

第一章 近場光學顯微術簡介

1-1 顯微術簡史

最早顯微鏡的發明，起源於放大鏡的使用，放大鏡其實就是一塊凸透鏡，慢慢接近物體時，具有放大待測物的效果。而在16世紀，有人利用兩塊透鏡，並加以組合，獲得較佳的放大效果(約放大十倍)。不過由於當時的工業技術還不夠成熟，透鏡的製程粗糙，使得放大的效果，略顯模糊而未受世人所重視。

直到1665年，英國物理學家虎克(Rober Hooke ,1635~1703)第一個發明顯微鏡可以觀察到軟木細胞及跳蚤等微小生物及物體，並發明”細胞”一詞。這時開始顯微鏡才開始受到重用。同時間，荷蘭的科學家雷文霍克(Anton van Leeuwenhoek, 1632~1723)使用品質較佳的透鏡來做顯微鏡，使放大倍率提升至數百倍(根據他的觀察報告指出，當時的放大倍率可達五百倍)，開啟研究小尺度物質的先端，例如:研究動物細胞、光學影像和原子...等等。

光學顯微鏡在經過長時間的發展，已經能獲得數百奈米(nm)的解析度。由於受到光波繞射(diffraction)與干涉所限制，使得其解析度只能夠到達量測波長的1/2。在科技的進步下，此解析度已經無法滿足科學家的需求，因為原子的尺寸大約在0.2 nm左右，所以光學顯微鏡的無法解析出原子的影像。

1924年法國科學家De Brogile 提出電子具有波動性質，且經由實驗證實後，立即有人提出”電子顯微術(Electron Microscopy, EM)”的構想。由1926年，布什(Hans Busch)發表關於磁聚焦的論文，論

文指出電子束可以藉由軸對稱電磁場來進行聚焦，如同光波聚焦的效果，從理論上得知，如果使用數萬伏特來加速電子，可將波長縮短至0.1埃(0.01 nm)以下，由繞射極限來看，運用電子束來成像，會比光波有更好的解析度。

在1933年德國科學家魯斯卡(Ernst Ruska)在親自實踐理論下，促使第一架電子顯微鏡的出現，在放大率12000倍下，他成功獲得優於光學顯微鏡的影像。在經過數十年的發展改良下，電子顯微鏡出現了蓬勃的生機，並在研究大規模積體電路下，掃瞄式電子顯微鏡(SEM)也發揮了重大的作用。1970年代出現的超高分辨率電子顯微鏡，並首次觀察到原子量較大的鈾原子。如今，在高解析及高伸縮性的性能下，電子顯微鏡已成為大部分研究室的觀察工具。

從光學顯微鏡到電子顯微鏡，主要透過透鏡或電磁場聚焦成像。然而到了1980年初期，多了一種新的顯微術，這種顯微術擺脫過去聚焦成像的思維，藉由一根極小的探針，利用探針與樣品間的相互作用，掃瞄出樣品表面形貌。同時，在經由探針結構或材料上的不同，能夠同時瞭解樣品表面的特性，因而衍生出各種不同的名稱，現在已經將這些顯微術統稱為“掃瞄式探針顯微術”(Scanning Probe Microscopy, SPM)。

在1982年G. Binnig及H. Rohrer成功發明出掃描穿隧顯微鏡(Scanning Tunneling Microscope, STM)，不到五年的時間，就成功將解析度達到原子量級，也因此1986年，Binnig、Rohrer與電子顯微術發明人Ruska一同獲得諾貝爾物理獎。電子顯微鏡雖然能夠獲得

高解析度，同時掃描速度上也較為快速，但它只能在特殊的條件下運作，且無法分析樣品表面的物性；在這一點，探針顯微術就較具優勢，不但可在一般的環境下(一大氣壓下，甚至在液體中)量測，同時可綜合物質表面細微結構及表面訊息，如成分、硬度、黏著、磁、電、光等，物理特性進行量測與分析，其應用已經脫離出過去”顯微成像”的目的，也因此被視為繼光學顯微術、電子顯微術後的第三代顯微術。

1-2 掃描探針顯微術

1-2-1 探針顯微術的崛起

在 1982 年，IBM Zurich 實驗室的 G. Binnig 和 H. Rohrer 利用壓電陶瓷管來控制微量的位移，並利用電子的量子穿隧效應(Electron tunneling effect)來做為金屬探針及樣品表面間距離的回饋控制，成功獲得導體與半導體樣品表面原子級的解析度，此種顯微術稱為掃描穿隧顯微術(Scanning Tunneling Microscope, STM)^[2]。STM 是利用一根尖細的探針來量測樣品的表面形貌，而探針的尖端(tip)約只有一兩個原子的大小，所以能夠得到樣品表面的原子影像。又因為透過電子穿隧電流經由回饋電路來控制壓電陶瓷管，使得探針與樣品能保持固定距離，且讓探針十分貼近表面（達奈米級），使掃描出的來的影像可信度更高。加上工作環境彈性，可在一大氣壓下操作。但它還是有若干缺點（需防震度需夠高，探針材質穩定...等等），但在顯微術的重要性已經普遍受到重視。

在STM成功發明出來後，許多人利用類似的概念，並利用不同的探針、不同型態的作用力，來量取測樣品表面極小區域內的聲、光、力、電、熱、磁……等等的特性。如利用探針與樣品表面間之凡得瓦爾力作為回饋控制，獲得Z軸變化量的原子力顯微術(Atomic force microscopy—AFM)^[3]，測量表面熱性的掃描式熱感顯微術(Scanning thermal microscopy)^[4]，運用磁性探針測量樣品表面細微磁力分佈的磁力探針顯微術(Magnetic force microscopy—MFM)^[5]，利用光纖探針量取樣品表面光學性質的近場光學顯微術(Scanning near-field optical

microscopy—SNOM)^[6]，以及其他諸如靜電力式顯微術(Electrostatic force microscopy—EFM)^[7]、掃描聲學顯微術(Scanning acoustic microscopy—SAM)^[8]等等，這些由STM技術所衍生出來的顯微術通稱為掃描式探針顯微術(Scanning probe microscopy—SPM)。

1-2-2 原子力顯微鏡

在 1985 年，Binnig 與 Stanford 大學的 Quate 及 Gerber 提出了利用凡得瓦力來做為探針與樣品之間距離的回饋控制依據，並在 1986 年成功的發展出原子力顯微鏡(Atomic Force Microscope — AFM)^[3]。AFM 回饋機制類似 STM，但其回饋的作用力來自探針針尖的原子與樣品表面的原子之間的作用力，可應用在各種材料與各種環境，不像 STM 樣品一般只限於導體及半導體；或是 SEM、TEM 必須在高真空環境中，且樣品必須鍍上導電膜甚至做成切片後，才可以拿來做實驗。加上 AFM 在橫向解析度已達到原子量級，垂直方向則擁有 0.1nm 以下解析度，故 AFM 已經成為表面檢測的一個重要工具，並廣泛的被應用於量測樣品的表面形貌(Topography)、粗糙度(Roughness)與關鍵尺度(Critical dimension)等。

AFM 的操作模式可依探針與樣品表面的距離遠近及作用力的大小而分為三類：(1) 接觸式(contact mode)、(2) 非接觸式(non-contact mode)、以及(3) 輕敲模式(tapping mode)。由圖 1.1 得知凡得瓦力與距離之間的關係圖。

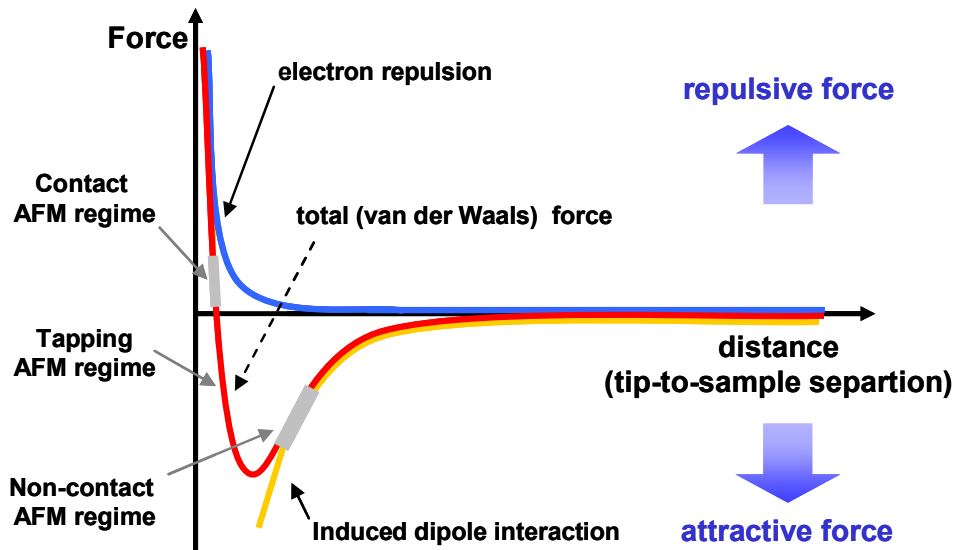


圖1.1 探針與樣品表面距離與總作用力的關係圖。

(1)接觸式(contact mode):

AFM 回饋機制的作用力來自樣品的原子與探針尖端原子間的“排斥力”。探針在工作時，為貼在樣品表面做掃描，所獲得的表面形貌最接近真實的表面形貌。而一般 AFM 實驗架構，如圖1.2所示，工作原理是將樣品固定在平台上，然後將探針固定一個可做X、Y、Z三維伸縮的壓電陶瓷管上，對樣品表面做 XY 二維掃描，在掃描過程中，探針的懸臂 (cantilever) 將受原子間作用力影響而隨著樣品表面的高低起伏做上下的彎曲偏移，利用半導體雷射光束打在探針懸臂的背面 (有鍍一層金屬層, Pt)，再反射進入一高靈敏度的位置偵測檢光器 (position sensitive photodetector, PSPD) 來偵測出此一位移的變化量，將此訊號送至回饋控制系統作為壓電陶瓷管掃描時之高度回饋控制，以保持探針與樣品表面間在掃描過程中有相同的高度或交互作用力。壓電陶瓷管在Z軸伸縮的變化量便反映了樣品表面的高低起伏，回饋控制系統記錄下來在XY平面上每一點的Z軸變化量，便可取得反映

出樣品表面幾何形貌 (topography) 的原子力顯微影像。

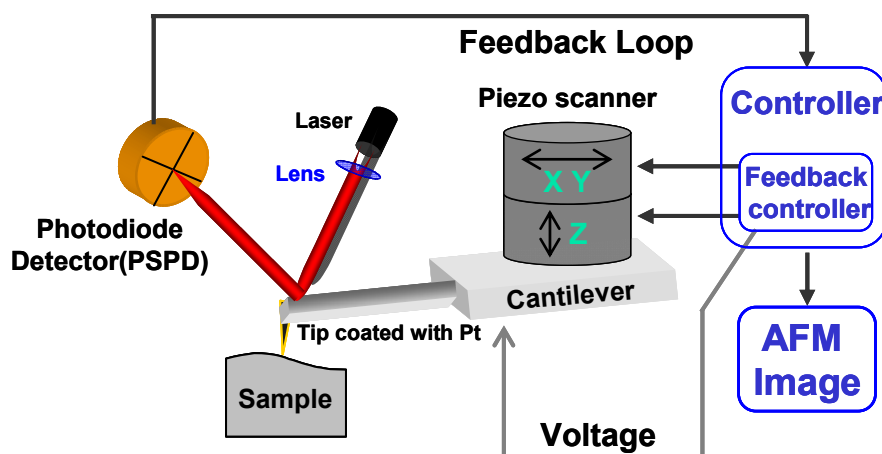


圖1.2 接觸式 AFM 儀器架構圖。

(2) 非接觸式(non-contact mode):

在接觸式的AFM中，其原子間的作用力較大，所以會得到較佳的解析度。但過大的作用力不但容易損害探針尖端，使量測的解析度變差，更會破壞樣品表面，例如：軟性樣品或是生物樣品，因此就發展出探針與樣品表面距離較遠、作用力較小的非接觸式 AFM (non-contact mode AFM)，其架構示意圖如圖1.3所示。其樣品的原子與探針尖端原子隨距離的作用力是吸引力，由於其相互的作用力較小，因此必須使用調制技術來增加訊雜比 (signal / noise ratio)。在工作機制上與接觸式 AFM 最大的不同點在於探針的懸臂上多了一片壓電陶瓷振盪片 (bimorph)，由訊號產生器(function generator) 產生一交變電壓源訊號以驅動壓電陶瓷片振動，使得探針懸臂能在其自然共振頻率做振盪。當探針與樣品表面慢慢靠近時，其作用力隨樣品與探針尖端原子的距離而做相對的變化，使得懸臂振幅及頻率改變，致使雷射光的光路發生偏移，而由PSPD偵測出振幅的變化，將此一訊號送入鎖相放大器

(lock-in amplifier) 與訊號產生器傳來的參考訊號比較放大後，輸出直流 (DC) 振幅訊號，再送入回饋控制系統作為壓電陶瓷管掃描時的回饋控制之用，便可以得到樣品表面的非接觸式原子力顯微影像。

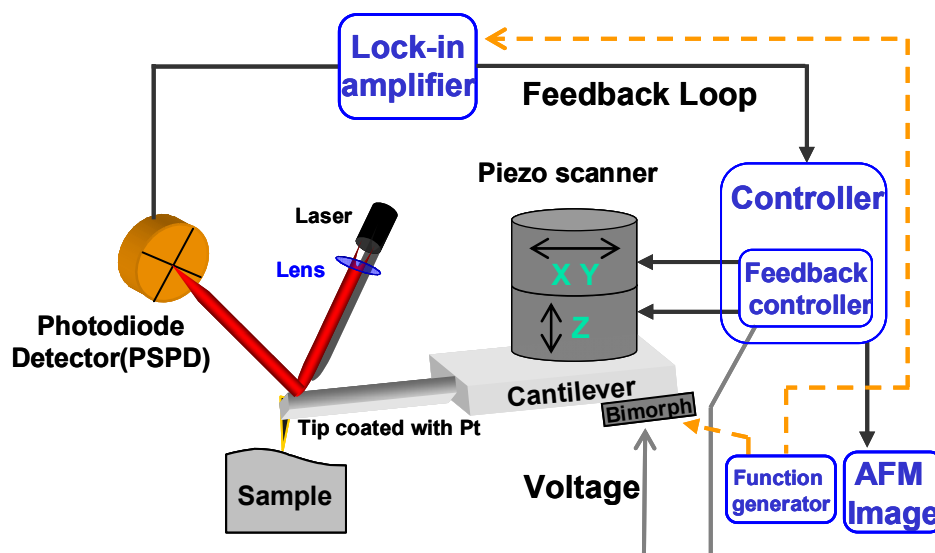


圖1.3 非接觸式 AFM 儀器架構示意圖。

(3) 輕敲模式(tapping mode):

輕敲模式是將非接觸式AFM加以改良而成，其原理是將探針及樣品之間的距離加近，並增大懸臂的振幅。因為探針與樣品表面的距離比較近，所以解析度比非接觸式要來的好。另一方面，探針與樣品表面進行間歇性的接觸，不會像接觸式AFM一般容易損壞樣品或探針，所以輕敲模式已成為目前商用原子力顯微儀最常使用的工作模式。

除了上述的工作模式外，為了配合近場光學需要，有人提出橫向作用力的剪力式顯微鏡(Shear force microscope)^{[9][10]}，採用直立式的光纖探針可同時量測樣品表面幾何形貌與近場光學訊號。其工作機制與非接觸式AFM相似，不同之處在於非接觸式AFM的探針振動方向是與樣品垂直的；而剪力式顯微儀則是利用壓電陶瓷振盪片(bimorph)來驅動直立式

光纖探針做與樣品表面成水平方向的振動。振幅訊號的量測方式最初使用的是光學式量測法，如圖1.4所示。

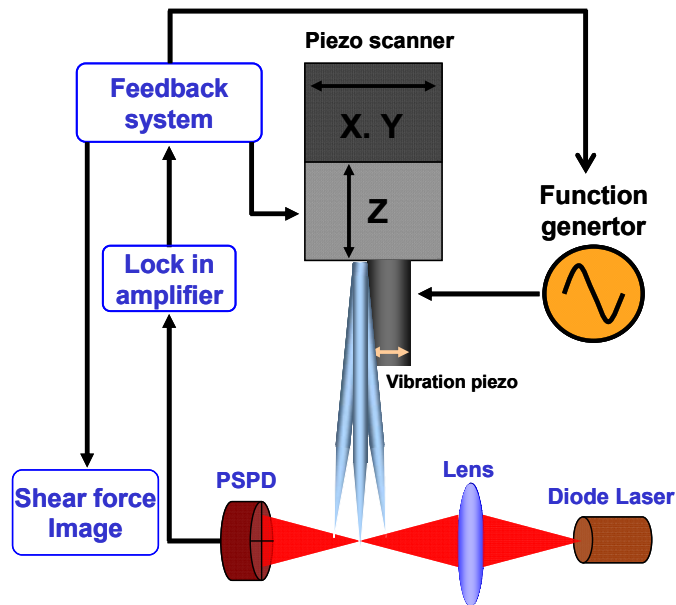


圖1.4 光學剪力式顯微術示意圖。

除此之外，非光學式量測法也因應近場光學量測而被發展出來，此法是將光纖和壓電晶體之間黏著一石英振盪器或音叉(tuning fork)，藉由壓電晶體作簡諧振盪運動帶動音叉振盪。這種非光學式量測法不但可避免傷害樣品、還可增加訊雜比，也不會有因為雷射光而產生熱方面的干擾，另外，系統也會省去了一組半導體雷射及位移檢測光二極體而變得輕巧而單純，所以非光學式近場光纖探針控制的方法已逐漸受到重視。此法於2-3-3小節有詳細的說明。

1-3 近場光學簡介

1-3-1 光學繞射極限

從光學顯微鏡的發明到改良，至19世紀初已經可以成功分辨一微米(μm)的解析度。而在發展的過程中，德國物理學家阿貝^[11] (Ernst Abbe, 1840~1905)在顯微理論有卓越的貢獻。1873年阿貝在顯微鏡成像理論中首次引入頻譜概念與二次成像概念，他在這種理論基礎下提出，使用顯微鏡觀察兩個點光源相距的距離，可解析的最短距離：當觀察者在遠大於一個波長的距離(稱之為遠場)觀測物體時，由於光具有波動性質無法必免干涉與繞射的產生，以致於其解析度只能達到 $1/2$ 的量測波長。而公式中的數值孔徑也首次被引用。阿貝藉由這些理論，改進了物鏡的設計，並在1878年設計浸油物鏡。此物鏡也使光學顯微鏡達到了理論上的分辨極限。之後Lord Rayleigh^[12] 對此寫下著名的繞射極限公式： $dL=1.22\lambda / 2N.A.$ (dL 為可分辨兩物體の間距， λ 為使用的量測波長， $N.A.$ 為收光透鏡的數值孔徑)，即所謂Rayleigh準則 (Rayleigh's criterion)。對光學顯微而言，若欲提高其解析度，從公式來看似乎只能從縮短波長或提高數值孔徑著手。亦即，若以600nm的紅光為光源，最佳也只能得到300nm的空間解析度。

繞射極限算是光學上的一個瓶頸，影響到的層面從顯微術到天文觀測，甚至近代的光學記錄，突破此極限亦成了一個重要的課題，而為了獲得較佳的顯微效果，也有了電子顯微鏡等技術的問世。但光學繞射極限的突破，則是藉由近場光學得以實現。

1-3-2 近場光學初始概念

1928年英國人E. H. Syngé^[13] 提出一個構想；在遠小於一個波長的距離(稱之為近場)，對待測物做光學量測，可避免在大於一個光波長距離下，由於光的波動性，所產生的干涉與繞射，而可以獲得高空間解析度的訊號。近場量測必須符合兩個條件：(1)微小的光學孔穴 (aperture) 直徑與(2)不透光板與樣品之間的距離，必須遠小於一個量測波長(λ)，必須符合兩個條件才可稱為近場量測。此即為掃描式近場光學顯微儀(scanning near-field optical microscope, SNOM or NSOM)的基本原理。在1956年時，美國的O'Keefe^[14] 以同樣的概念做了理論計算，以10nm的孔穴可得到10nm的空間解析度，但受限於當時的工程技術，無法以實驗來證明此一概念。直到1972年，E. A. Ash和G. Nichols^[15] 才以波長3cm的微波(microwave)，首次實驗得到 $\lambda/60$ 的空間解析度，證實在近場可以突破傳統繞射極限。

當時所提出的近場觀念如圖1.5所示，在孔穴直徑與孔穴距待測物表面距離皆遠小於一個波長，而近場光學訊號由此一光學孔穴的存在而產生，於是量測樣品表面上每個點之近場光學訊號強度並將其排列後，便可得到近場光學顯微影像，而近場光學影像與樣品的表面形貌為同步獲得。然而在當時，由於無法有效控制此孔穴與樣品表面約 $\lambda/100$ 的距離，加上無法製作微小光學孔穴的技術，所以可見光的近場量測在當時仍無法實現。直到1982年掃描式穿隧顯微鏡(Scanning tunneling Microscope, STM)的問世，近場量測的想法才得以實現。

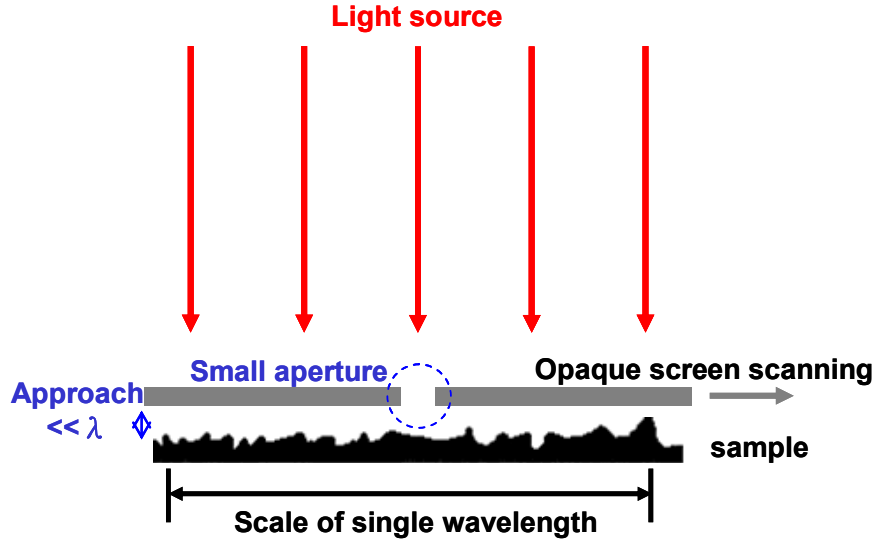


圖1.5 近場突破繞射極限示意圖。

1-3-3 近場光學原理

依據古典電動力學^[16]理論，我們對近場與遠場下的電磁波做一討論。若將一電偶極視為電磁波輻射來源，其微小振盪源(Oscillating source)所產生的電磁場：

$$\vec{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \left\{ k^2 (\vec{n} \times \vec{p}) \times \vec{n} \frac{e^{ikr}}{r} + 3\vec{n} \cdot [(\vec{n} \cdot \vec{p}) - \vec{p} \left(\frac{1}{r^3} - \frac{ik}{r^2} \right) e^{ikr}] \right\}$$

$$\vec{H} = \frac{ck^2}{4\pi} (\vec{n} \times \vec{p}) \frac{e^{ikr}}{r} \left(1 - \frac{1}{ikr} \right)$$

而後獲得電磁場分量：

$$\vec{E}_R = \frac{2p \cos \theta}{r^3} (1 + ikr) e^{ikr}$$

$$\vec{E}_\theta = \frac{p \sin \theta}{r^3} (1 + ikr - k^2 r^2) e^{ikr}$$

$$\vec{H}_\phi = \frac{p \sin \theta}{r^3} (ikr - k^2 r^2) e^{ikr}$$

在考慮遠場情況下，即 $kr \gg 1$ (i.e. $d \ll \lambda \ll r$)：

$$\vec{E}_R \approx 0$$

$$\vec{E}_\theta \propto -\frac{p \sin \theta}{r} k^2 e^{ikr}$$

$$\bar{H}_\varphi \propto -\frac{p \sin \theta}{r} k^2 e^{ikr}$$

觀察電磁場強度皆與距離 r 成反比，因此可看成一點光源所發射出來的傳遞波(propagated wave)，其Poynting vector隨距離的平方成反比。然而在考慮近場下，即 $kr \ll 1$ (i.e. $0 \ll r \ll \lambda$)：

$$\bar{E}_R \propto \frac{2p \cos \theta}{r^3} e^{ikr}$$

$$\bar{E}_\theta \propto \frac{p \sin \theta}{r^3} e^{ikr}$$

$$\bar{H}_\varphi = \frac{p \sin \theta}{r^2} i k e^{ikr}$$

接近振盪源附近，電磁場會隨著距離快速衰減，且Poynting vector趨近於零，可以將能量視為是以靜態方式存於近場距離下。

若再進一步將電場對距離取微分，對遠場而言 $kr \gg 1$ (i.e. $d \ll \lambda \ll r$)：

$$\left| \frac{dE}{E} \right| = \left| \frac{\sqrt{1+k^2 r^2}}{r} \right| dr \cong k dr$$

$$dr \cong \frac{1}{k} \left| \frac{dE}{E} \right| = \frac{\lambda}{2\pi} \left| \frac{dE}{E} \right| = \lambda \cdot \text{contrast}$$

由此可知在遠場區域的空間解析度主要是與量測的波長與對比度有關。

但是在近場下 $kr \ll 1$ (i.e. $0 \ll r \ll \lambda$)：

$$\left| \frac{dE}{E} \right| = \frac{3}{r} dr \Rightarrow dr = \frac{r}{3} \left| \frac{dE}{E} \right|$$

因為在近場的範圍內， $r \geq d$ ，故

$$dr \geq \frac{d}{3} \left| \frac{dE}{E} \right| = d \cdot \text{contrast}$$

所以在近場範圍，空間解析度主要與對比度及電偶極有關，而其最小值為電偶極輻射源的尺寸，所以理論上，近場光學可獲得的分子尺寸空間解析度，不過因為實際上實驗所得之近場光學影像是光學孔穴與

樣品光學作用的捲積(Convolution)後的結果，因此空間解析度的極限與光學孔穴大小相關。

1983年，Massey^[17] 探討在一維的情況下，入射光經過一個方孔後所獲得的光場強度及傅立葉頻譜。由於在遠離方孔下，只有空間低頻訊號能傳遞，而高頻訊號會沿著表面傳遞而很快的消逝，欲得此高頻訊號，其接收訊號的距離要在高頻訊號未消逝的距離之內，所以要非常靠近方孔，並在一維平面下進行掃描，如此可獲得高解析影像。而後J. M. Vigoureux等人^[18]，用一個模型解釋近場光學成像原理，如下圖所示：

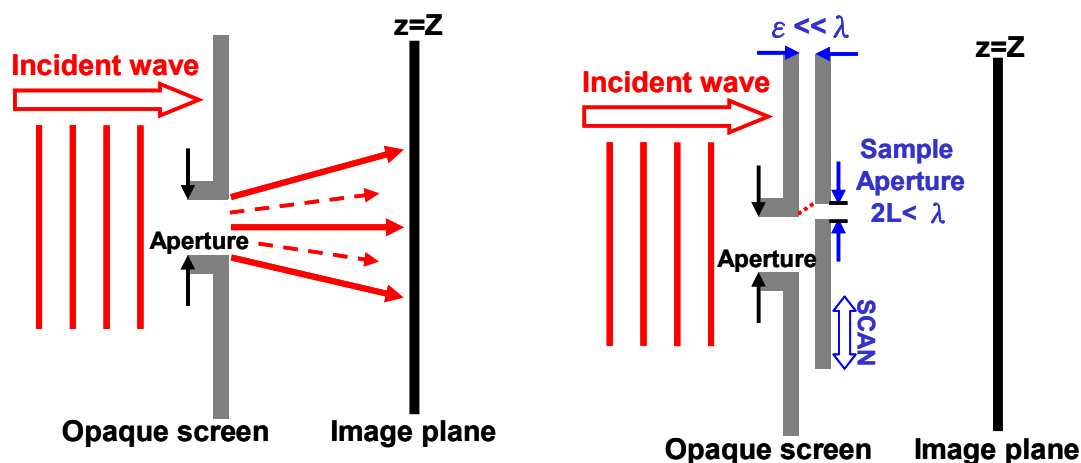


圖1.6 (a)遠場顯微與(b)近場顯微示意圖。

在遠場的情況下，由於孔穴(Aperture)為次波長(Subwavelength)尺度，在成像平面上，所獲得的繞射訊號包含空間高頻的消散場(Evanescient wave)，而空間高頻訊號以指數的函數衰減，以致於在遠場距離下無法偵測到此訊號。若是在近場模型，如圖1-6 (b)，將一個次波長的孔穴，在貼近透光孔穴下($\epsilon \ll \lambda$)，得以讓原先的消散波轉換成傳遞波，在遠場由偵測器接收到，而獲得較佳空間解析度。成

像平面所接受到的訊號便是孔穴的資訊與小孔穴做捲積後的圖形。除此之外，傳遞到遠場的空間高頻訊號，也取決於小孔穴的大小，若孔穴越小，則提高空間截止頻率下，可通過更多高頻的訊號，以獲得更高解析度。

我們現在可對近場顯微術做個概略性描述：如下圖所示，當遠方有一個入射光源，會使得樣品表面產生空間低頻訊號的傳遞波 (Propagated wave) 與高頻訊號的消散波 (Evanescent wave)。若我們利用一個奈米顆粒靠近樣品，並對樣品表面的消散場做一擾動^[19]，則能使表面的消散波轉換成傳遞波而在遠場被接收，進而獲得樣品表面的資訊。而光纖探針則是扮演此一接收器 (Aperture type) 或干擾器 (Scatter type) 的角色。

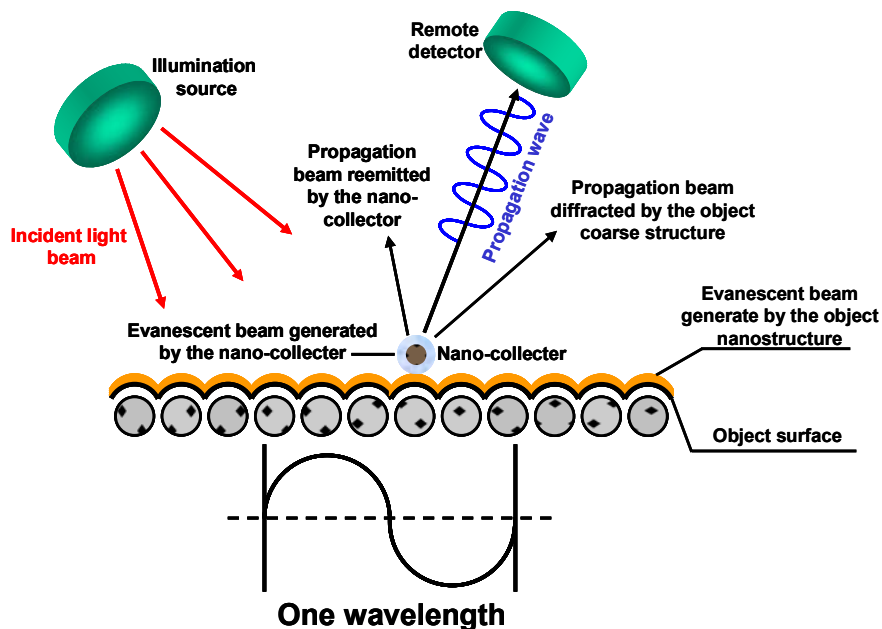


圖1.7 近場光學顯微術示意圖^[19]。

1-4 近場光學顯微術

1-4-1 近場光學顯微術崛起

前面曾經提過，若要獲得較佳的光學解析度，需要透過極小孔穴，並貼近樣品表面做掃描，然而貼近樣品表面有破壞樣品的風險。直到1982年掃描穿隧顯微術(Scanning tunneling Microscope, STM)的問世，立刻有人想到以STM解決此問題。在1982年到1988年之間，瑞士IBM研究中心D. W. Phol^[19]等人和美國康乃爾大學A. Lewis^[20]等人及德國MPI研究中心Fishe等人，利用STM的回饋控制機制，並且利用微細玻璃管(Micropipette)熔拉製作成錐形的探針，再鍍一層金屬膜(40奈米)形成奈米尺度的光學孔穴探針，這即是近場光學顯微儀初步成功的雛形。

後來1989年美國Oak Ridge國家實驗室研究員R. C. Reddick^[21]等人利用全反射性質之衰減場(evanescent field)強度具有指數(exponential)衰減的特性，架設了具有光學回饋控制探針高度光學顯微術，並且首次使用腐蝕光纖的方式製作近場光學感測之探針，稱之為光子掃描穿隧顯微儀(Photon Scanning Tunneling Microscope—PSTM)。它可成功且穩定的做近場光學量測，其空間解析度達50nm至20nm，但因為其利用光學全反射的消散場強度做光源，故樣品之光學條件頗受限制。

隨著1986年原子力顯微術問世之後，1992年美國的AT&T實驗室的Eric Betzig^[22]和Rochester Institute of Technology大學的Mehdi Vaez-Iravani^[23]分別提出利用剪力式顯微術(Shear-force

Microscope) 的技術作為近場光學顯微術之光學探針的高度回饋控制，此技術被證實可獲得極穩定和重覆性高的表面形貌與近場光學影像，並且兩者可同時獨立的取得，能有效的對照與研究參考，使得此後近場光學的進展受到廣泛的關注與重視。

1-4-2 近場光學顯微術工作模式

目前近場光學顯微術常用的工作模式大致上分成穿透式與反射式兩大類^[24]，若再以光纖探針的工作角色區分則有收光模式及送光模式，可以依樣品的特性或量測需求來選擇適當工作模式。

- (a) 穿透式光纖送光模式：以光纖探針的光學孔穴作為近場之點光源，光穿透樣品至另一方之偵測器而被接收的模式。
- (b) 穿透式光纖收光模式：光源由物鏡聚焦穿透樣品後，經由光纖探針在近場的距離收訊號光的模式。
- (c) 斜向入射探針收光模式：斜向光源入射樣品上，由光纖探針在近場距離收集反射的散射光(scattering light)。
- (d) 垂直反射模式：量測光源在光纖中傳遞，經由光纖尖端當成點光源送光，在近場的距離下，由同一探針孔穴收集反射光，同時藉由分光鏡防止入射光源進入光偵測器。
- (e) 探針送光反射式收光模式：由光纖探針之光學孔穴送出，照在樣品表面，產生反射光，再由側向的偵測器接收散射光訊號。

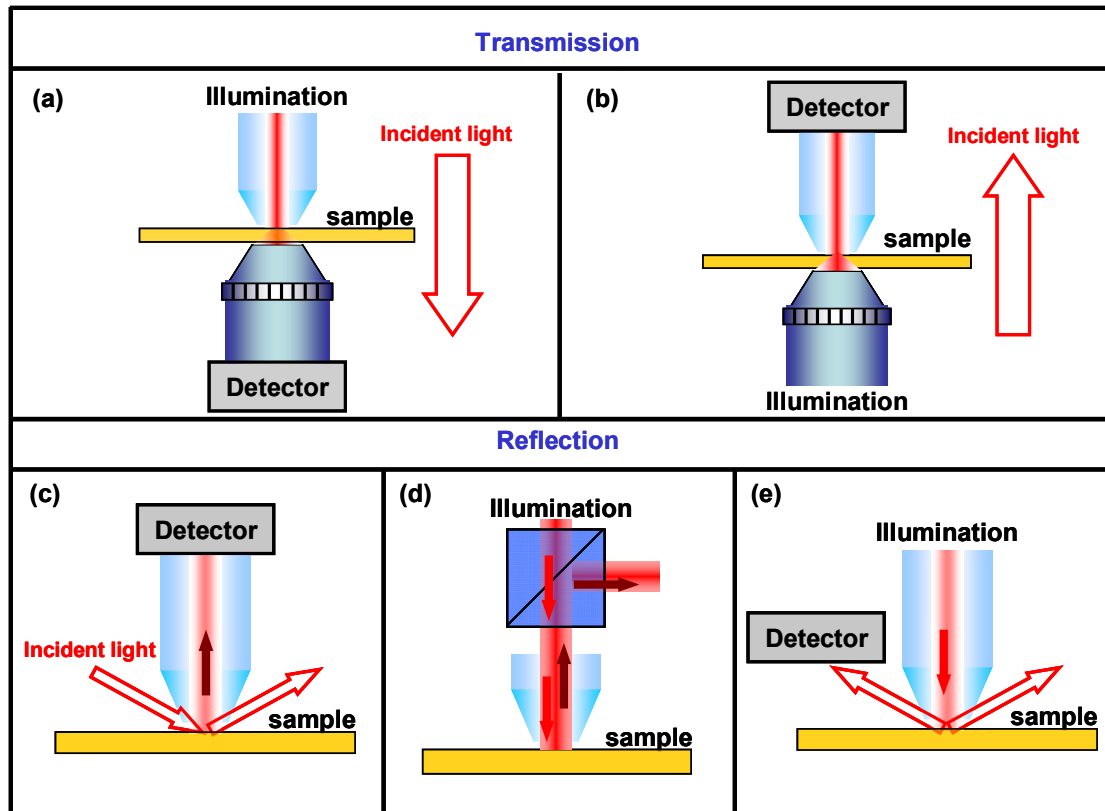


圖1.8 近場光學顯微儀穿透與反射的各種工作模式^[24]。

以上幾種是常用的近場工作模式，我們可以依照樣品的特性選擇適合的模式，若樣品透光度較佳，則可利用穿透模式，若反射率較高，則選擇反射模式。

除了上述常用的工作模式外，也有其他的模式的近場光學顯微儀。例如斜向照明樣品後，藉由一根鎢針(Tungsten)在近場的距離下，針尖形成一個干擾器，將高空間解析度的光訊號，由消散波轉變成傳遞波傳遞出來訊號光，再以一般光學顯微鏡配合高倍率物鏡將光訊號收集後，再使用鎖相放大器濾掉背景光源後，獲得近場光學影像，此方式稱為無孔穴近場光學顯微術(Apertureless Near-field Scanning Optical Microscopy)^[25]。或利用原子力顯微鏡當中的探針製作出微小光學孔穴，直接利用原子力顯微鏡的工作平台進行近場光學實驗。以及多種新式的近場光學顯微術也一一被開發出來。

近場光學顯微術具有高空間解析度且不受繞射極限之限制，理論之極限約在分子大小的尺寸，而實驗上的解析度則取決於光纖探針光學孔穴的大小。此外，近場光學顯微術屬於非破壞性檢測，不會像 SEM 在高倍率時產生高能量電子束對樣品的破壞，並且樣品不必鍍上導電膜，更不必在高真空下進行，同時也具有其他光學訊息的優點包括可利用光波的偏振性 (polarization)、相位 (phase)、波場及螢光性等來作為光學顯微影像的對比(contrast)。近場光學顯微術還可對樣品做反射、穿透及各種光譜學訊息的分析的量測，尤其是所獲得之訊息是區域性 (localized) 的光學訊息，理論上可提供樣品表面小至分子尺寸影像光譜 (image spectroscopy) 訊息。

1-5 實驗動機

可見光波長的範圍為 400 奈米~700 奈米左右，在遠場觀測物體時，光波會產生干涉與繞射的現象，故其解析度只能到達 $1/2$ 量測波長的空間解析度。小於 $1/2$ 量測波長($\lambda/2$)的距離時，就會造成解析度不佳，因而不能分辨圖像。如圖 1.9 所示，樣品為市售 DVD+RW 商業片，經由動態測試儀(DDU-1000)在相變化記錄層(GST)寫上記錄

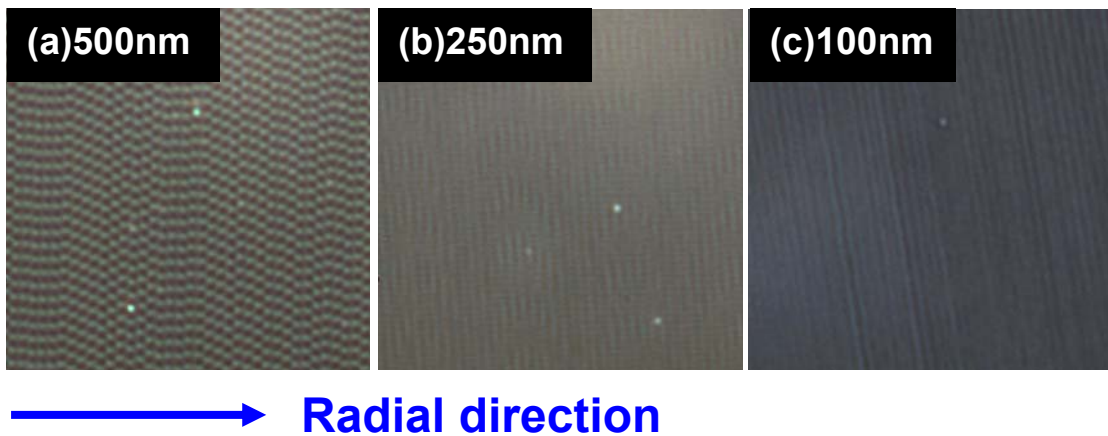


圖 1.9 使用光學顯微鏡(Leica-DMR microscope) 觀察記錄點 500 / 350 / 250 奈米。

點。儀器所使用的雷射光源為 657 奈米，寫入功率是 12mW，週期 2T2T，在相變化記錄層上寫下不同大小的記錄點(500 / 250 / 100 奈米)。將樣品放在光學顯微鏡(Leica-DMR microscope)下，做光學檢測，可以得到如圖 1.9(a)記錄點 500 奈米時，可以清楚的分辨每一顆記錄點；但是在圖 1.9(b)記錄點 250 奈米時，隱約可以看到模糊的記錄點，相互重疊而產生的影像；圖 1.9(c)的光學影像中，已經完全分辨不出記錄點，其因光的波動性質，所產生的繞射現象，以造成解析度不好，所以記錄點看起來為一條直線。

這樣的結果與當有兩個點光源相互靠近時的情況^[26]類似，如圖 1.10 所示。當一個點光源經由透鏡聚焦在像平面上，由於光具有波

動的性質，所以可以在像平面觀察到繞射光斑(Airy disk)。圖 1.10 (a) 當兩個點光源距離夠遠時，經過透鏡聚焦後，在聚焦處的像平面上，可以清楚的觀察到兩個繞射光斑。圖 1.10(b)，將兩個點光源相互靠近，經由透鏡聚焦後，相互靠近至在像平面上所形成兩個繞射光斑其圖形可解析的最短距離，此距離既稱為繞射極限。當兩個點光源更靠近，如圖 1.10 (c)，在小於恰可解析的距離後，經過透鏡後，繞射光斑疊加的結果，為一個強度變強的繞射光斑，不可以分辨出此光斑是由兩個點光源疊加而成還是一個較強的點光源所形成。所以利用近場光學顯微儀來量測繞射極限以下的近場光學訊號。

在本論文實驗中，我們使用近場光學顯微術來量測繞射極限以下之奈米記錄點，得到高空間解析度的光學影像。

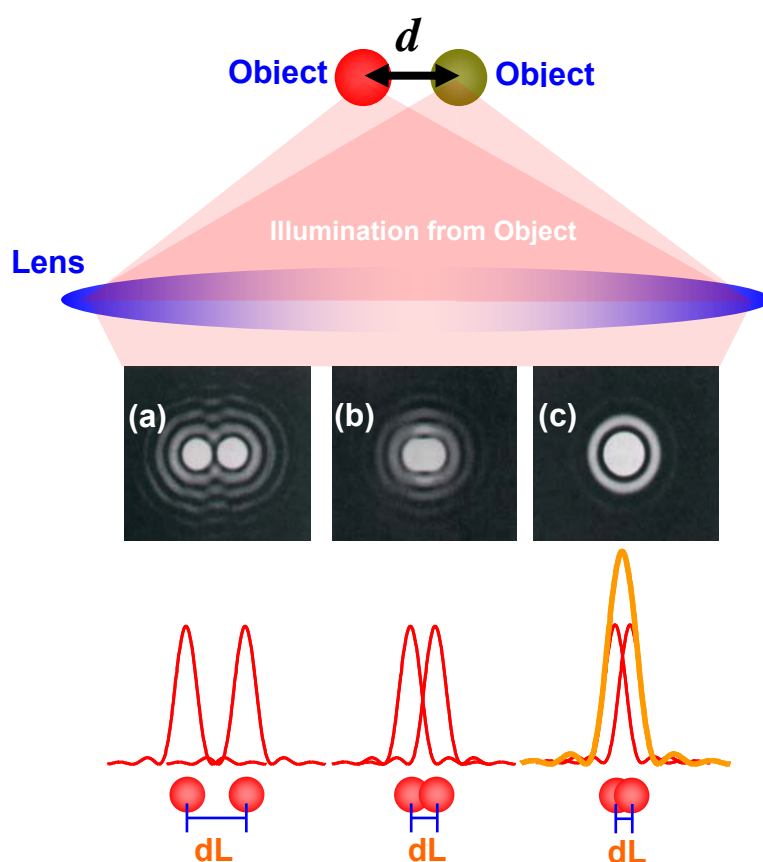


圖 1.10 遠場兩個點光源經過透鏡聚焦示意圖^[26]。