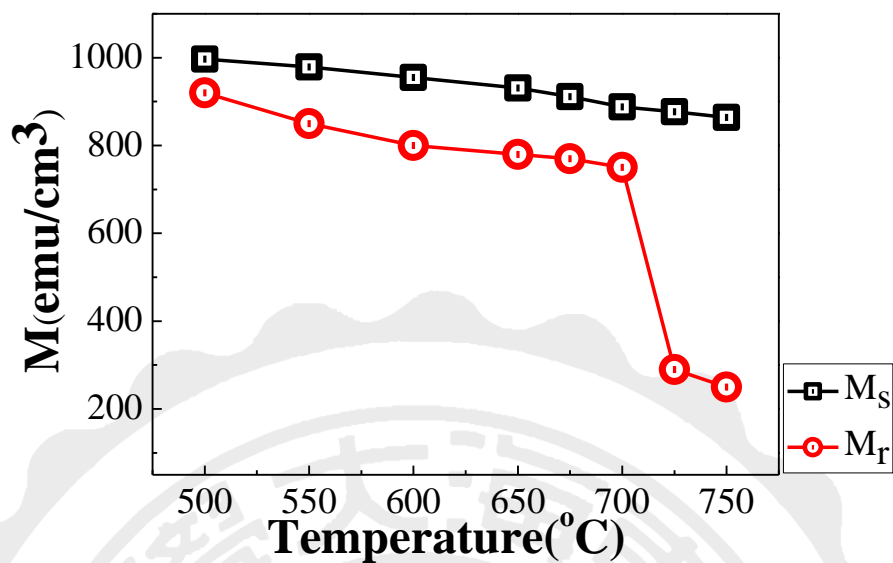


圖 5.1.3 氮氣下靶距 5 cm 之 FePd 薄膜飽和磁化量及殘餘磁化量隨不同後退火溫度之變化圖。

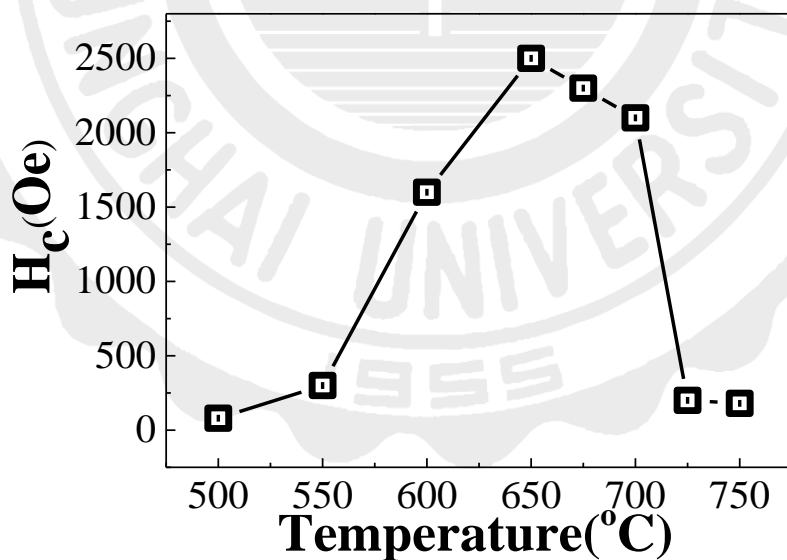


圖 5.1.4 氮氣下靶距 5 cm 之 FePd 薄膜經不同溫度退火之水平矯頑磁力圖。

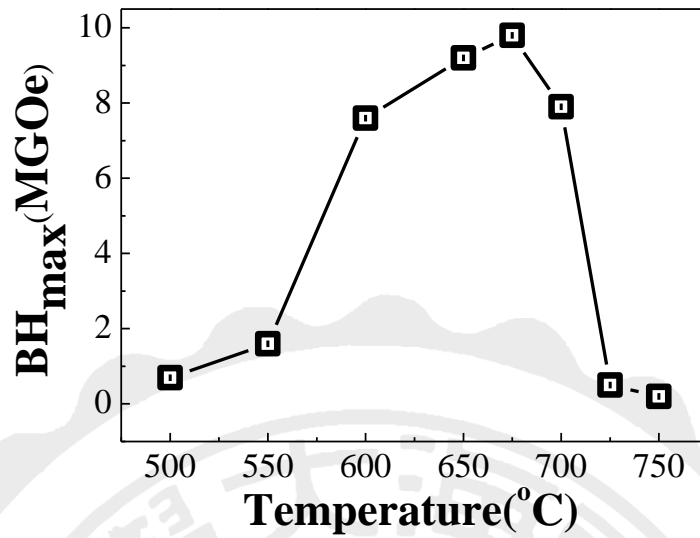


圖 5.1.5 氮氣下靶距 5 cm 之 FePd 經不同溫度退火之磁能積變化圖。

圖 5.1.6 為氮氣下鍍製 Fe<sub>50</sub>Pd<sub>50</sub> 薄膜經不同後退火溫度之 SEM 圖。隨著溫度上升，其表面顆粒些微增大，可以發現到說使用氮氣後表面有明顯的波紋與細小的孔洞，可能是氮氣鍍製關係。

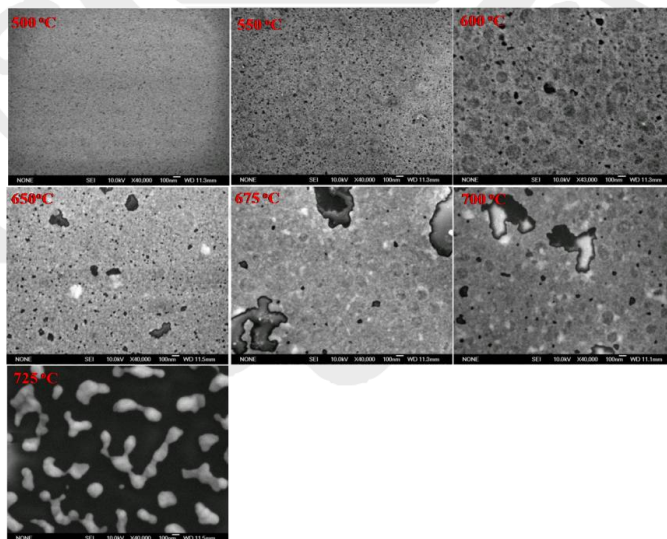


圖 5.1.6 氮氣下靶距 5 cm FePd 薄膜經不同退火溫度後退火之

SEM 圖。





圖 5.1.7 為氮氣下鍍製  $\text{Fe}_{50}\text{Pd}_{50}$  薄膜經不同後退火溫度之 MFM 圖。  
隨著溫度上升，磁區隨之增大。

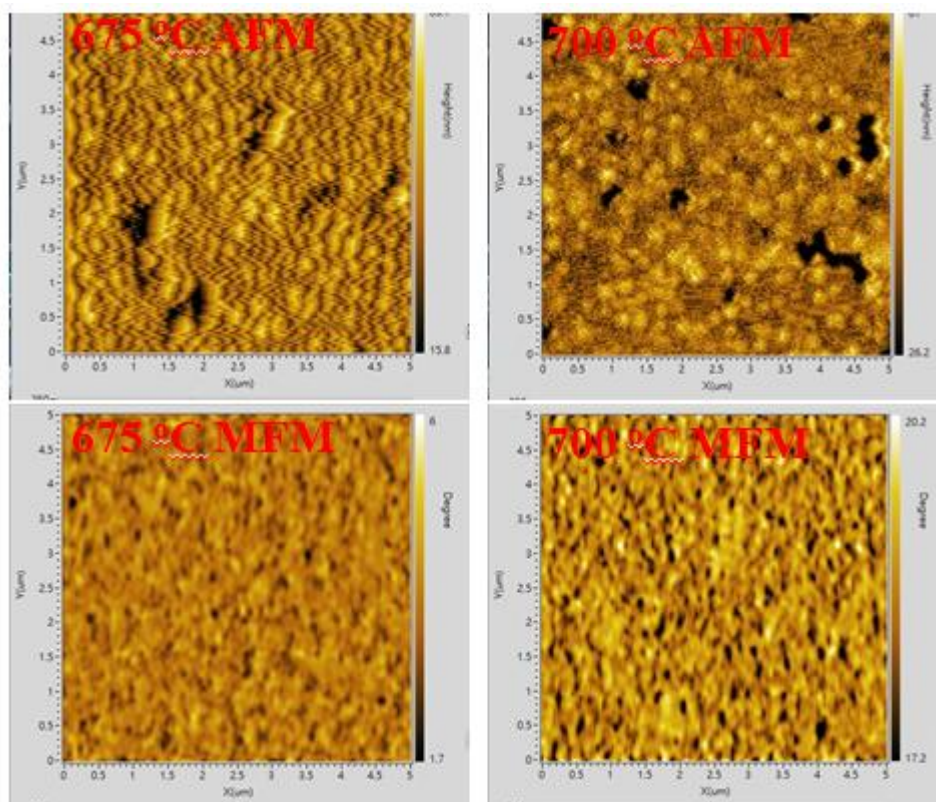


圖 5.1.7 氮氣下靶距 5 cm  $\text{FePd}$  薄膜經不同退火溫度後退火之 MFM 圖。

## 5-1-2 靶距 10 cm 下以射頻濺鍍氮氣沉積 FePd 薄膜經由不同溫度後退火之結構及磁性研究

圖 5.1.8 為靶距 10 cm 氮氣鍍製 Fe<sub>50</sub>Pd<sub>50</sub> 薄膜經不同後退火溫度之 XRD 圖。在初鍍態時呈現(111)繞射峰，隨著退火溫度升高，(111)繞射峰有明顯增強趨勢。

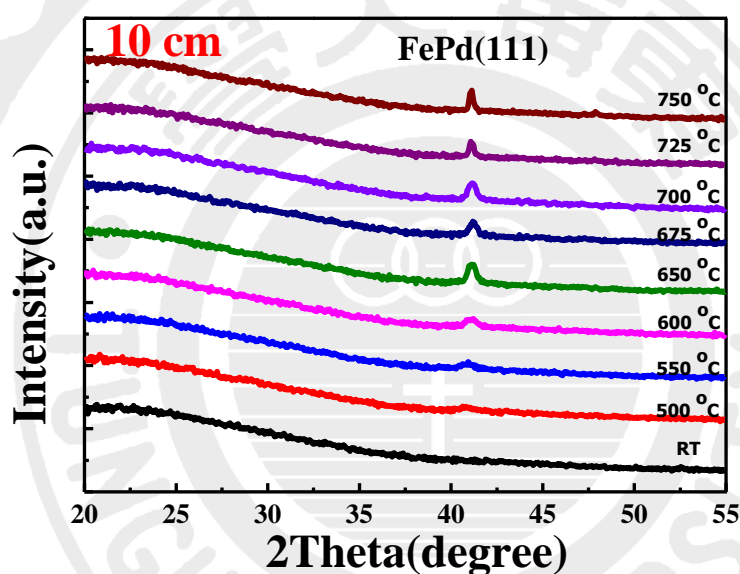


圖 5.1.8 氮氮氣下靶距 10 cm FePd 薄膜經不同退火溫度後退火之 XRD 圖。

圖 5.1.9 為靶距 10 cm 氮氣鍍製 Fe<sub>50</sub>Pd<sub>50</sub> 薄膜於玻璃基板經不同退火溫度後退火之磁滯曲線圖。由圖可以觀察到藉由改變氣體在靶距 10 cm 皆有較好的磁性。

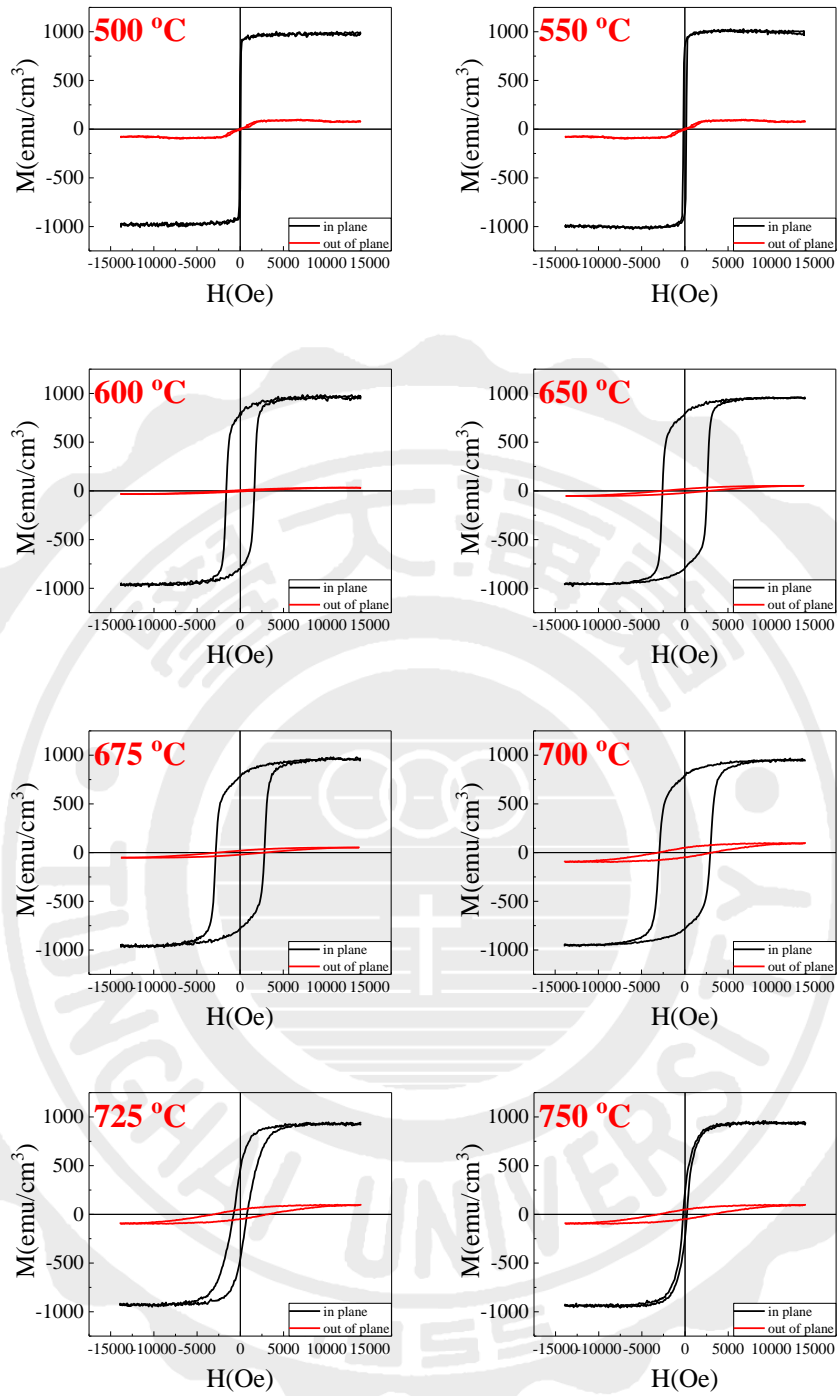


圖 5.1.9 為氮氣下靶距 10 cm FePd 薄膜經不同退火溫度後退火之磁滯曲線圖。

根據 5.1.9 作分析彙整其磁性圖於表 5.1.3。圖 5.1.10 為氮氣後 FePd 薄膜之飽和磁化量和殘餘磁化量。從圖中可以觀察到，隨著溫度提高，飽和磁化量和殘餘磁化量隨之慢慢下降。圖 5.1.11 為矯頑磁力隨後退火溫度變化圖。矯頑磁力隨後退火溫度提升，當溫度至 725 °C 大幅下降。圖 5.1.12 為磁能積隨不同後退火溫度之變化圖。磁能積隨著退火溫度上升而也有所提升，在 700 °C 時，其因有高矯頑磁力而呈較高磁能積為 10.5 MGOe。在加入氮氣後矯頑磁力明顯提升相對磁能積也會隨之提升。

表 5.1.3 氮氣下靶距 10 cm 之 FePd 薄膜經不同溫度後退火之飽和磁化量、殘餘磁化量、矯頑磁力及磁能積一覽表

$D=10$ $,N^2$	$M_s(\text{emu/cm}^3)$	$M_r(\text{emu/cm}^3)$	$H_c(\text{Oe})$	$BH_{\max}(\text{MGOe})$
500 °C	989	870	60	0.5
550 °C	965	860	180	0.7
600 °C	943	800	1670	7.3
650 °C	921	795	2650	10.2
675 °C	901	790	2800	10.3
700 °C	884	783	3000	10.5
725 °C	864	470	790	1.0
750 °C	833	280	230	0.2

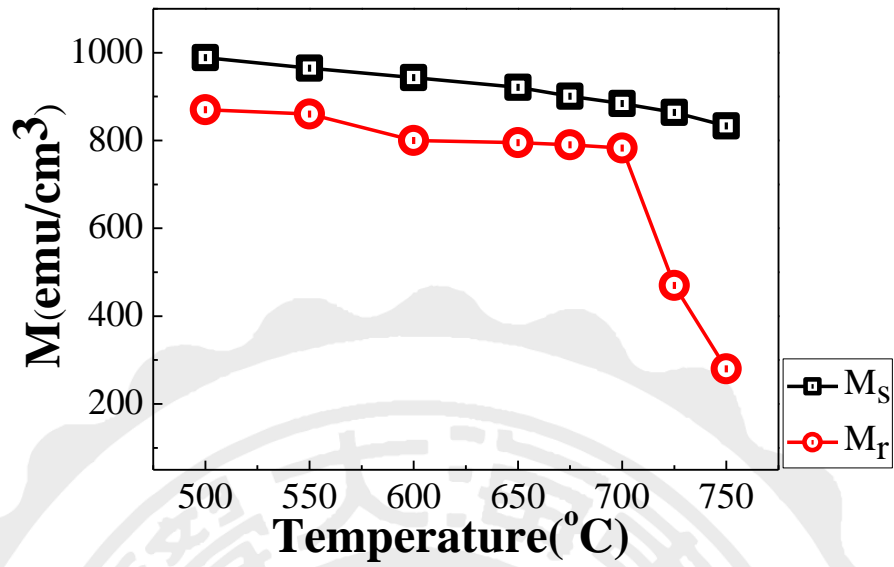


圖 5.1.10 氮氣下靶距 10 cm 之 FePd 薄膜飽和磁化量及殘餘磁化量隨不同後退火溫度之變化圖。

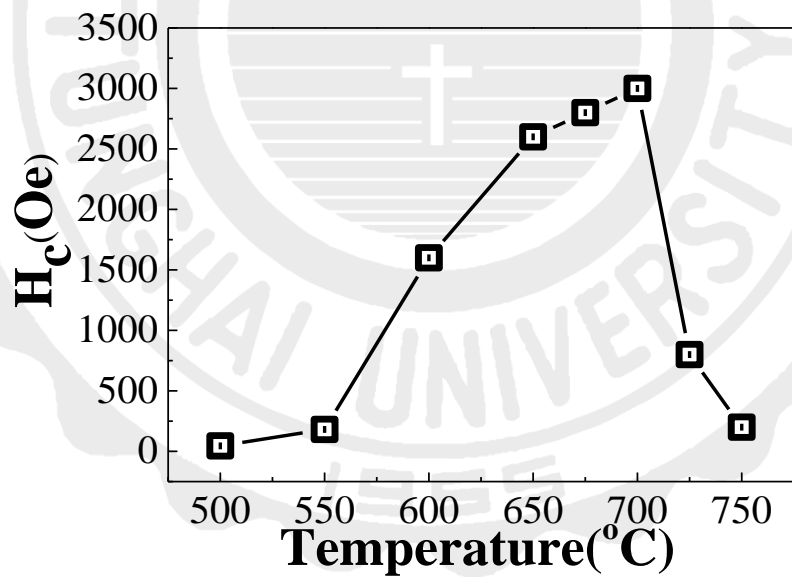


圖 5.1.11 氮氣下靶距 10 cm 之 FePd 薄膜經不同溫度退火之水平矯頑磁力圖。

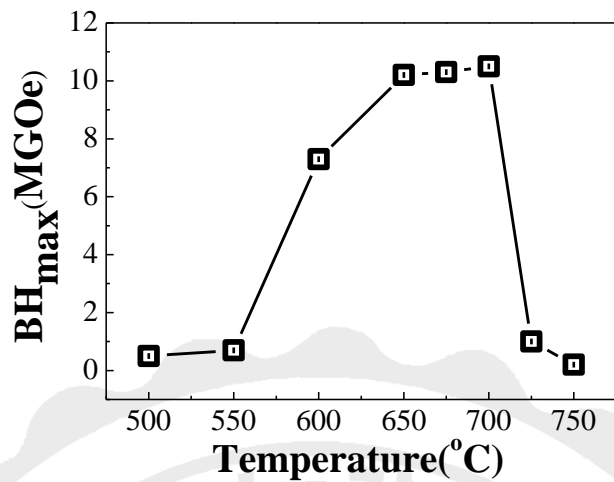


圖 5.1.12 氮氣下靶距 10 cm 之 FePd 經不同溫度退火之磁能積變化圖。

圖 5.1.13 為氮氣下鍍製 Fe<sub>50</sub>Pd<sub>50</sub> 薄膜經不同溫度後退火之 SEM 圖。隨著溫度上升，晶粒隨之增大伴著細小的孔洞，溫度越高孔洞越大，當溫度到 725 °C 表面劇烈收縮，產生連續的島狀結構。

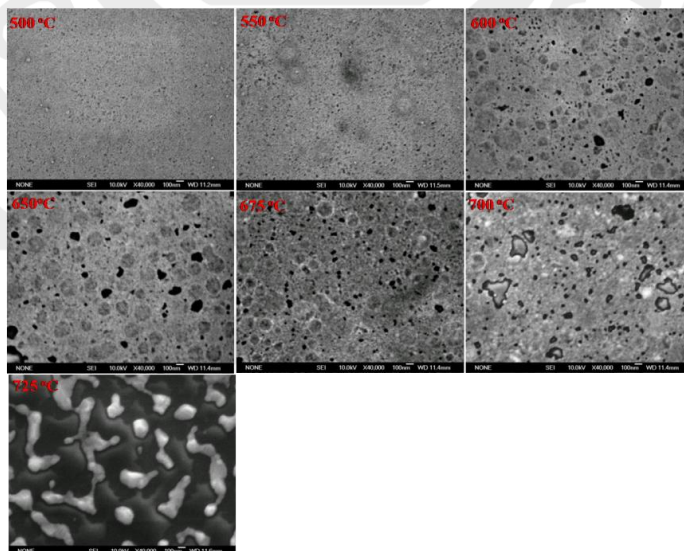


圖 5.1.13 氮氣下靶距 10 cm FePd 薄膜經不同退火溫度後退火之

SEM 圖。



圖 5.1.13 為氮氣下鍍製  $\text{Fe}_{50}\text{Pd}_{50}$  薄膜經不同溫度後退火之 MFM 圖。隨著退火溫度增加，磁區隨之增大。

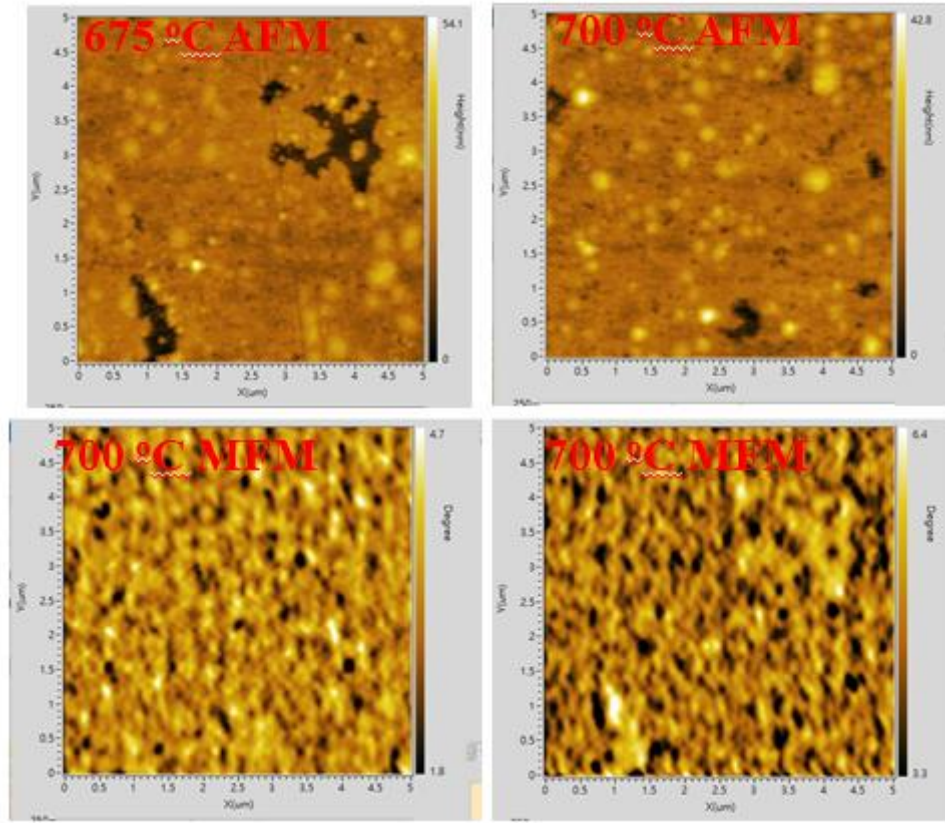


圖 5.1.14 氮氣下靶距 10 cm FePd 薄膜經不同退火溫度後退火之 MFM 圖。



### 5-1-3 射頻濺鍍靶距 12.5 cm 氮氣下沉積 FePd 薄膜經由不同退火溫度之結構及磁性影響

圖 5.1.15 靶距 12.5 cm 氮氣鍍製 Fe<sub>50</sub>Pd<sub>50</sub> 薄膜經不同後退火溫度之 XRD 圖。在初鍍態時呈現(111)繞射峰，隨著退火溫度升高，(111)繞射峰有明顯增強趨勢。

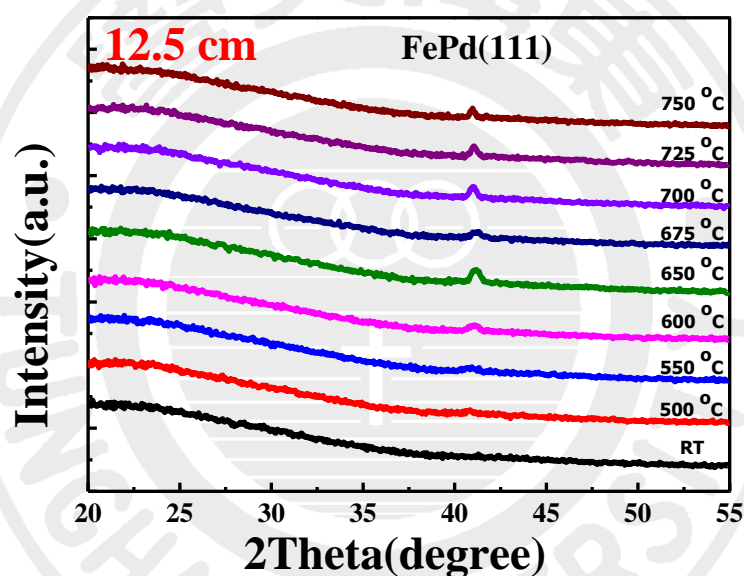


圖 5.1.15 氮氣下靶距 12.5 cm FePd 薄膜經不同退火溫度後退火之 XRD 圖。

圖 5.1.16 為靶距 12.5 cm 鍍製 Fe<sub>50</sub>Pd<sub>50</sub> 薄膜於玻璃基板經不同退火溫度後退火之磁滯曲線圖。由圖可知。由改變氣體在靶距 12.5 cm 有著高的矯頑磁力，當溫度超過 700 °C 會發現到會由水平異相性轉變為等方性。

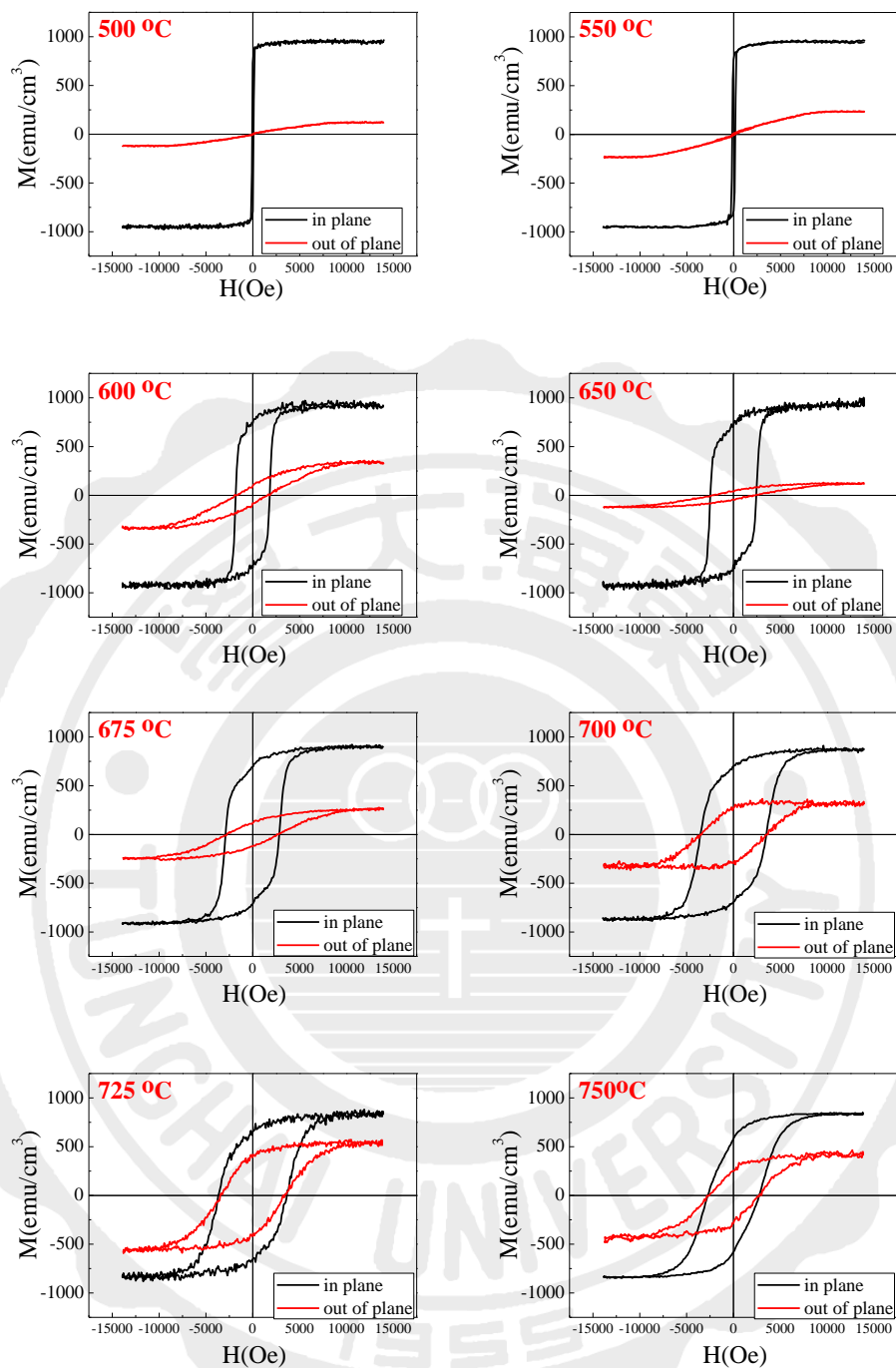


圖 5.1.16 為氮氣下靶距 12.5 cm FePd 薄膜經不同退火溫度後退火之磁滯曲線圖。

根據 5.1.16 作分析彙整其磁性圖於表 5.1.4。圖 5.1.17 為氮氣後 FePd 薄膜之飽和磁化量和殘餘磁化量。從圖中可以觀察到，隨著溫度提高，飽和磁化量和殘餘磁化量隨之慢慢下降。圖 5.1.18 為矯頑磁力隨退火溫度之變化圖。由圖可知，矯頑磁力隨著退火溫度提升而明顯提高，當退火溫度在 725 °C 時，呈現出最高矯頑磁力為 3.7 kOe，而溫度持續提升到 750 °C 時，矯頑磁力顯著下降。圖 5.1.19 為磁能積隨退火溫度變化圖。磁能積隨著退火溫度上升也有所提升，並且在 700 °C 時，其因有高矯頑磁力，故可獲得相當高的磁能積為 8.8 MGOe。

表 5.1.4 氮氣下靶距 12.5 cm 之 FePd 薄膜經不同溫度後退火之飽和磁化量、殘餘磁化量、矯頑磁力及磁能積一覽表

D = 12.5, N <sub>2</sub>	$M_s$ (emu/cm <sup>3</sup> )	$M_r$ (emu/cm <sup>3</sup> )	$H_c$ (Oe)	(BH) <sub>max</sub> (MGOe)
500 °C	975	820	75	0.1
550 °C	955	779	170	0.2
600 °C	929	749	1800	7.8
650 °C	908	733	2500	8.5
675 °C	894	710	3000	8.6
700 °C	878	702	3550	8.8
725 °C	868	653	3700	8.5
750 °C	846	585	2700	4.1

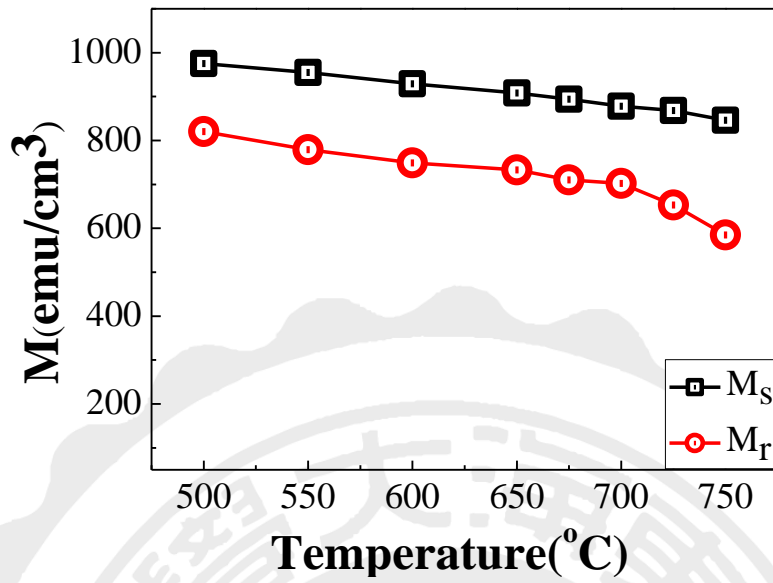


圖 5.1.17 氮氣下靶距 12.5 cm 之 FePd 薄膜飽和磁化量及殘餘磁化量隨後退火溫度變化圖。

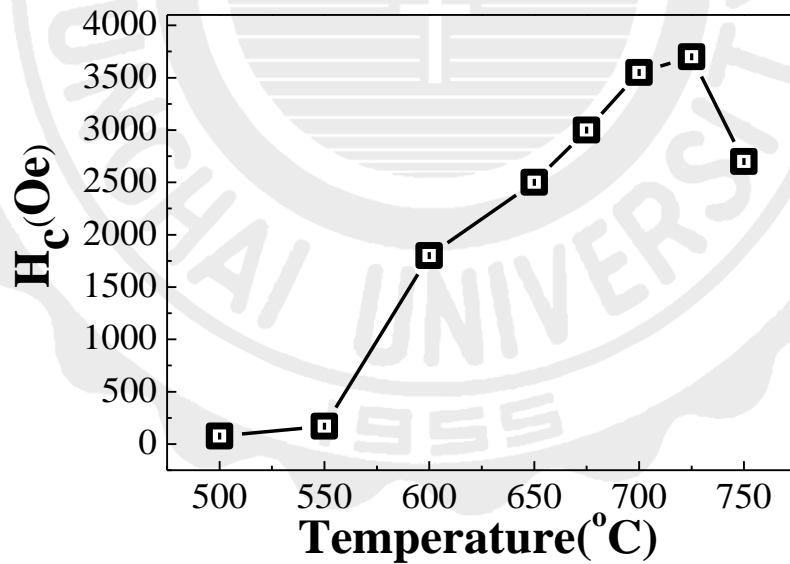


圖 5.1.18 氮氣下靶距 12.5 cm 之 FePd 薄膜水平矯頑磁力隨後退火溫度變化圖。

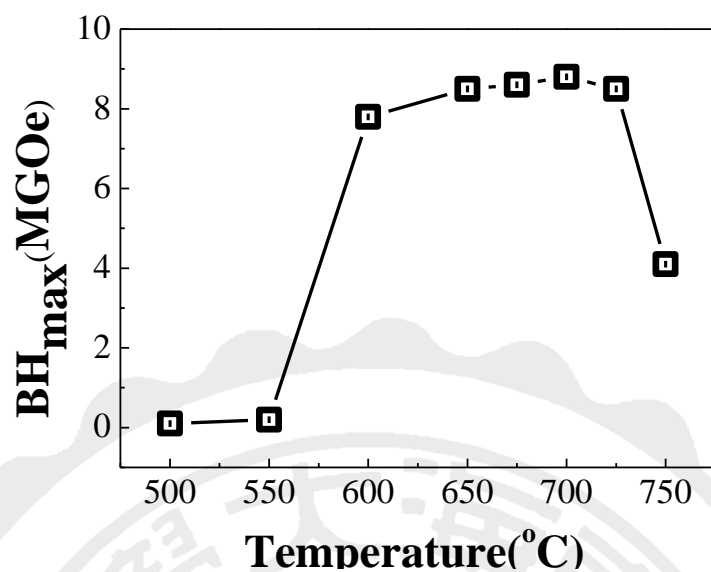


圖 5.1.19 氮氣下靶距 12.5 cm 之 FePd 薄膜磁能積隨後退火溫度變化圖。

圖 5.1.20 為氮氣下鍍製 Fe<sub>50</sub>Pd<sub>50</sub> 薄膜經不同溫度後退火之 SEM 圖。隨著溫度上升，晶粒隨之增大伴著細小的孔洞，溫度越高孔洞越大，當溫度到 675°C 會有不規則大小的晶粒。

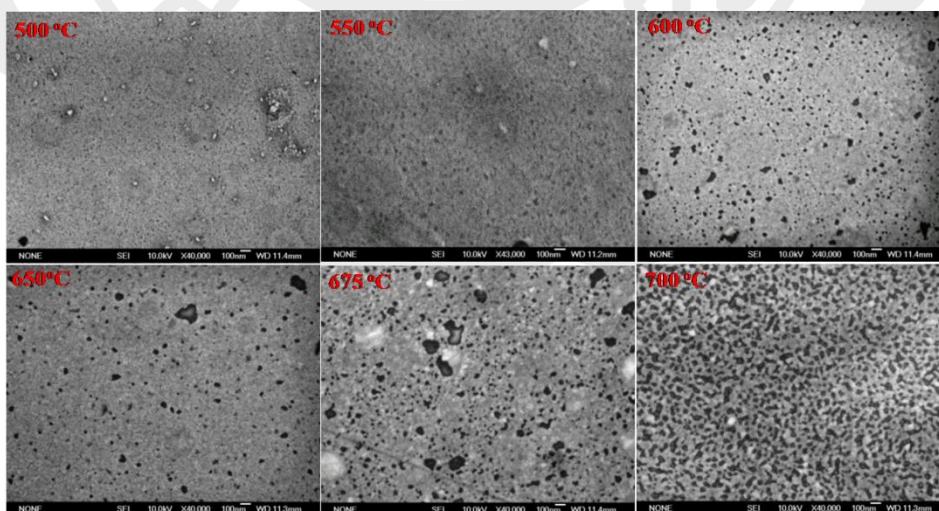


圖 5.1.20 氮氣下靶距 12.5 cm FePd 薄膜經不同退火溫度後退火之 SEM 圖。

圖 5.1.21 為氮氣後 FePd 薄膜經不同溫度後退火之 TEM 圖。隨著溫度上升，晶粒隨之增大，晶粒尺寸約 50 nm 。

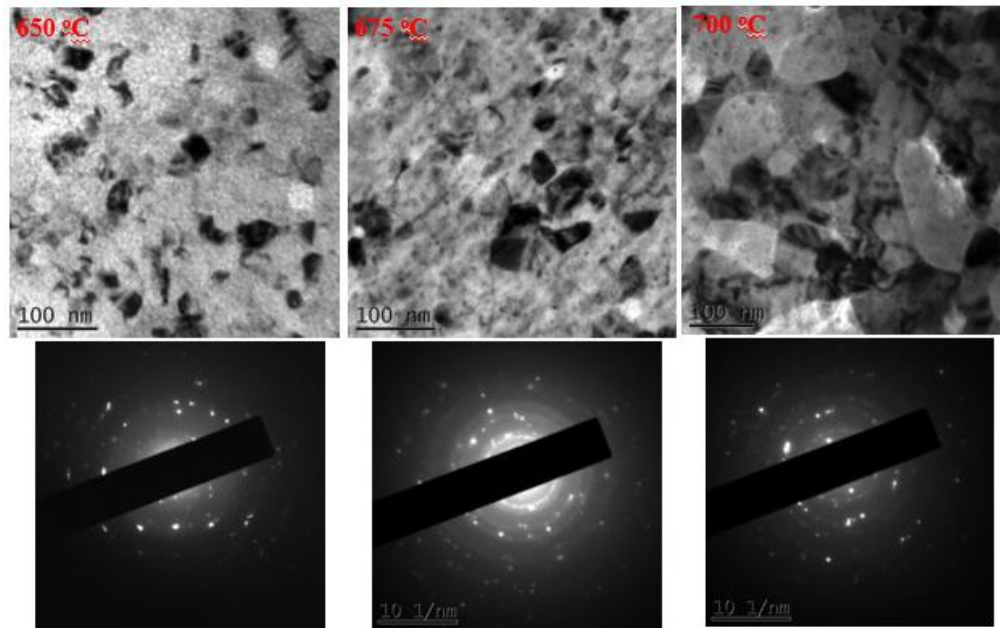


圖 5.1.21 氮氣下靶距 12.5 cm FePd 薄膜經不同退火溫度後退火之 TEM 圖。

圖 5.1.212 為氮氣後 FePd 薄膜經不同溫度後退火之 MFM 圖。  
隨著溫度上升，磁區隨之增加。

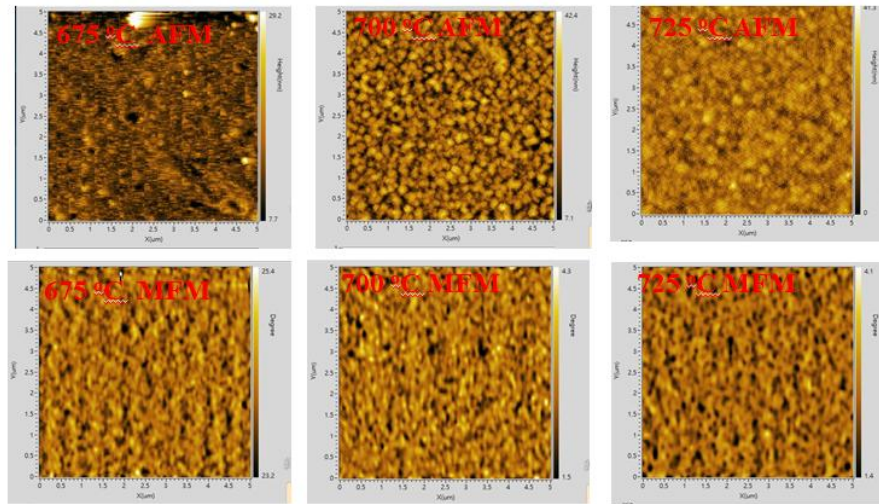


圖 5.1.22 氮氣下靶距 12.5 cm FePd 薄膜經不同退火溫度後退火之  
MFM 圖。

#### 5-1-4 射頻濺鍍氮氣下沉積並改變靶距效應之 FePd 薄膜結構與磁性之探討

本節實驗以射頻濺鍍法氮氣下製備了 Fe<sub>50</sub>Pd<sub>50</sub> 薄膜，並探討不同退火溫度對於 Fe<sub>50</sub>Pd<sub>50</sub> 薄膜結構及磁性之影響。在靶距為 5 cm 的單層 Fe<sub>50</sub>Pd<sub>50</sub> 薄膜於不同溫度下退火時，樣品藉由 XRD 分析皆呈現(111)繞射峰，繞射峰隨之增強，在磁滯曲線上可以觀察隨著溫度提升矯頑磁力隨之提升，最高值出現在 650 °C 最高值為 2.5 kOe 磁能積 9.8 MGOe，氮氣沉積比氫氣在靶距為 5 cm，由 XRD 圖 5.1.20 - 5.1.27 可知，隨著退火溫度改變，氮氣所製備的 FePd 薄膜相比氫氣鍍製，角度有明顯往低角度偏移。而磁性之提升可能與初鍍態壓縮應力較大有關。

在靶距為 10 cm 時，樣品有較強 (111)繞射峰，隨著退火溫度增加在退火溫度為 600°C - 650 °C 因有較好的序化，而有較高矯頑磁力，為 3.0 kOe。在靶距為 10 cm 退火溫度為 650 °C，其有出現較高的磁能積，最大能積為 10.5 MGOe，而退火溫度為 725 °C，都有下降的趨勢。

當靶距為 12.5 cm 時，樣品有著微弱的(111)，隨著退火溫度提升，繞射峰隨之增強，磁滯曲線上可以觀察到磁性質有著明顯的增加而最高的矯頑磁力為靶距為 12.5 cm，當退火溫度為 700 °C，由水平異向性逐漸轉變為等方性，其有大的矯頑磁力為 3.7 kOe 及最高的磁能積 8.8 MGOe。當濺鍍氣氛改變成氮氣，在相同製成參數下射頻濺鍍上相較與氫氣濺鍍磁性皆有更好的表現，並且靶距的改變進行不同溫度退火，矯頑磁力皆大幅提升，這是值得關注的。



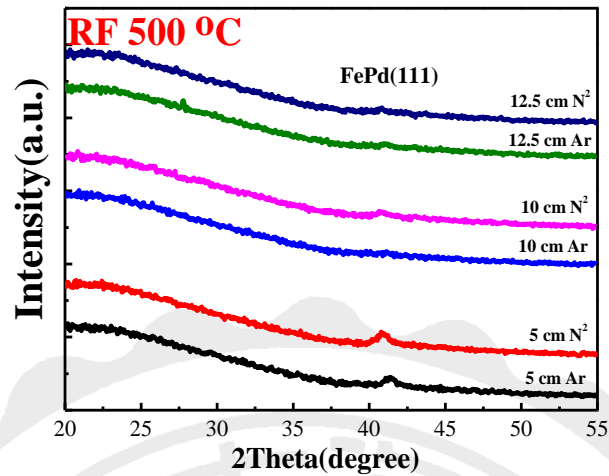


圖 5.1.23 氬氣與氮氣鍍製 FePd 薄膜經由 500 °C 退火溫度 XRD 圖。

表 5.1.5 氬氣與氮氣鍍製 FePd 薄膜經由 500 °C 退火溫度 XRD 圖及角度和半高寬一覽表。

Temperature(°C)	FePd(111)	
	Peak(°)	FWHM(°)
500°C		
D= 5cm , Ar	41.365	0.726
D= 5cm , N <sup>2</sup>	40.878	0.926
D= 10cm , Ar	41.149	0.148
D= 10cm , N <sup>2</sup>	40.772	0.834
D= 12.5cm , Ar	40.885	2.033
D= 12.5cm , N <sup>2</sup>	40.750	0.720

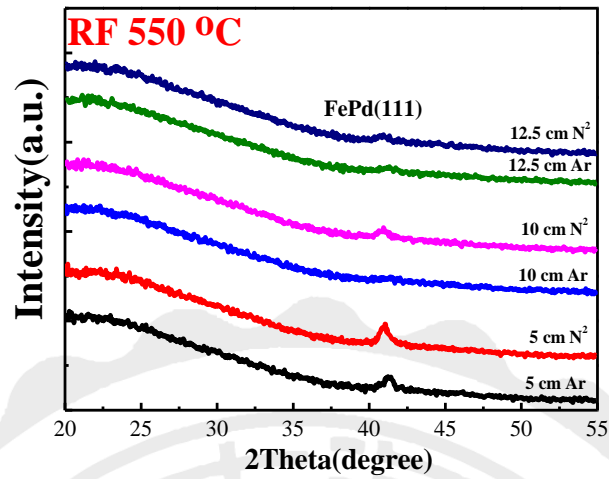


圖 5.1.24 氫氣與氮氣鍍製 FePd 薄膜經由 550 °C 退火溫度 XRD 圖。

表 5.1.6 氫氣與氮氣鍍製 FePd 薄膜經由 550 °C 退火溫度 XRD 圖及角度和半高寬一覽表。

Temperature(°C)	FePd(111)	
550°C	Peak(°)	FWHM(°)
D= 5cm , Ar	41.256	0.684
D= 5cm , N <sup>2</sup>	40.987	0.749
D= 10cm , Ar	40.948	6.468
D= 10cm , N <sup>2</sup>	40.874	1.083
D= 12.5cm , Ar	41.036	2.549
D= 12.5cm , N <sup>2</sup>	40.812	1.235

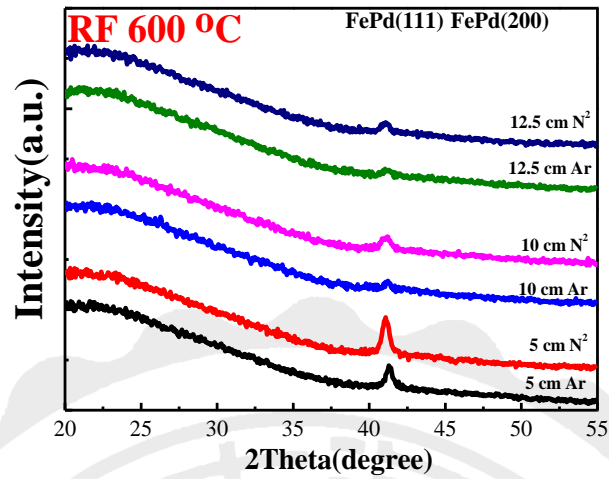


圖 5.1.25 氬氣與氮氣鍍製 FePd 薄膜經由 600°C 退火溫度 XRD 圖。

表 5.1.7 氬氣與氮氣鍍製 FePd 薄膜經由 600 °C 退火溫度 XRD 圖及角度和半高寬一覽表。

Temperature(°C)	FePd(111)	
	Peak(°)	FWHM(°)
600°C		
D= 5cm , Ar	41.311	0.476
D= 5cm , N <sup>2</sup>	41.080	0.561
D= 10cm , Ar	41.205	0.325
D= 10cm , N <sup>2</sup>	41.079	0.819
D= 12.5cm , Ar	41.139	0.733
D= 12.5cm , N <sup>2</sup>	41.036	0.708

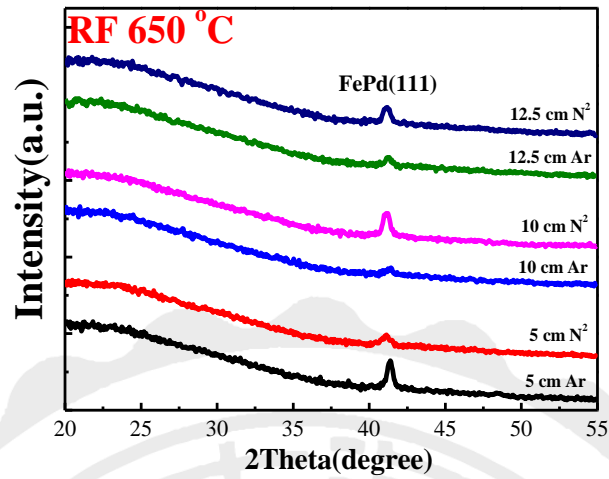


圖 5.1.26 氬氣與氮氣鍍製 FePd 薄膜經由 650°C 退火溫度 XRD 圖。

表 5.1.8 氬氣與氮氣鍍製 FePd 薄膜經由 650 °C 退火溫度 XRD 圖及角度和半高寬一覽表。

Temperature(°C)	FePd(111)	
650°C	Peak(°)	FWHM(°)
D= 5cm , Ar	41.359	0.398
D= 5cm , N <sup>2</sup>	41.070	0.831
D= 10cm , Ar	41.309	0.555
D= 10cm , N <sup>2</sup>	41.131	0.514
D= 12.5cm , Ar	41.239	0.457
D= 12.5cm , N <sup>2</sup>	41.138	0.535

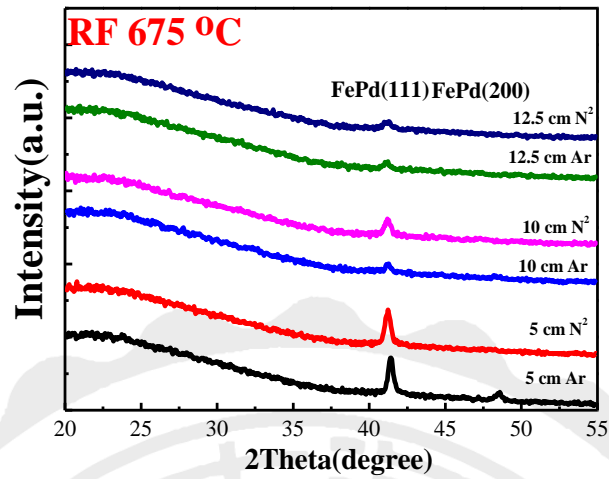
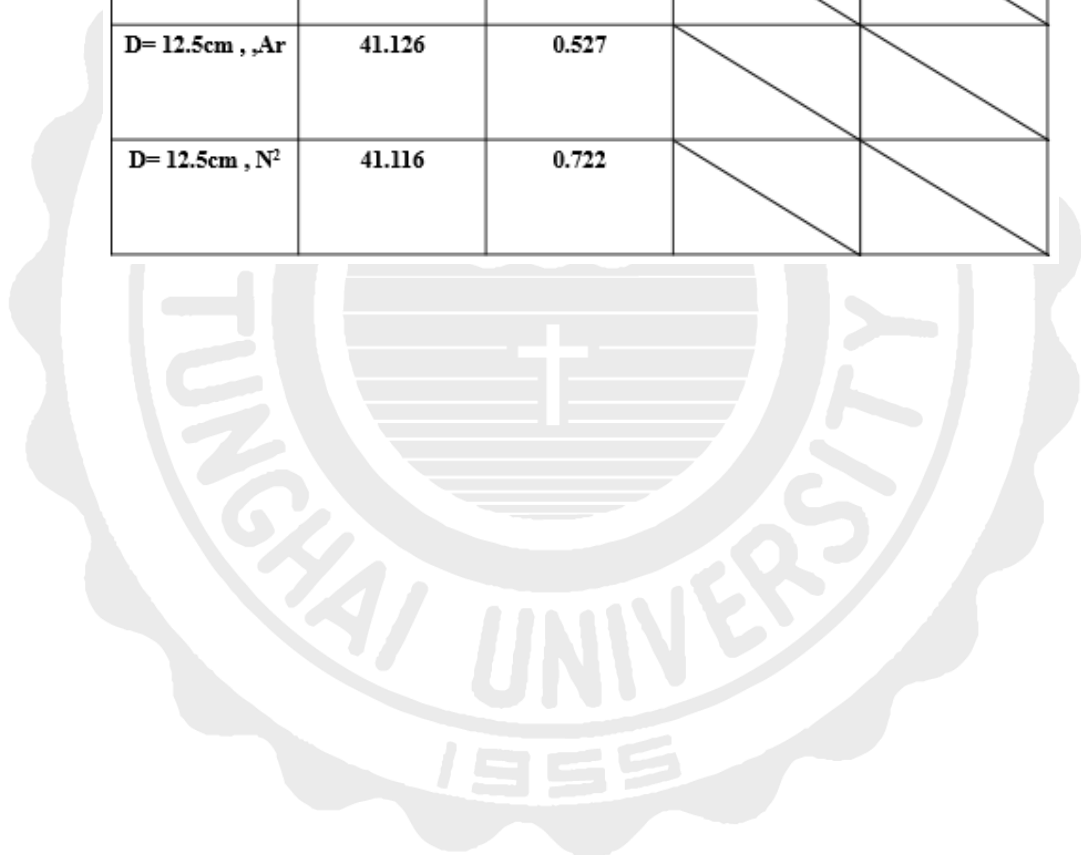


圖 5.1.27 氬氣與氮氣鍍製 FePd 薄膜經由 675 °C 退火溫度 XRD 圖及角度和半高寬彙整圖。

表 5.1.9 氬氣與氮氣鍍製 FePd 薄膜經由 675 °C 退火溫度 XRD 圖及角度和半高寬一覽表。

Temperature(°C)	FePd(111)		FePd(200)	
	Peak(°)	FWHM(°)	Peak(°)	FWHM(°)
675°C				
D= 5cm , Ar	41.4119	0.355	48.514	0.430
D= 5cm , N <sup>2</sup>	41.216	0.429		
D= 10cm , Ar	41.219	0.3501		
D= 10cm , N <sup>2</sup>	41.193	0.486		
D= 12.5cm , Ar	41.126	0.527		
D= 12.5cm , N <sup>2</sup>	41.116	0.722		



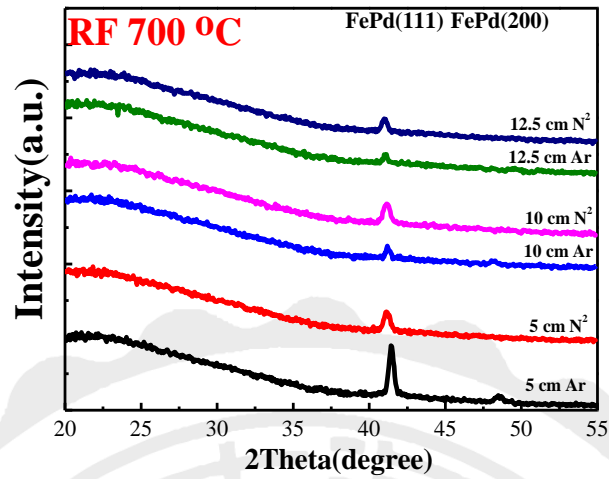


圖 5.1.28 氬氣與氮氣鍍製 FePd 薄膜經由 700 °C 退火溫度 XRD 圖及角度和半高寬彙整圖。

表 5.1.10 氬氣與氮氣鍍製 FePd 薄膜經由 700 °C 退火溫度 XRD 圖及角度和半高寬一覽表。

Temperature(°C)	FePd(111)		FePd(200)	
	Peak(°)	FWHM(°)	Peak(°)	FWHM(°)
700°C				
D= 5cm , Ar	41.452	0.354	48.502	0.618
D= 5cm , N <sub>2</sub>	41.154	0.453		
D= 10cm , Ar	41.213	0.293	48.143	0.536
D= 10cm , N <sub>2</sub>	41.146	0.510		
D= 12.5cm , Ar	41.060	0.286		
D= 12.5cm , N <sub>2</sub>	40.998	0.4200		

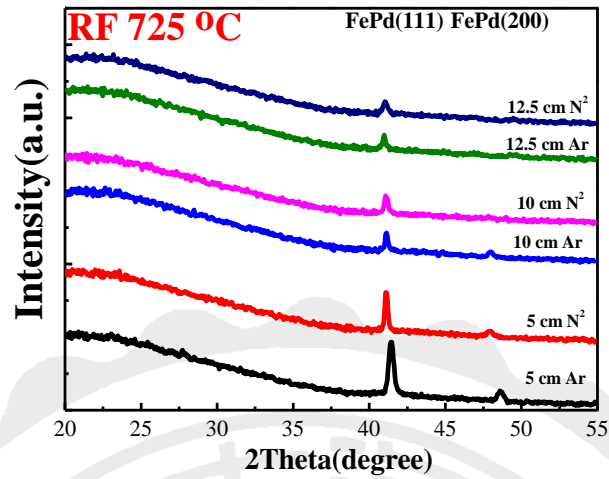


圖 5.1.29 氬氣與氮氣鍍製 FePd 薄膜經由 725 °C 退火溫度 XRD 圖及角度和半高寬彙整圖。

表 5.1.11 氬氣與氮氣鍍製 FePd 薄膜經由 725 oC 退火溫度 XRD 圖及角度和半高寬一覽表。

Temperature(°C)	FePd(111)		FePd(200)	
	Peak(°)	FWHM(°)	Peak(°)	FWHM(°)
D= 5cm,Ar	41.442	0.355	48.622	0.385
D= 5cm,N <sup>2</sup>	41.112	0.209	47.909	0.619
D= 10cm,Ar	41.130	0.204	47.970	0.415
D= 10cm,N <sup>2</sup>	41.106	0.274	47.822	0.216
D= 12.5cm,Ar	40.978	0.249		
D= 12.5cm,N <sup>2</sup>	40.952	0.334		



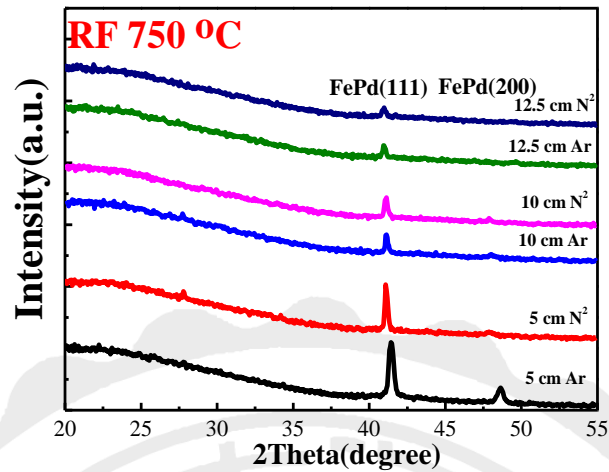


圖 5.1.30 氫氣與氮氣鍍製 FePd 薄膜經由 750 °C 退火溫度 XRD 圖及角度和半高寬彙整圖。

表 5.1.12 氫氣與氮氣鍍製 FePd 薄膜經由 750 °C 退火溫度 XRD 圖及角度和半高寬一覽表。

Temperature(°C)	FePd(111)		FePd(200)	
	Peak(°)	FWHM(°)	Peak(°)	FWHM(°)
750°C				
D= 5cm , Ar	41.443	0.340	48.621	0.406
D= 5cm , N <sup>2</sup>	41.107	0.199	47.890	0.713
D= 10cm , Ar	41.134	0.187	48.026	0.971
D= 10cm , N <sup>2</sup>	41.095	0.224	47.882	0.302
D= 12.5cm , Ar	40.974	0.221		
D= 12.5cm , N <sup>2</sup>	40.954	0.261		

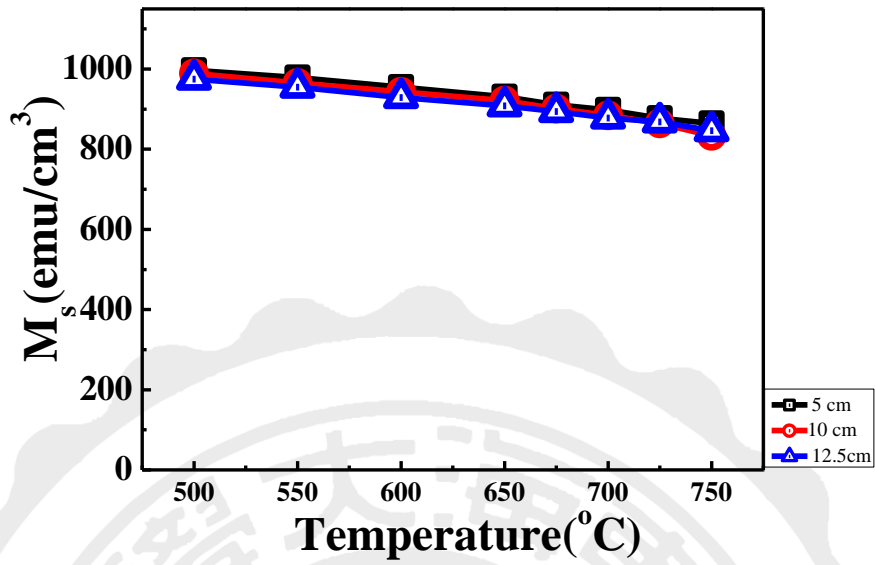


圖 5.1.31 氮氣下改變靶距經由不同溫度退火飽和磁化量。

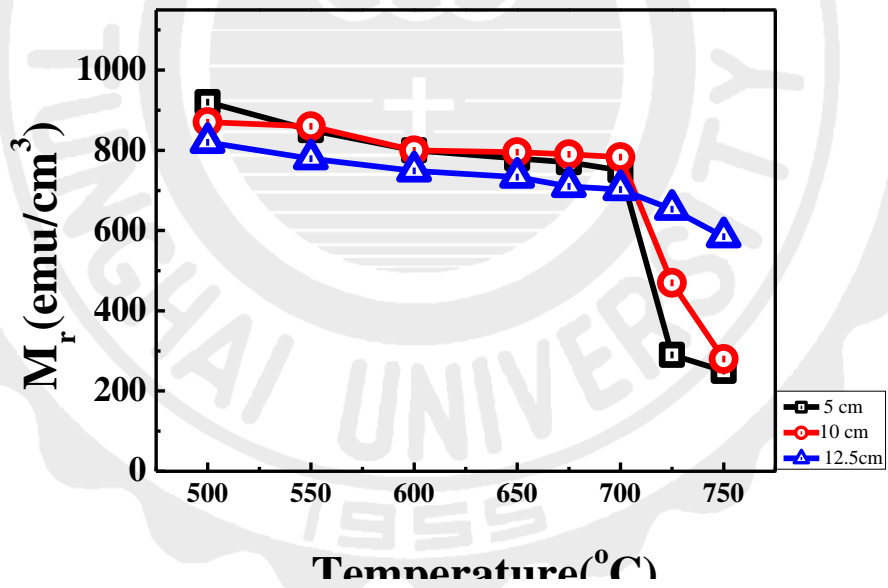


圖 5.1.32 氮氣下改變靶距經由不同溫度退火殘餘磁化量。

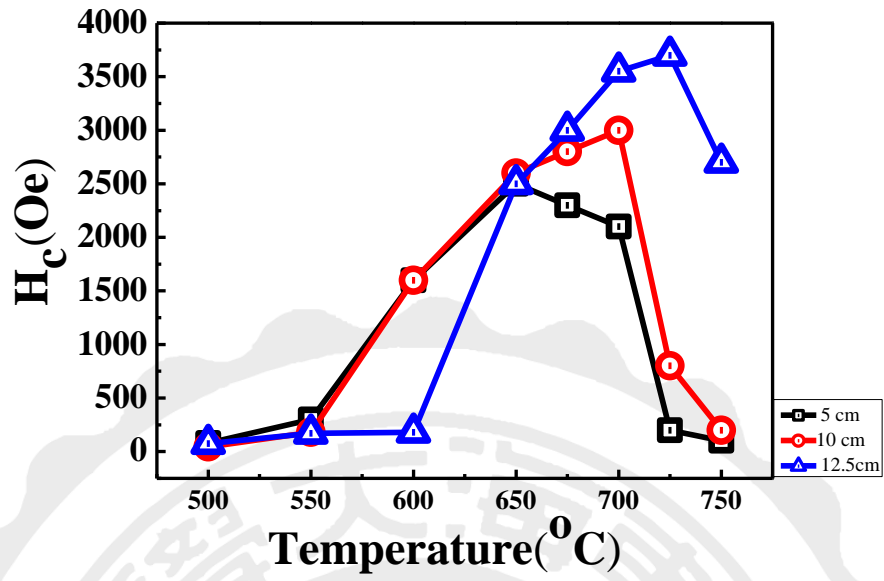


圖 5.1.33 氮氣下改變靶距經由不同溫度退火矯頑磁力變化圖。

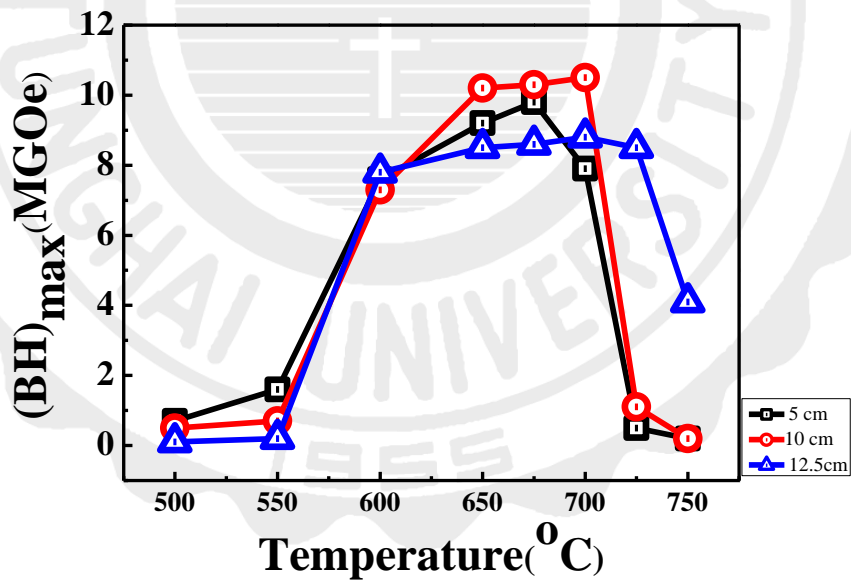


圖 5.1.34 氮氣下改變靶距經由不同溫度退火磁能積變化圖。

## 5-2 氮氣效應對於以直流濺鍍法製備的 Fe<sub>50</sub>Pd<sub>50</sub> 薄膜結構與磁性之影響

本節以直流濺鍍法製備單層 30 nm FePd 薄膜，改變製成條件為濺鍍靶材與基板之間的距離以及濺鍍氣氛，並進行不同溫度後退火，探討不同靶距對 FePd 薄膜結構及磁性之影響。實驗參數如表 5.2.1:

表 5.2.1 實驗參數

濺鍍法	濺鍍功率 (W)/工作壓力 (mTorr)	改變靶距	氣體
直流濺鍍法 (RF)	30/10	5 cm	氮氣(N <sub>2</sub> )
		10 cm	
		12.5 cm	

### 5-2-1 靶距 5 cm，在氮氣下以射頻濺鍍沉積 FePd 薄膜經由不同溫度後退火之結構及磁性研究

圖 5.2.1 為靶距 5 cm 氮氣鍍製 Fe<sub>50</sub>Pd<sub>50</sub> 薄膜經不同後退火溫度之 XRD 圖。在初鍍態時，FePd 薄膜僅出現(111)繞射峰，當退火溫度高於 600 °C 時，才出現(200)繞射峰。隨著退火溫度升高(111)和(200)繞射峰強度都隨之增強，繞射強度變強表示著晶粒大小隨之增加。

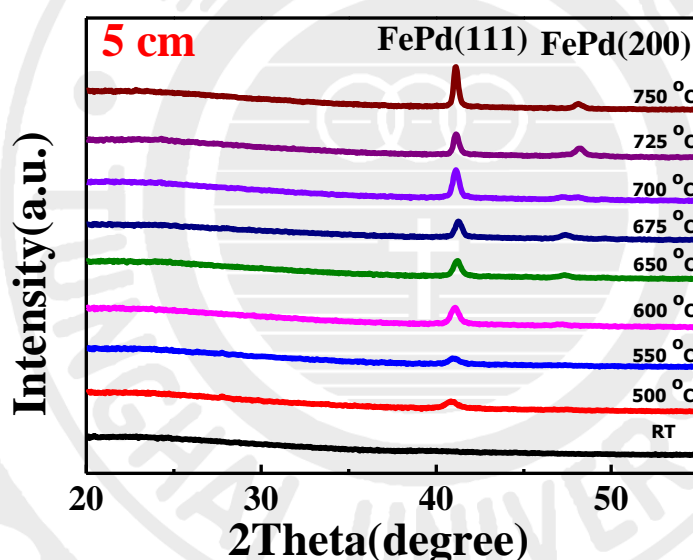


圖 5.2.1 氮氣下靶距 5 cm FePd 薄膜經不同退火溫度後退火之 XRD 圖。

圖 5.2.2 為靶距 5 cm 氮氣鍍製 Fe<sub>50</sub>Pd<sub>50</sub> 薄膜於玻璃基板經不同溫度後退火之磁滯曲線圖。由圖可知，藉由改變濺度氮氣在靶距 5 cm 時，比使用氬氣鍍製較好，磁滯曲線上當退火溫度為 650 °C 有較高的矯頑磁力為 2.6 kOe。

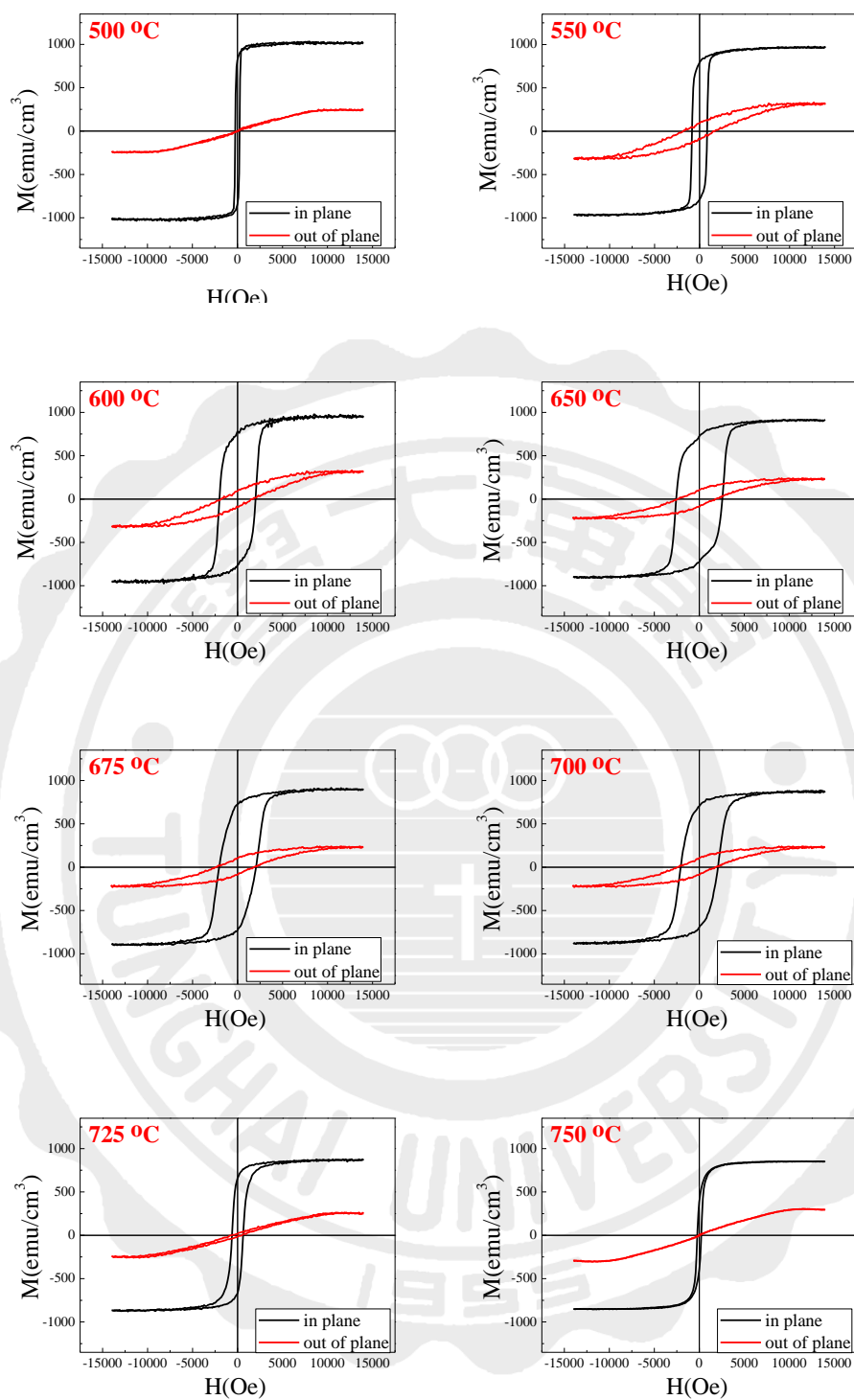


圖 5.2.2 氮氣下靶距 5 cm 之 FePd 薄膜經不同後退火溫度之磁滯曲線

圖。

根據 5.2.2 作分析彙整其磁性圖於表 5.2.2。圖 5.2.3 為氮氣後 FePd 薄膜之飽和與殘餘磁化量隨不同後退火溫度之變化圖。由圖可知，兩磁化量都隨之下降。圖 5.2.4 矯頑磁力隨不同後退火溫度之變化圖。此可看到矯頑磁力隨退火溫度提升而明顯提高，當退火溫度在 650 °C 時呈現出最高矯頑磁力。圖 5.2.5 為磁能積隨不同後退火溫度之變化圖。磁能積隨著退火溫度上升而也有所提升，在 650 °C 時，其因有高矯頑磁力而呈較高磁能積為 8.4 MGOe。

表 5.2.2 氮氣下靶距 5 cm 之 FePd 薄膜經不同溫度後退火之飽和磁化量、殘餘磁化量、矯頑磁力及磁能積一覽表

$D = 5, N_2$	$M_s$ (emu/cm <sup>3</sup> )	$M_r$ (emu/cm <sup>3</sup> )	$H_c$ (Oe)	$(BH)_{max}$ (MGOe)
500 °C	980	890	265	1.1
550 °C	963	792	900	4.3
600 °C	943	776	2000	7.7
650 °C	915	730	2600	8.4
675 °C	894	725	2100	6.3
700 °C	876	705	2100	6.0
725 °C	865	662	630	1.8
750 °C	851	410	270	0.1

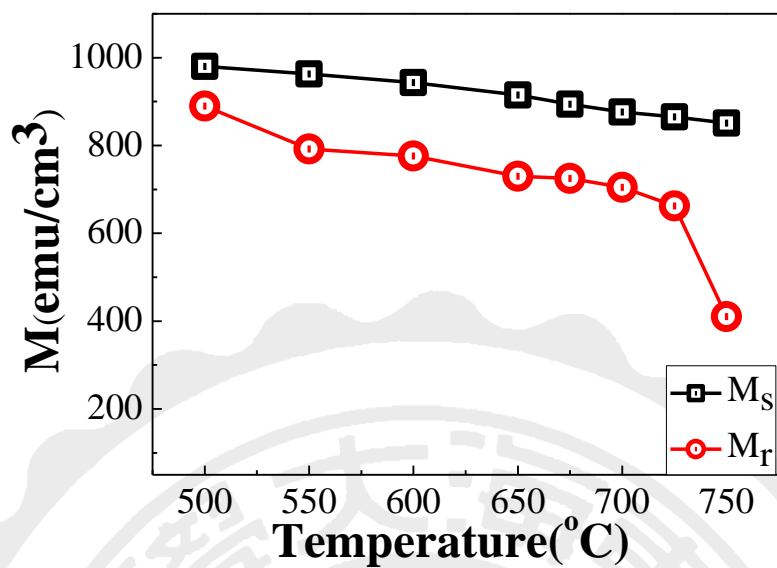


圖 5.2.3 氮氣下靶距 5 cm 之 FePd 薄膜飽和磁化量及殘餘磁化量隨不同後退火溫度之變化圖。

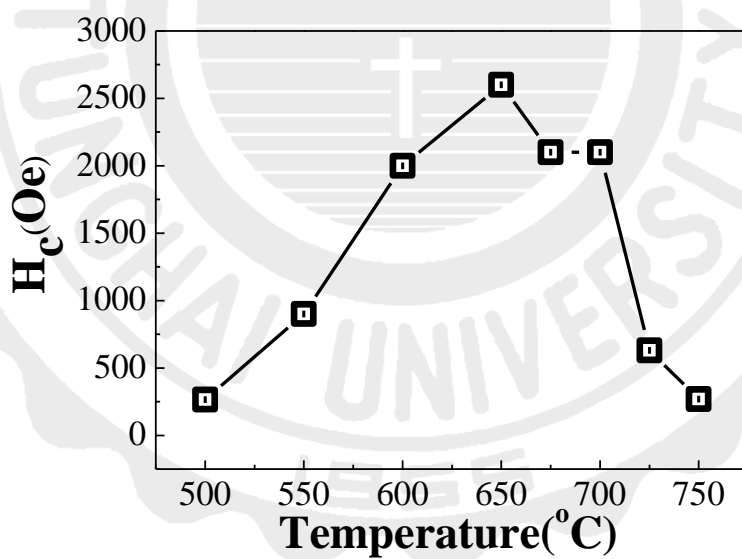


圖 5.2.4 氮氣下靶距 5 cm 之 FePd 薄膜經不同溫度退火之水平矯頑磁力圖。



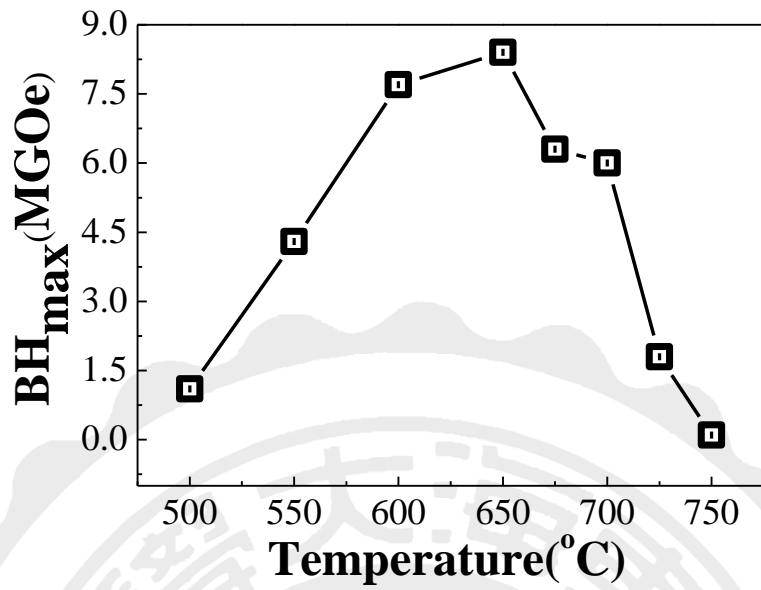


圖 5.2.5 氮氣下靶距 5 cm 之 FePd 經不同溫度退火之磁能積變化圖。

圖 5.2.6 為氮氣下鍍製 Fe<sub>50</sub>Pd<sub>50</sub> 薄膜經不同後退火溫度之 SEM 圖。隨著退火溫度上升，晶粒隨之增大。

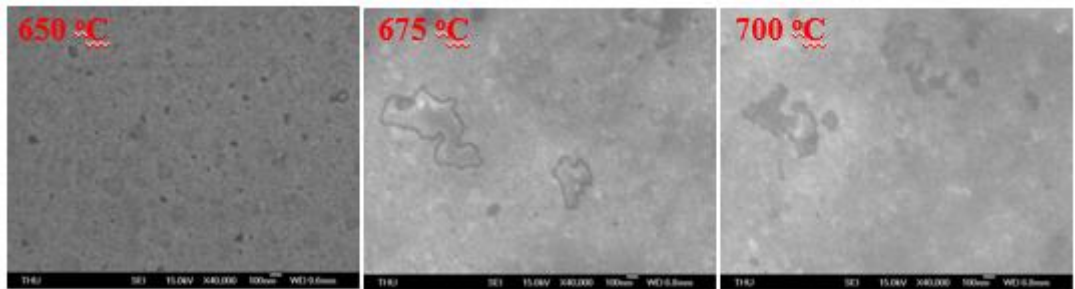


圖 5.2.6 氮氣下靶距 5 cm FePd 薄膜經不同退火溫度後退火之 SEM 圖。

圖 5.2.6 為氮氣下鍍製  $\text{Fe}_{50}\text{Pd}_{50}$  薄膜經不同後退火溫度之 MFM 圖。隨著退火溫度上升，磁區隨之增大。

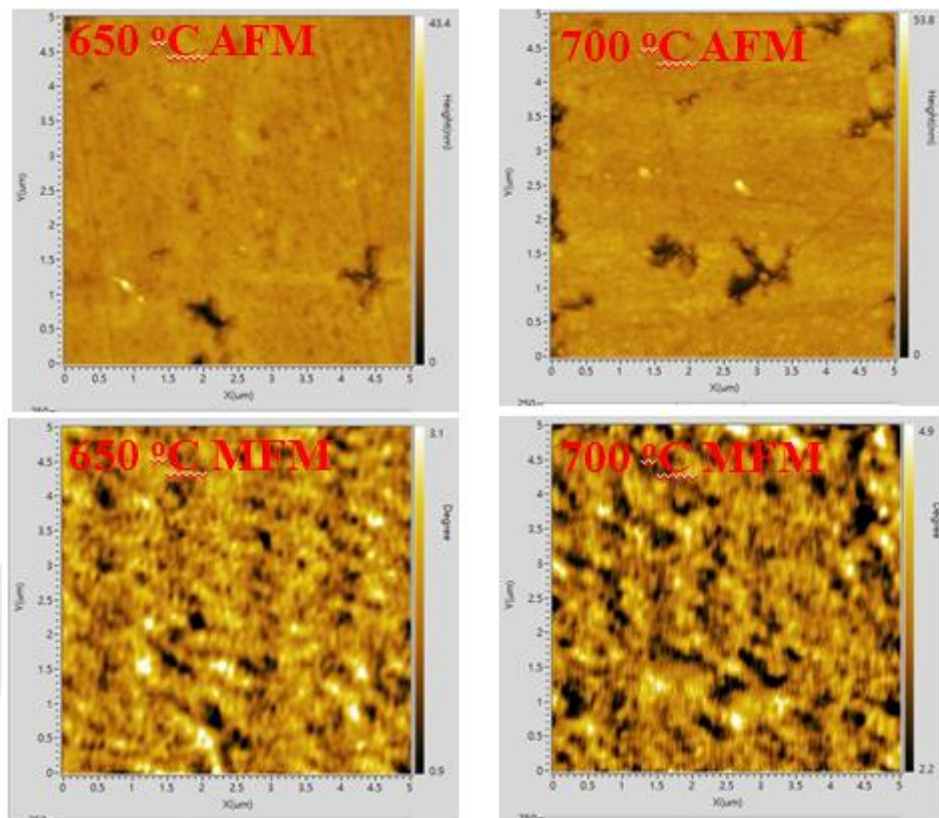


圖 5.2.7 氮氣下靶距 5 cm FePd 薄膜經不同退火溫度後退火之 MFM 圖。

### 5-2-2 靶距 10 cm，在氮氣下以射頻濺鍍沉積 FePd 薄膜經由不同溫度後退火之結構及磁性研究

圖 5.2.8 為靶距 10 cm 氮氣鍍製 Fe<sub>50</sub>Pd<sub>50</sub> 薄膜經不同後退火溫度之 XRD 圖。在初鍍態時，FePd 薄膜僅出現(111)繞射峰，隨著溫度提升，(111)隨之增強。當退火溫度上升至 700 °C 時，(111)繞射峰有明顯的向左偏移，其表示結構由序化的 L1<sub>0</sub> 相漸漸轉變為非序化的 A1。

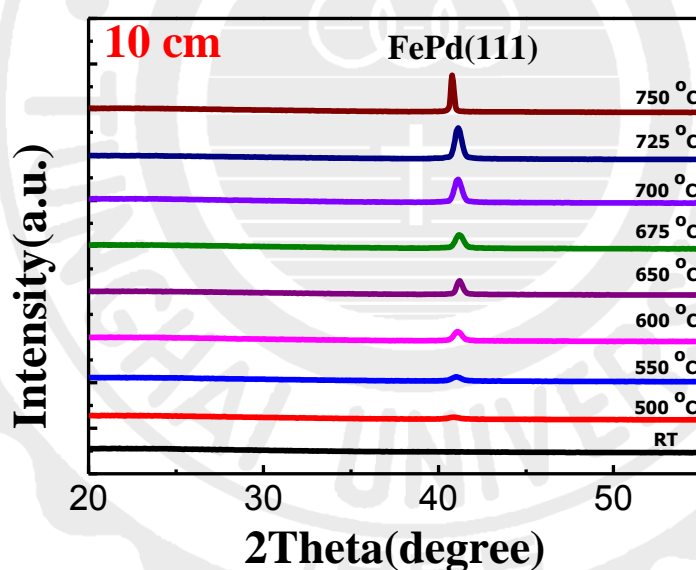


圖 5.2.8 氮氣下靶距 10 cm FePd 薄膜經不同退火溫度後退火之 XRD 圖。

圖 5.2.9 為靶距 10 cm 氮氣鍍製 Fe<sub>50</sub>Pd<sub>50</sub> 薄膜於玻璃基板經不同退火溫度後退火之磁滯曲線圖。由圖可以觀察到藉由改變氣體在相同靶距為 10 cm 磁性顯著提升。

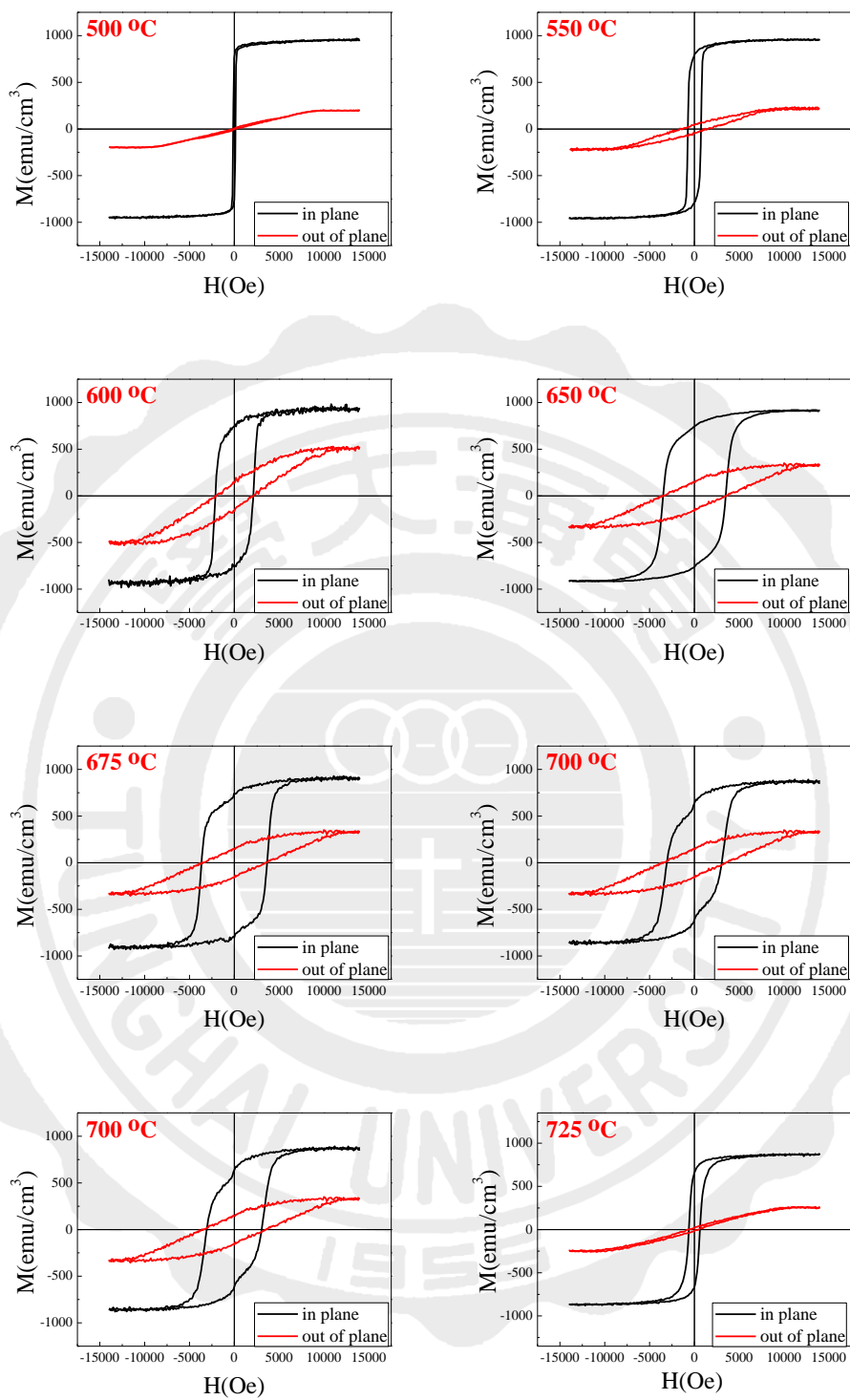


圖 5.2.9 氮氣下靶距 10 cm FePd 薄膜經不同退火溫度後退火之磁滯曲線圖。

根據 5.2.9 作分析彙整其磁性圖於表 5.2.3。圖 5.2.10 為氮氣後 FePd 薄膜之飽和磁化量和殘餘磁化量。從圖中可以觀察到，隨著溫度提高，飽和磁化量和殘餘磁化量隨之慢慢下降。圖 5.2.11 為矯頑磁力隨後退火溫度變化圖。當退火溫度在 675 °C 時呈現出最高矯頑磁力。圖 5.2.12 為磁能積隨不同後退火溫度之變化圖。磁能積隨著退火溫度上升而也有所提升，在 650 °C 時，其因有高矯頑磁力而呈較高磁能積為 10.8 MGOe。

表 5.2.3 氮氣下靶距 10 cm 之 FePd 薄膜經不同溫度後退火之飽和磁化量、殘餘磁化量、矯頑磁力及磁能積一覽表

D = 10 , N <sub>2</sub>	$M_s$ (emu/cm <sup>3</sup> )	$M_r$ (emu/cm <sup>3</sup> )	$H_c$ (Oe)	(BH) <sub>max</sub> (MGOe)
500 °C	970	805	160	0.3
550 °C	956	798	750	3.7
600 °C	941	755	2100	8.4
650 °C	915	743	3400	10.7
675 °C	897	741	3700	10.8
700 °C	870	635	3100	6.0
725 °C	853	630	630	1.8
750 °C	843	150	150	0.1

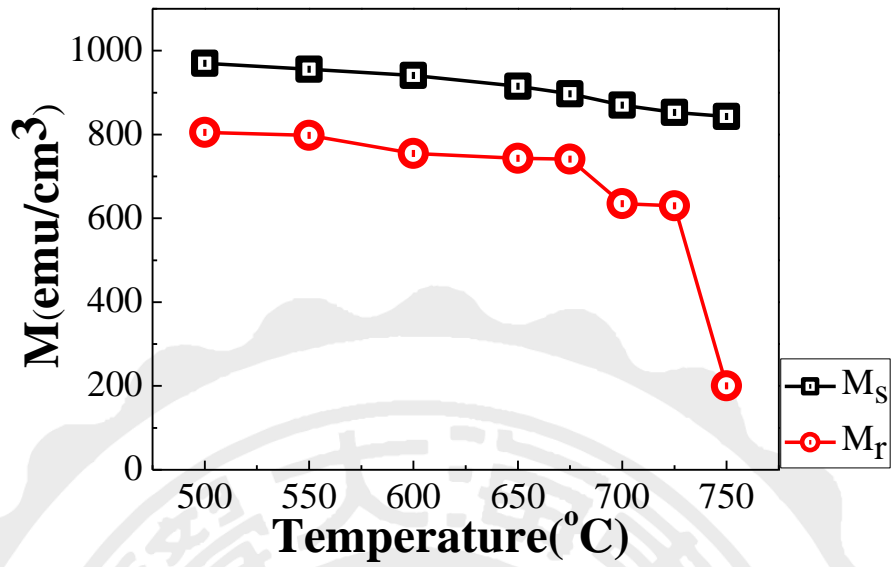


圖 5.2.10 氮氣下靶距 10 cm 之 FePd 薄膜飽和磁化量及殘餘磁化量隨不同後退火溫度之變化圖。

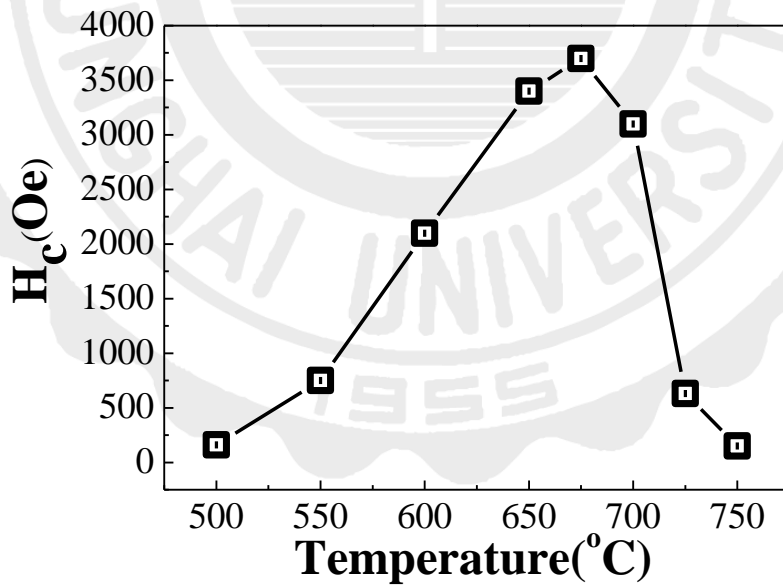


圖 5.2.11 氮氣下靶距 10 cm 之 FePd 薄膜經不同溫度退火之水平矯頑磁力圖。

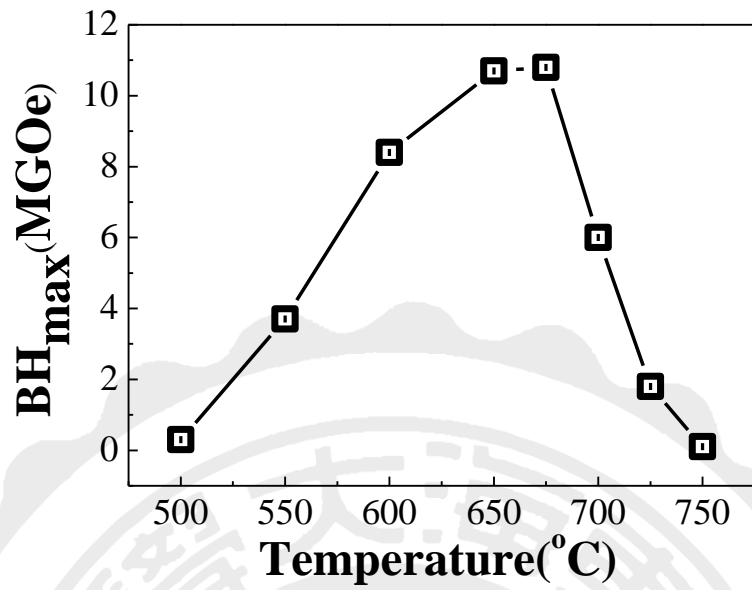


圖 5.2.12 氮氣下靶距 10 cm 之 FePd 經不同溫度退火之磁能積變化圖。

圖 5.2.13 為氮氣下鍍製 Fe<sub>50</sub>Pd<sub>50</sub> 薄膜經不同溫度後退火之 SEM 圖。隨著退火溫度上升，晶粒隨之增大，且伴隨著小孔洞。

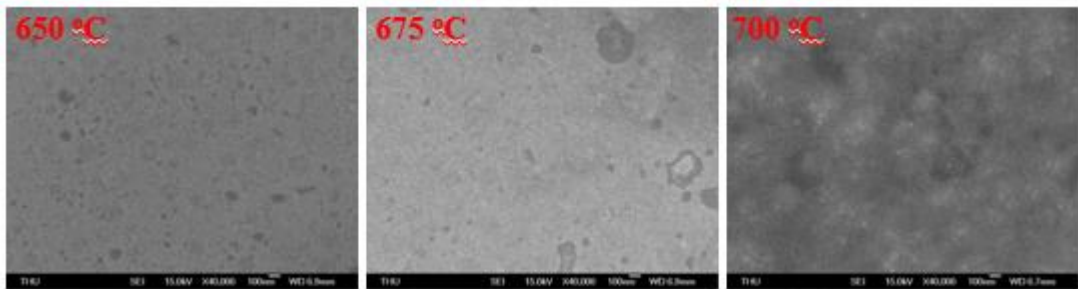


圖 5.2.13 氮氣下靶距 10 cm FePd 薄膜經不同退火溫度後退火之 SEM 圖。

圖 5.2.14 為氮氣下鍍製  $\text{Fe}_{50}\text{Pd}_{50}$  薄膜經不同溫度後退火之 SEM

圖。隨著退火溫度上升，磁區隨之增大。

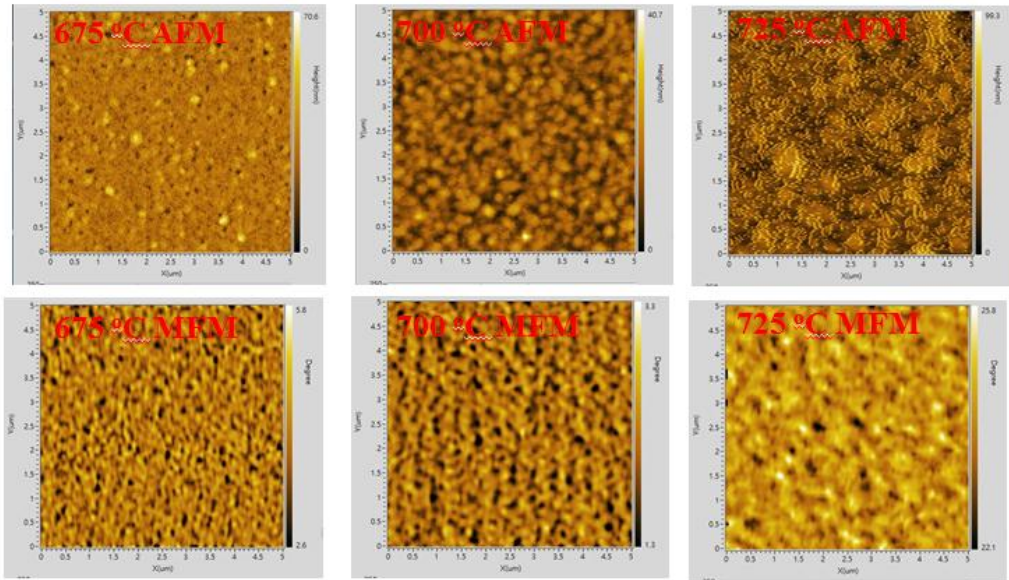


圖 5.2.14 氮氣下靶距 10 cm FePd 薄膜經不同退火溫度後退火之 MFM

圖。



### 5-2-3 靶距 12.5 cm，在氮氣下以射頻濺鍍沉積 FePd 薄膜經由不同溫度後退火之結構及磁性研究

圖 5.2.15 靶距 12.5 cm 氮氣鍍製 Fe<sub>50</sub>Pd<sub>50</sub> 薄膜經不同後退火溫度之 XRD 圖。在初鍍態時呈現(111)繞射峰，隨著退火溫度升高，(111)繞射峰有明顯增強趨勢。

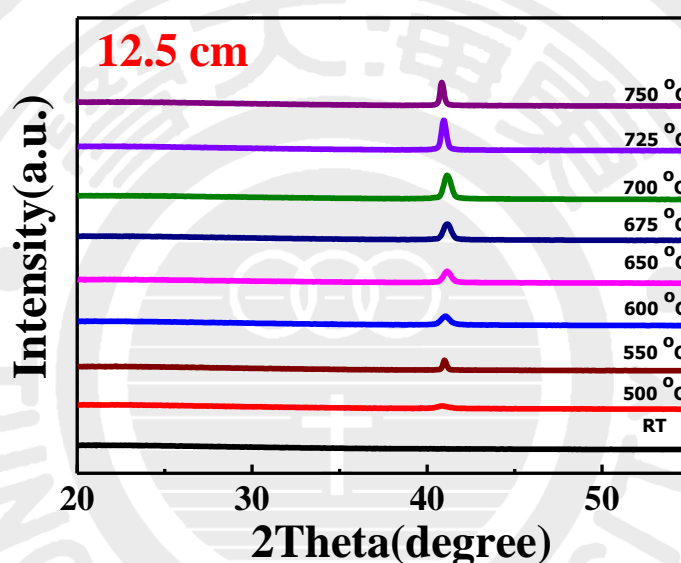


圖 5.2.15 氮氣下靶距 12.5 cm FePd 薄膜經不同退火溫度後退火之 XRD 圖。

圖 5.2.16 為靶距 12.5 cm 鍍製 Fe<sub>50</sub>Pd<sub>50</sub> 薄膜於玻璃基板經不同退火溫度後退火之磁滯曲線圖。由圖可以觀察到藉由改變氣體在靶距 12.5 cm 有著高的矯頑磁力，當溫度達到 650 °C 時，可獲得較高水平矯頑磁力達 3.9 kOe

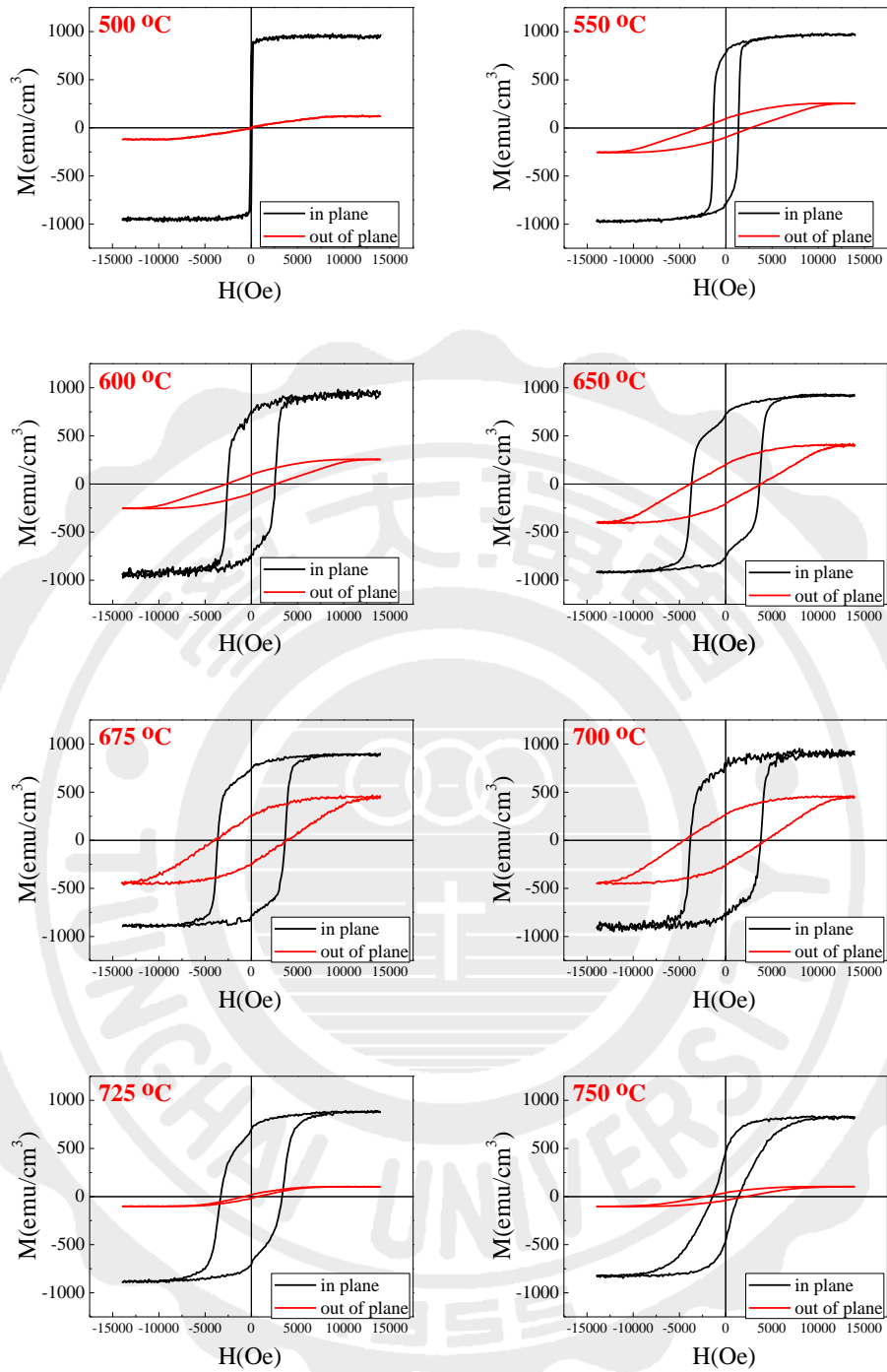


圖 5.1.16 氮氣下靶距 12.5 cm FePd 薄膜經不同退火溫度後退火之磁滯曲線圖。

根據 5.2.16 作分析彙整其磁性圖於表 5.1.4。圖 5.2.17 為氮氣後 FePd 薄膜之飽和磁化量和殘餘磁化量。從圖中可以觀察到，隨著溫度提高，飽和磁化量和殘餘磁化量隨之慢慢下降。圖 5.2.18 為矯頑磁力隨退火溫度之變化圖。由圖可知，矯頑磁力隨著退火溫度提升而明顯提高，當退火溫度在 675 °C 時，呈現出最高矯頑磁力為 3.9 kOe，而溫度持續提升到 725 °C 時，矯頑磁力顯著下降。圖 5.2.19 為磁能積隨退火溫度變化圖。磁能積隨著退火溫度上升也有所提升，並且在 675 °C 時，其因有高矯頑磁力，故可獲得相當高的磁能積為 8.3 MGOe。

表 5.2.4 氮氣下靶距 12.5 cm 之 FePd 薄膜經不同溫度後退火之飽和磁化量、殘餘磁化量、矯頑磁力及磁能積一覽表

$D = 12.5, N_2$	$M_s$ (emu/cm <sup>3</sup> )	$M_r$ (emu/cm <sup>3</sup> )	$H_c$ (Oe)	$(BH)_{max}$ (MGOe)
500 °C	972	815	75	0.4
550 °C	957	779	1400	6.3
600 °C	929	755	2600	8.4
650 °C	911	752	3700	9.3
675 °C	896	748	3700	10.6
700 °C	885	745	3900	12.6
725 °C	876	696	3400	7.7
750 °C	833	463	1400	1.4

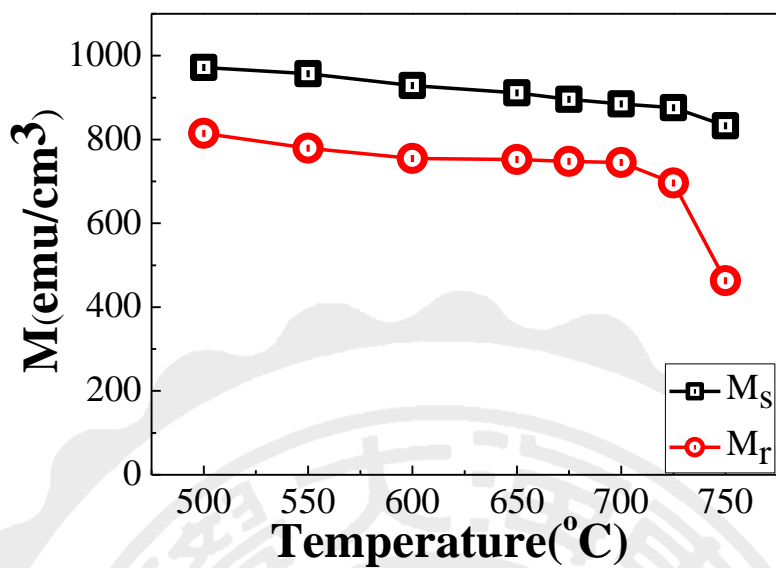


圖 5.2.17 氮氣下靶距 12.5 cm 之 FePd 薄膜飽和磁化量及殘餘磁化量隨後退火溫度變化圖。

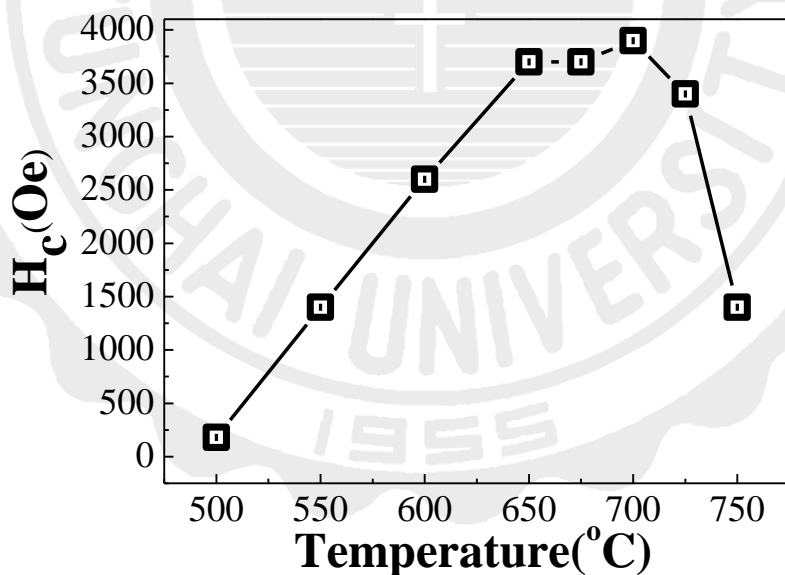


圖 5.2.18 氮氣下靶距 12.5 cm 之 FePd 薄膜水平矯頑磁力隨後退火溫度變化圖。

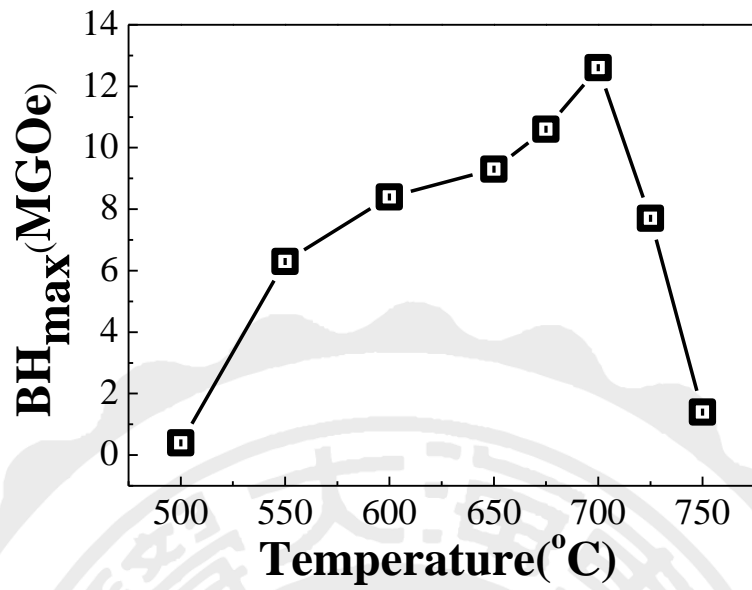


圖 5.2.19 氮氣下靶距 12.5 cm 之 FePd 薄膜磁能積隨後退火溫度變化圖。

圖 5.2.20 為氮氣下鍍製 Fe<sub>50</sub>Pd<sub>50</sub> 薄膜經不同溫度後退火之 SEM 圖。隨著溫度上升，晶粒隨之增大伴著小的孔洞，溫度越高孔洞越大，當溫度到 700 °C 會產生連續的島狀結構。

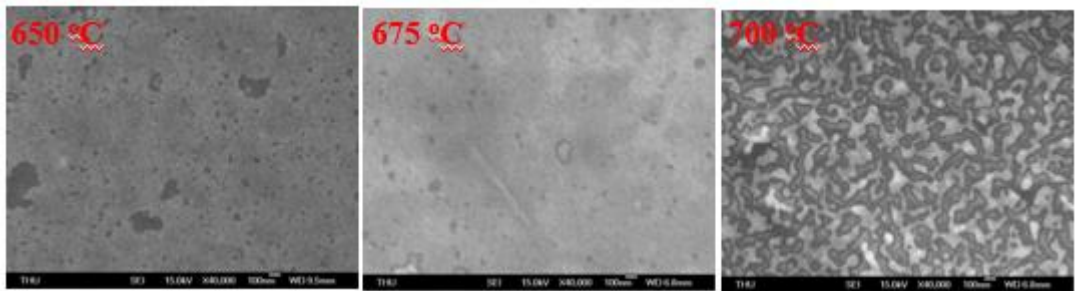


圖 5.1.21 氮氣下靶距 12.5 cm FePd 薄膜經不同退火溫度後退火之 SEM 圖。

圖 5.2.22 為氮氣後 FePd 薄膜經不同溫度後退火之 TEM 圖。隨著溫度上升，晶粒隨之增大，晶粒尺寸約 50 -70 nm 。

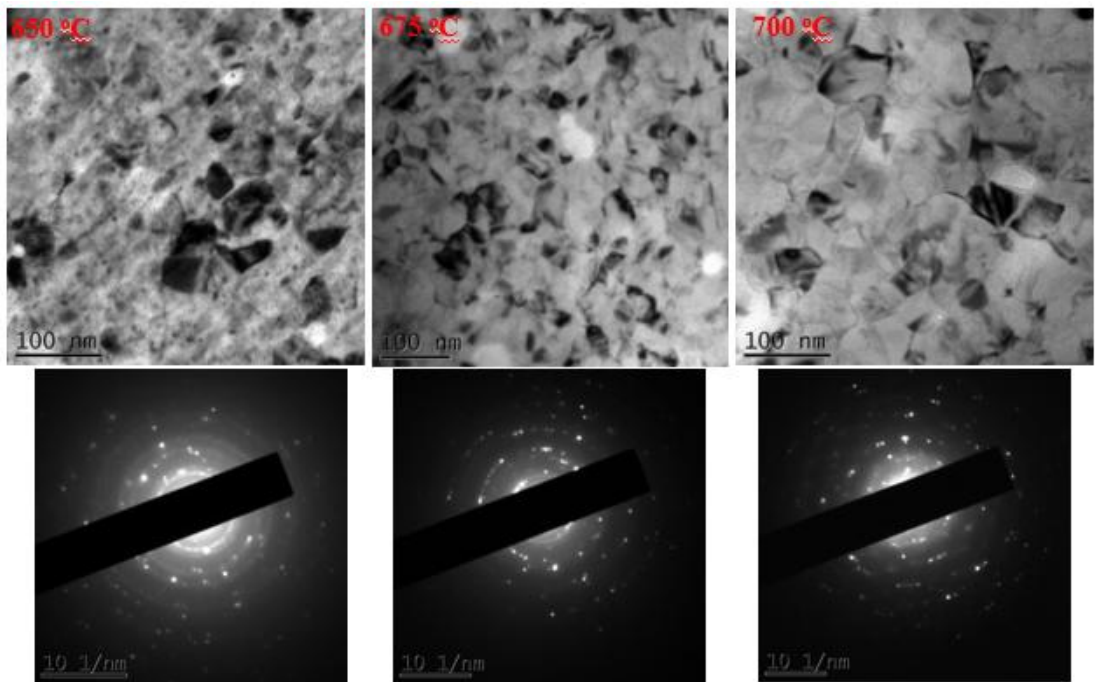


圖 5.2.22 氮氣下靶距 12.5 cm FePd 薄膜經不同退火溫度後退火之 TEM 圖。

圖 5.2.22 為氮氣後 FePd 薄膜經不同溫度後退火之 MFM 圖。隨著溫度上升，磁區隨之增大。

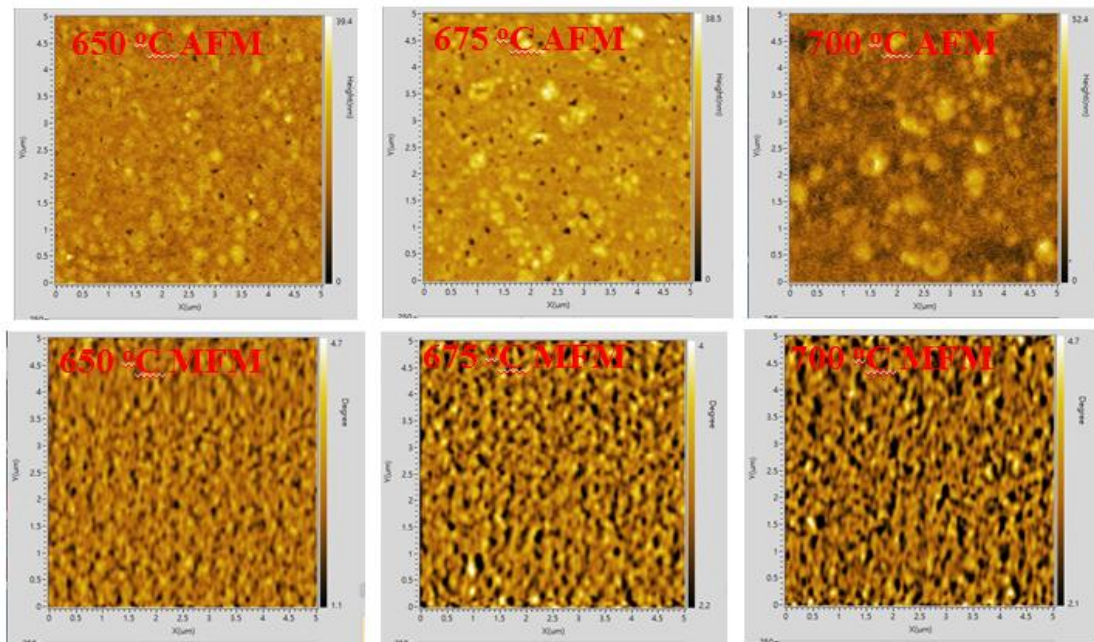


圖 5.2.23 氮氣下靶距 12.5 cm FePd 薄膜經不同退火溫度後退火之 MFM 圖。

#### 5-2-4 射頻濺鍍氮氣下沉積並改變靶距效應之 FePd 薄膜結構與磁性之探討

本節實驗以直流濺鍍法氮氣下製備了 Fe<sub>50</sub>Pd<sub>50</sub> 薄膜，並探討不同退火溫度對於 Fe<sub>50</sub>Pd<sub>50</sub> 薄膜結構及磁性之影響。在靶距為 5 cm 的單層 Fe<sub>50</sub>Pd<sub>50</sub> 薄膜於不同溫度下退火時，樣品藉由 XRD 分析皆呈現(111)繞射峰，繞射峰隨之增強，在磁滯曲線上可以觀察隨著溫度提升矯頑磁力隨之提升，最高值出現在 650 °C 最高值為 2.6 kOe 磁能積 8.4 MGOe，與射頻濺鍍相似氮氣沉積比氮氣靶距為 5 cm 時較為顯著。

在靶距為 10 cm 時，樣品有較強 (111)繞射峰，隨著退火溫度增加，當退火溫度為 700 °C 時有著較高的矯頑磁力為 3.7 kOe。退火溫度為 675 °C，其有出現較高的磁能積，最大能積為 10.8 MGOe，而溫度到達 725 °C，都有下降的趨勢。

當靶距提升至 12.5 cm 時，樣品有著微弱的(111)，隨著退火溫度提升，繞射峰隨之增強，磁滯曲線上可以觀察到磁性質有著明顯的增加而最高的矯頑磁力為靶距為 12.5 cm，當退火溫度為 700 °C，其有大的矯頑磁力為 3.9 kOe 及最高的磁能積 12.6 MGOe。氣氛不同和靶距的改變有助於大幅減少序化溫度，當退火溫度為 550 °C 最為顯著，並且在高溫退火應力釋放後，磁性皆更好的表現[80,81]。



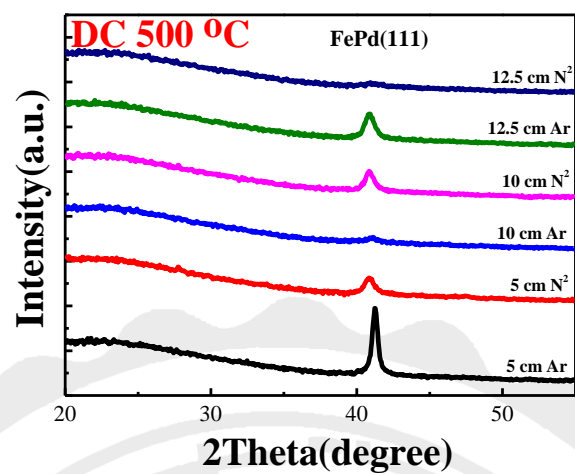
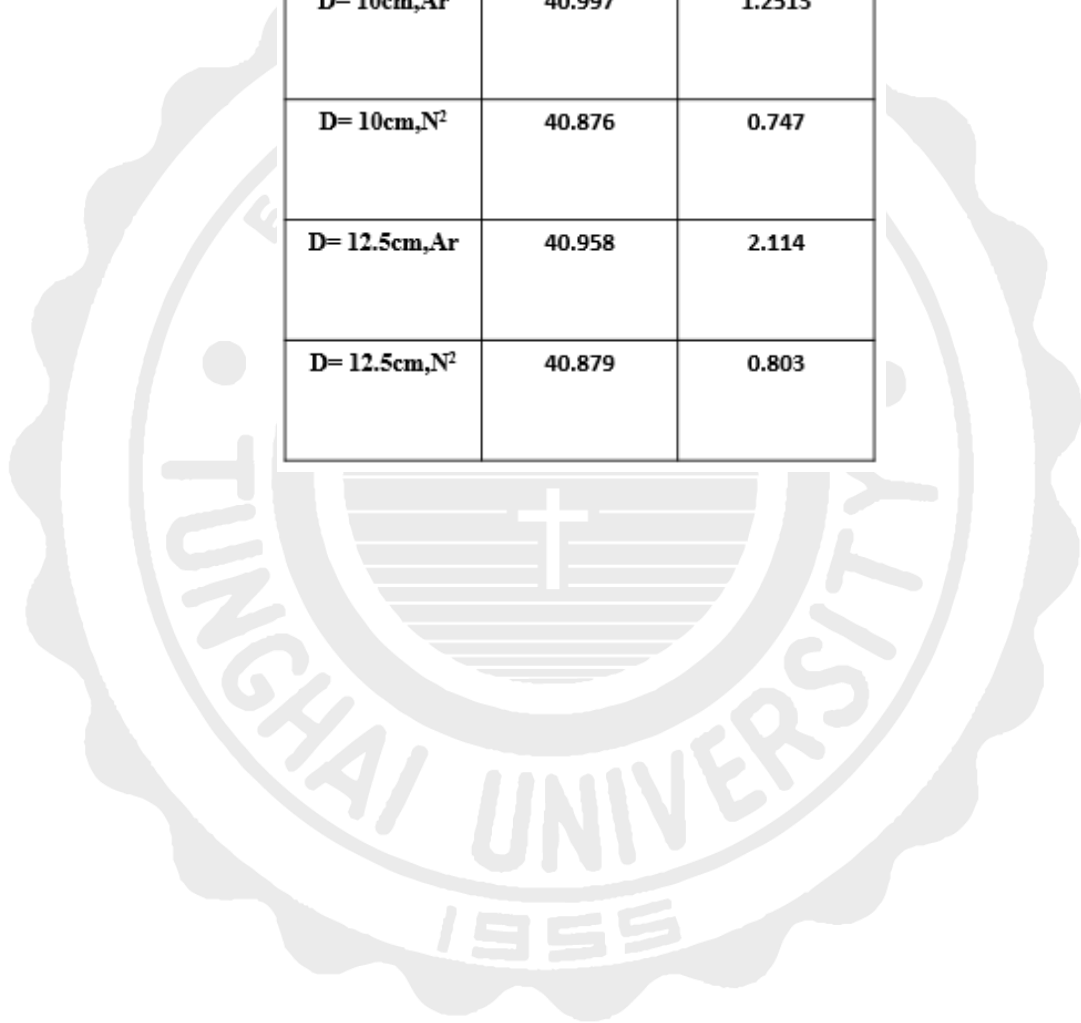


圖 5.2.24 氫氣與氮氣鍍製 FePd 薄膜經由 500 °C 退火溫度 XRD 圖。

表 5.2.5 氫氣與氮氣鍍製 FePd 薄膜經由 500 °C 退火溫度 XRD 圖及

角度和半高寬一覽表。

Temperature(°C)	FePd(111)	
	Peak(°)	FWHM(°)
500°C		
D= 5cm,Ar	41.254	0.436
D= 5cm,N <sup>2</sup>	40.862	0.850
D= 10cm,Ar	40.997	1.2513
D= 10cm,N <sup>2</sup>	40.876	0.747
D= 12.5cm,Ar	40.958	2.114
D= 12.5cm,N <sup>2</sup>	40.879	0.803



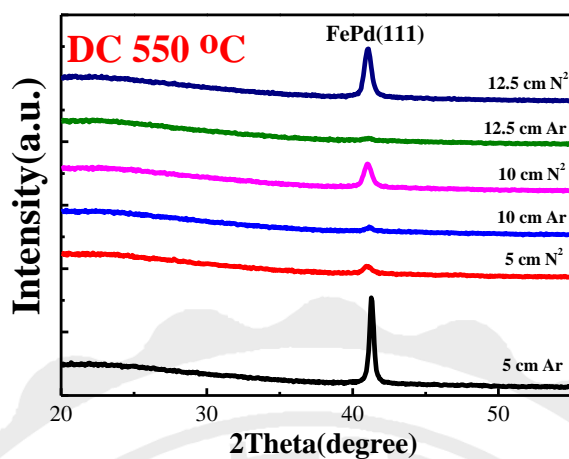


圖 5.2.25 氫氣與氮氣鍍製 FePd 薄膜經由 550 °C 退火溫度 XRD 圖。

表 5.2.6 氫氣與氮氣鍍製 FePd 薄膜經由 550 °C 退火溫度 XRD 圖及角度和半高寬一覽表。

Temperature(°C)	FePd(111)	
	Peak(°)	FWHM(°)
550°C		
D= 5cm,Ar	41.300	0.325
D= 5cm,N <sup>2</sup>	41.013	0.738
D= 10cm,Ar	41.133	0.667
D= 10cm,N <sup>2</sup>	41.035	0.624
D= 12.5cm,Ar	40.000	1.005
D= 12.5cm,N <sup>2</sup>	41.045	0.548

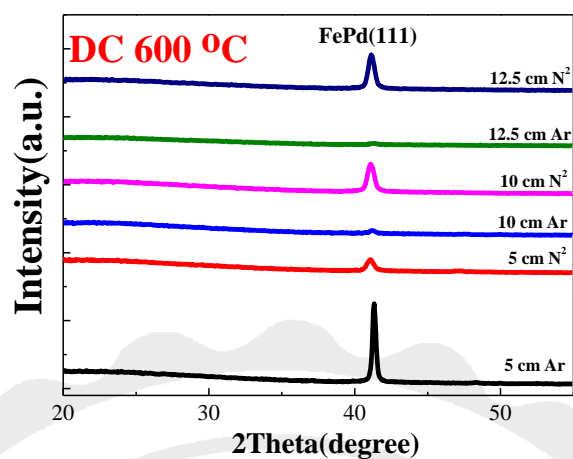
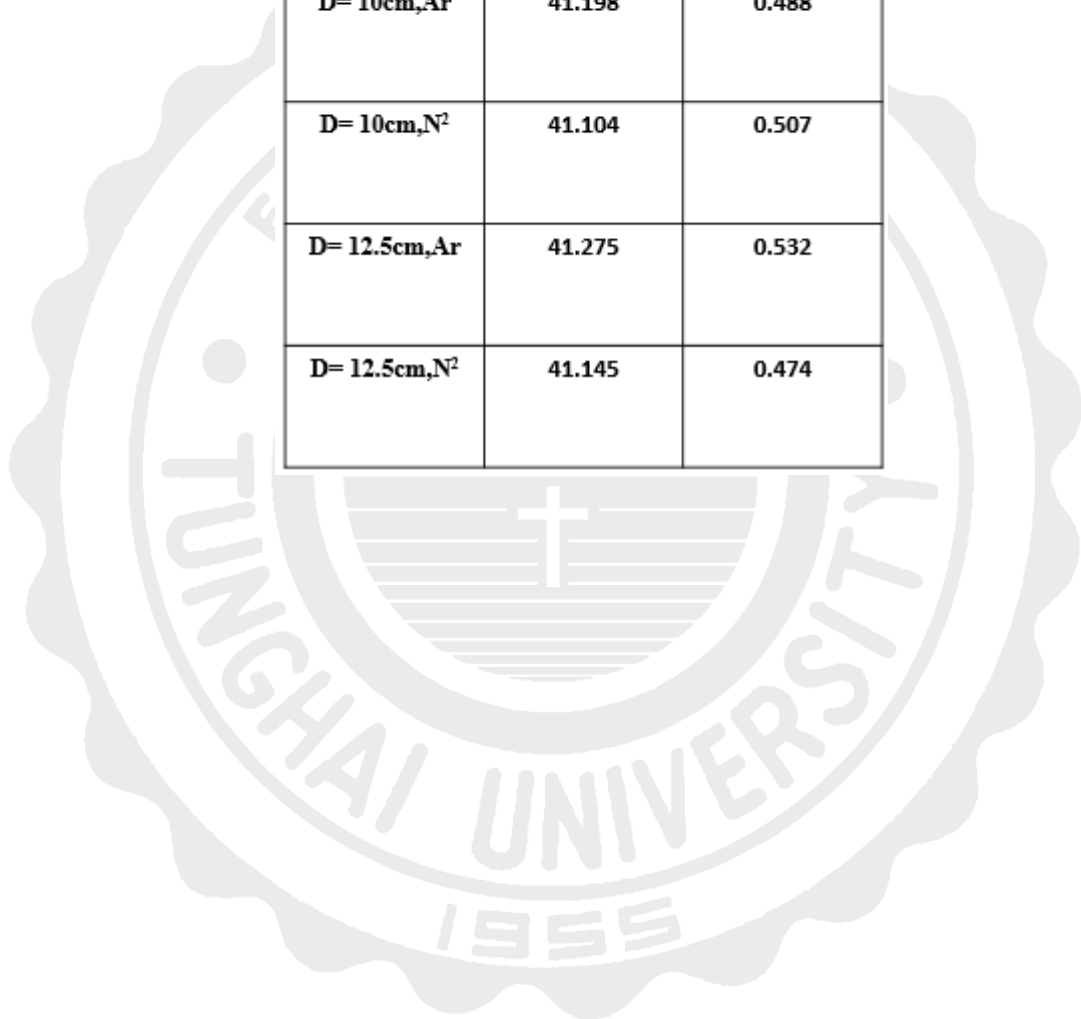


圖 5.2.26 氬氣與氮氣鍍製 FePd 薄膜經由 600 °C 退火溫度 XRD 圖。

表 5.2.7 氬氣與氮氣鍍製 FePd 薄膜經由 600 °C 退火溫度 XRD 圖及  
角度和半高寬一覽表。

Temperature(°C)	<u>FePd(111)</u>	
600°C	Peak(°)	FWHM(°)
D= 5cm,Ar	41.332	0.251
D= 5cm,N <sup>2</sup>	41.070	0.524
D= 10cm,Ar	41.198	0.488
D= 10cm,N <sup>2</sup>	41.104	0.507
D= 12.5cm,Ar	41.275	0.532
D= 12.5cm,N <sup>2</sup>	41.145	0.474



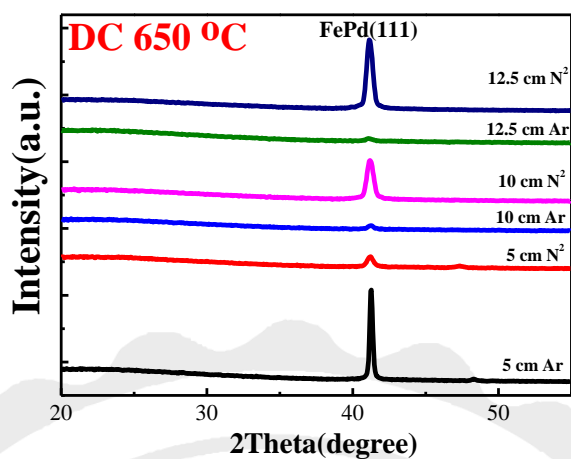


圖 5.2.27 氫氣與氮氣鍍製 FePd 薄膜經由 650 °C 退火溫度 XRD 圖。

表 5.2.7 氫氣與氮氣鍍製 FePd 薄膜經由 650 °C 退火溫度 XRD 圖及角度和半高寬一覽表。

Temperature(°C)	FePd(111)		FePd(200)	
	Peak(°)	FWHM(°)	Peak(°)	FWHM(°)
650 °C				
D= 5cm,Ar	41.264	0.214	48.305	0.321
D= 5cm,N <sup>2</sup>	41.199	0.472	47.316	0.735
D= 10cm,Ar	41.231	0.455		
D= 10cm,N <sup>2</sup>	41.197	0.495		
D= 12.5cm,Ar	41.109	0.544		
D= 12.5cm,N <sup>2</sup>	41.161	0.447		

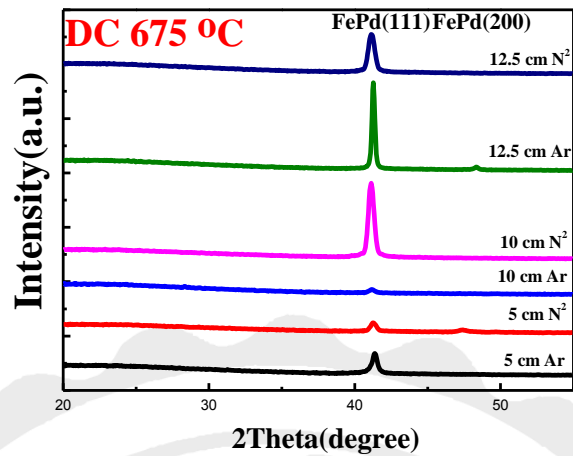


圖 5.2.28 氬氣與氮氣鍍製 FePd 薄膜經由 675 °C 退火溫度 XRD 圖。

表 5.2.8 氬氣與氮氣鍍製 FePd 薄膜經由 675 °C 退火溫度 XRD 圖及角度和半高寬一覽表。

Temperature(°C)	FePd(111)		FePd(200)	
	Peak(°)	FWHM(°)	Peak(°)	FWHM(°)
675 °C				
D= 5cm,Ar	41.369	0.408		
D= 5cm,N <sup>2</sup>	41.277	0.426	47.405	0.746
D= 10cm,Ar	41.171	0.455		
D= 10cm,N <sup>2</sup>	41.129	0.418		
D= 12.5cm,Ar	41.278	0.208		
D= 12.5cm,N <sup>2</sup>	41.151	0.474		

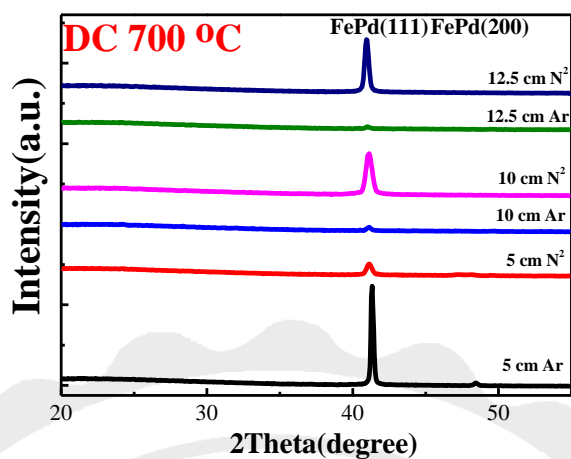


圖 5.2.29 氫氣與氮氣鍍製 FePd 薄膜經由 700 °C 退火溫度 XRD 圖。

表 5.2.9 氫氣與氮氣鍍製 FePd 薄膜經由 700 °C 退火溫度 XRD 圖及角度和半高寬一覽表。

Temperature(°C)	FePd(111)		FePd(200)	
	Peak(°)	FWHM(°)	Peak(°)	FWHM(°)
700 °C				
D= 5cm,Ar	41.333	0.182	48.446	0.286
D= 5cm,N <sup>2</sup>	41.131	0.393	47.527	2.026
D= 10cm,Ar	41.109	0.309		
D= 10cm,N <sup>2</sup>	41.136	0.454		
D= 12.5cm,Ar	41.021	0.301		
D= 12.5cm,N <sup>2</sup>	40.957	0.288		



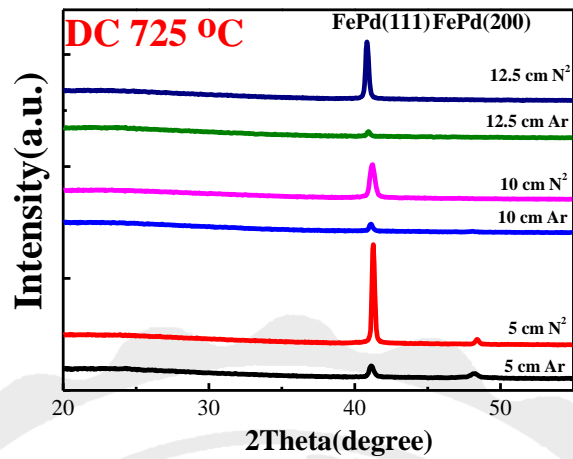


圖 5.2.30 氬氣與氮氣鍍製 FePd 薄膜經由 725 °C 退火溫度 XRD 圖。

表 5.2.10 氬氣與氮氣鍍製 FePd 薄膜經由 725 °C 退火溫度 XRD 圖及角度和半高寬一覽表。

Temperature(°C)	FePd(111)		FePd(200)	
	Peak(°)	FWHM(°)	Peak(°)	FWHM(°)
725 °C				
D= 5cm,Ar	41.146	0.333	48.191	0.554
D= 5cm,N <sup>2</sup>	41.272	0.193	48.396	0.229
D= 10cm,Ar	41.109	0.260		
D= 10cm,N <sup>2</sup>	41.209	0.358		
D= 12.5cm,Ar	40.937	0.247		
D= 12.5cm,N <sup>2</sup>	40.848	0.223		

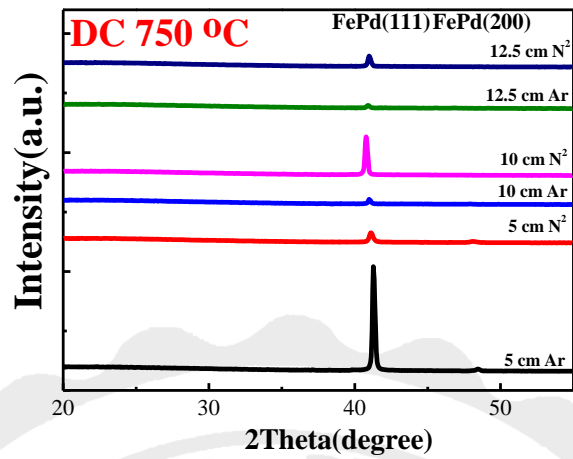


圖 5.2.31 氫氣與氮氣鍍製 FePd 薄膜經由 600 °C 退火溫度 XRD 圖。

表 5.2.12 氫氣與氮氣鍍製 FePd 薄膜經由 600 °C 退火溫度 XRD 圖及角度和半高寬一覽表。

Temperature(°C)	FePd(111)		FePd(200)	
	Peak(°)	FWHM(°)	Peak(°)	FWHM(°)
750°C				
D= 5cm,Ar	41.299	0.180	48.447	0.259
D= 5cm,N <sup>2</sup>	41.126	0.275	48.122	0.561
D= 10cm,Ar	41.006	0.195	48.447	0.259
D= 10cm,N <sup>2</sup>	40.789	0.180	48.122	0.561
D= 12.5cm,Ar	40.915	0.205		
D= 12.5cm,N <sup>2</sup>	40.913	0.210		

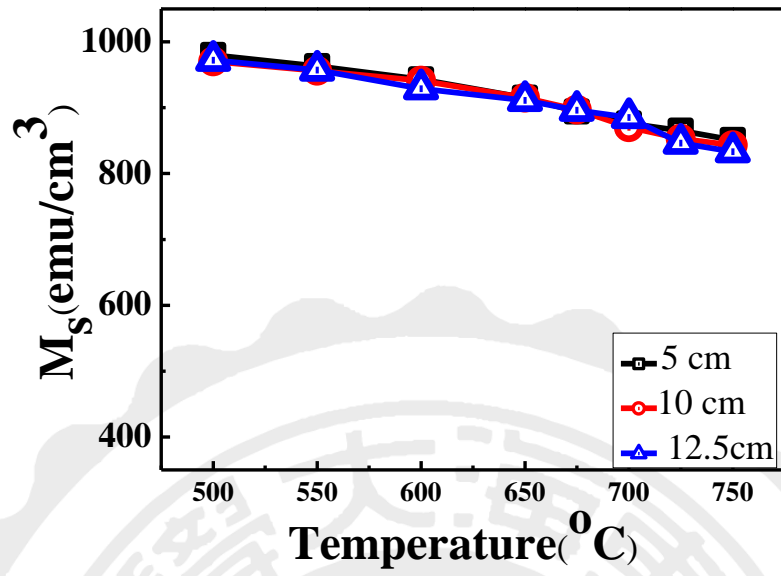


圖 5.2.32 氮氣下改變靶距經由不同溫度退火飽和磁化量。

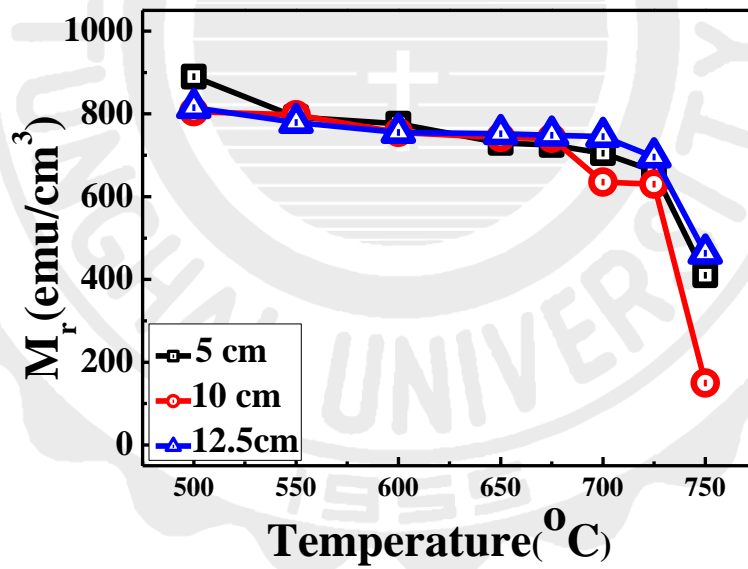


圖 5.2.33 氮氣下改變靶距經由不同溫度退火殘餘磁化量。

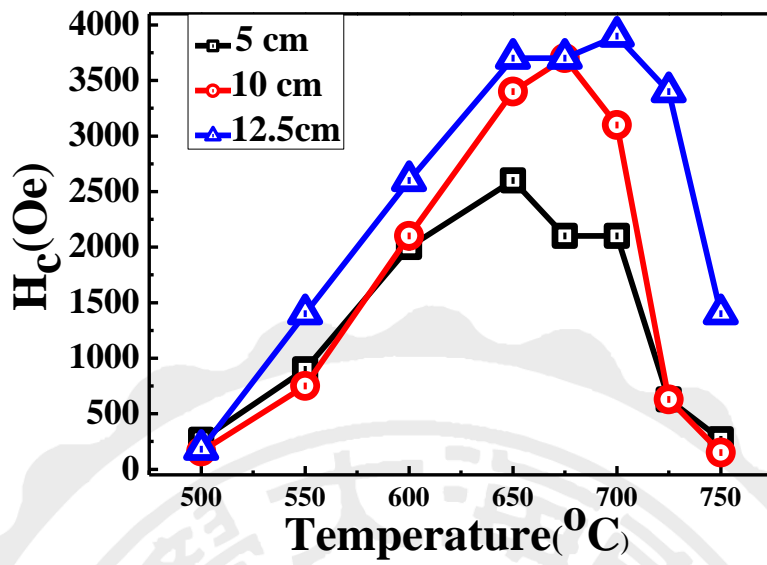


圖 5.2.34 氮氣下改變靶距經由不同溫度退火矯頑磁力變化圖。

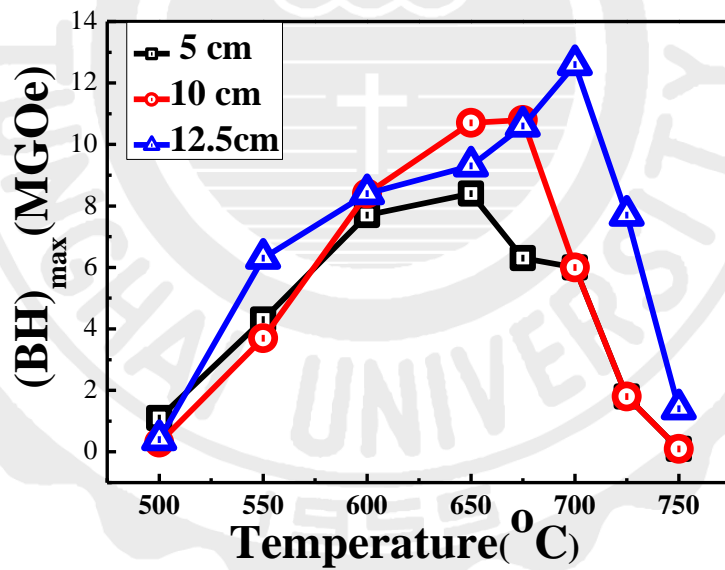


圖 5.2.35 氮氣下改變靶距經由不同溫度退火磁能積變化圖。

### 5-3 氮氣效應對於改變靶距沉積 FePd 薄膜結構與磁性影響之探討。

以氮氣濺鍍沉積單層 30 nm Fe<sub>50</sub>Pd<sub>50</sub> 薄膜於玻璃基板上，並以不同退火溫度( $T_a = 500\text{ }^\circ\text{C} - 750\text{ }^\circ\text{C}$ )，並以研究其磁性。FePd 薄膜經過退火後，其晶粒的平面間距會改變，從 XRD 會觀察到(111)繞射峰與氬氣的不同，可能原因為在鍍製過程氮氣使 FePd 晶格間距改變，使(111)繞射峰往左偏移。

由於鍍氣濺製發現到在相同的靶距為 5 cm 時最為顯，在射頻和直流濺鍍下與氬氣相比其磁性提升超過 100%，表面形貌上也發現到波紋這可能是氮氣對 FePd 影響。

以上結果可知，藉由第四章進一步優化製程參數改變氣氛，氮氣效應進而提高其磁性，本節實驗結果提供了氮氣鍍製 FePd 薄膜之有效方法的訊息。

表 5.3.1 為氬氣與氮氣磁性一覽表

Method	Gas	Distance	$T_a$ (°C)	$M_s$ (emu/cm <sup>2</sup> )	$M_r$ (emu/cm <sup>2</sup> )	$H_c$ (Oe)	$(BH)_{max}$ (MG·Oe)	RT (d <sub>111</sub> )
Rf sputtering	Ar	5 cm	550	987	890	340	1.7	2.194
		10 cm	650	883	735	2200	7.1	2.207
		12.5 cm	675	903	730	3500	10.5	2.208
Dc sputtering	Ar	5 cm	600	984	884	400	1.1	2.194
		10 cm	675	894	758	2900	10.4	2.207
		12.5 cm	700	865	696	3300	8.8	2.208
Rf sputtering	N <sub>2</sub>	5 cm	650	931	780	2500	9.2	2.205
		10 cm	700	884	783	3000	10.5	2.207
		12.5 cm	725	868	653	3700	8.5	2.209
Dc sputtering	N <sub>2</sub>	5 cm	650	915	730	2600	8.4	2.205
		10 cm	675	897	741	3700	10.8	2.208
		12.5 cm	700	885	745	3900	12.6	2.209



## 第六章 Cu 頂層擴散對 FePd 結構與磁性影響

從先前的第五章，氮氣的加入獲得較高的矯頑磁力，因此本章討論氮氣下沉積 FePd 薄膜覆蓋銅頂層並退火擴散 ( $T_a = 300 - 600\text{ }^\circ\text{C}$ ) 研究 FePd 薄膜磁性與及結構的影響。

實驗結果分以下四部分：

1. 序化 FePd 薄膜退火溫度為  $650\text{ }^\circ\text{C}$  覆蓋 Cu 頂層並研究不同退火溫度 Cu 擴散其對結構及磁性之影響。
2. 序化 FePd 薄膜退火溫度為  $675\text{ }^\circ\text{C}$  覆蓋 Cu 頂層並研究不同退火溫度 Cu 擴散其對結構及磁性之影響。
3. 序化 FePd 薄膜退火溫度為  $700\text{ }^\circ\text{C}$  覆蓋 Cu 頂層並研究不同退火溫度擴散 Cu 擴散其對結構及磁性之影響。
4. 擴散效應對序化 FePd 薄膜結構與磁性之探討。

## 6-1 Cu 頂層擴散效應對經 650 °C 後退火 FePd 膜結構及磁性之影響

本節以直流濺鍍法製備單層 30 nm FePd 薄膜，改變製成條件為覆蓋銅頂層，並進行不同溫度後退火，探討不同溫度對 FePd 薄膜結構及磁性之影響。實驗參數如表 6.1.1:

表 6.1.1 實驗參數

濺鍍法	濺鍍功率 (W)/ 工作壓力 (mTorr)	氣體	膜層
直流濺鍍法 (Dc)	30/10	氮氣 (N <sub>2</sub> )	Cu 5nm FePd (650 -700 °C)



### 6-1-1 結構分析

圖 6.1.1 為 FePd 退火溫度為 650 °C 並覆蓋銅頂層經不同退火溫度後退火之 XRD 圖。在初鍍態時，FePd 薄膜僅出現(111)繞射峰，(111)有增強。

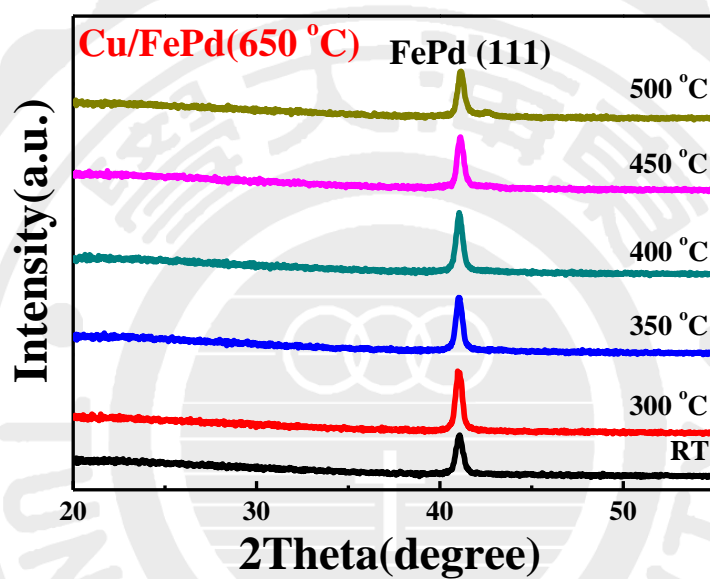


圖 6.1.1 Cu/FePd (650 °C)薄膜經不同退火溫度後退火之 XRD 圖。

## 6-1-2 磁性之研究

圖 6.1.2 為 FePd 退火溫度為  $650^{\circ}\text{C}$  並覆蓋銅頂層經不同退火溫度後退火之磁滯曲線圖。由圖可以觀察到藉由銅頂層退火後隨著溫度改變矯頑磁力有顯著提升。

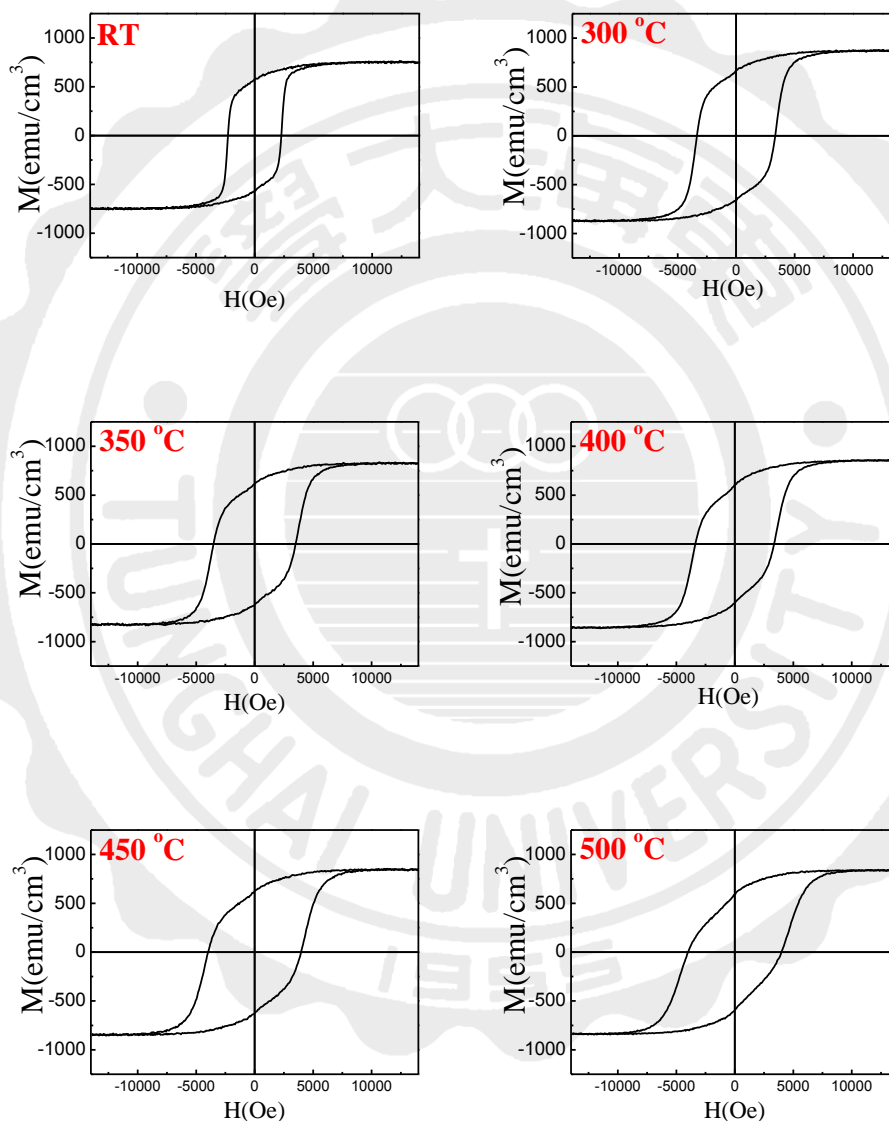


圖 6.1.2 Cu/FePd ( $650^{\circ}\text{C}$ ) 薄膜經不同退火溫度後退火之磁滯曲線圖。

根據 6.1.2 作分析彙整其磁性圖於表 6.1.2。圖 6.1.3 為 Cu/FePd 薄膜之飽和與殘餘磁化量隨不同後退火溫度之變化圖。由圖可知，兩磁化量都隨之下降。圖 6.1.4 矯頑磁力隨不同後退火溫度之變化圖。隨著退火溫度提升矯頑力有明顯的提升，當擴散溫度為 500 °C 有出現最高的矯頑力 4.0 kOe，圖 6.1.5 為磁能積隨不同後退火溫度之變化圖。當其退火溫度在 650 °C 時，矯頑磁力為 4.0 kOe 磁能積為 4.0 MGOe。

表 6.1.2 Cu/FePd (650 °C) 薄膜經不同溫度退火之飽和磁化量和殘餘磁化量及矯頑磁力、磁能積一覽表

<u>FePd</u> <u>650 °C</u>	<u>M<sub>s</sub></u> (emu/cm <sup>3</sup> )	<u>M<sub>r</sub></u> (emu/cm <sup>3</sup> )	<u>H<sub>c</sub></u> (Oe)	<u>(BH)<sub>max</sub></u> (MGOe)
RT	791	655	2280	6.9
300 °C	766	651	3350	8.3
350 °C	763	642	3370	7.5
400 °C	758	633	3520	7.3
450 °C	755	625	4000	7.0
500 °C	749	602	4000	5.1

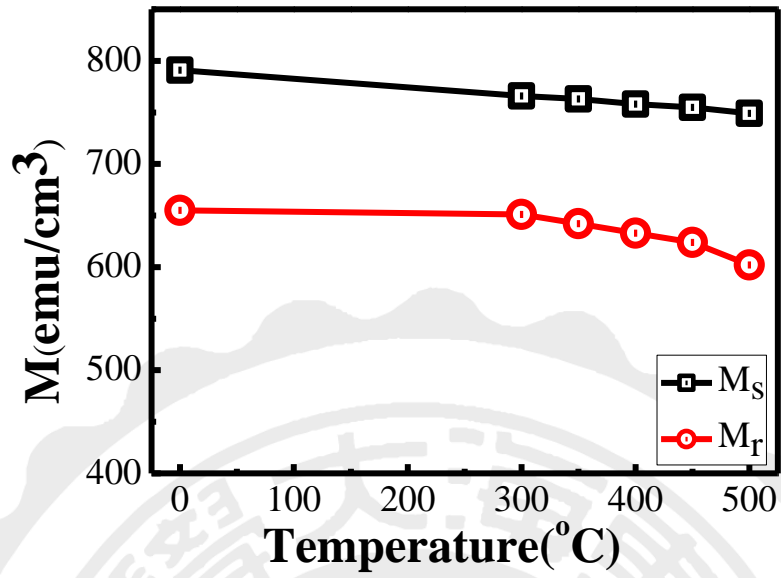


圖 6.1.3 Cu/FePd (650 °C) 薄膜飽和磁化量及殘餘磁化量隨不同後退火溫度之變化圖。

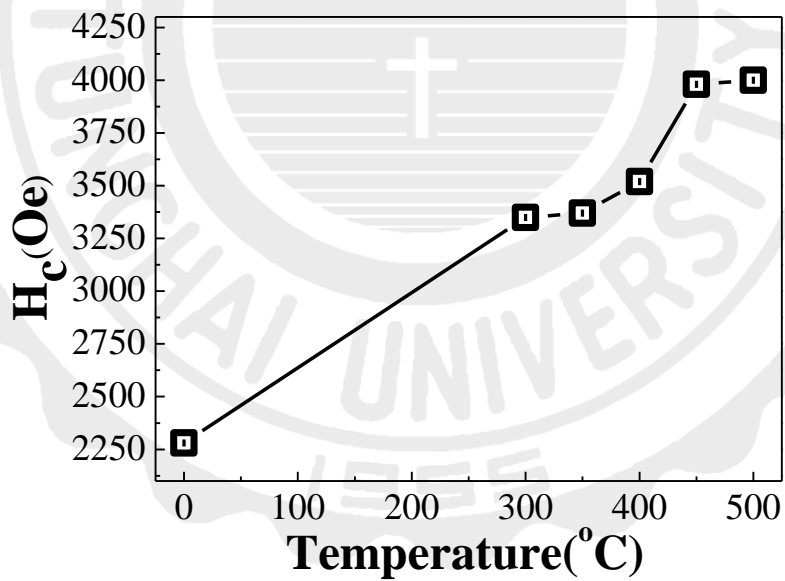


圖 6.1.4 Cu/FePd (650 °C) 薄膜經不同溫度退火之水平矯頑磁力圖。

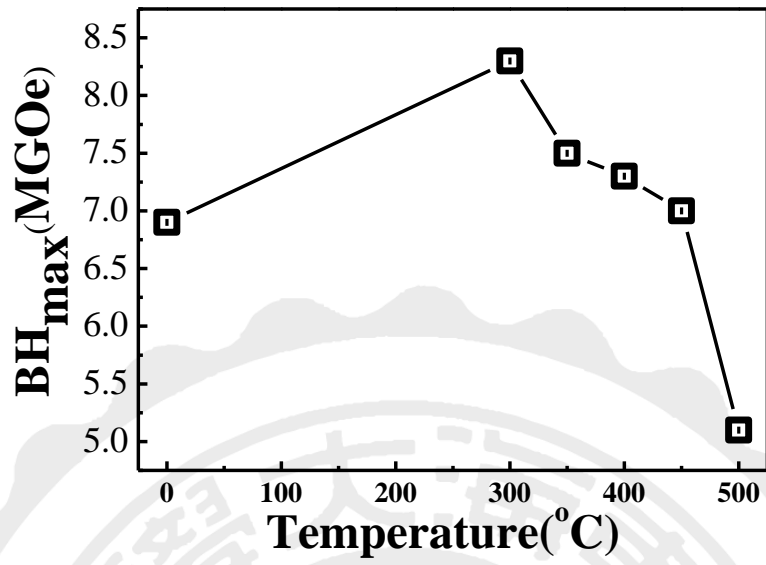


圖 6.1.5 Cu/FePd (650 °C) 薄膜經不同溫度退火之磁能積變化圖。

### 6-1-3 表面形貌之研究

圖 6.1.6 為 Cu/FePd (650 °C) 薄膜經不同溫度後退之 SEM 圖。藉由加入銅頂層，隨著退火溫度提升，會發現到 Cu 會熔於 FePd 晶界並包覆晶粒。非磁 Cu 膜經擴散包覆硬磁性 FePd 晶粒將提高其矯頑磁力。

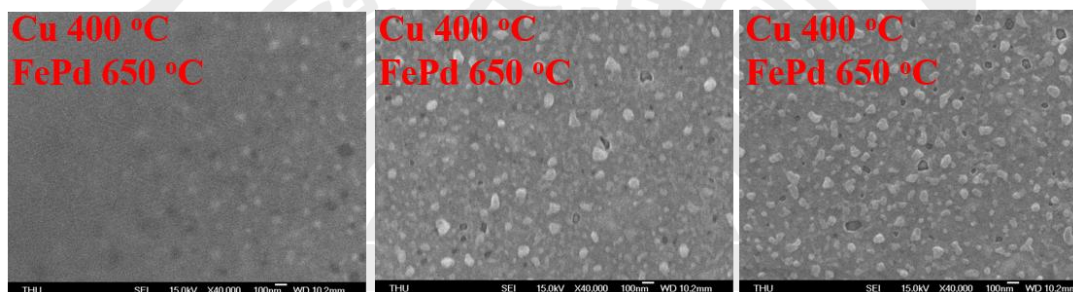


圖 6.1.6 Cu/FePd (650 °C) 薄膜經不同溫度後退火之 SEM 圖。

## 6-2 Cu 頂層擴散效應對經 675 °C 後退火 FePd 膜結構及磁性之影響

本節以直流濺鍍法製備單層 30 nm FePd 薄膜，改變製成條件為覆蓋銅頂層，並進行不同溫度後退火，探討不同溫度對 FePd 薄膜結構及磁性之影響。實驗參數如表 6.2.1:

### 6-2-1 結構分析

圖 6.2.8 為 FePd 退火溫度為 650 °C 並覆蓋銅頂層經不同退火溫度後退火之 XRD 圖。在初鍍態時，FePd 薄膜僅出現(111)繞射峰，(111)有增強。

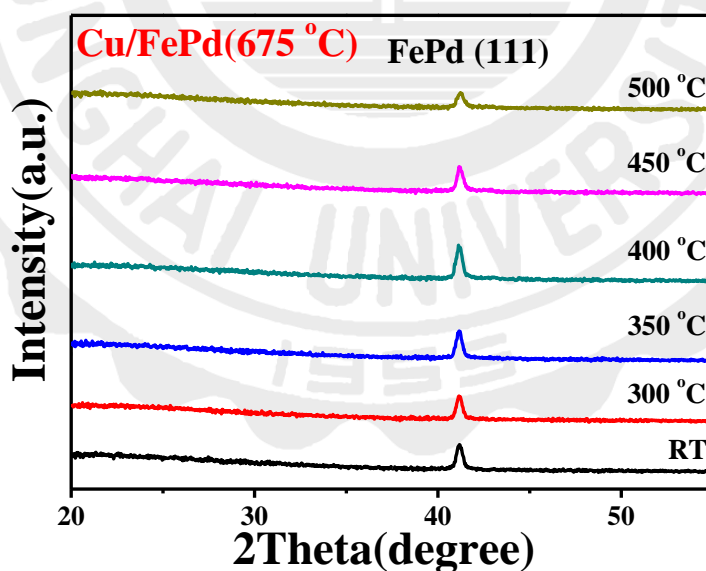


圖 6.2.1 Cu/FePd (675 °C) 薄膜經不同退火溫度後退火之 XRD 圖。

## 6-2-2 磁性之研究

圖 6.1.2 為 FePd 退火溫度為  $675^{\circ}\text{C}$  並覆蓋銅頂層經不同退火溫度後退火之磁滯曲線圖。由圖可以觀察到藉由銅頂層退火後隨著溫度改變矯頑磁力有顯著提升。

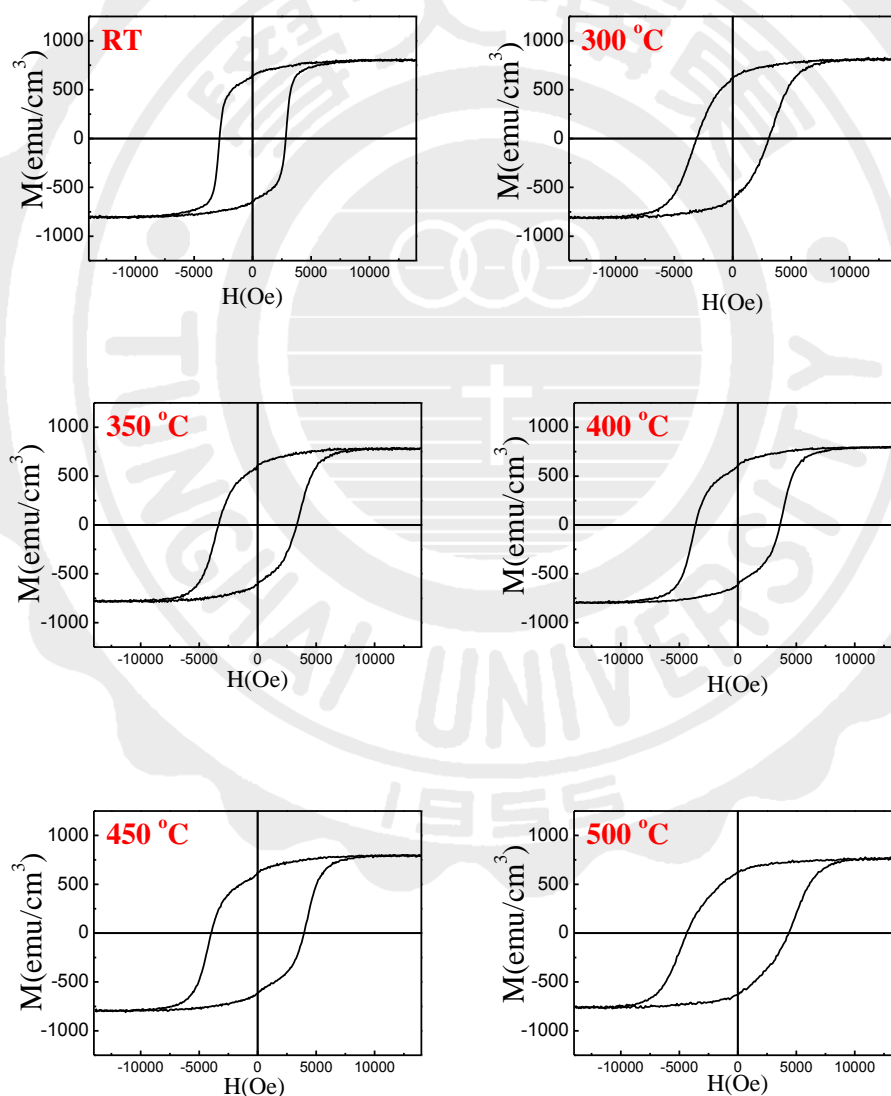


圖 6.2.1 Cu/FePd ( $675^{\circ}\text{C}$ ) 薄膜經不同退火溫度後退火之磁滯曲線圖。



根據 6.2.2 作分析彙整其磁性圖於表 6.2.2。圖 6.2.3 為 Cu/FePd 薄膜之飽和與殘餘磁化量隨不同後退火溫度之變化圖。由圖可知，兩磁化量都隨之下降。圖 6.2.4 矯頑磁力隨不同後退火溫度之變化圖。當擴散溫度在 500 °C 時呈現出最高矯頑磁力。圖 6.2.5 為磁能積隨不同後退火溫度之變化圖。當其退火溫度在 500 °C 時，矯頑磁力為 4.0 kOe 磁能積為 6.5 MGOe。

表 6.2.2 Cu/FePd (675 °C) 薄膜經不同溫度退火之飽和磁化量和殘餘磁化量及矯頑磁力、磁能積一覽表

<b>FePd 675 °C</b>	<b><math>M_s</math> (emu/cm<sup>3</sup>)</b>	<b><math>M_r</math> (emu/cm<sup>3</sup>)</b>	<b><math>H_c</math> (Oe)</b>	<b>(BH)<sub>max</sub> (MGOe)</b>
RT	786	636	2950	6.1
300 °C	775	625	3100	6.2
350 °C	770	621	3400	6.5
400 °C	765	619	3600	7.1
450 °C	758	617	4000	7.5
500 °C	753	610	4500	7.6

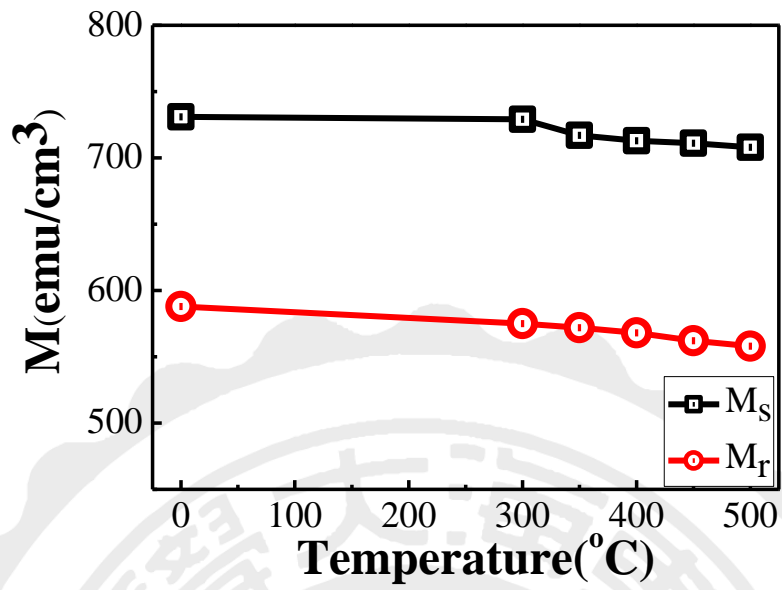


圖 6.2.3 Cu/FePd (675 °C) 薄膜飽和磁化量及殘餘磁化量隨不同後退火溫度之變化圖。

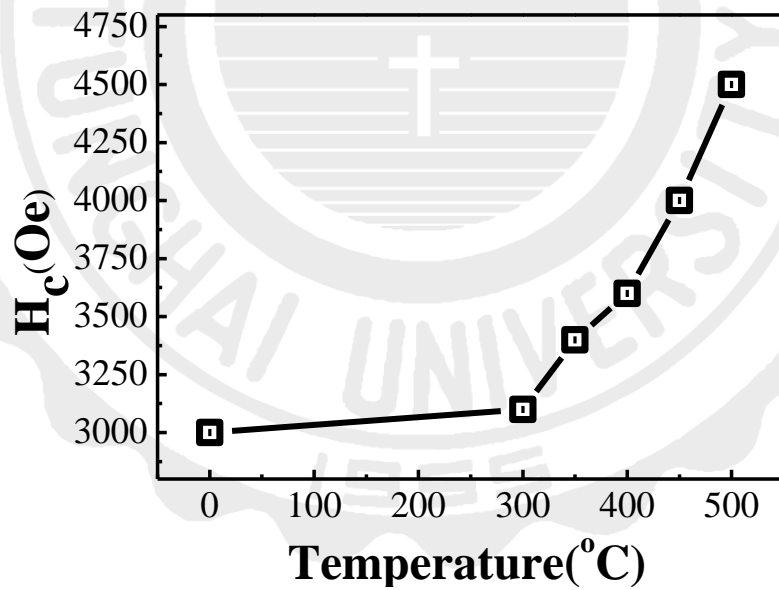


圖 6.2.4 Cu/FePd (675 °C) 薄膜經不同溫度退火之水平矯頑磁力圖。

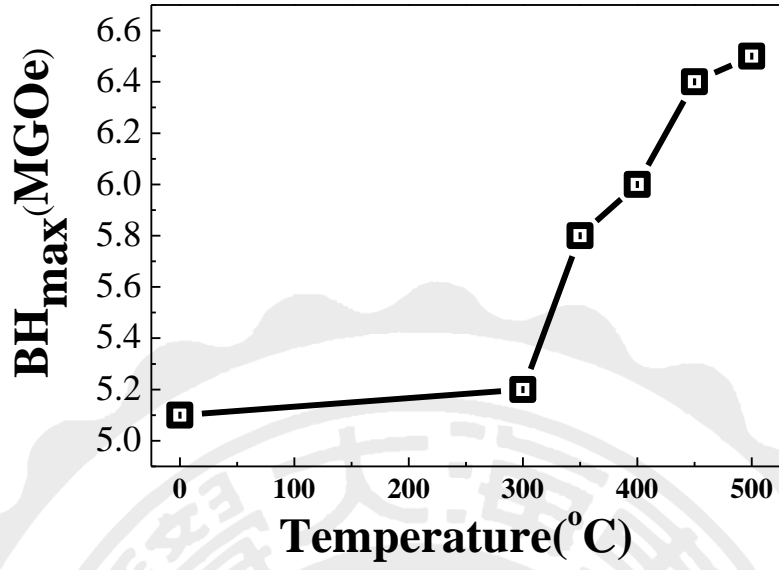


圖 6.2.5 Cu/FePd (675 °C) 薄膜經不同溫度退火之磁能積變化圖。

### 6-2-3 表面形貌之研究

圖 6.2.6 為 Cu/FePd (675 °C) 薄膜經不同溫度後退之 SEM 圖。藉由加入銅頂層，隨著擴散溫度表面帶有孔洞和小晶粒，並隨之增加。

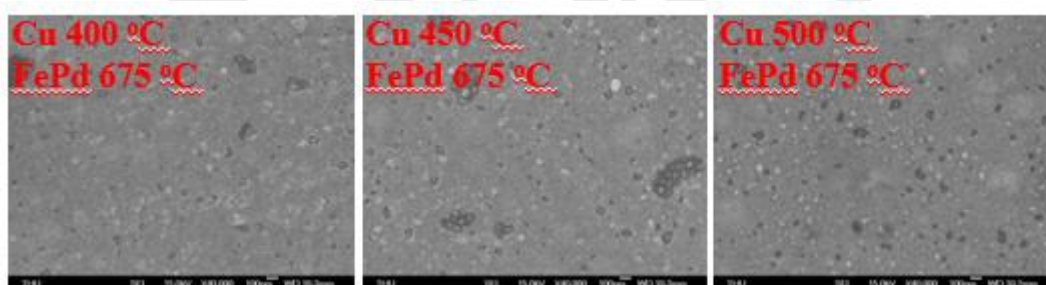


圖 6.1.6 Cu/FePd (675 °C) 薄膜經不同溫度後退火之 SEM 圖。

## 6-3 Cu 頂層擴散效應對經 700 °C 後退火 FePd 膜結構及磁性之影響

本節以直流濺鍍法製備單層 30 nm FePd 薄膜，改變製成條件為覆蓋銅頂層，並進行不同溫度後退火，探討不同溫度對 FePd 薄膜結構及磁性之影響。

### 6-3-1 結構分析

圖 6.3.1 為 FePd 退火溫度為 700 °C 並覆蓋銅頂層經不同退火溫度後退火之 XRD 圖。在初鍍態時，FePd 薄膜僅出現(111)繞射峰，(111)有增強。

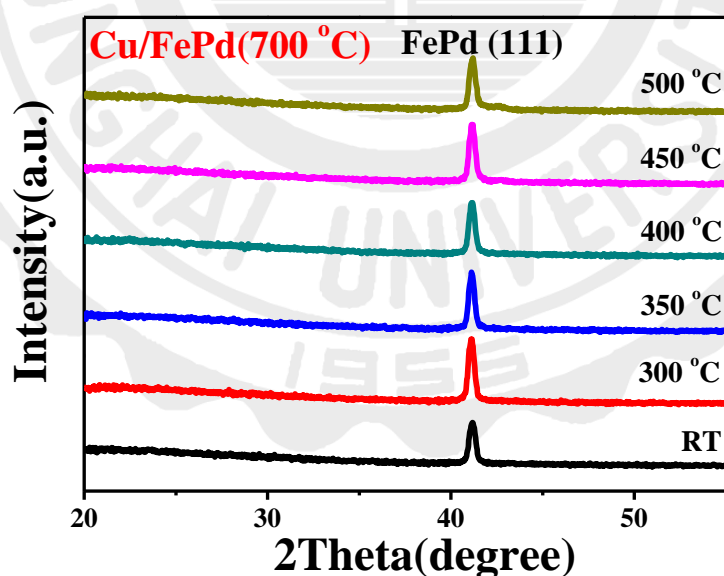


圖 6.3.1 Cu/FePd (700 °C) 薄膜經不同退火溫度後退火之 XRD 圖。

### 6-3-2 磁性之研究

圖 6.3.2 為 FePd 退火溫度為 700 °C 並覆蓋銅頂層經不同退火溫度後退火之磁滯曲線圖。由圖可知，藉由銅頂層擴散當退火溫度為 500 °C 時，其有著最高的矯頑磁力為 4.5 kOe。

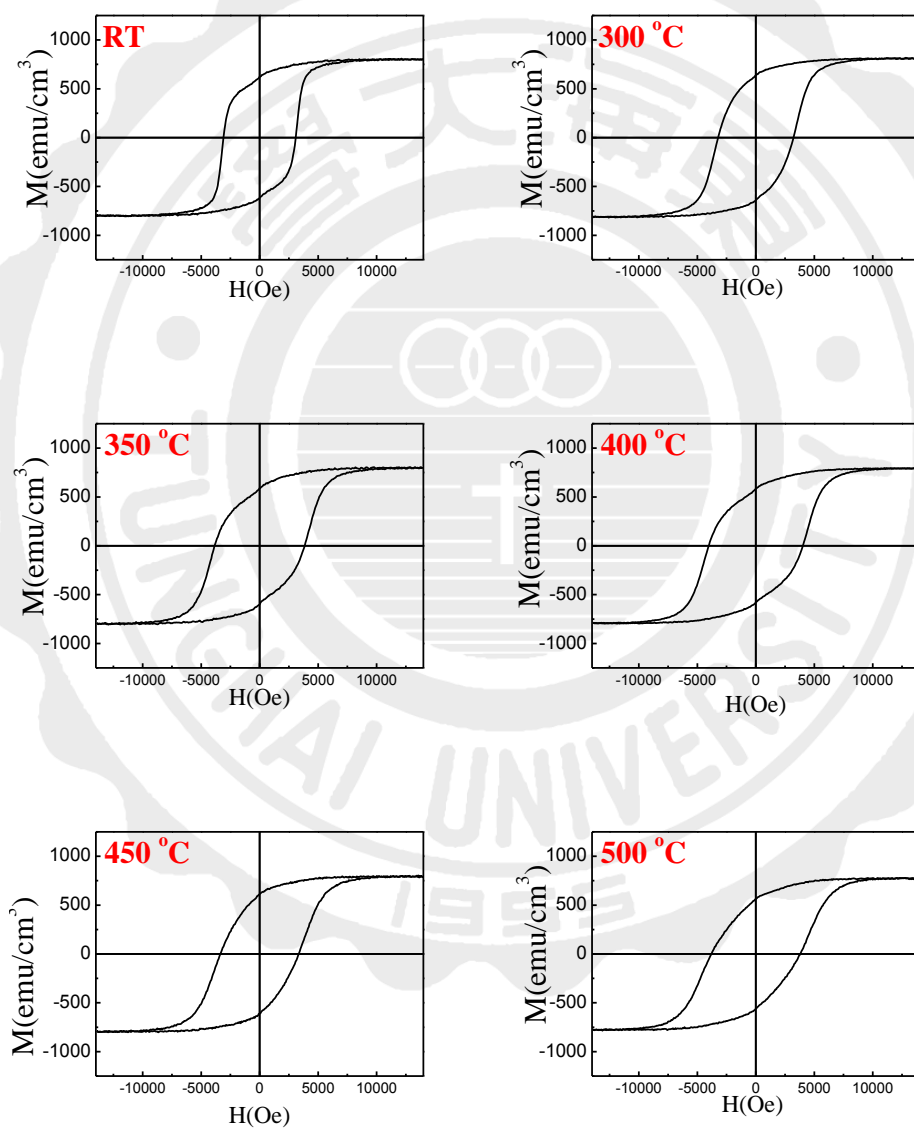


圖 6.3.2 Cu/FePd (700 °C) 薄膜經不同退火溫度後退火之磁滯曲線圖。

根據 6.3.2 作分析彙整其磁性圖於表 6.3.2。圖 6.3.3 為 Cu/FePd 薄膜之飽和與殘餘磁化量隨不同後退火溫度之變化圖。由圖可知，兩磁化量都隨之下降。圖 6.3.4 為矯頑磁力隨不同後退火溫度之變化圖。隨著退火溫度提升矯頑力有明顯的提升，在擴散溫度為 400 °C 有最高的矯頑磁力，而擴散溫度持續提升到 450 °C 時，矯頑磁力顯著下降。圖 6.3.5 為磁能積隨退火溫度變化圖。磁能積隨著退火溫度上升也有所提升，並且在擴散溫度為 300 °C 時，其因有高矯頑磁力，故可獲得相當高的磁能積為 5.3 MGOe。

表 6.3.2 Cu/FePd (700 °C) 薄膜經不同溫度退火之飽和磁化量和殘餘磁化量及矯頑磁力、磁能積一覽表

<u>FePd</u> <u>700 °C</u>	<u>M<sub>s</sub></u> (emu/cm <sup>3</sup> )	<u>M<sub>r</sub></u> (emu/cm <sup>3</sup> )	<u>H<sub>c</sub></u> (Oe)	<u>(BH)<sub>max</sub></u> (MGOe)
RT	775	636	3090	7.3
300 °C	773	630	3200	7.2
350 °C	768	592	3850	7.2
400 °C	765	586	4100	7.1
450 °C	755	580	3800	7
500 °C	751	562	3360	6.9

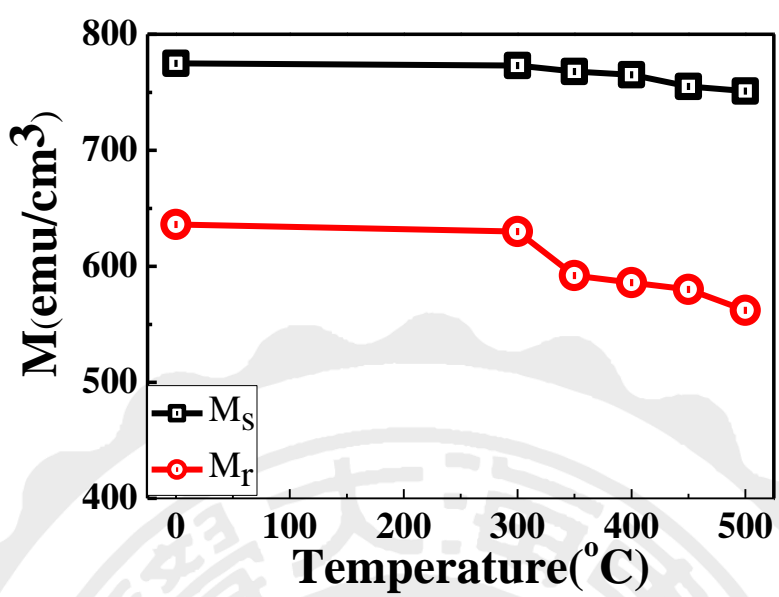


圖 6.3.3 Cu/FePd (700 °C) 薄膜飽和磁化量及殘餘磁化量隨不同後退火溫度之變化圖。

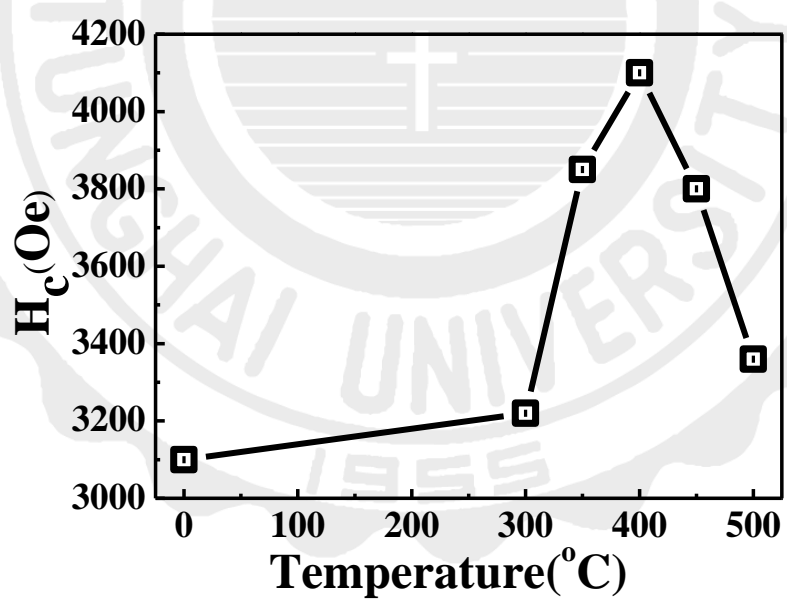


圖 6.3.4 Cu/FePd (700 °C) 薄膜經不同溫度退火之水平矯頑磁力圖。



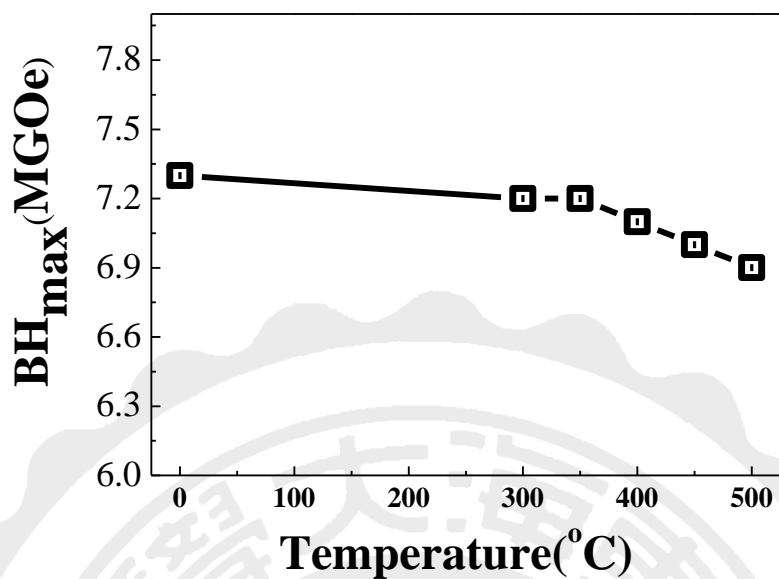


圖 6.3.5 Cu/FePd (700 °C) 薄膜經不同溫度退火之磁能積變化圖。

#### 6-3-4 表面形貌之研究

圖 6.3.6 Cu/FePd (700 °C) 薄膜經不同溫度後退之 SEM 圖。藉由加入銅頂層，隨著退火溫度提升 Cu 頂從逐漸熔進 FePd 中，並形成塊狀。

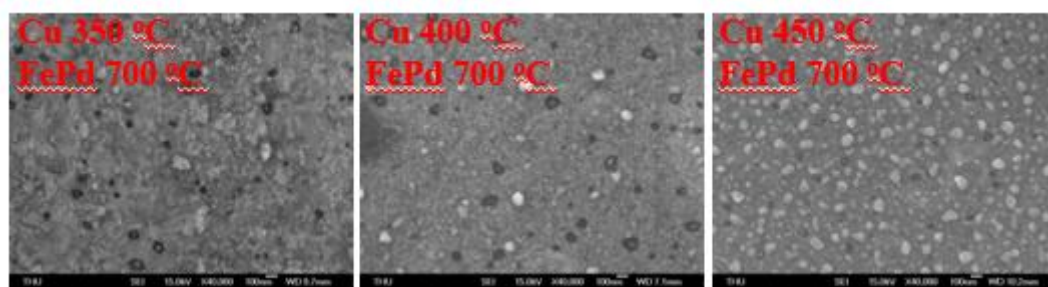


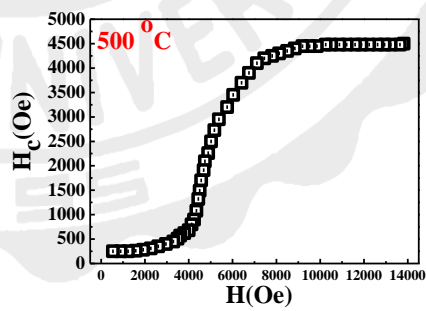
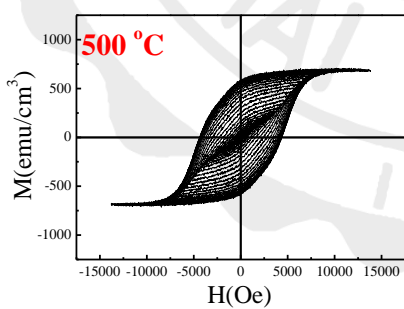
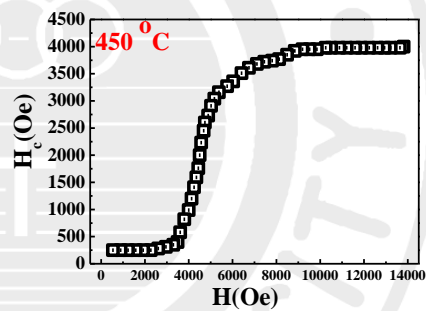
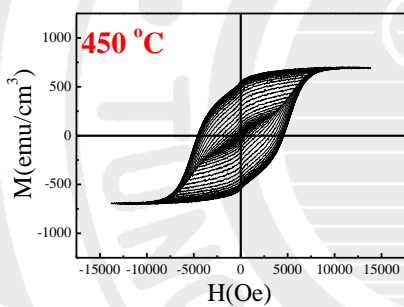
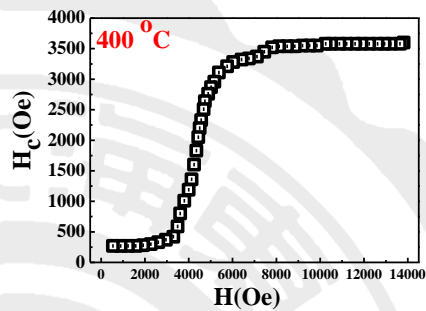
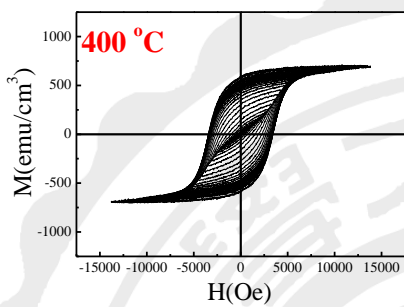
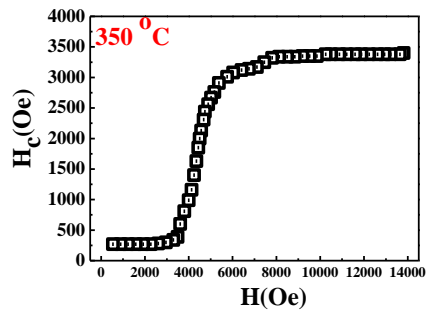
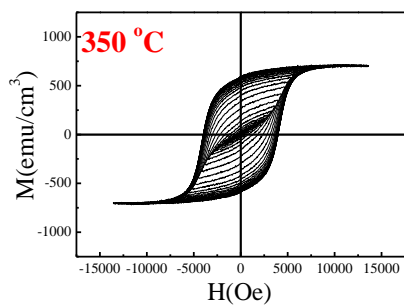
圖 6.3.6 Cu/FePd (700 °C) 薄膜經不同溫度後退火之 SEM 圖。

## 6-4 Cu 擴散效應對不同序化 FePd 薄膜結構與磁性之探討。

當 FePd 退火溫度為 650 °C 藉由不同擴散溫度樣品藉由 XRD 分析皆呈現(111)繞射峰，繞射峰隨之增強，磁滯曲線上可以觀察隨著溫度提升矯頑磁力皆有明顯的增加，最高值出現擴散溫度為 500 °C，其矯頑磁力為 4.0 kOe。

當 FePd 退火為 675 °C 時進行擴散，隨著溫度增加當擴散溫度為 500 °C，其因矯頑磁力為 4.5 kOe，故最高的磁能積為 7.6 MGOe，表面形貌上會產生部分塊狀，在文獻上[76]擴散會增進磁性原因為擴散過程時頂層會逐漸熔於擴散層從缺陷開始延伸圍繞著擴散層的晶界包覆晶粒，並且抑制晶粒間交互作用減少晶粒尺寸。

FePd 退火為 700 °C 時進行擴散，隨著擴散溫度增加，相較與單層 700 °C 時矯頑磁力逐漸提升，當擴散溫度為 400 °C，其有較高的矯頑磁力為 4.1 kOe，初步探討以頂層擴散可有效達到矯頑磁力之提升，且探討矯頑磁力機制是典型磁區壁拴固型所主導的矯頑機制。



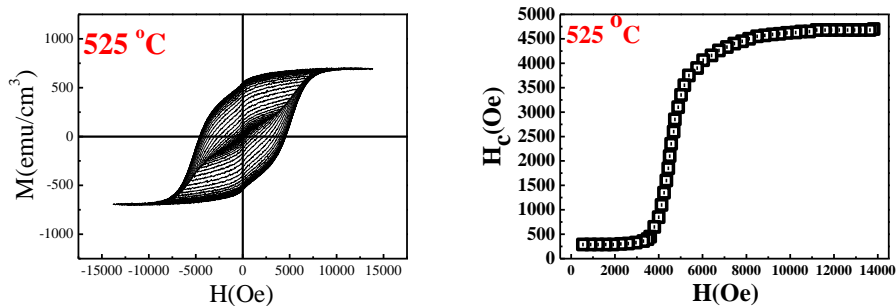


圖 6.4.1 加入銅頂層後經由不同溫度退火之矯頑力機制圖。

表 6.4.1 加入銅頂層後經由不同溫度退火之飽和磁化量和殘餘磁化量及矯頑磁力、磁能積一覽表

Method	Gas	structure	T(°C)	$M_s$ (emu/cm <sup>3</sup> )	$M_r$ (emu/cm <sup>3</sup> )	$H_c$ (Oe)	(BH) <sub>max</sub> (MGOe)
Dc sputtering	N <sub>2</sub>	FePd (650 °C)	RT	791	655	2280	6.9
		Cu FePd (650 °C)	500	755	625	4000	7.0
Dc sputtering	N <sub>2</sub>	FePd (675 °C)	RT	766	636	2950	6.1
		Cu FePd (675 °C)	500	753	610	4500	7.6
Dc sputtering	N <sub>2</sub>	FePd (700 °C)	RT	775	636	3100	7.3
		Cu FePd (700 °C)	400	751	562	4100	6.9

## 第七章 結論

### 1. 靶距效應對於 $\text{Fe}_{50}\text{Pd}_{50}$ 薄膜經不同溫度後退火結構及磁性之影響

以不同濺鍍法製備 30 nm  $\text{Fe}_{50}\text{Pd}_{50}$  薄膜於玻璃基板上，並以快速升溫退火做不同溫度退火處理( $T_a = 500\text{ }^\circ\text{C} - 750\text{ }^\circ\text{C}$ )，並研究其結構及磁性。實驗結果顯示，由射頻濺鍍與直流濺鍍從 XRD 圖可知，隨著退火溫度提升繞射峰顯著向右偏移表示著 FePd 結構的轉變，使其矯頑磁力提升，若退火溫度持提升至  $725\text{ }^\circ\text{C}$ ，繞射峰會往回偏移意指著 FePd 又會轉變為面心立方結構。而靶距的改變，有效進一步提升其矯頑磁力，並且靶距的改變有助於降低 FePd 序化溫度。

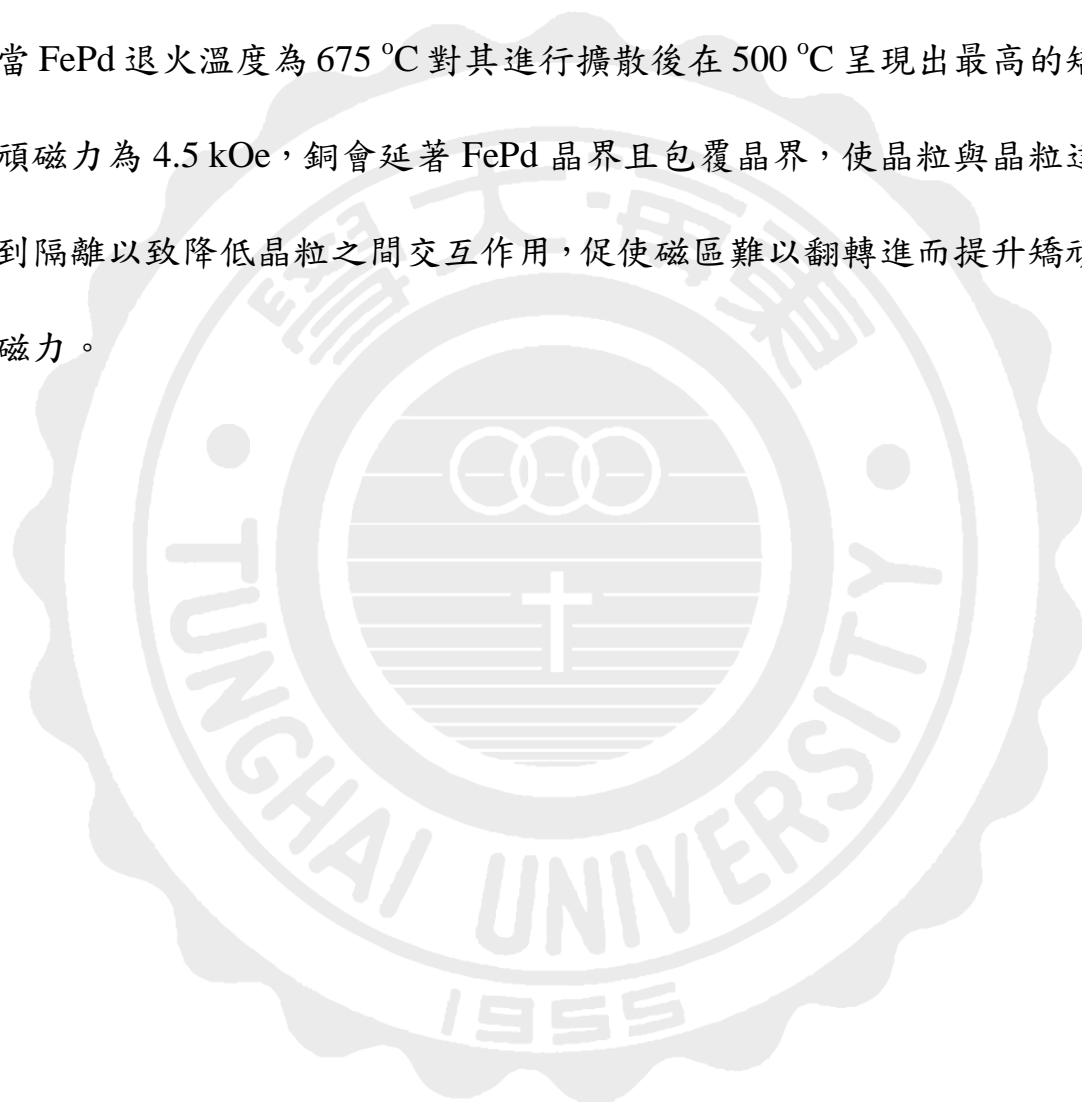
藉由脈衝直流濺鍍所製備的 FePd 薄膜，當靶距為 5 cm 時顯示的結果都較於射頻濺鍍和直流濺鍍優異，經由 FePd(111)晶粒的平面間距計算得知在初鍍態下應力較大，並且經由退火後應力釋放有著較大的矯頑磁力。

### 2. 氮氣效應對於 $\text{Fe}_{50}\text{Pd}_{50}$ 薄膜經不同溫度後退火結構及磁性之影響

氮氣的加入將使 FePd 較易序化，矯頑磁力最高值出現在退火溫度為  $700\text{ }^\circ\text{C}$  時靶距為 12.5 cm，其為 3.9 kOe，而磁性之提升可能與初鍍態壓縮應力較大有關。

### 3. 擴散效應對於 $\text{Fe}_{50}\text{Pd}_{50}$ 薄膜經不同溫度後退火結構及磁性之影響

本節以加入頂層並且以不同溫度下擴散，來探討擴散效應對其結構與磁性影響。由三種不同溫度退火後的  $\text{L1}_0$  FePd 做 Cu 頂層擴散，當 FePd 退火溫度為  $675^\circ\text{C}$  對其進行擴散後在  $500^\circ\text{C}$  呈現出最高的矯頑磁力為  $4.5\text{ kOe}$ ，銅會延著 FePd 晶界且包覆晶界，使晶粒與晶粒達到隔離以致降低晶粒之間交互作用，促使磁區難以翻轉進而提升矯頑磁力。



## 參考文獻

- [1] B. D. Cullity et al., 1972. Addison-Wesley Publishing Company , Inc. , 207.
- [2] 楊智信，垂直記錄原理，台灣資訊技術儲存協會會刊，(2005)。
- [3] D. Weller, A. Moser, L. Folks, M. E. Best, W. Lee, M. F. Toney, M. Schwickert, J. U. Thiele, and M. F. Doerner, “High Ku materials approach to 100 Gbits/in<sup>2</sup>”, *IEEE Trans. Magn.* 36, 10 – 15 (2000).
- [4] P. Caro, A. Cebollada, F. Briones, and M.F. Toney, “Structure and chemical order in sputtered epitaxial FePd(001) alloys”, *J. Cryst. Growth.* 187, 426 (1998).
- [5] T. Massalski, ed. “Binary Alloy Phase Diagrams”, ASM international, (1990).
- [6] C. Clavero, J. M. Garc á-Mart ín, J. L. Costa Kr ämer, G. Armelles, and A. Cebollada, 2006. “Temperature and thickness dependence at the onset of perpendicular magnetic anisotropy in FePd thin films sputtered on MgO(001)”, *Phys. Rev. B.* 73, 174405.
- [7] J. R. Skuza, C. Clavero, K. Yang, B. Wincheski, and R. A. Lukaszew, 2010. “Microstructural, magnetic anisotropy, and magnetic domain structure correlations in epitaxial FePd thin films with perpendicular magnetic anisotropy”, *IEEE Trans. Magn.* 46, 6, 1886.
- [8] D. H. Wei and Y. D. Yao, 2009. “Controlling microstructure and magnetization process of FePd (001) films by staged thermal modification”, *J. Appl. Phys.* 95, 1725003.
- [9] M. N. I. Khan, N. Inami, H. Naganuma, Y. Ohdaira, and M. Oogane, 2012. “Promotion of L1<sub>0</sub> ordering of FePd films with amorphous CoFeB thin Interlayer”, *J. Appl. Phys.* 111, 07C112.
- [10] B. Li, W. Liu, X. G. Zhao, S. Ma, W. J. Gong, J. N. Feng, F. Wang, and Z. D. Zhang, 2013. “Ordering temperature of L1<sub>0</sub>-FePd film reduced by Ag underlayer”, *Mater. Lett.* 100, 58.
- [11] H.W. Chang, F.T. Yuan, W.C. Chen, D.H. Wei, M.C. Lin, C.R. Wang, W.C. Chang, 2015. “Magnetic property improvement of sputter-prepared FePd films on glass substrates with W underlayer”. *J. Alloys Compd.* 622, 1013–1017
- [12] D. Pecko, S. Sturm, S. Kobe, K. Z. Rozman. 2015. “Potentiostatically Electrodeposited Hard-Magnetic Fe–Pd-Based Nanowires”. *IEEE TRANS. MAG.* 51, 9600204.

- [13] L. Ma, L. Zhou, T. Liu, S.Q.Zhao,L. Li, X. F. Wu, Y . L. Zhang, G. Cheng, 2016. “Microstructure and magnetic properties of self-assembled FePd–SiN films”.*J Mater Sci.* 27, 7420.
- [14] T. Liu, L. Ma, S. Zhao, D. Ma, L. Li, G. Cheng , 2017. “Promotion of L<sub>10</sub> Ordered Phase Transformation by the Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> Top Layer on FePd Thin Films”*J Supercond Nov Magn* 30, 3215-3219.
- [15] M. He, L. Ma, X. Zhou,T. Liu, Q. Yao, Z. Gu, 2019. “Effect of N on the microstructure and magnetic properties of FePdSi nanocomposite films”*Mater. Res. Express* 6, 046406.
- [16] T. Liu, L. Ma, S. Q. Zhao, D. D. Ma, L. Li, G. Cheng, 2016. “Crystal structure and magnetic properties of Fe<sub>x</sub>Pd<sub>12-x</sub> thin films annealed at 550 C”. *J Mater Sci.* 28, 3616 – 3620.
- [17] J Xu, L Jia, C Li, H Wang, L Ma, H Sun,D.Hou.2017. “Ti Capping Layer Effects in Microstructure and Magnetic Properties of Sputter-Deposited FePt Thin Film” *J Supercond Nov Magn* 31,2207-2210.
- [18] F. T. Yuan, S. K. Chen, W. C. Chang, and Lance Horng, 2004. “Effect of Au cap layer on the magnetic properties and the microstructure for FePt thin films”*Appl. Phys. Lett.* 85, 15 .
- [19] C. Clavero, J. R. Skuza, Y. Choi, D. Haskel, and J. M. Garc ía-Mart ín, 2008. “Control of the perpendicular magnetic anisotropy of FePd films via Pd capping deposition”, *Appl. Phys. Lett.* 92, 162502.
- [20] C. Clavero, J. M. Garc ía-Mart ín, J. L. Costa Kr ämer, G. Armelles, and A. Cebollada, 2006. “Temperature and thickness dependence at the onset of perpendicular magnetic anisotropy in FePd thin films sputtered on MgO(001)”, *Phys. Rev. B.* 73, 174405
- [21] Mitsuru Ohtake, Shouhei Ouchi, Fumiyoshi Kirino, and Masaaki Futamoto, 2012.“L<sub>10</sub> ordered phase formation in FePt, FePd, CoPt, and CoPd alloy thinfilms epitaxially grown on MgO(001) single-crystal substrates”, *J. Appl. Phys.* 111, 07A708.
- [22] B. D. Cullity, 1972. *Introductiton to magnetic materials*, Addison-Wesley Publishing Company , Inc., 207
- [23] C. Kittel, 1972. “Introduction of Solid State Physics” 8th Ed, John Wiley, Sons inc.
- [24] U. Ozgür, Ya. I. Alivov, and H. Morkoç, 2009. “Microwave ferrites, Part 1: Fundamental Properties”, *Journal of Materials Science: Materials in Electronics* 20, 789.



- [25] 陳士堃，磁性技術手冊—第三章，中華民國磁性技術協會(2002).
- [26] Nicola A. Spaldin, 2003. “Magnetic Materials Fundamentals and device applications”,42,5791.
- [27]金重勳主編，陳士堃，第三張。
- [28] A. H. Morrish, 1965. “The Physical Principles of Magnetism”, Wiley, New York .
- [29] Stoner, 1945. *Philosophical Magazine*. 7, 803.
- [30] B. D. Cullity, C. D. Graham, 2008. Introduction to Magnetic Materials 2nd edition, New York: Wiley .
- [31] Shuyun Wang, Tiejun Gao, Cuntao Wang, Jianfang He, 2013. *Journal of Alloys and Compounds*. 554, 405–407 .
- [32] B.G. Park, J. Wunderlich, X. Martí V. Holy, Y. Kurosaki, M. Yamada, H. Yamamoto, A. Nishide, J. Hayakawa, H. Takahashi, A.B. Shick, T. Jungwirth, 2011. *Nat. Mater.* 10, 347.
- [33] A. H. Morrish, 1965. “The Physical Principles of Magnetism”, Wiley, New York.
- [34] M.Goertz, 1951. *Journal of Applied Physics*. 22,964.
- [35] 梅瑞國，鐵鉑薄膜經快速熱退火處理後之結構、相變、優選方位與內應力之研究，大同大學材料工程學系(2011)。
- [36][http://www.tf.uni-kiel.de/matwis/amat/elmat\\_en/kap\\_4/backbone/r4\\_3\\_4.html](http://www.tf.uni-kiel.de/matwis/amat/elmat_en/kap_4/backbone/r4_3_4.html).
- [37] Umit Ozgur, Microwave Magnetic ferrites, 2009. part 1: fundamental properties. ”*J. Mater. Sci. Mater. Electron* 20, 789
- [38] 張文成，磁性技術手冊，P.54 (2002).
- [39] T. Schied, A. Lotnyk, C. Zamponi, L. Kienle, J. Buschbeck, M. Weisheit, B. Holzapfel, L. Schultz, and S. Fähler, 2010. “Fe–Pd thin films as a model system for self-organized exchange coupled nanomagnets”, *J. Appl. Phys.* 108, 033902.
- [40] T. Ichitsubo, S. Takashima, E. Matsubara, Y. Tamada, and T. Ono, 2010. “Exchange-coupling of c-axis oriented L1<sub>0</sub>–FePd and Fe in FePd/Fe thin films”, *Appl. Phys. Lett.* 97, 182508.
- [41] Noritsugu Sakuma, Tsubasa Ohshima, Tetsuya Shoji, Yoshihito Suzuki, Ryota Sato, Ayako Wachi, Akira Kato, Yoichiro Kawai, Akira

Manabe, and Toshiharu Teranishi, 2011. “Exchange Coupling Interaction in  $L1_0$ -FePd/ $\alpha$ -Fe Nanocomposite Magnets with Large Maximum Energy Products”, *ACS Nano*.5, 4, 2806.

[42] 盧志權，AMR 磁感測器設計，台灣磁性技術協會會訊 51 期，(2010)。

[43] 葉林秀、李佳謀、徐明豐、吳德和，磁阻式隨機存取記憶體技術的發展—現在與未來，物理雙月刊（廿六卷四期），(2004)。

[44] 詹丁山、劉如熹，自旋電子學之基石：簡介磁電阻與半金屬材料之發展與應用，化學，第六十六卷，第一期，(2008)。

[45] R. J.Hill, “Physical vapor deposition” 2nd Ed, (1985).

[46] B. Z. Cui, M. Q. Huang, R. H. Yu, A. Kramp, J. Dent, D. D. Miles, and S. Liu, *Journal of Applied Physics*. 93, 8128 (2003).

[47] 唐偉忠，薄膜材料製備原理、技術及應用，北京冶金工業出版社(1998)。

[48] 吳自勤、王兵，薄膜生長，科學出版社(2001)。

[49] 陳建人，真空技術與應用，國家實驗研究院儀器科技研究中心(2008)。

[50] 麻蒔立男著、陳國榮等人譯，薄膜製備技術基礎(原著第四版)，化學工業出版。

[51] T. Schied, A. Lotnyk, C. Zamponi, L. Kienle, J. Buschbeck, M. Weisheit, B. Holzapfel, L. Schultz, and S. Fähler, 2010. *Journal of Applied Physics*. 108, 033902.

[52] T.Massalski, ed., “Binary Alloy Phase Diagrams” , ASM international, (1990).

- [53] 陳建人，真空技術與應用，國家實驗研究儀器科技研究中心。
- [54] J. Topfer, B. Pawlowski, H. Beer, K. Plotner, P. Hofmann, and J. Herrfurth, 2004. "Multi-pole magnetization of NdFeB magnets for magnetic micro-actuators and its characterization with a magnetic field mapping device", *J. Magn. Magn. Mater.* 270, 124.
- [55] 張家銓，何家文，材料中殘餘應力的 X 射線衍射分析和作用、2、X 射線衍射應力分析，西安交通大學出版社(1999)。
- [56] 李柏毅，室溫下以濺鍍法研製 CoPt 薄膜及其磁性之研究，東海大學應用物理系碩士論文(2014)。
- [57] S. Yoshimoto, Y. Murata, K. Kubo, K. Tomita, K. Motoyoshi, T. Kimura, H. Okino, R. Hobara, I. Matsuda, S. Honda, M. Katayama, and S. Hasegawa. 2007. Four-point probe resistance measurements using PtIr-coated carbon nanotube tips. *Nano Lett.* 7:956–959.
- [58] 原力精密儀器股份有限公司，操作手冊。
- [59] 陳哲雄、林俊勳、林紋瑞、吳靖宙，原子力顯微鏡(Atomic Force Microscopy)，成功大學醫學工程所生醫感測實驗室(成像原理與中文簡易操作手冊)。
- [60] 林麗娟，X 光繞射原理及其應用，工業材料 86 期，(1994)。
- [61] 陳光鏡，鎳鐵/鐵錳雙層膜退火溫度對交換耦合偏壓場之研究，國立彰化師範大學物理研究所碩士論文，(2007)
- [62] M. Viret, Y. Samson, P. Warin, A. Marty, F. Ott, E. Søndergård, and O. Klein, C. Fermon, 2000. "Anisotropy of Domain Wall Resistance", *Phys. Rev. Lett.* 85, 18.
- [63] K. M. Seemann, M. C. Hickey, V. Baltz, B. J. Hickey, and C. H. Marrows, 2010. "Spin-dependent scattering and the spin polarization of a diffusive current in partly disordered L1<sub>0</sub> epitaxial FePd", *New. J. Phys.*

033033, 19.

[64] 羅聖全，科學基礎研究之重要利器-掃描式電子顯微鏡(SEM)，(2013)。

[65] 黃彥傑，鐵鉑-二氧化鋯奈米複合材料合成及特性分析，台北科技大學機械工程系碩士論文，(2013)。

[66] 羅聖全，研發奈米科技的基本工具之一電子顯微鏡介紹-TEM，小奈米大世界。

[67] 陳煒杰，底層對 FePd 薄膜磁性之影響，國立台北科技大學機械與機電工程系碩士論文(2014)。

[68] K. Wasa, and S. Hayakawa, 1992. "Sputter Deposition Technology", Noyes Publications.

[69] Donald L. Smith, and McGraw Hill, 1995. "Thin-film deposition : principles and practice", McGraw Hill Professional.

[70] Stephen M. Rosnagel, Jerome J. Cuomo and William D. Westwood, 1989. "Plasma Processing Technology", Noyes Publications,.

[71] P. Caro et al., 1998. *J. Cryst. Growth.* 187, 426-434.

[72] Satoru Yoshimura, Shogo Omiya, Genta Egawa, and Hitoshi Saito, 2011. "Fabrication of (001) Oriented TMR Film With Highly Ordered L<sub>10</sub>-Fe(Pd, Pt) Alloy Films by Using a Very Thin Fe Underlayer", *IEEE Trans. Magn.* 47, 10.

[73] M. N. I. Khan, N. Inami, H. Naganuma, Y. Ohdaira, and M. Oogane, 2012. "Promotion of L<sub>10</sub> ordering of FePd films with amorphous CoFeB thin Interlayer", *J. Appl. Phys.* 111, 07C112.

[74] M. N. I. Khan, H. Naganuma, N. Inami, M. Oogane, and Y. Ando, 2013. "Effect of Annealing Temperature on Structure and Magnetic Properties of L<sub>10</sub>-FePd/CoFeB Bilayer", *IEEE Trans. Magn.* 49, 7, 4409.

[75] Noritsugu Sakuma, Tsubasa Ohshima, Tetsuya Shoji, Yoshihito Suzuki, Ryota Sato, Ayako Wachi, Akira Kato, Yoichiro Kawai, Akira Manabe, and Toshiharu Teranishi, 2011. "Exchange Coupling

Interaction in  $L1_0$ -FePd/ $\alpha$ -Fe Nanocomposite Magnets with Large Maximum Energy Products”, *ACS Nano*. 5, 4, 2806.

[76] Z. Yanli, C. Gang, X. Xiaozong, L. Lin, 2018. “Effect of Change in Thickness of Ag Toplayer on the Structure and Magnetic Properties of FePd Films Grown on Glass Substrate”*J Wuhan Univ Technol.* 33,1082-1085.

