

國立成功大學
聲光電暨奈微米結構實驗室
碩零新生暑期訓練

共軛焦顯微鏡設備（Confocal）操作與量測

訓練負責人:林合祐(碩一)、游翔智(碩一)

內容

基本原理.....	1
一、Gaussian beam（高斯光束）	1
二、共軛焦原理介紹	2
三、共軛焦顯微鏡構造介紹	3
四、可量測資料	5
五、共軛焦顯微鏡運作原理	5
實驗操作.....	9
一、操作前準備	9
二、初始設定	9
三、量測操作	10
四、量測分析	11
常用數值.....	13
學習考核.....	14
一、考核目的	14
二、考核實施方式與評分方式	14

基本原理

一、Gaussian beam (高斯光束)

$$w(z) = w_0 \sqrt{1 + \left(\frac{z}{z_R}\right)^2}$$

$w(z)$ 並非光束的實際邊界，而是高斯光束大小的標準定義。

$w_0 = w(0)$ ：焦點位置最小的光斑半徑。

z ：樣品表面與焦點的高度差，也就是離焦量。

z_R ：Rayleigh range 從其腰部到其面積為腰部面積兩倍的截面的距離，此時截面半徑約為 $\sqrt{2}$ 倍的腰部半徑 ($\sqrt{2}w_0$)。

$$I(r, z) = \frac{2P}{\pi w(z)^2} e^{\frac{-2r^2}{w(z)^2}}, \quad I(r, z) \text{ 為光強度 (W/m}^2\text{)}, \quad P \text{ 為雷射功率 (W)}$$

由定義 $I(0, 0) = I_0 = \frac{2P}{\pi w_0^2}$ ，此時當 $z = 0, r = 0$ 時 $I = I_0$

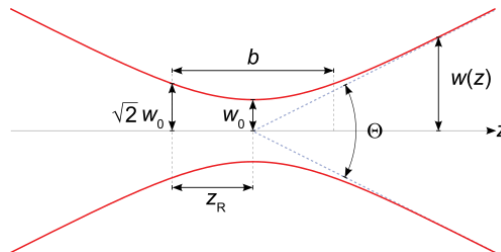
因此半高全寬 (FWHM, Full Width at Half Maximum) 及意光強度為峰值的一半即 r 值需要離光束軸心距離多長，此時光強會剩峰值時強度的一半。

由工程定義「光強降到一半的位置」代表光斑的有效大小

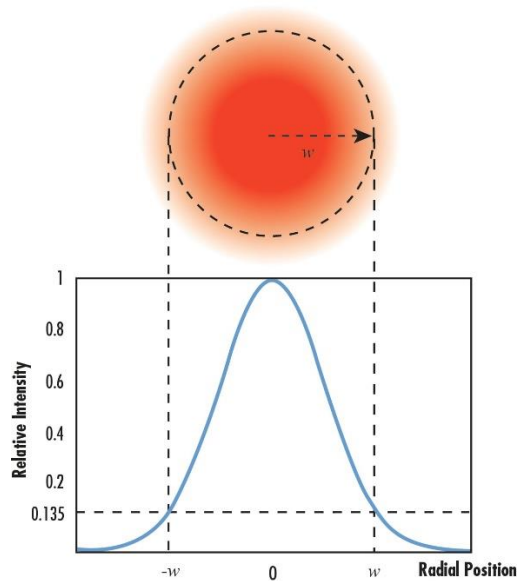
當 $z = 0$ $I(r, 0) = I_0 e^{\frac{-2r^2}{w_0^2}}$ 時，取 $\frac{1}{2}I_0 = I_0 e^{\frac{-2r^2}{w_0^2}}$ 故 $\frac{1}{2} = e^{\frac{-2r^2}{w_0^2}}$

因此 $r = w_0 \sqrt{\frac{\ln 2}{2}}$ 可以知道不同類型 Gaussian Beam 有 w_0 可以得出 Gaussian

Beam 在光強一半時的 r 值，及光斑 (spot) 的有效大小。



依此類推可以知當 $r = w_0$ 時 $I(w_0, 0) = I_0 e^{-2} = 0.135I_0$ 即當 r 距離軸中心距離 w_0 時，強度為峰值強度的 13.5%。

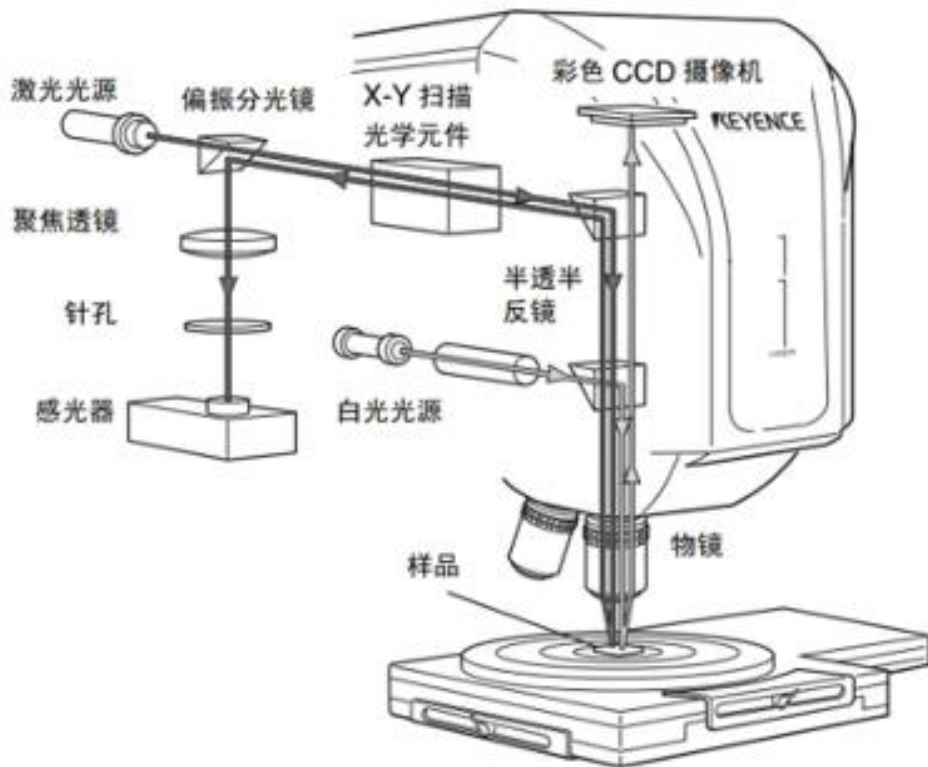


二、共軛焦原理介紹

當光線經物鏡聚焦於某一點時，若欲觀測的物體正好位於此焦點，則物體反射的光再度穿過同一物鏡後，會重新匯聚於光源所在的位置。這種「光源與成像焦點互為共軛」的配置，稱為**共軛焦**。

在此共軛焦點處放置一個微小的針孔，只收集能精確穿過該針孔的光線，即可有效排除來自非聚焦平面的散射或失焦光，降低背景雜訊，顯著提升影像對比與解析度，這便是**共軛焦原理**。

三、共軛焦顯微鏡構造介紹



雷射掃描共軛焦顯微鏡的核心構造包含以下 3 個部件：

A. 雷射光源：

雷射具備單色性佳、光強高、調控彈性大等優勢，是激發螢光不可或缺的光源。當雷射照射樣本時，螢光分子吸收光能躍遷至激發態，隨後回到基態並以螢光形式釋放能量。藉由調整雷射波長匹配所選染料，可獲得最佳激發效率並提升訊雜比。

B. 二向色鏡/偏振分光鏡 (dichroic mirror)：

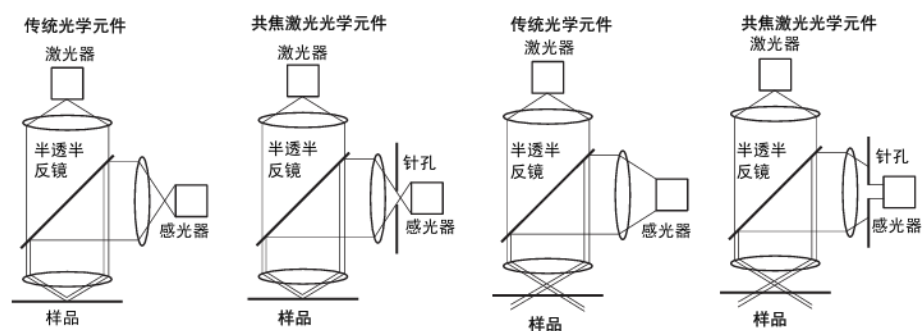
二向色鏡利用多層介質薄膜的干涉效應，對不同波長的光實現選擇性反射或透射。在共軛焦光路中，它肩負「分光」任務：將激發光反射進物鏡照射樣本，同時允許樣本產生的螢光穿透鏡面進入偵測通道。此結構確保激發光與發射光路徑分離，避免強烈反射光淹沒微弱螢光訊號。

偏振分光鏡可以讓特定偏振方向的雷射光近乎 100% 穿透並導向掃描元件。當光線從樣品反射並再次通過光學系統時(實務上物鏡端通常會搭配四分之一波

片，使偏振態旋轉 90 度)，反射回來的雷射光遇到偏振分光鏡時，會近乎 100% 地被反射進去「針孔 (Pinhole)」與感測器的路徑中。

C. 針孔光圈 (pinhole)：

針孔位於偵測光路的共軛焦平面，只准許源自焦平面的螢光匯聚穿孔；焦前與焦後的散射或失焦光因無法聚焦於此，極大部分將被擋板阻隔(擋下 95%~99% 的失焦光)。針孔的大小直接影響影像解析度，因此，在實際應用中，需要根據樣本的特性和實驗要求，選擇合適的針孔大小。



焦点对准
传统光学元件与共焦激光光学元件一样，可以让所有的反射光进入感光器。

焦点未对准时
传统光学元件可以让所有的反射光进入感光器，而共焦激光光学元件仅允许一部分光进入。

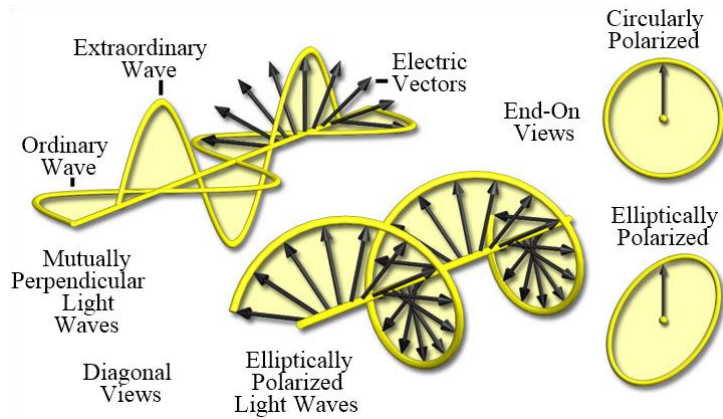
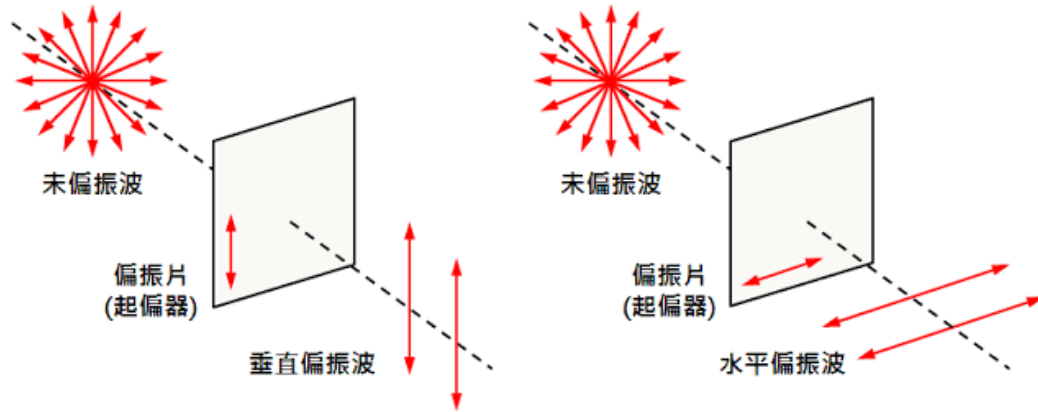
四、可量測資料

Profile Measurement	Height、Shape Sample、Width、Cross-section、R- measurement
Roughness Measurement	Line Roughness、Surface Roughness
3D Measurement	Volume、Surface、Ratio of area to surface area
Automatic Width/Height Measurement	Width、Height
Comparative Measurement	Compare two target objects and measure their differences.
2D Plus 3D Measurement	Set measurement locations in 2D & 3D images.

五、共軛焦顯微鏡運作原理

VK-9700 採用兩種光源：短波長激光光源和白光源，透過這兩種光源，可以獲取影像的顏色、光強度和高度信息。短波長雷射束檢測反射光強度和高度，VK-9700 使用激光束和 X-Y 掃描光學系統掃描顯微鏡的場域，光接收元件檢測視野中每個像素的反射光，通過在 Z 軸上驅動物鏡並重複掃描，根據 Z 位置獲得反射光強度，在專注於峰值位置時，可以獲得高度信息並檢測反射光強度。

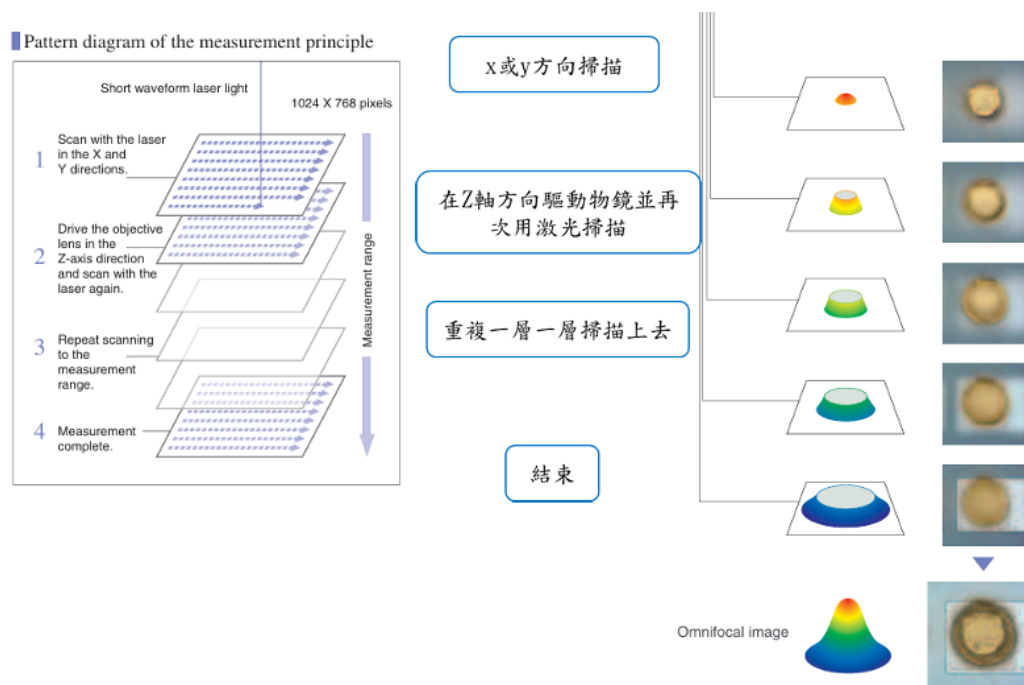
VK-9700 使用雷射 408 nm 紫光雷射 (Violet Laser) 穿過偏振分光鏡，特定偏振方向的光會通過（例如 p 偏振光）使其進入後續光路。



通過偏振分光鏡的雷射進入 X-Y 掃描光學元件。掃描元件利用兩個可轉動的反射鏡，改變雷射的行進角度。當雷射經過後續物鏡聚焦後，焦點便會在樣品表面做 x、y 方向的逐點掃描，達成雷射光點在樣品表面的平移。

雷射從 x、y 方向進行掃描→根據所選擇的 Z-Pitch 值一層一層的掃描 → 最後疊加起來 最終形貌影像。

如下圖所示：



因為共軛對焦掃描雷射一次只能量測一個點 透過這種方式來讓光點可以掃描整個觀測區域。因此 X-Y 掃描光學元件控制雷射依序照射樣品上的**每一個位置**，逐點收集資訊，最後重建出整張影像。

雷射光經過兩個半透半反鏡。半透半反鏡的功能是分光與合光，使不同來源或不同方向的光能共用部分光路，再依照光學設計導向不同元件。在顯微鏡中，其主要作用是整合 X-Y 掃描元件光路與白光照明光路，使兩者共用同一支物鏡；此外，樣品反射光沿原光路返回，在偏振分光鏡分離後進入偵測光路，再經聚焦透鏡與針孔到達光電倍增管（Photomultiplier Tube，簡稱 PMT），而白光影像則可導向 CCD。



雷射照射樣品後，樣品表面的高度會影響雷射的聚焦程度；而樣品的材質、粗糙度、多層薄膜結構、金屬或半導體特性，以及多次散射等因素，則可能影響反射光的強度與偏振狀態，同時焦點離樣品表面越大，雷射光斑就越大，單位面積上的光強就越低。反射光沿原光路返回並通過物鏡，抵達偏振分光鏡後，其中符合偵測光路（例如 s 偏振光）分光條件的偏振分量會被導向聚焦透鏡。聚焦透鏡再將樣品焦平面成像於針孔位置，使來自焦平面的反射光能較有效地通過針孔，而離焦光則大多被針孔阻擋。高斯光束模型用於描述雷射聚焦前後的光斑尺寸及光強分布，當樣品偏離焦平面時，光斑半徑 $w(z)$ 增加，樣品表面的中心照明光強下降；同時，反射光無法在針孔形成最小光斑，使通過針孔的光量進一步降低。因此，共軛焦感光訊號會在樣品表面位於焦點時達到最大值。

系統藉由 Z 軸掃描並尋找訊號峰值，判定該點的表面高度，最後由感光器接收並計算出物體高度的變化。

PS：VK-9700 的量測雷射波長為 408 nm，而白光的波長範圍約為 400–700 nm。由於光路圖沒有標示二向色鏡（Dichroic Mirror），因此可能在第一個半反半透鏡附近可能採用了具有波長選擇性的二向色鏡，以分離雷射光與白光，避免白光進入 X-Y 掃描及共軛焦偵測光路。

實驗操作

一、操作前準備

1. 打開 VK Viewer。
2. 利用程式將載台移回原點（中央位置）。
3. 將物鏡切換至低倍鏡。
4. 打開塑膠盒，取出 wafer。
5. 將 wafer 放置於觀測平台上。

二、初始設定

將觀測程式 Zoom 設定為 1x，並切換至 Camera 模式。

6. 設定 Laser Intensity：

在 Select Filter 中若為*鍍金屬樣品，請適當調低。若待測物為光阻結構(即未進行 PDMS 翻模)將其設置為 *3%，若為量測 PDMS 設為 *100%。

*量測鍍金屬樣品時不能將 Select Filter 設得太高（例如 100%）的原因是：金屬的高反射率會使回到光學系統的雷射能量過強，造成量測品質下降，甚至使感測器飽和。

*由於 PDMS 為透明材料，對雷射的反射率低且回傳訊號較弱，因此需將 Select Filter 設為 100%，以提供足夠的雷射能量，確保共軛焦系統能接收到足夠的反射訊號，提升焦點判定與高度量測的準確性。

*Confocal 光源波長為 406 nm，實驗室中常用曝光光源波長為 365nm、

405nm 因此若直接量測光阻結構時將雷射強度設為 3% 可避免 Confocal 雷射與試片上光阻產生非預期反應。

三、量測操作

7. 使用方向鍵及旋轉平台調整高度，直到螢幕顯示清晰影像。當成功鎖定待量測 pattern 後，切換至 50x 高倍鏡，再切換至 Laser 模式，等待畫面變為 Laser 觀測影像。

8. 設定檢測區間：

在 Laser 模式下調整下對比度 (Lower Contrast)，直到畫面全黑，再按 Set Lower Pos。接著調整上對比度 (Upper Contrast)，直到畫面再次全黑，再按 Set Upper Pos。(對比度調整可使用滑鼠操作，或按 Ctrl + Shift + 滑鼠滾輪進行調整)

9. 按下 *Auto Gain (自動增益)，等待系統完成自動增益程序。

*按下 Auto Gain 後，軟體會：

- A. 掃描目前畫面
- B. 找出最亮像素
- C. 自動增加或降低 Gain
- D. 讓最亮區域接近飽和，但通常不超過飽和 (例如 95%~99% 動態範圍)

注意!!! Auto Gain 並不是調整雷射輸出功率，而是調整偵測器對回波訊號的放大倍率。

10. 確認 Estimated Time 是否可接受。若預估時間過長，可回到 Measurement Setting，將量測精度調整為較大的尺度 (例如 0.1 μm)，以縮短量測時間。

11. 點擊 Start Measurement 開始量測。

12. 量測完成後，儲存量測資料 → File → Save measurement result as... (儲存 .vk3 檔)。

四、量測分析

13. 開啟 VK Analyzer ，並選取儲存的 VK3 檔案，並將影像切換為 Laser + Color 模式或 Laser intensity 。

14. 開啟 Noise 功能，選擇 Normal 模式，針對高度 (Z) 資料進行數位濾波，減少因雷射散射、偵測器雜訊或環境振動造成的孤立高點、低點及隨機起伏，以去除影像雜訊。

15. 選擇 *Corrtct tilt (傾斜校正)功能，選擇合適的 Correction method →將測量點拉至同高度(同色) → 勾選 Auto adjust height range → Execute → Close 。

*在實際量測時，樣品通常不會完全水平放置，例如：基板固定時有微小角度偏移、載台水平度誤差，因此量測得到的高度資料可能包含：

$$Z_{measure} = Z_{surface} + Z_{tilt}$$

其中：

- $Z_{surface}$ ：真正的表面高度變化
- Z_{tilt} ：由樣品傾斜造成的線性高度變化

Correct Tilt 會利用選定區域的高度資料，建立一個最佳擬合平面

$$Z(x, y) = ax + by + c$$

其中：

- a：X 方向傾斜量
- b：Y 方向傾斜量
- c：基準高度

然後將此平面從原始高度資料中扣除：

$$Z_{corrected} = Z_{measured} - (ax + by + c)$$

使表面重新以水平面作為基準。

16. 開啟 Profile 功能，選擇量測工具。

基本圖形：於欲量測位置點擊兩次建立剖面線。

多個 Nozzles 或 Circles：使用斜線工具拉出量測線，使參考線通過各 Nozzle 的圓心。

17. 在剖面圖中拖曳第一個量測範圍，將 Nozzle 的最高點與最低點完整包覆。

18. 選擇第二組量測區間（可新增兩組以上），於剖面圖中拖曳另一個範圍，用以比較同一形貌不同位置的剖面差異。

19. 確認量測完成後，點擊 OK。

20. 依序點選 File → Save Image → 儲存 Report... 檔（儲存 .bmp 檔）。

21. 再依序點選 File → Output CSV file，儲存 CSV 檔（儲存 .csv 檔）。

常用數值

$$1\text{ }\mu\text{m} = 0.001\text{ mm}$$

$$1000\text{ nm} = 1\text{ }\mu\text{m}$$

$$1\text{ nm} = 10^{-3}\text{ }\mu\text{m} = 10^{-6}\text{ mm} = 10^{-7}\text{ cm}$$

$$\text{常見 A4 影印紙厚度為 } 0.1\text{ mm} = 100\text{ }\mu\text{m} = 100000\text{ nm}$$

$$\text{頭髮直徑約為 } 60\sim 100\text{ }\mu\text{m} = 0.06\text{ mm} \sim 0.1\text{ mm}$$

$$\text{細菌直徑約為 } 0.2\sim 1.2\text{ }\mu\text{m} = 0.0002\text{ mm} \sim 0.0012\text{ mm}$$

$$\text{保鮮膜厚度約為 } 12\text{ }\mu\text{m}$$

$$\text{常見醫用針孔直徑 } 0.8\text{ mm} = 800\text{ }\mu\text{m}$$

$$\text{台幣一元硬幣厚度為 } 2.0\text{ mm} = 2000\text{ }\mu\text{m}$$

$$\text{台幣五元硬幣厚度為 } 1.6\text{ mm} = 1600\text{ }\mu\text{m}$$

$$\text{台幣十元硬幣厚度為 } 1.88\text{ mm} = 1880\text{ }\mu\text{m}$$

$$\text{台幣五十元硬幣厚度為 } 1.93\text{ mm} = 1930\text{ }\mu\text{m}$$

學習考核

一、考核目的

透過實機操作考核，使學生能夠：

1. 獨立找到指定量測圖形 (Pattern)。
2. 獨立操作 Confocal 顯微鏡及 VK Viewer 軟體完成量測。
3. 正確輸出量測結果並完成資料存檔。
4. 理解量測結果及其基本判讀方式。

二、考核實施方式與評分方式：

由已曝光 Wafer 上的不同曝光圖形中，隨機抽取一種特定間距 (Pitch) 作為考核題目。在過程中學生須於 Wafer 上搜尋並定位對應之圖形，完成圖形辨識及量測。學生需操作 Confocal 軟體及顯微鏡平台進行圖形搜尋、定位與量測，以熟悉平台操作流程及設備控制方式。

須自打開 Wafer 盒開始，依照標準操作流程完成整個量測程序，直至量測完成並將資料存檔。考核過程中，所有操作步驟皆由學生獨立完成。若學生於操作過程中發生錯誤、操作不當、遺失步驟，考核負責人將立即提醒並說明正確操作方式，本考核採扣分制，滿分 100 分，每提醒一次扣 2 分。

考核最低分數以 80 分為下限；若最終成績未達 90 分，學生須進行補考，直至考核成績達 90 分 (含) 以上，始視為通過考核。