

第四章 實驗結果

4.1 量測柱狀平凸透鏡

4.1.1 實驗之樣品

此實驗的樣品為圓柱狀平凸透鏡 (Thorlabs : LJ1144L2) 上鍍一層 ITO 材料薄膜，此 ITO 薄膜經光譜儀已測得折射率在波長 633nm 時為 $N = 2.164 - 0.083i$ 。實驗時我們將圓柱樣品的 Z 軸方向平行入射面，也就是在垂直入射面方向的軸是呈曲線分佈，為了讓經擴束後的雷射光打在此樣品時造成入射面的偏差，這樣我們才能將這入射面偏差產生的偏光片方位角誤差 α 分佈量測出來。

4.1.2 量測圓柱面二維方位角偏差 α 分佈

下圖為量測圓柱狀平凸透鏡上鍍一層 ITO 薄膜的偏光片方位角誤差 α 分佈圖，因為光在入射樣品前加了擴束系統，所以影像解析度為 $20\mu\text{m}$ 。在圖中的 X 軸為垂直入射面方向，Y 軸為平行入射面方向。理論上量測此曲面的 α 應為一斜面分佈，由此實驗數據看出此面凹凸不平，這也許是由系統誤差造成，或表面的膜厚不均的影響，此結果我們在之後討論，但整個 α 分佈的趨勢是正確的。

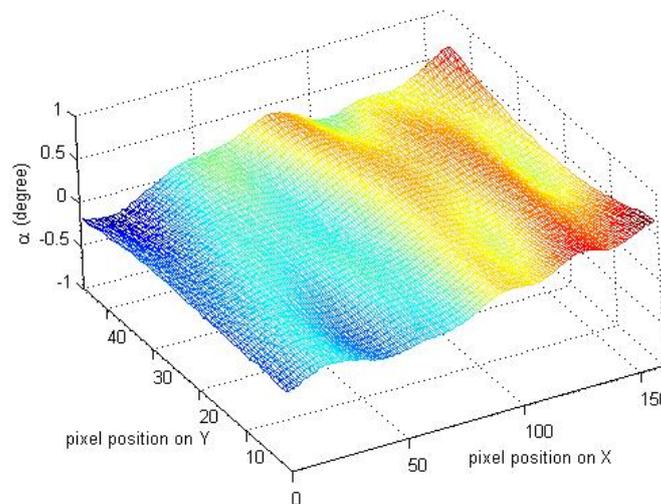


圖 4-1：圓柱面的二維 α 分佈

因為此樣品是柱狀結構，所以在任意 Y 軸的 α 差 (X=1 的 α 減 X=160 的 α 值) 都將一樣，我們將整個 α 分佈面做誤差最小擬合法 (least square fit)。在圖 4-2 中 Y=1 pixel 位置的擬合線可看到 α 分佈由 $-0.1660^\circ \sim 0.5595^\circ$ ，我們由這結果計算出此柱狀凸面鏡之曲率半徑為 249.56 mm (光點大小為 3.16 mm)，而柱狀平凸透鏡上的產品規格為曲率半 248.79 mm $\pm 1\%$ ，這與我們實驗結果相當吻合。

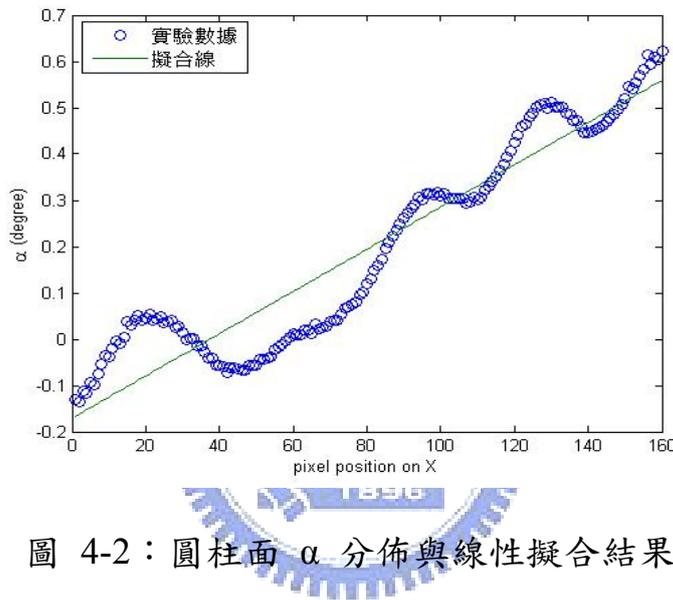


圖 4-2：圓柱面 α 分佈與線性擬合結果

接下來我們利用 α 擬合面去模擬推算系統入射角為 70° 時，雷射光打在柱狀平凸透鏡上的整個入射角分佈 [9]，這步驟是為了之後計算薄膜厚度所需，本實驗室已可由實驗的 Ψ 、 Δ 直接計算出帶測物的入射角與薄膜厚度，但我們目前由 α 的分佈上猜測此薄膜厚度分佈可能不均勻，且入射角的改變與薄膜厚度的改變皆會影響 Ψ 、 Δ 的變化，直接只用實驗所得 Ψ 、 Δ 做計算厚度會造成許多誤差，所以我們先由 α 擬合面與圓柱面的幾何結構，將目前的入射角分佈推算出來，這樣在計算厚度上就可減少一個未知的參數 (入射角參數) 做擬合，增加所算得薄膜厚度的準確性，如圖 4-3 所示；因為在量測時光線並沒有打在曲面中心位置，所以入射角是由 $70^\circ \sim 70.001^\circ$ 的非對稱分佈。

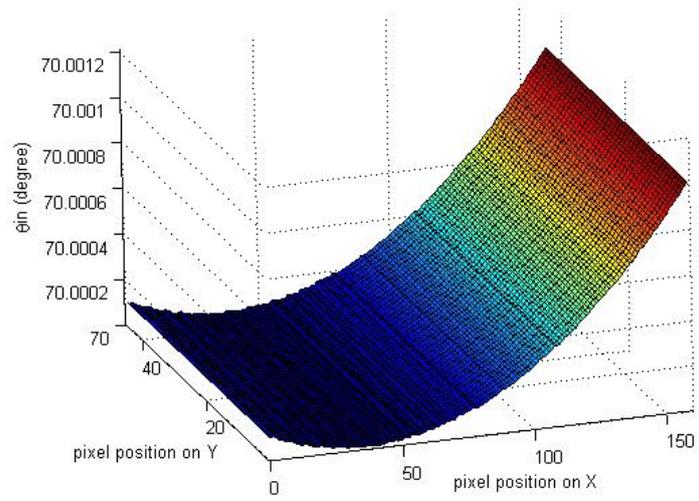


圖 4-3：圓柱面入射角分佈圖



4.1.3 圓柱面之二維橢圓參數分佈

圖 4-4 為量測柱狀平凸透鏡樣品的二維 Ψ 分佈， Ψ 值大小在此面上為 $6.78^\circ \pm 0.09^\circ$ ，可看出載此面上的變化相當小幾乎為一平面結構；圖 4-5 為其二維 Δ 分佈，且此值的變化與 Ψ 相比就大的許多，值的大小為 $70^\circ \pm 3^\circ$ 。

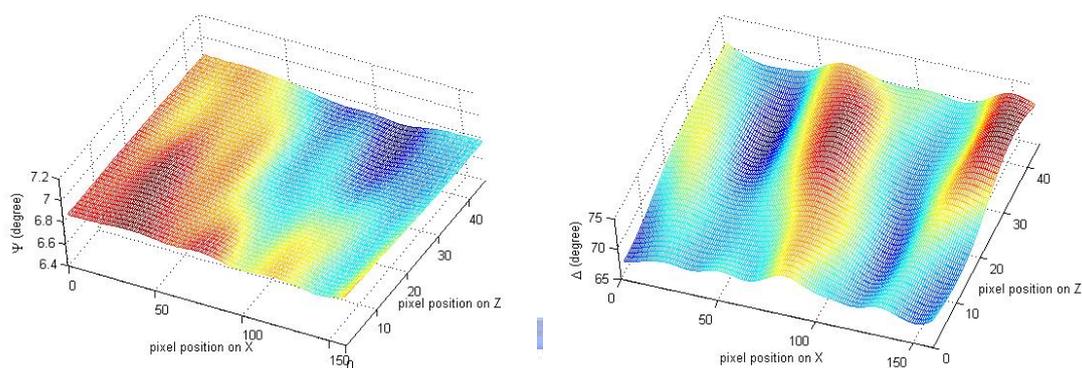


圖 4-4：圓柱面之二維 Ψ 分佈

圖 4-5：圓柱面之二維 Δ 分佈

因為所得到二維 Ψ 、 Δ 形貌相差很大，所以我們利用模擬此材料的結構（基板 BK7： $N = 1.515$ ；薄膜 ITO： $N = 2.164 - 0.083i$ ）觀察薄膜厚度變化與 Ψ 、 Δ 變化走勢，來討論實驗數據的結果，如圖 4-6 所示。

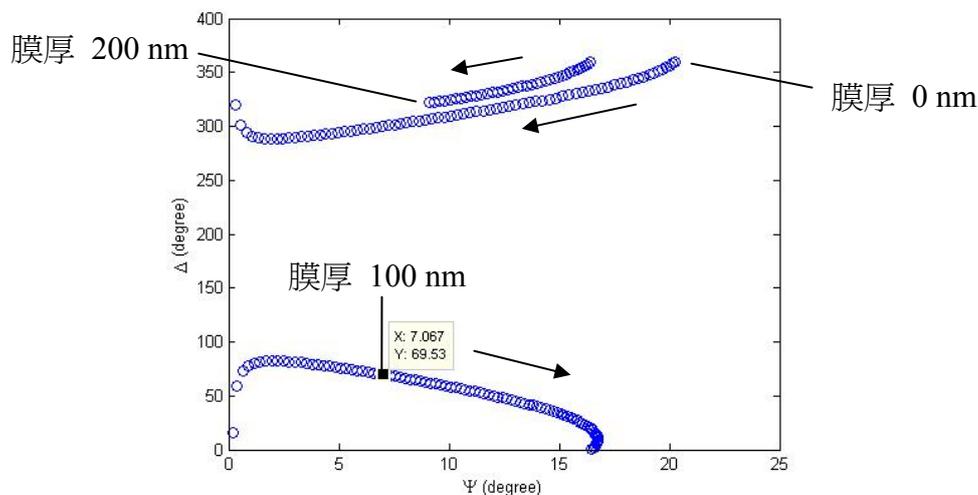


圖 4-6：薄膜厚度的改變與 Ψ 、 Δ 變化

由圖看出當入射角 70° 薄膜厚度為 0nm 時， Ψ 與 Δ 分別為 20° 、 360° ，然後隨著薄膜 ITO 厚度增加 Ψ 與 Δ 就隨著箭頭方向變化，我們可看出 Ψ 隨著厚度增加了 200nm 只有 20° 的變化，而 Δ 有近 200° 的改變，故 Δ 對於薄膜厚度的改變相當靈敏，所以我們所得的數據變化算是相當合理，且可從 Δ 的二維分佈判斷出此薄膜厚度分佈的形貌如何。在圖 4-6 中，當 ITO 厚度為 100nm 時 Ψ 與 Δ 分別為 7.07° 、 69.53° ，且隨薄膜厚度增加 Ψ 越大， Δ 越小，這與我們實驗所得數據相近。

接著我們利用 4.1.2 節所求得的入射角分佈，與實驗所得 Ψ 、 Δ 來推算我們所量測樣品的區域厚度分佈，經計算所得結果如圖 4-7 所示。

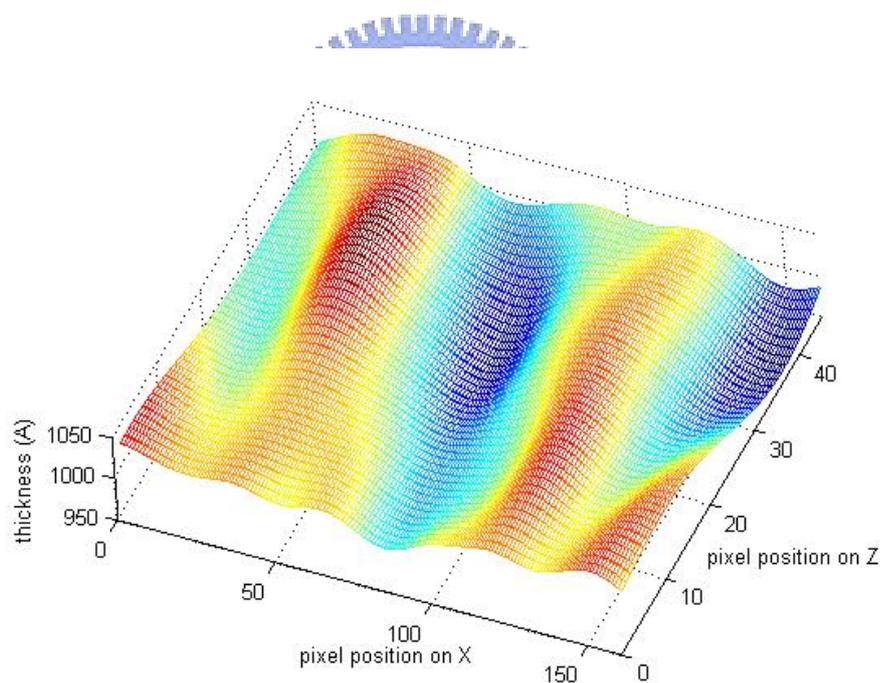


圖 4-7 (a)：圓柱透鏡上薄膜厚度分佈圖

由上圖(圖 4-7 (a)) 可知我們所測得薄膜厚度為 $100\text{nm} \pm 4.3\text{nm}$ ，但所得厚度誤差相當大，且橢圓儀是個準確性相當高的儀器，而這些誤差是系統造成的還是材料本身鍍膜不均勻是我們要討論的。因為我們所測的 ITO 材料薄膜是利用磁控濺鍍的方式鍍在玻璃基板上，根

據文獻表示用此方式鍍膜的表面粗糙度為 5nm~20nm 。利用薄膜測厚儀 (Alpha-step) 量測平面玻璃基板上的 ITO 薄膜厚度為 $97\text{nm} \pm 6\text{nm}$ ， (此平面玻璃、圓柱平凸透鏡與 4.2 節所測的球面平凸透鏡是在同一環境下同一機台一起鍍膜) ，且利用此實驗系統對這平面玻璃基板上的 ITO 量測，所測得厚度為 $100\text{nm} \pm 4\text{nm}$ (圖 4-7 (b)) ，這結果與薄膜測厚儀測得的結果一致，故我們在圓柱面透鏡上所測得的 ITO 薄膜厚度是正確的，而我們在實驗上所測得面上厚度不均勻應是鍍膜方式造成。

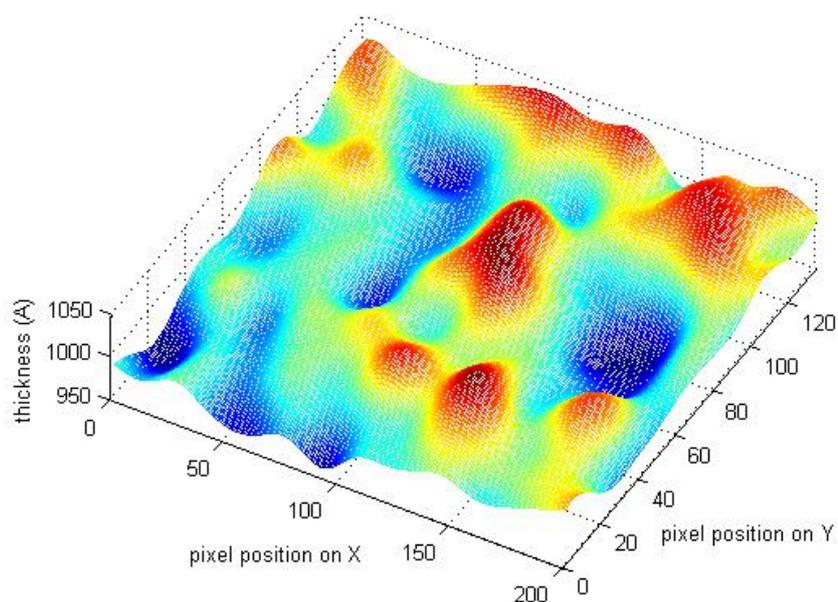


圖 4-7 (b)：平面鏡上薄膜厚度分佈圖

4.2 量測球面平凸透鏡

4.2.1 實驗之樣品

此實驗的樣品為球面平凸透鏡 (Thorlabs: LA1380) 上鍍一層 ITO 材料薄膜，因為與 4.1 節實驗的樣品在同一環境下一起進行磁控濺鍍，所以折射率皆為 $N = 2.164 - 0.083i$ 。

4.1.2 量測球面二維方位角偏差 α 分佈

下圖 4-8 為量測球面狀平凸透鏡上鍍一層 ITO 薄膜的偏光片方位角誤差 α 分佈圖，在圖中的 X 軸為垂直入射面方向，Y 軸為平行入射面方向，因為在球面平凸透鏡在 Y 軸上也是呈均勻曲面分佈，所以當我們斜向入射量測時，入射角會有很大的變化，且在不同 Y 軸位置所測得的 α 分佈範圍會有些許的不同 [9]，這我們可將球面鏡想像成由許多同心圓組成，假設球心在卡式座標軸 (Cartesian coordinate) 的零點位置，沿著 Y 軸將球切成很多同心圓，越遠離原點的同心圓曲率半徑越小，原點位置的同心圓曲率半徑是最大，所以才會在不同 Y 軸的位置所測得的 α 分佈範圍會不同，但這與光點所照射面積有關，面積越大在中心曲線所得 α 值分佈與邊緣值相差越大，所以在計算曲率半徑時要取中心曲線的 α 值分佈來計算。但經模擬計算我們在此實驗的量測面積所得中心 α 值與邊緣 α 值僅 0.0001 度的變化，而這變化的大小在我們的系統上無法解析到這麼好，所以用我們的系統作量測將在不同 Y 軸位置的 α 分佈會一樣，故在計算曲率半徑上，所算得結果毫無影響。

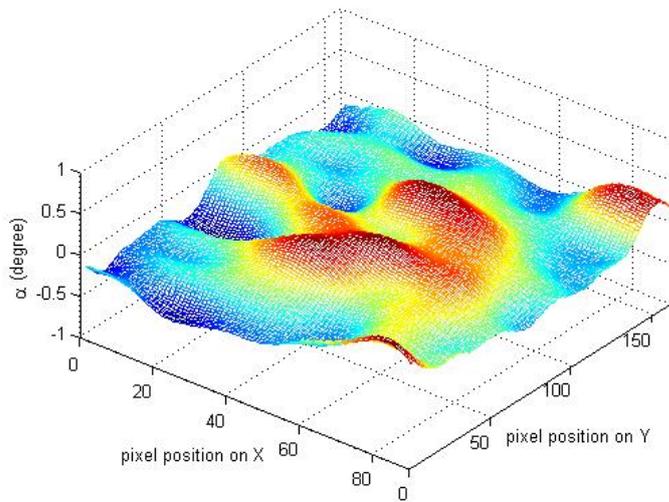


圖 4-8：量測球面之二維 α 分佈

我們將所測得整個 α 面取誤差最小擬合法，並取 $Y=10$ pixel 的數據來觀察分布情形，如圖 4-9 所示， α 分佈由 -0.3 到 0.3 ，再利用雷射光點在 X 軸的大小 2.6 mm，及在 Y 軸的大小 3.2 mm，可算得曲率半徑 248.28 mm，產品規格上的標示 248.79 mm \pm 1% 差不多，接著利用 α 擬合面計算系統入射角在 70 度時所對應的入射角分佈，如圖 4-9，及其在 $Y=75$ pixel 的切線分佈，如圖 4-10。

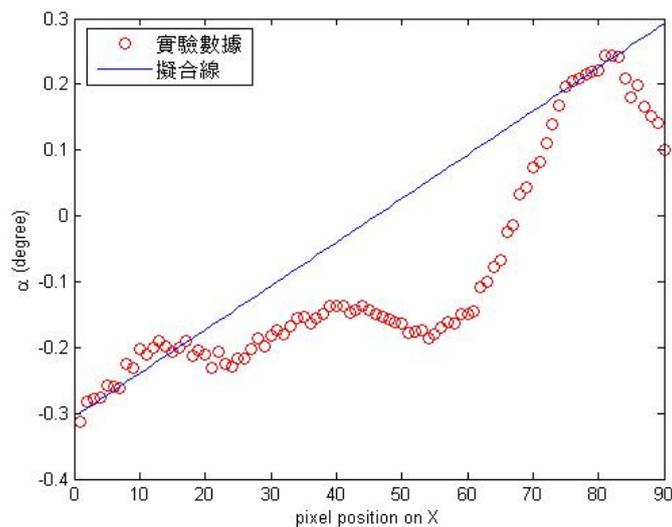


圖 4-9：球面二維 α 分佈與線性擬合結果

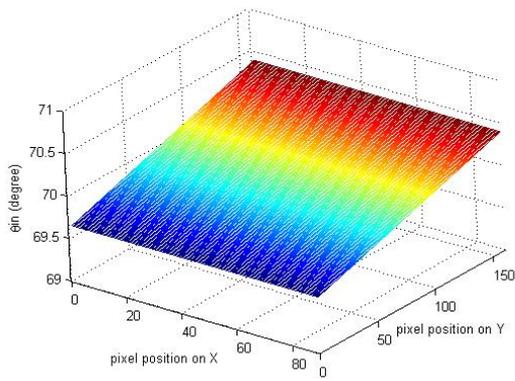


圖 4-10：球面之入射角分布

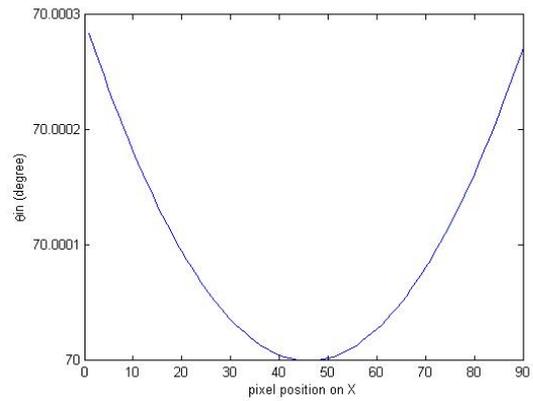


圖 4-11：Y=75 的入射角分佈

在 Y 軸方向上只要斜面有 1 度的變化，入射角也隨著改變 1 度，所以上圖中我們可看出入射角在 Y 軸上由 69.6° 增到 70.4° ，在 X 軸上入射角只變化了 0.0003° 。



4.2.3 球面之二維橢圓參數分佈

因為目前所測的是球面平凸透鏡上的薄膜，不只在 X 軸方向呈曲線分佈，在 Y 軸方向也是，而 Y 軸方向的曲線分佈我們已從上一節得知，它對入射角是直接呈現加成的關係，所以我們現在量得 Ψ 與 Δ 分佈會不同於圓柱的情形。圖 4-12 所示，為 Ψ 在球面上的二維分佈， Ψ 值因入射角增加而從 6.6° 隨著位置增加到 7.15° ，且整個斜面較為平坦，表面起伏變化不大；圖 4-13 為球面的二維 Δ 分佈，它與 Ψ 值的變化不同， Δ 值隨著入射角的增加而從約 75° 減少到 65° ，且表面起伏變化較大，這也說明了球面表面的薄膜厚度也並不均勻。

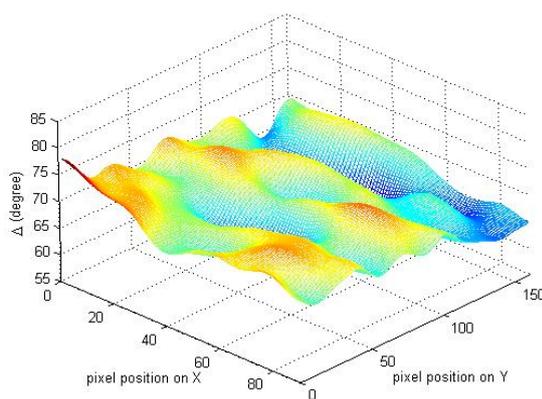
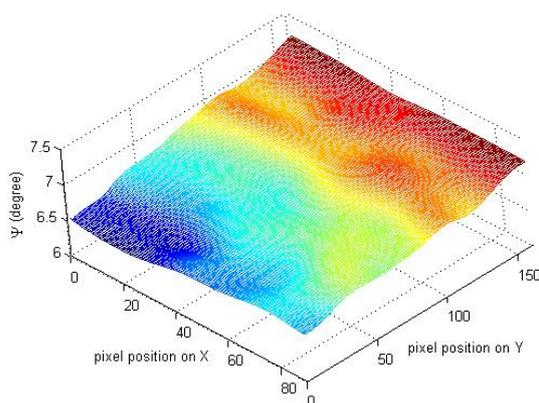


圖 4-12：球面之二維 Ψ 分佈

圖 4-13：球面之二維 Δ 分佈

接著我們將上一節所得的入射角分佈帶入目前的 Ψ 與 Δ ，一起計算球面透鏡上的 ITO 薄膜厚度分佈，如圖 4-14 所示，影像解析度為 $30\mu\text{m}$ ，所計算得厚度為 $100\text{nm} \pm 5.5\text{nm}$ ，雖然薄膜厚度上的誤差大小比上一節求得厚度差大，但與薄膜測厚儀 (Alpha-step) 量測平面玻璃基板上的 ITO 薄膜厚度 ($97\text{nm} \pm 6\text{nm}$) 比較，結果差不多，也符合文獻所說鍍膜過程造成的表面粗糙度 ($5\text{nm} \sim 20\text{nm}$)，由這些結果可知我們在球面透鏡量測的薄膜厚度是正確的。

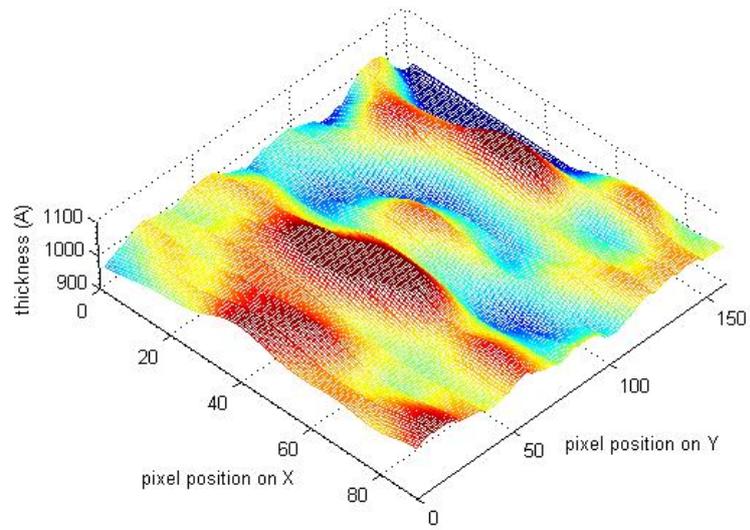


圖 4-14：球面透鏡上薄膜厚度分佈



4.3 α 分佈與薄膜厚度變化關係

為了了解量測得 α 面的平整度與薄膜厚度粗糙的關係，我們將實驗的 α 面減去 α 誤差最小擬合面，得到 α 誤差分佈去比較薄膜厚度分佈的關係。因此我們再量測一個球面透鏡上鍍有一層 Cr 材料的薄膜，所得厚度分佈 (圖 4-15 (b)) 及 α 分佈 (圖 4-16)，其薄膜厚度大小為 $15\text{nm} \pm 1\text{nm}$ ，影像解析度為 $40\mu\text{m}$ ；因為此薄膜材料具高消光係數，且較厚的區域與較薄的區域差 2nm ，會有 6% 的光穿透差，所以我們利用 720 萬畫素數位相機拍攝光穿透樣品後的影像，並將量測區域放大後轉為灰階形式，加強其灰階強度 (圖 4-15 (a))，對薄膜厚度分佈與灰階圖做定性上的比對，我們可發現黑框裡的灰階位置分佈與厚度分佈位置相當吻合，確認了實驗所算得的薄膜厚度分佈。

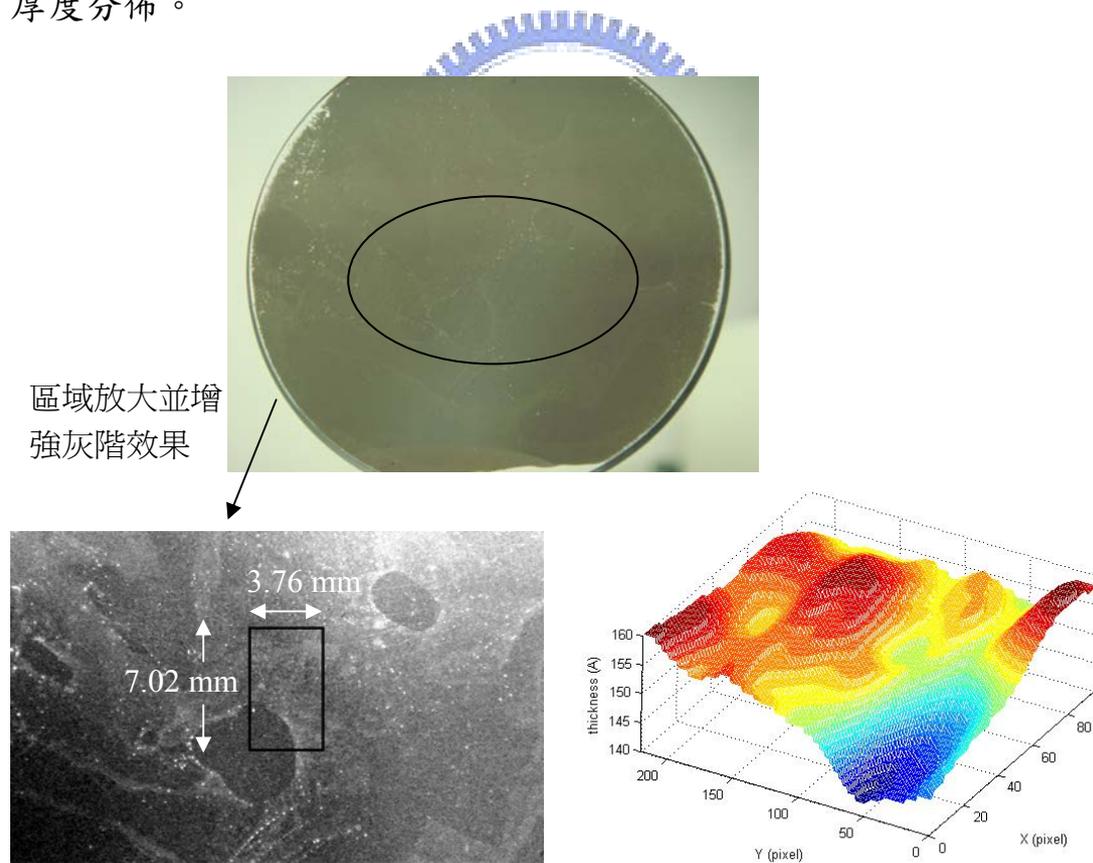


圖 4-15 (a)：薄膜相片灰階圖

圖 4-15 (b)：Cr 薄膜厚度分佈

因為所測得 α 面相當平整，我們再做出 α 誤差分佈 (圖 4-17)

，即實驗 α 減掉擬合 α 分佈，觀察其與厚度分佈關係，算得 α 誤差為 $0^\circ \pm 0.05^\circ$ ，可明顯看出區域上的高低分佈與薄膜的厚度分佈形貌不相似。

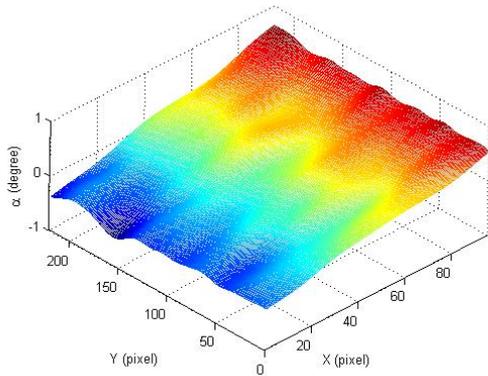


圖 4-16：球面凸透鏡 α 分佈

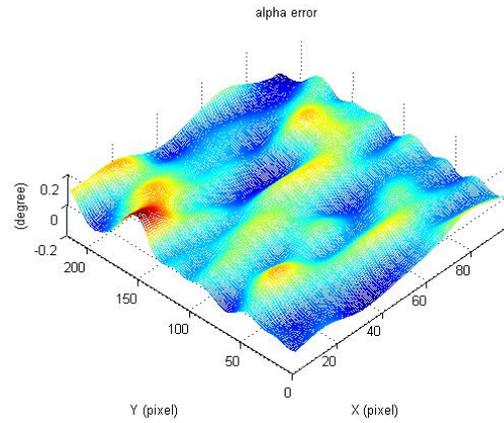


圖 4-17： α 誤差分佈

但我們將 4-1 節所測得圓柱上 ITO 薄膜厚度與 α 誤差分佈做比較 (圖 4-18)， α 誤差為 $-0.05^\circ \pm 0.23^\circ$ ，這 α 範圍比上述的誤差範圍還大，並可明顯看出兩張圖均有兩條凸起的區域，且位置有稍微相似，在 $Z=25$ pixel 的位置劃一條切線觀察其高低分佈的相關性 (圖 4-19)，我們可看出在此切線上的膜厚與 α 誤差數據恰好對應，膜厚增加 α 誤差增加，膜厚減少 α 誤差減少。

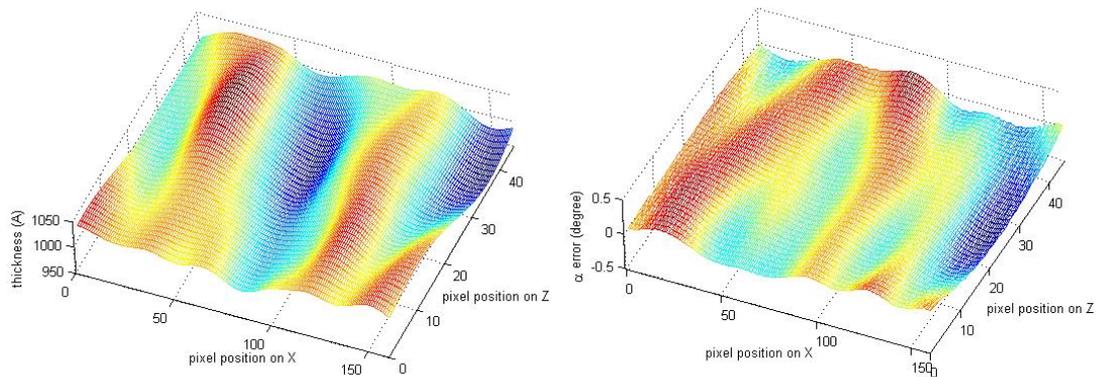


圖 4-18：圓柱透鏡上膜厚分佈與其 α 誤差分佈

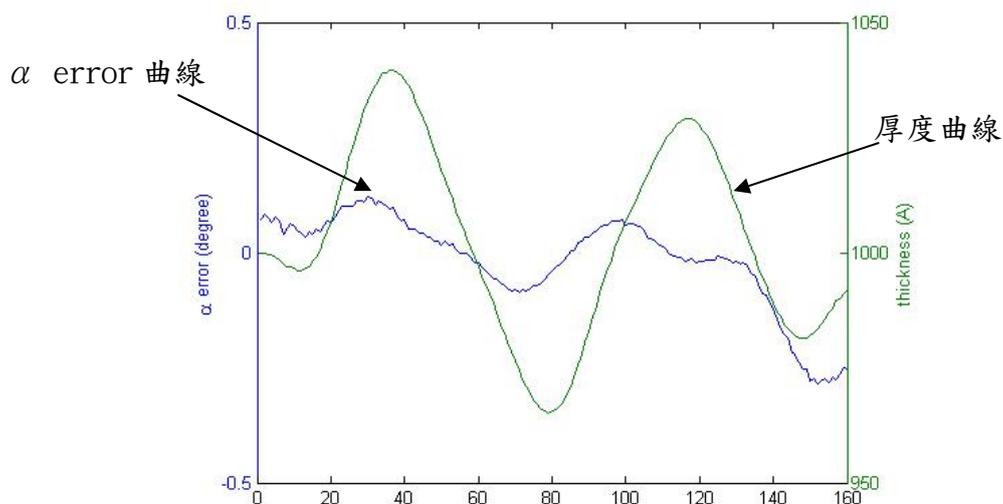


圖 4-19： α 誤差與膜厚之切線比較圖

因為系統對所測得 α 的標準差為 0.02° ，所以根據我們影像的解析度分析與造成 α 的幾何關係，當系統解析度為 $20\mu\text{m}$ 時，只要薄膜厚度差在 7nm 以上， α 就會有 0.02° 以上的變動 (圖 4-20)；故影像解析度在 $40\mu\text{m}$ 時，薄膜厚度差就需要 14nm 以上， α 才會造成 0.02° 以上的誤差。所以我們才能在圓柱上鍍 ITO 的數據中 (膜厚差 8.6nm)，看出 α 誤差的形貌與膜厚分佈相似，而不能由球面上鍍 Cr 的樣品的 α 誤差看出膜厚的形貌 (膜厚差 2nm)。

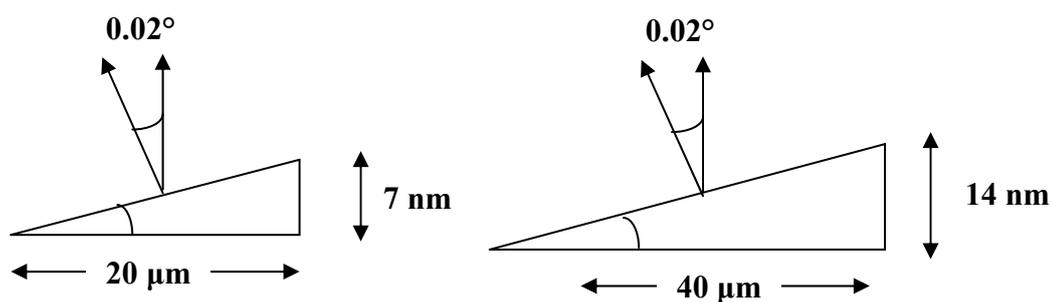


圖 4-20： α 對膜厚變化的解析