

# 磊晶氧化物薄膜的製成

氧化鐵、氧化鎳等過渡金屬氧化物具有豐富的電磁性質及穩定化學特性，在過去幾十年塊材的研究以及應用受到廣泛的重視。最近由於高溫超導物質的快速發展帶動了氧化物薄膜的技術，使得此類薄膜的品質得以與半導體或金屬相提並論。本文介紹使用分子束磊晶製成過渡金屬氧化物薄膜、多層膜、超晶格的方法，並且以氧化鐵相關的超晶格為例，說明薄膜的特質以及結構分析的過程。

張耀庭、陳恭

## 一、前言

一般薄膜的厚度大約從奈米到幾個微米，因為太薄了，必須依附在其它的物體之上，被依附的物體稱之為基板。由於受到基板的影響，加上特殊的製成過程（與一般塊材形成的條件不同），因此薄膜的性質往往無法從已知的塊材性質獲得，而必須多由實驗或計算才能瞭解。目前薄膜技術的發展關係到許多現在與未來工業的展望，以大家較熟悉的藍光雷射為例，由於高品質氮化鎵 (GaN) 薄膜的突破，使得短波長、高解析度、高能量且廉價輕便的光源得以誕生。這些成果不僅推動無可限量的半導體工業，而且提供了許多基礎科研的機會<sup>(1)</sup>。

同樣的，最近十年磁性多層膜的研究中也有突飛猛進的發現。1980 年代末期，在鐵或鈷膜的中間夾著鉻或銅等非磁性金屬的多層膜中觀察到巨磁阻的效應<sup>(2)</sup>，而引導出目前所謂「自旋傳輸」的概

念，藉著外加磁場的控制可使得導體中電子的自旋呈現不同的對比態，而導致電阻（即電流）放大的現象。原則上，此種設計與 MOSFET 中用偏壓（電壓）放大電流的現象類似，但前者在關機的時候，原有狀態不會消除 (nonvolatile)，因此受到元件工業的重視。

薄膜製成的過程看來是相當直接了當，不過成膜的機制卻十分複雜。如前面談到的由於有基板的緣故，與一般氣體的凝結過程大不相同。從熱力學的角度，初期成長模式決定於薄膜與基板之間表面能的差異，不過由於固體中晶體排列的緣故，即使是表面能的資料也未必十分完全。

如果基板是採用單晶物質，則薄膜有機會依照基板上整齊的原子做類似的排列而長成高品質、平滑、有序的晶體，這個過程稱為磊晶 (epitaxy)。磊晶的技術成功的被用在半導體及金屬物質上，在文獻中有許多報導。近幾年來，此項技術也被推展到絕緣的介電物質上，尤其在高溫超導物質、高介電鐵電性 (ferroelectric) 物質及陶鐵性 (ferrimagnetic) 氧化物等。這些薄膜的發展，無論在工業技術或基礎研究上，目前也都受到廣泛的重視。

---

張耀庭先生現為國立中正大學物理系碩士班學生。

陳恭先生為美國佛羅里達州立大學物理博士，現任國立中正大學物理系教授。

以下的討論即是以鐵氧化合物薄膜、超晶格為主。部分的内容節錄於過去幾年本實驗室的研究成果，因此許多詳盡的討論可參閱這些文獻<sup>(3)</sup>。

## 二、分子束磊晶系統

薄膜製成的方式有很多種，大致可分為物理氣相沉積 (physical vapor deposition, PVD)、化學氣相沉積 (chemical vapor deposition, CVD) 及液相法 (化學鍍及電鍍等)。分子束磊晶法屬於物理氣相沉積的一種，它是利用超高真空極少雜質的環境，使得殘餘氣體對薄膜的污染減到最低，再將物質以分子的形式沉積在基板上。在這種超真空的環境下，同時可配合一些精密儀器如反射式高能電子繞射儀 (RHEED) 來觀察薄膜成長時的表面變化，或其他光或電子譜儀，來瞭解薄膜的化學組成。透過這樣的成長控制條件，可生長成高品質的單晶薄膜或超晶格。

分子束磊晶 (molecular beam epitaxy) 技術通常簡稱 MBE。在超高真空下，蒸鍍物質分子的平均自由路徑大於蒸鍍源至基板之間的距離，使蒸鍍物質之分子束在與基板碰撞之前會直線流動，並且不會潰散，讓欲鍍分子束能穩定成長到基板上相應的晶格位置。平均自由路徑為氣體分子與氣體分子相繼兩次碰撞中所運動之距離的平均值，壓力越小時分子之平均自由路徑越大，當壓力為  $10^{-6}$  Torr 時，平均自由路徑約為  $5 \times 10^3$  cm，遠大於蒸鍍源至基板約 12 in. 的距離。系統如圖 1 所示，以下分成兩大部分介紹。

### 1. 載裝室

為了保持成長室內穩定的高真空狀態，樣品的進出都透過載裝室，通常將已裝置好的基座放在傳輸桿 (transfer rod) 上，打開邦浦待全速運轉 10 - 20 分鐘後待真空度達到  $10^{-6}$  -  $10^{-7}$  Torr 左右，慢慢地將隔開載裝室 (loading chamber) 與成長室 (deposition chamber) 的手動式閥門打開，將基座移入成長室中的基座支撐架 (substrate holder) 上，拉出傳輸棒，關上閥門，隔開兩個真空腔。薄膜成長完後也是先將基座移至載裝室，通入乾燥的氮氣

後，再將基座取出。

### 2. 成長室 (Deposition Chamber)

薄膜成長的整個過程主要在這個真空腔中進行，其真空度通常為  $\sim 10^{-9}$  Torr，內部裝置的儀器概分成四部分：(1) 蒸鍍裝置，(2) 磊晶成長監控裝置，(3) 邦浦系統，(4) 其它裝置。

#### (1) 蒸鍍裝置

蒸鍍槍源 (Kundsen-cells)

如圖 2 所示的線圈加熱裝置，在真空中最高溫度可至 2000 °C 左右，中等熔點物如鐵、鈷、鎳等 ( $T_M$  1500 °C) 都可以適用。蒸鍍源的溫度可以準確的控制 1 度誤差以內，以致於薄膜成長速率十分穩定，這個條件對多層膜中各單層厚度的控制尤其重要。簡單的操作程序如下。

用酸將欲蒸鍍金屬物質氧化的表面去掉後，放進丙酮和甲醇清洗，吹乾後放入坩堝中。坩堝有內外兩層其分別的材質為  $Al_2O_3$  及 PBN， $Al_2O_3$  製的坩堝其最大容量約有 6 cm<sup>3</sup>，在 K-cell 的上方並有一個遮板 (shutter) 的裝置用以控制分子束的關閉或開放。溫差電耦 (thermocouple) 的反饋裝置 (feedback) 可供 K-cell 的溫度控制與設定。腔體系統本身可承受 3000 °C 的高溫，若高於 3000 °C 時，一般使用液態氮來冷卻並保護系統。

RF 電漿裝置 (RF Plasma Source)

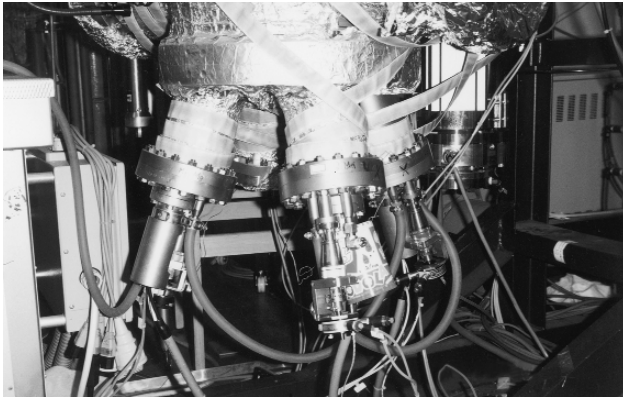
在製作氧化物薄膜時，為了使輸入的氧氣分子能充分的與其它金屬分子化合成為氧化物，故藉由輸入 13.56 MHz、125 W 功率的電漿將氧原子活化。氧氣的注入在製作氧化物膜的系統中是一大學問，活性高的離子態或原子態的氧產生，有助於金屬的氧化，因此可在較低的基板溫度下成長。氧氣源種類很多，一般還包括 ECR (electron cyclotron resonance) 或臭氧 ( $O_3$ ) 等。

#### (2) 磊晶成長監控裝置

反射式高能量電子繞射 (RHEED)

通常在 MBE 中都是用 RHEED 來觀測薄膜成長的過程，RHEED 在真空系統中的裝置包括有：

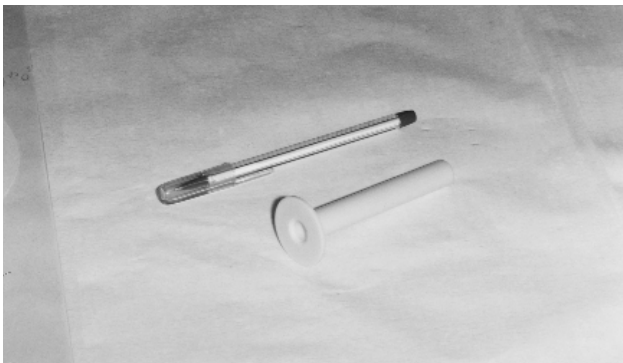




(a)



(b)



(c)

圖 2. (a) 蒸鍍源外觀，(b) 高溫 K-cell 及 (c) 坩鍋。

電子槍 (electron gun)、狹縫 (slit)、磁透鏡 (magnetic lens) 及螢幕 (screen)。成長室內的壓力須小於  $1 \times 10^{-5}$  Torr 才能開始操作電子槍，再將投射到螢幕上的條紋以攝影機把資料輸入電腦內做處理。RHEED 的工作原理是將自鎢絲游離的電子給予 20 keV 的動能，使其以高能量入射到樣品的表面，為了降低電子的入射能量使表面不受到太大的破壞，故將入射電子束自表面起以很低的入射角 (約  $1^\circ - 5^\circ$  的範圍內) 掠過表面，如此其垂直進入表面的能量將很小，只能穿透少量的原子層 (約數 Å)，且由於入射的角度很小，所以只需使用到成長室中兩端的空間，並不會影響到鍍膜進行的方向。又由於 RHEED 需很高的電壓，因此其能量供應源 (power supply) 必須用特殊的真空傳接裝置 (special and vacuum feedthroughs)，這些原始的高能量已足夠使螢幕產生螢光，不需再另外提供高電壓源及高速電子。螢幕是一個平面，有時會在電子打到的那一面窗口塗上一層導電的薄膜，以防發生積電 (charging) 的現象。經由狹縫可以使其只通過我們所需要的方向，而磁透鏡能使電子束聚焦得更好。

在長膜的過程中為了直接觀測薄膜的成長情形，MBE 系統藉著 RHEED 來獲得晶體的繞射圖案，即倒晶格的圖形，而間接判斷磊晶的好壞。一般來說，低能量電子繞射或其他與結構相關的裝置都可以使用，不過 RHEED 的方便之處在於入射角度極小，等於完全是由側邊射入，而避開了蒸鍍氣體的路徑 (垂直進入)，因此最常搭配蒸鍍系統使用。

#### 石英膜厚偵測器 (Quartz Crystal Monitor)

在成長的過程中用以測讀膜厚，並使用反饋方式控制蒸鍍源檔版，完成設計的多層膜樣品。其工作原理是利用分子沉積在石英晶體上時石英晶體的質量改變，石英振盪器的振盪頻率會隨之改變。經由輸入被蒸鍍物質的密度，以 (1) 式換算後可得到薄膜厚度，由公式中可看出薄膜的厚度與其塊材密度成反比。

$$d_v = \left( \frac{-v^2}{N} \right) \times \left( \frac{\rho_f}{\rho} \right) d_x \quad (1)$$

$d_v$ ：為振盪數變化

$N$ ：為周波數常數

$d_x$ ：為薄膜質量膜厚  
 $\rho_f$ ：為被蒸鍍物質之塊材密度  
 $\rho$ ：為石英密度

### (3) 邦浦系統

在這兩個真空腔中的邦浦系統包含油迴轉式機械旋片邦浦 (rotary pump) 與渦輪分子邦浦 (turbo-molecular pump)，其個別性質列於表 1。

### (4) 其它裝置

#### 基座支撐架 (Substrate Holder)

基座經由載裝室進入成長室後被放置在手動式的基座支撐架上，這個機制可使得基板被上下移動及左右旋轉，以方便有一個適當的位置將基座從傳輸棒與支撐架間承接，並找到適當的位置觀察 RHEED 的繞射圖形。

#### 基板加熱裝置

在基座支撐架上方有一個利用電阻加熱的裝置，將基座靠近此裝置可提供基板加熱到  $\sim 8000^\circ\text{C}$ ，並經由熱耦線量測溫度。值得一提的是，本系統中的加熱體 (heater) 是由 SiC 製成，在氧氣的環境中無法使用一般鎢絲為加熱體。除了 SiC 以外，一些抗氧化性高的金屬合作也常被使用。

#### 真空計

在這套系統內使用了兩種真空計，分別為指針式的派藍尼真空計 (Pirani vacuum gauge) 和數字式的高真空計 (ultra high vacuum gauge)，派藍尼真空計裝置在油迴轉式機械旋片邦浦與渦輪分子邦浦間的管道上量測範圍在  $3 \times 10^{-3} - 760$  Torr，其工作原理為測量燈絲電阻隨溫度之變化，即可推算出氣壓大小。而高真空計是使用日真公司所產型號為 GI-N5 的型式，將其裝置在成長室內，其測量範圍為  $1.5 \times 10^{-11} - 3.0 \times 10^{-3}$  Torr，這是一種 B.A. (Bayard-Alpert) 式離子真空壓力計，其工作原理為加熱燈絲使之放出電子，經加速後碰撞系統中的氣體分子，將氣體分子游離成正電子，經由集極收集這些正電子，並測量電流的大小進而推算出壓力的值，其換算關係為下式：

表 1. 機械旋片邦浦與渦輪分子邦浦之特性。

適用的壓力範圍	
機械旋片邦浦	$760 - 10^{-3}$ Torr
渦輪分子邦浦	$10^{-2} - 10^{-10}$ Torr

$$I_i = K \times P \times I_e$$

其中

$I_i$ ：離子電流 (ion current: A)

$P$ ：壓力 (Torr)，

$I_e$ ：游離電流 (emission current: A)

$K$ ：靈敏度 (sensitivity: Torr<sup>-1</sup>)

除此外，尚有提供石英晶體振盪器冷卻之水冷卻系統，氣動式閥門遮板開關之系統。

## 三、成長過程

長膜前的準備過程如下：

### 1. 真空系統外

基板的選擇關係到薄膜的品質甚大，但一般受限於現有的材料供應，多半從一些普遍使用，高品質的單晶中，選取晶體結構與晶格常數匹配較好的使用。氧化膜中最常用的如 MgO、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 及 SrTiO<sub>3</sub> 等等，不過價錢都不便宜，一片  $10 \times 10 \times 0.5 \text{ mm}^3$  的基板大約要一千元上下。如果晶格匹配常數太差，往往要先鍍上緩衝層，才可得到較佳比值的膜，如何使用緩衝層則需要嘗試或豐富的經驗了。在選定基板後，放入 MBE 系統前，基板與基座需要先清潔，以減少污染真空腔的可能性及除去其他如油脂等附著物。在超音波洗淨器中依序以丙酮、甲醇震洗基板和基座。而後用乾燥的空氣吹乾基座與基板，再將基板放置在基座上，準備送入載裝室內。

### 2. 真空系統中

在載裝室中經由傳輸棒將基座送到成長室中的基座支撐架上後，先將基板加熱到  $2500^\circ\text{C}$  約 10

分鐘後，為了不使雜質影響薄膜的生長，把溫度升高到 5500 °C，以去除殘餘在基板上的少數雜質，約 20 分鐘後降下溫度，並在成長過程中保持一定溫度，基板溫度需遠小於被蒸鍍物所需加熱之溫度。基板加熱一方面除了鍵結較弱的雜物之外，更重要的是經過退火的過程可以使得表面趨於平滑，這些變化可以從高能電子繞射中清楚的觀察到，是非常重要的步驟。

整個系統在升溫時，以液態氮通於環繞在系統外壁的銅管或塑膠管內，以冷卻整個系統及維持整個系統在較好的真空度。而從 K-cell 產生的蒸氣分子流以通入 125 W RF 功率的電漿氧充分氧化並附著在基板上，其附著的速率由石英膜厚偵測器校定，經由控制 K-cell 的溫度來調整速率。原本整個成長真空腔中的壓力為  $\sim 10^{-8}$  Torr，加入氧氣後壓力則為  $\sim 4.8 \times 10^{-5}$  Torr。至此，大致上整個準備工作已完成。此刻將遮住基板的遮板移開並開始計時到所需的成長時間，並利用 RHEED 作臨場的觀測，至完成長膜為止。

#### 四、氧化鐵 ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) 薄膜及超晶格的成長

以下我們用氧化鐵的薄膜或超晶格作例子再多做一些說明。鐵磁性物質中，除鐵、鈷、鎳及一些稀土元素或合金之外，最重要的應該還包括了這些物質的氧化物，而其中最具代表性的物質之一即是正方的 ferrites。它的化學式為  $\text{MO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ ，其中 M 為鐵或是其他二價金屬，而氧化鐵  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  (磁鐵礦) 則是人類最早發現的磁鐵，不過一直到 1950 年代初期，物理學家才瞭解到他們的磁性與金屬的鐵磁性並不完全相同。基本上，此類物質的磁距存在於兩個不同的位置，彼此反平行但淨磁距不為零，Neel 並將它稱之為 ferrimagnetic，氧化鐵薄膜製作的工作是在約 1980 年前後由日本的 Bando 團隊成長一系列的  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ 、NiO、CoO 薄膜及超晶格開始。但高品質的超晶格是在 1990 年前後在美國佛羅里達州立大學完成，隨後荷蘭 Philips (1994) 完成一系列重要的工作。由於巨磁組相關問題目前受到廣泛的重視，最近五年內許多關於  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  成長、

表面、磁性及磁電組等報導數量已大為增加<sup>(4)</sup>。

先簡略的談一下  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  的結構。在具有 ferrimagnetism 性質的結構中，最具代表性的就是 spinel 結構，這個結構的命名是由於其原子排列的形式與尖晶石礦 ( $\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ ) 相似所得到的。spinel 結構是由  $\text{MO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$  的分子組成，其中 M 代表金屬原子，它可以是 Fe、Co、Ni 及 Mn 等金屬原子，而 O 則為氧原子。瞭解 spinel 結構的最佳辦法是用它 (以  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  為例) 來比較我們較為熟悉的 rocksalt (以 MgO 為例) 結構，因為這兩種結構極為相似 (見圖 3)。在 MgO 中鎂、氧的數目一樣多且彼此互相包圍形成穩定的 FCC 結構 (離子鍵)，相對的在 spinel 結構中，氧的數目及排列方式與 MgO 一樣，但是金屬陽離子鐵的數目只有 MgO 中鎂的 3/4。由於排列的方式不同，單位晶胞中原子的數目遠較 MgO 為多，共有 56 個 (大小相當於 rocksalt 單位晶胞的八倍)，其中 32 個是氧原子，另外 24 個是鐵離子。其中 Fe 可為二價或三價，分別為 8 個  $\text{Fe}^{2+}$  及 16 個  $\text{Fe}^{3+}$ 。而在單位晶胞中，由於晶格的排列不同，可以將之分為 A-site 和 B-site 兩種結構空間。A-site 位於氧所形成的六面體中，B-site 則位於氧所形成的四面體中，且 A-site 與氧排列在同一個平面上，B-site 則排列在 A-site 與 A-site 的中間夾層中。

由於金屬原子的價數和個數的不同，造成金屬原子排列在不同的 site 時，就形成了不同的結構特性，spinel 可以分為兩類：normal spinel 及 inverse spinel。normal spinel 即 8 個二價金屬離子位於 A-site，16 個 3 價離子位於 B-site；inverse spinel 則是 8 個二價離子位於 B-site，16 個三價陽離子平均分配於兩個 site。這些不同的分佈對於飽和磁化量造成了很大的影響。

大多數高品質的  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  薄膜，都選擇 MgO 為基板，這是由於兩者相似的晶體結構以及低於 0.3% 的晶格常數差異，加上 MgO 基板的取得容易的緣故，事實上，除了  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  以外，有一系列的重要過渡金屬氧化物都具備類似的結構與晶格常數，都可以類似的方式備製薄膜或多層膜。以下列舉一些在表 2 中。

下面再談一下超晶格。超晶格基本上是一種多

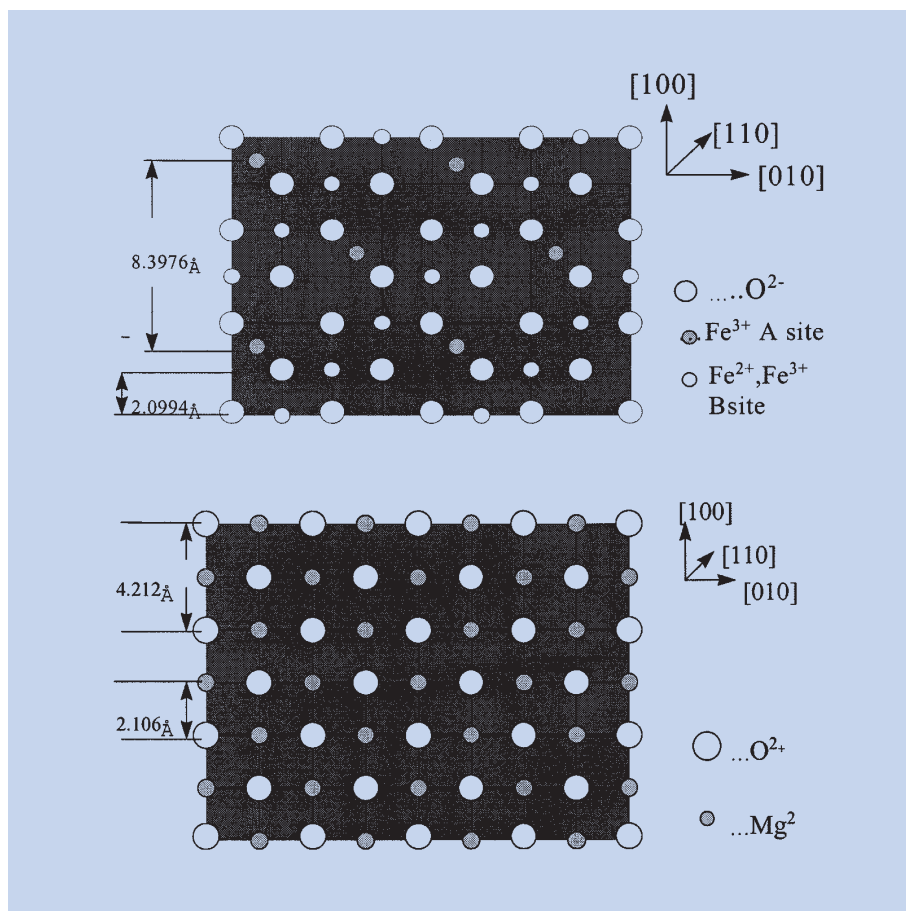


圖 3.  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  及  $\text{MgO}$  (001) 面的截面圖。

表 2. 機械旋片邦浦與渦輪分子邦浦之特性。

	$\text{Fe}_3\text{O}_4$	$\text{NiO}$	$\text{CoO}$	$\text{Mn}_3\text{O}_4$	$\text{MgO}$
晶格常數 (Å)	$a/2 = 4.20$	$a = 4.17$	$a = 4.26$	$a = b = 8.14$ $c = 9.4696$	$a = 4.21$
結構	正方	正方	正方	長方	正方

層膜，通常用 A、B 兩種物質交替的在基版上成長，如果每個 A、B 層的厚度保持一定，則在沿著垂直表面的方向，有一個新的週期產生，此週期的大小即等於 A、B 層疊加的厚度。這些週期可以被 X 光繞射準確的量出，因此在結構上，包括每層介面的情形即有定量的資料，而不同的樣品可因此做有系統的比較。另外由於疊加了許多層，因此可以用一般塊材的量測。

原則上任何兩種物質均可透過精密的成長控制，而製成不同的超晶格材料。但是介面的品質如果過於粗糙，則影響到晶體的長距離規律 (coherency)，因此化學組成 (鍵結) 及晶格常數等都

是重要的考量因素。

由於化學鍵、晶體結構及晶格常數的類似，可與許多氧化物長成極佳的超晶格，如  $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{NiO}$  ( $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{CoO}$ )、 $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{MgO}$  及  $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{Mn}_3\text{O}_4$ ，這些超晶格看起來類似但從磁性的角度來看，分別是鐵磁 / 反鐵磁、鐵磁 / 無磁、鐵磁 / 鐵磁等不同的系統，藉著磁性的耦合，完全不同於母體單層膜的物理性質被觀察到。同時，改變超晶格中單層的厚度更可有系統的探討相關的物理問題。以下對  $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{MgO}$  超晶格做詳細說明。

用無磁的  $\text{MgO}$  隔開  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  主要的興趣分為兩類，一是固定  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  的厚度，而改變  $\text{MgO}$  的厚

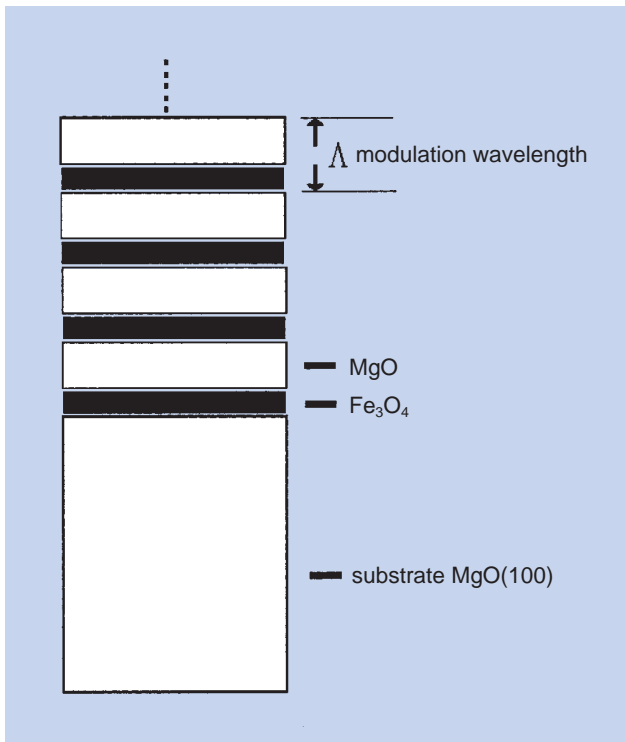


圖4. 理想的超晶格示意圖。

度，如此製成一系列的超晶格，可以探討  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  是否可以透過  $\text{MgO}$  而產生長程有序，並且檢驗是否有如 GMR 一般震盪（鐵磁或反鐵磁耦合）的現象。另一種是固定  $\text{MgO}$  的厚度（足以隔絕  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  的 coupling）而改變  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  的厚度，如此可以瞭解氧化鐵的 finite size 現象。此外， $\text{Fe}_3\text{O}_4$  與  $\text{MgO}$  的晶格常數只相差 0.3% 晶格的結構預期會幾乎沒有應變的限制，但由於篇幅的限制，我們僅簡略的討論  $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{MgO}$  的結構。從以下  $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{MgO}$  超晶格的結構分析的討論，將對氧化物超晶格有進一步的瞭解。

原則上超晶格是將 A、B 兩種物質交替的成長，如圖 4 所示，從製作者的角度，僅是將 A、B 兩物質持續的蒸鍍（或其他辦法）於基板上，但是否真的會長成如圖 4 的形式，其實很難說，原子通常偏好互相擴散，因此超晶格結構都是次穩態，不過以臨場的高能量電子繞射及事後的 X 光繞射可予以深入的分析。圖 5 即是觀察  $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{MgO}$  超晶

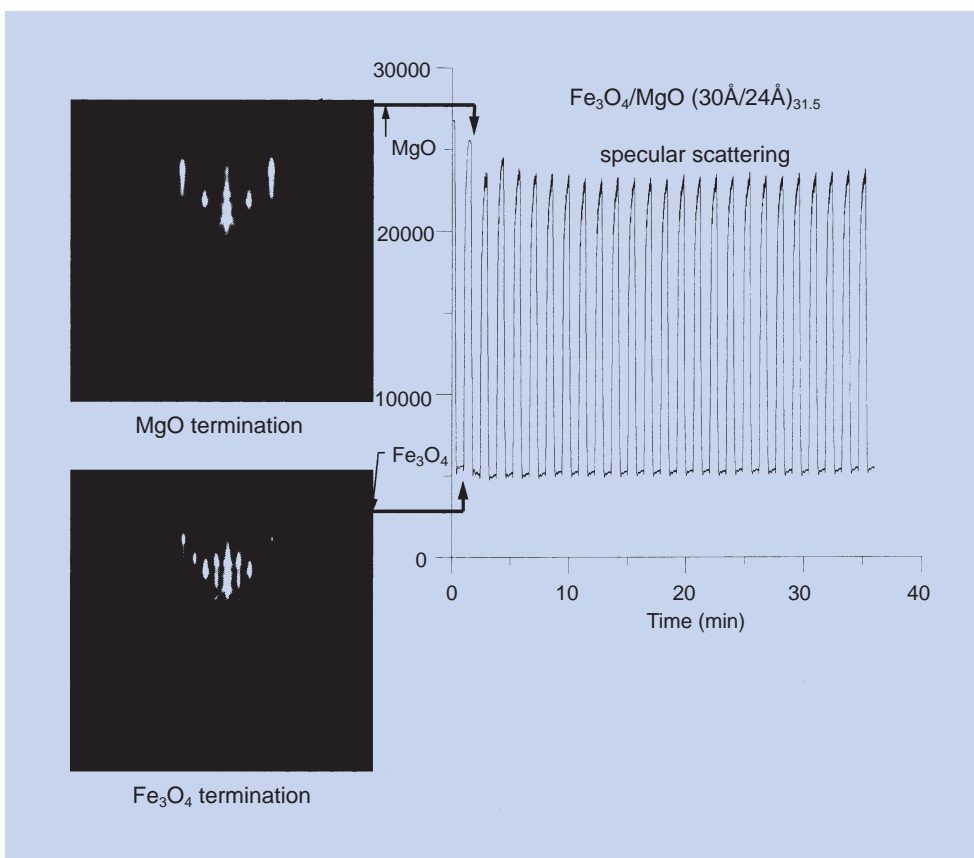


圖 5. 成長  $(\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{MgO})$  超晶格時，表面繞射的圖形隨蒸鍍物質的不同而改變，左上是  $\text{MgO}$ ，左下是  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ，而右邊是亮度的變化。

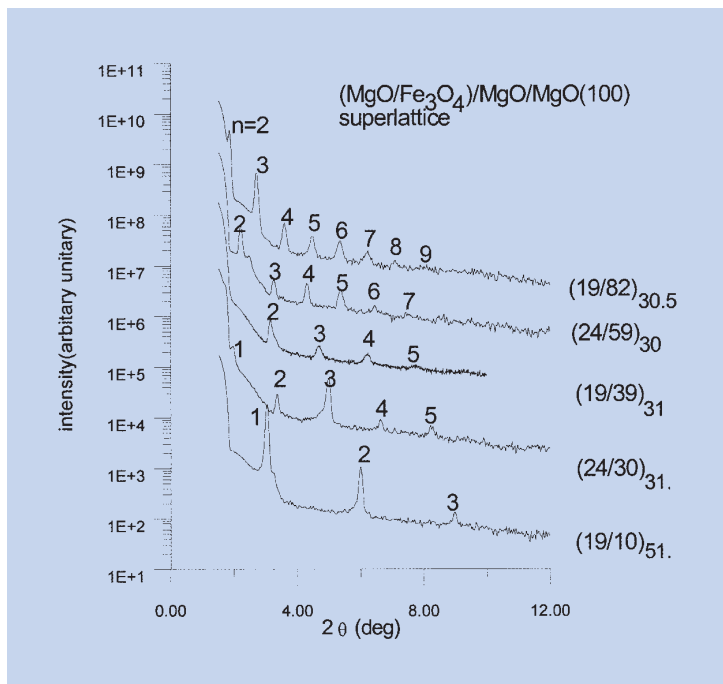


圖 6. 一系列  $(\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{MgO})$  超晶格的 X 光低角度的繞射圖。

格的一個例子，途中左邊的部分分別是成長  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  或  $\text{MgO}$  時 RHEED 的圖案，由於  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  的晶格常數是  $\text{MgO}$  的兩倍，因此呈現較細密的繞射，因此可見  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  與  $\text{MgO}$  確是交替成長，不過更進一步觀察繞射亮度的變化 (如圖的右半部) 更可看出長時間成長的情況。由於散射的能力 (scattering power) 不同，當成長  $\text{MgO}$  時，亮度遠較成長  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  為高，因而形成隨時間震盪的結果，在經歷超過 20

個震盪週期 ( $\sim 1200 \text{ \AA}$ )，繞射強度沒有明顯變化，充分的顯示出在沿著成長方向高度的 coherency。不過定量的分析，仍依賴成膜後 X 光的分析。圖 6 是在小角度 (1.5 - 12 度) 的繞射結果。這些超晶格樣品都顯示出特有的小角度繞射現象，小角度的繞射對應著較大的晶格週期。在 2 度左右的繞射峰對應的週期超過幾個奈米尺度，遠大於的晶格週期，這些峰值充分顯示出沿著薄膜成長方向的超週期，而這些超週期完全可以人為控制，而提供了新的物理性質。

## 五、結語

半導體及金屬的薄膜、多層膜、超晶格等材料在過去一、二十年有著輝煌的發展，在實用工業以及基礎科研上都扮演了重要的角色。如今這些發展被推進到絕緣體尤其是氧化物，包括高溫超導體、高介電鐵電物質，以及磁性氧化物。預料在 21 世紀這些物質將有一番新的作為。

## 參考文獻

1. N. M. Johnson, A. V. Nurmikko, and S. P. DenBaars, *Physics Today*, **53** (10), 31 (2000).
2. G. A. Prinz, *Physics Today*, **48** (4), 58 (1995).
3. 沈有仁, 林銘哲, 李淑媚, 中正大學物理系, 碩士論文 (1988, 1989).
4. 中華民國物理雙月刊, **22** (6), 1 (2000).