

## 摘要

本實驗將利用高純度鋁(99.9%)經電化學之陽極處理法製作奈米孔洞結構之陽極氧化鋁模板(anodic aluminum oxide; AAO)。並利用直流電鍍法將低熔點的鋅(Zn)元素填入至陽極氧化鋁模板內，製得鋅金屬奈米線材。之後，將所製得之鋅奈米線材，經 400°C、50 小時的氧氣氣氛爐氧化後，獲得氧化鋅奈米線陣列，而後再以 X-光繞射分析儀(XRD)、掃描式電子鏡(SEM)、原子力顯微鏡(AFM)和穿透式電子鏡(TEM)分析儀器觀察鋅奈米線和氧化鋅奈米線陣列的微觀結構及表面型態，其結果顯示出鋅原子藉由毛細現象(capillary effect)，讓氧化鋅奈米線能在氧化鋁管中得以成核和成長為 wurtzite 結構(繞射面方向(102)、(101))。而在光激發光能譜儀(photoluminescence ;PL)的分析中，氧化鋅奈米線的發光波長是取決於氧空孔，並且在 15nm 的氧化鋅奈米線中發現到，波長有藍位移的現象，顯示出在奈米尺寸的效應下，氣氛中的氧氣在高溫的環境下更容易進入到奈米線中，進而與氧空孔結合，使氧化的過程趨近於完全(2.76eV)。

## Abstract

In our experiment, specimens of high purity(99.999%) aluminum were used and fabricated nano-scale anodic alumina oxide (AAO), such as 200·60 and 15nm AAO by tow step anodic method .Using one step direct current electrodeposited low melting point of Zn to full up the anodic alumina oxide (AAO) and to fabricate Zn metal nanowire. Then, taking the fabricated nano-array Zn wire on AAO to get zinc oxide (ZnO) nano-wire array by oxide furnace at 400°C. Scanning electron microscopy (SEM), transmission electron microscopy (TEM), atom force microscopy (AFM) and X-ray Diffraction (XRD) were used to investigate the microstructure and surface morphology of the ZnO nanowires. The result indicate that zinc atom can nucleate and grow in high aspect ratio pore of AAO by capillary effect to form wurtitize structure((101) · (102)). It is found that photoluminescence (PL) spectrum of ZnO/AAO assembly system depends on the excitation wave, which is attributed to different types of oxygen vacancies in the ZnO nanowires. We observe when the diameter of ZnO was small at 15nm, the wavelength had a blue shift. We guess the oxygen can more easily into nanowire at high temperature oxidizing process and combine with oxygen vacancies to get perfect ZnO nanowires.

# 目錄

摘要.....	1
目錄.....	3
圖目錄.....	5
第一章 導論.....	10
第二章 文獻回顧.....	12
2-1 陽極處理氧化鋁模板(AAO)之簡介.....	12
2-2 陽極氧化鋁(AAO)模版之機制.....	13
2-3 陽極處理之氧化鋁模板(AAO)之應用.....	17
2-4 奈米線氧化鋅(ZnO).....	18
第三章 實驗步驟.....	39
3-1 陽極氧化鋁薄膜之製備.....	39
3-1-1 電解拋光.....	39
3-1-2 二次陽極處理和擴孔處理.....	40
3-2 製備氧化鋅奈米線.....	41
3-3 測試及分析.....	41
3-3-1 X-ray 鑑定.....	41
3-3-2 掃描式電子顯微鏡(SEM)分析.....	42
3-3-3 原子力顯微鏡(AFM ; Atomic Force Microscope)分析.....	43

3-3-4 穿透式電鏡(TEM, Transition Electron Microscope )分析.....	44
3-3-5 激發光光譜分析(PL ; Photoluminescence).....	44
第四章 實驗結果與討論.....	51
4-1 陽極氧化鋁模板之表面型態.....	51
4-1-1 商用陽極氧化鋁模板的表面型態.....	51
4-1-2 草酸( $H_2C_2O_4$ )陽極氧化鋁模板.....	52
4-1-3 硫酸( $H_2SO_4$ )陽極氧化鋁模板.....	53
4-2 電鍍法置備氧化鋅奈米線.....	55
4-2-1 商用 AAO 置備氧化鋅奈米線.....	55
4-2-2 草酸( $H_2C_2O_4$ )AAO 置備氧化鋅奈米線.....	59
4-2-3 硫酸( $H_2SO_4$ )AAO 置備氧化鋅奈米線.....	60
4-3 X-ray 之分析.....	63
4-3-1 氧化鋅奈米線(ZnO)/商用(commercial)AAO.....	63
4-3-2 氧化鋅奈米線(ZnO)/硫酸( $H_2SO_4$ )AAO 和草酸( $H_2CO_4$ )AAO..	64
4-4 氧化鋅奈米線的光激發光(PL)性質分析.....	65
第五章 結 論.....	97
第六章 參考文獻.....	99

## 圖目錄

### 第二章

圖 2-1 CNT 場效發射體之製備.....	21
圖 2-2 FE 電場對電流密度作圖.....	21
圖 2-3 多孔氧化鋁模版置備柱狀型規則奈米結構之電容流程圖... ..	22
圖 2-4 模擬奈米電容之阻抗.....	22
圖 2-5 置備奈米結構在 ITO/玻璃基板上之流程圖.....	23
圖 2-6 以 sol-gel 的方式製備奈米線.....	23
圖 2-7 陽極氧化鋁的多孔性結構.....	24
圖 2-8 模擬的 AAO 3-D 立體圖.....	24
表 2-1 陽極氧化鋁的成長條件一覽表.....	25
圖 2-9 CdS 的奈米線.....	25
圖 2-10 Bi 的奈米線.....	26
圖 2-11 利用 AAO 製備 AgI 奈米線之設計圖.....	26
圖 2-12 AgI 奈米線.....	27
圖 2-13 阻障層和多孔薄膜示意圖.....	27
圖 2-14 陽極處理時間和陽極氧化鋁膜厚的關係圖.....	28
圖 2-15 阻障層到多孔薄膜的變化情形.....	28
表 2-2 各種氧化薄膜的阻障層厚度.....	29

表 2-3 各種條件下陽極氧化鋁的孔洞數.....	29
圖 2-16 Keller Model.....	30
圖 2-17 鋁在陽極處理的變化情形.....	30
圖 2-18 陽極處理時,電場的變化情形.....	31
圖 2-19 限制理論.....	31
圖 2-18 1D 和 2D 放射狀分布函數.....	32
圖 2-19 2D 放射狀分布函數實例.....	32
圖 2-20 選擇性成長 CNT 的 SEM 圖.....	33
圖 2-21 CNT 選擇性的成長奈米級的字“SAIT” .....	33
圖 2-22 CNT 選擇性成長.....	34
圖 2-23 利用滲透方式製備 CNT.....	34
圖 2-24 $\text{LiCo}_{0.5}\text{MnO}_2$ 奈米線.....	35
圖 2-25 鐵磁材料奈米線的 M-H 遲滯曲線.....	35
圖 2-26 ZnO 奈米線.....	36
圖 2-27 ZnO 奈米線/AAO 經 $300^\circ\text{C}$ 退火 的 XRD 分析.....	36
圖 2-28 氧化鋅奈米線/AAO 的 PL 光譜.....	37
圖 2-29 空白 AAO 的 PL 光譜(實線)和 ZnO/AAO(虛線)分別以不同的激發波長.....	38

### 第三章

圖 3-1 以 AAO 當模板製備氧化鋅奈米線實驗流程圖.....	46
圖 3-2 一般陽極處理之設計簡圖.....	47
圖 3-3 陽極處理之設計透視圖.....	47
圖 3-4 電鍍 Zn 的設計示意圖.....	48
圖 3-5 粉末繞射儀分析方式.....	48
圖 3-6 小角度 XRD 分析方式.....	49
圖 3-7 SEM 及 EDS 之分析方式.....	49
圖 3-8 原子力顯微鏡原理略圖.....	50
圖 3-9 TEM 之分析及成像原理.....	50
	
<b>第四章</b>	
圖 4-1 商用 AAO 的 AFM 表面型態.....	68
圖 4-2 商用 AAO 之 AFM 3-D 圖及縱深結構分析圖.....	68
圖 4-3 商用 AAO 之 SEM 俯視圖.....	69
圖 4-4 商用 AAO 之 SEM 剖面圖.....	69
圖 4-5 草酸( $H_2C_2O_4$ )AAO 的 AFM 表面型態.....	70
圖 4-6 草酸( $H_2C_2O_4$ )AAO 之 AFM 3-D 圖及縱深分析圖.....	70
圖 4-7 草酸( $H_2C_2O_4$ )AAO 之 SEM 俯視圖及剖面圖.....	71
圖 4-8 硫酸( $H_2SO_4$ )AAO 的 AFM 表面型態.....	72
圖 4-9 硫酸( $H_2SO_4$ )AAO 之 AFM 3-D 圖及縱深分析圖.....	72

圖 4-10 硫酸( $H_2SO_4$ )AAO 之 SEM 俯視圖.....	73
圖 4-11 硫酸( $H_2SO_4$ )AAO 之 SEM 俯視圖及剖面圖.....	74
圖 4-12 陽極處理時間對氧化鋁薄膜厚度的關係圖.....	75
圖 4-13 AAO 的 EDS 分析.....	76
圖 4-14 陽極處理電壓對鋅奈米線的關係圖.....	77
圖 4-15 鋅(Zn)電鍍在商用 AAO 上 0.5V.....	78
圖 4-16 鋅(Zn)電鍍在商用 AAO 上 1.2V.....	79
圖 4-17 鋅(Zn)電鍍在商用 AAO 上 2.0V.....	80
圖 4-18 氧化鋅(ZnO)電鍍在商用 AAO.....	81
圖 4-19 氧化鋅(ZnO)奈米線.....	82
圖 4-20 TEM 觀察陽極氧化鋁模板(AAO).....	83
圖 4-21 TEM 觀察氧化鋅奈米線(ZnO nanorod).....	84
圖 4-22 氧化鋅奈米線的 TEM 影像和繞射圖形及 Wurtzite 結構..	85
圖 4-23 鋅(Zn)電鍍在草酸( $H_2C_2O_4$ )AAO 上 0.8V,1.2V.....	86
圖 4-24 鋅(Zn)電鍍在草酸( $H_2C_2O_4$ )AAO 上 2.0V.....	87
圖 4-25 氧化鋅(ZnO)/草酸( $H_2C_2O_4$ )AAO 奈米陣列.....	88
圖 4-26 鋅(Zn)電鍍在硫酸( $H_2SO_4$ )AAO 上 0.4V,0.8V.....	89
圖 4-27 鋅(Zn)電鍍在硫酸( $H_2SO_4$ )AAO 上 1.5V.....	90
圖 4-28 氧化鋅(ZnO)/硫酸( $H_2SO_4$ )AAO 奈米陣列.....	91



圖 4-29 氧化鋅(ZnO)/硫酸(H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> )AAO 奈米陣列.....	92
圖 4-30 鋅(Zn)/商用 AAO X-ray 和氧化鋅(ZnO)/商用 AAO 分析...	93
圖 4-31 硫酸(H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> )AAO/鋁(Al)基材和氧化鋅(ZnO)/硫酸 (H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> )AAO X-ray 分析.....	94
圖 4-32 氧化鋅(ZnO)/硫酸(H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> )AAO X-ray 分析.....	95
圖 4-33 氧化鋅(ZnO) 之 PL 分析.....	96



## 第一章 導論

近年來，一維結構的奈米材料變得相當有潛力，不論是在電子產業、光學、磁性和各種性質都有很高的應用價值。因此，讓越來越多的研究趨向如何製備一維的奈米結構材料；而模板合成是一種以化學方式來達到製造奈米結構的方式，特別是針對一些奈米線方面。而近來，多孔性結構的陽極氧化鋁模板(AAO)被認為是合成奈米結構最合適的材料，因為其獨特的可多孔的結構特性和規則性的孔洞分佈。正因為如此，氧化鋁模板被廣泛的用來製備奈米尺寸的金屬或半導體的纖維、棒材、線材和管材。

氧化鋅(ZnO)擁有好的光學性質，特別是在光學波長[1, 2]、導電穿透[3]和表面聲波穿透[4]…等方面有相當多的應用。另外，其在室溫的寬能帶 3.37eV 更是適合用來做短波長的聲波元件，包含有光激發二極體(LEDs)和雷射二極體(LDs)[5]；再者，氧化鋅是室溫下紫外光雷射二極體(UV LDs)相當好的選擇，因為其激發鍵結能很大(60meV)比室溫下的 26meV 大的許多[6]；且當氧化鋅的尺寸達到相當小時，會因為量子效應而降低雷射的起始電壓。此外，有一些研究則是調查

氧化鋅奈米線在多孔氧化鋁內的光激發光特性研究，在 date. Li[7] 研究成果中提到氧化鋅在 515nm 的地方有相當寬的散射能帶，推測和單一的離子化氧空孔有很大的關連。

而如何將這 AAO 及氧化鋅結合在一起，或是說如何置備規則排列的奈米線光電原件，是現今大家都在努力的目標，一般成長規則排列的氧化鋅奈米線都會選用溶液配製法，包括：電鍍[7]、電泳法[8]、溶凝膠法[9]和熱液法[10]；而乾式法則大部分以氣相沈積為主，也因為氣相沈積法的變化比較豐富且參雜濃度易控制，因此，受到越來越多人的高度使用，但成本卻是其大缺點。在本文章中，我們將報告如何藉著多孔氧化鋁模板，利用低成本的電鍍法來置備一個高深寬比、高密度、大面積均質的氧化鋅奈米線；此外，還針對以不同孔徑的多孔氧化鋁模板所置備的氧化鋅奈米線在 PL 光譜下做分析的研究與探討。

## 第二章 文獻回顧


### 2-1 陽極處理氧化鋁模板(AAO)之簡介

近年來，有越來越多研究顯示出對於一維量子的奈米結構材料有相當高的興趣，因為其獨特的特性可應用在各種領域範圍內，譬如：以 AAO 當作模板，來製作奈米碳管 (CNT) 場發射顯示器，並探討有無鍍上催化劑 (Nb) 後對 I-V 曲線變化(如圖 2-1, 2-2 所示)，或是利用 AAO 高密度的孔洞結構特性製備奈米電容，讓資料儲存的速度可以獲得大大的提升[11, 12](如圖 2-3, 2-4 所示)。加上光電零件(將 AAO 應用在 LCD 光電製程上，如圖 2-5, 2-6 所示)和聲波元件[13-16]的需求劇增，都告訴我們高密度和高排列性的奈米陣列是現今不可獲缺的目標，因此用酸性電解液所製作的規則性孔洞結構，也就是陽極氧化鋁模板(AAO)，不僅擁有 10~200nm 範圍的奈米孔洞直徑，且其孔洞長度更達到 1~100  $\mu\text{m}$ ，顯示出其 1:500 的高深寬比特性，另外孔洞密度更可達至  $10^{10}\sim 10^{12}\text{cm}^{-2}$  的範圍[17-22](如圖 2-7, 2-8 所示)。

除了形貌上獨特的性質外，其熱傳及化學的穩定性也都是陽極氧化鋁模板(AAO)成為製備奈米線的主要原因，另外如果製備的電解液

不同還可獲得不同孔徑的陽極氧化鋁模板(AAO)(如表 2-1 所示)，讓之後利用各種合成方式製作的奈米金屬或半導體的纖維、棒、線和管…等材料[23-33](比如:利用 AAO 當作模板製備 CdS、Bi、Ag、AgI 之奈米線，如圖 2-9~2-12 所示)，亦或是一些生醫高分子的奈米線[33-36]，和單晶[37, 38]或各種元素成分[39-42]混合的奈米線材料，有許多的變化選擇；另外近年來，也有一些是以多孔氧化鈦[43-46]或是多孔氧化矽[47-50, 24]當作模板來製作各種奈米線，但因為孔洞的規律性和深度都不及陽極氧化鋁來的佳，因此未被大量使用。

## 2-2 陽極氧化鋁(AAO)模版之機制



如果鋁在一些酸性溶液中(比如:硫酸、鉻酸、磷酸或草酸)進行陽極處理，就會形成鋁的多孔性氧化膜。多孔性薄膜一般又被稱為雙重薄膜，這是因為多孔薄膜可以區分為阻障層薄膜(barrier layer)和多孔氧化薄膜(porous layer)(如圖 2-13 所示)。而多孔氧化薄膜(porous layer)的厚度大小是取決於時間、電流密度、電解液的溫度，如果拉長時間和加大電流密度，換句話說就是給予更多的電荷(電流密度 $\times$ 時間)，即可獲得比較厚的多孔氧化層(porous layer)，圖 2-14 是顯示實際的氧化鋁薄膜的厚度和理論厚度差異圖，可以看出實際的厚度會比根據法拉第定律的理論質來的小了許多，這是因為實

際量測到的厚度會因外在因素的影響，而比理論值來的小。圖 2-15 則是鋁在硫酸溶液中固定電壓下，電流和時間的曲線變化圖。由物理和化學的角度來看，圖可分為四各區域，(a)區指的是在鋁表面上有一層很薄且均一性佳的阻障層，(b)區則是因為阻障層的體積膨脹造成氧化層表面變的不規則，當表面開始變的不規則，就會造成電流密度不均勻化。因此，在凹陷處的電流密度就會慢慢增加，使微孔洞開始在凹陷處聚集，而使得電場和電解液對此產生反應，而這就是 C 區的反應，而 d 區則是孔洞的數目達到固定，但孔洞的深度仍舊快速的增加當中。另外，有研究指出當氧化薄膜的孔壁厚度越大時，孔洞的數目會變得比較少，又阻障層的厚度是左右孔壁的厚度主要條件，一般孔壁厚度是阻障層厚度的 2 倍，而各種電解液和阻障層厚度的關係(如表 2-2 所示)。阻障層的厚度是決定於陽極電壓的大小，因此阻障層厚度/電壓大小又稱為“coating ratio”，通常氧化鋁阻障層的 coating ratio 約 14 angstrom/V，其他像：鈦 16 angstrom/V、鈹 22 angstrom/V、鋅 22~27 angstrom/V，然後再從表 2-2 中可以計算出理論的氧化鋁在各種電解液的阻障層厚度，比如：硫酸 10 angstrom/V × 工作電壓 18V= 180 angstrom，草酸 11.8 angstrom/V × 工作電壓 40V= 472 angstrom…等，因此，以此為基礎可以反推測出各種電解液和電壓的理論孔洞密度(如表 2-3 所示)。

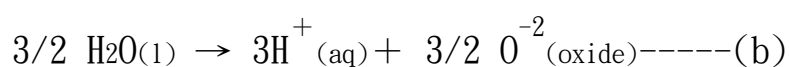
另外目前已經有 2 各較為被人接受的理論，來解釋氧化鋁薄膜結構的理論，一各是 Keller Model，另一各則是 Murphy Model。圖 2-16 是利用電子鏡觀察氧化鋁薄膜(磷酸電解液在 120V 的電壓下製成的)，研究結果指出氧化膜結構是由六角柱聚集而成的，因此 Keller Model 也被稱為 Hexagonal Column；另一方面，Murphy 則是指出氧化薄膜的結構是由鋁化合物的膠體顆粒聚合而成的。除此之外，Setoh 和 Miyata[51]兩個人是研究陽極氧化鋁模板(AAO)成形機制最為重要的兩個人，他們是認為由於一開始在水中產生的氧離子和鋁基材產生了新的阻障層，而孔洞則是由於陰離子的侵蝕和氧離子被鎖在孔洞的阻障層中以避免金屬和溶液的反應，且孔洞的成長方向會垂直基材表面是因為平衡電場的影響(如圖 2-17~2-19 所示)[118、119]。用化學反應來表示陽極處理氧化鋁(AAO)之模板成形機制如下[52]:

(1)  $\text{Al}^{3+}$  離子形成在金屬/氧化物的介面並且移動至氧化層中。

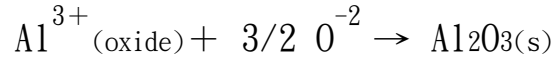


(2) 水的裂解反應，使得氧離子藉著電場的方向，從氧化層/電解液的介面移動至金屬/氧化物的表面而和鋁離子產生反應，而形成

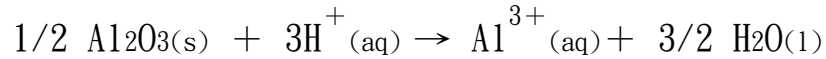
$\text{Al}_2\text{O}_3$ ，但因為反應是藉著擴散機制來控制，因此是相當緩慢的。



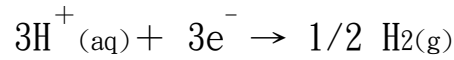
(a) + (b)



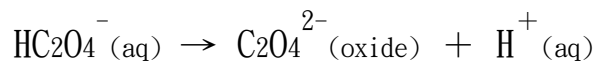
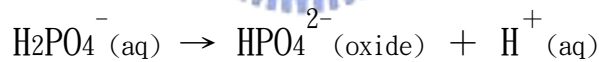
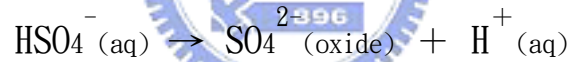
(3) 而質子又再跟氧化層反應，使得氧化層又被溶解，但這反應大概只有 30%，表示 70%的氧化層還存在著，而這也是為何反應後氧化層沒有消失的原因。



(4) 氫離子在陰極處被還原成氫氣釋放。



(5) 在孔洞的底部，除了水的裂解反應外，還包含了酸根二次解離反應，而其中的陰離子會取代氧離子而以雜質的方式殘留在氧化層當中。



另外還有一些文獻是研究氧化鋁孔洞和阻障層的關係，如下表示

[45]：

(a): 阻障層成形的電壓和電流關係  $i = aV/V^* (1 - V/V^*)^{-1}$

$i$ : 電流密度  $V$ : 電壓  $V^*$ : 飽和電壓

(b): 平均孔洞數  $n(\text{cm}^{-2}) = 1.6 \times 10^{12} \exp(-4.76V/V^*)$

(c): 平均孔洞直徑  $d(\text{nm}) = 3.64 + 18.9V/V^*$



(d): 氧化層成長率  $\eta = 0.5V/V^*$

(e): 阻障層成形的時間  $\Delta t = t_0(1 - V/V^*)$

上述的經驗公式中，方程式(a)是符合硫酸、草酸和磷酸電解液中量測的結果，方程式(b)~(e)則是符合硫酸的電解液的量測結果。但是這些經驗公式也會因為試片本身的雜質、缺陷、晶粒大小，而必須有所調整，但也因為藉著這些公式的輔助，使得陽極氧化鋁(AAO)的物理性質[53-55]、表面型態[56-58]、光學特性[59, 60]都可以被歸納出一套合理的解釋觀點。除了利用一些經驗公式外，更有些文獻還會以統計的方式來探討這些結果，譬如以 1D 或 2D 的量測方式和藉助 AFM 的輔助，來歸納出孔洞密度的分佈特性[61, 62](如圖 2-20, 2-21 所示)，而這些都尚未能全盤解釋陽極氧化鋁模板(AAO)的成長機制，但不論如何，陽極氧化鋁模板(AAO)被廣泛應用在各種用途上卻是不可抹滅的事實。

### 2-3 陽極處理之氧化鋁模板(AAO)之應用

由於陽極氧化鋁(AAO)的孔洞規則排列性和其奈米尺寸的結構，使得許多原本不能達到奈米尺寸的材料，不但變成可行外，還能改變了材料本身的特性，因此，讓許許多多的研究不斷地投入到這個領域。像是當紅的奈米碳管(CNTs)雖擁有超優良的電性、機械強度、熱

穩定、化學穩定性，但因其無成長方向可言，讓實用性降低，然而藉由陽極氧化鋁模板的合成[63-73]，不但可獲得單一方向外，還得到高密度規則排列奈米碳管(CNTs)，使其應用性變得更加的廣泛，譬如：場發射顯示器(如圖 2-22, 2-23 所示)、掃描探針顯微鏡、儲存電池和場效電晶體(FETs)(如圖 2-24, 2-25 所示)、金屬跟半導體二極體、整流器[74]…等應用，都是藉助陽極氧化鋁模板才能完成的。

另一項陽極氧化鋁的應用就是製作奈米尺寸的鐵磁材料，而最常見的就是置備鋰錳氧( $\text{LiMn}_2\text{O}_4$ )[75]、鋰鈷氧( $\text{LiCoO}_2$ )[76]、鋰鎳氧( $\text{LiNiO}_2$ )[77]…等奈米線的材料。早期之鐵磁材料雖然可以藉著鋰離子( $\text{Li}^+$ )使得電池效能增加，但隨著需求量慢慢的增加，要獲得更高的功率，就必須增加表面積以提高其效能來降低成本，因此陽極氧化鋁(AAO)高密度規則排列的結構，正是鐵磁材料可以利用的空間。除了電池的容量增加外，欲製作高密度磁性記憶體，陽極氧化鋁(AAO)更是不可缺少的，像是  $\text{Co}$ 、 $\text{Fe}_{39}\text{Co}_{61}$ 、 $\text{Fe}-\alpha$  和  $\text{Fe}_{21}\text{Ni}_{79}$ ……等材料[78-88]，都是藉著奈米線的高表面積和高深寬比的性質，讓鐵磁材料的遲滯曲線產生不同的變化(如圖 2-26, 2-27 所示)。

#### 2-4 奈米線氧化鋅( $\text{ZnO}$ )

氧化鋅( $\text{ZnO}$ )一般是 Wurtzite 的結構[89-91]並且擁有相當寬能

帶的半導體材料(能帶=3.2eV)[92, 93]，而且其低電壓和短波長(綠光或是綠/藍光)正是符合發光二極體和雷射二極體元件的特性，另外亦有人將其應用在 UV 穿透光的薄膜、氣體化學感測器、壓電轉換器、磷光劑、太陽能板…等方面[94, 95]。因此利用 AAO 的奈米結構特性，不僅可以讓氧化鋅材料保有光電的特性外，還可成為有序的奈米結構材料，而圖 2-28, 2-29 是利用溶凝膠法所置備的氧化鋅奈米線，其中氧化鋅奈米線的直徑約 200nm、長度約 2  $\mu$ m，且經 XRD 的分析，都說明著氧化鋅奈米線相嵌在 AAO 裡面。另外，圖 2-30, 2-31 是氧化鋅奈米線鑲嵌在 AAO 的 PL 光譜分析，ZnO/AAO 的組合在波長 515 的附近有很強的綠色光譜，但其強度會隨著熱處理的溫度增加而急速的下降(圖 2-30 之(a)-(c))[94]；且空白的 AAO 的 PL 光譜，本身強度都很弱(圖 2-30 之(d))，也顯示出很強的綠光能帶激發是由奈米線 ZnO 所貢獻的。近幾十年來，有相當多氧化鋅的綠光發光機制以被提出來了，像是 Vanheusdan et al. 所發表的氧空孔理論[102]，或是 Mo et. al 的 ZnO/SiO<sub>2</sub> 模型[103]都有解釋。然而在圖 2-31 中，其圖(a)的 AAO 發光波長在 460nm 左右，而 ZnO/AAO 則是會產生紅位移而使發光波長是在 500nm，其中 AAO 的發藍光成因是由於氧化鋁中的 O<sup>-</sup> 離子(F<sup>+</sup> centers)與電洞結合而發光，而圖(b)是將 ZnO/AAO 曲線以 Gaussian 法分成三各曲線，其中 470nm 的波包是 AAO 本身提供的，而 510、590nm

則是由 ZnO 奈米線所貢獻，顯示著有幾種不同的 ZnO 發光機制決定著發光的光譜。在本篇文章中，將採用一次直流電鍍方式將鋅原子電鍍到有序多孔氧化鋁薄膜(AAO)上，並在氣氛爐的環境下通入氧氣跟長時間的熱氧化方式，以形成氧化鋅奈米線的結構[96-98]。

