

# 儀器總覽 Introduction to Instrumentation

## 光學量測儀器 Optical Measuring Instrument

# 序言

---

工業革命以來，儀器技術伴隨科技發展、學術研究及產業需求而蓬勃發展，為人類生活帶來重大變革；近年來政府開始積極推動儀器產業發展，列為重點產業及重要關鍵技術之一，每兩年專案規劃儀器產業技術發展策略，以期帶動本土儀器產業技術發展。本中心進行精密儀器研究發展與技術服務廿餘年，深感國內儀器資訊之重要，陸續編輯出版『科儀新知』、『科儀叢書』等專業刊物及建立『全國科學儀器網路查詢系統』供各界使用。近年來科技發展一日千里，新穎設備不斷問世，系統愈形繁雜，新名詞、新術語層出不窮，本中心乃編纂兼顧廣度與普及性的儀器百科全書，有系統且廣泛地介紹各種科學儀器，『儀器總覽』便是此一構思下之產物，透由國內專家、學者參與，藉深入淺出的解說一方面為廣大青年學子與社會人士解讀各種科學儀器，另一方面亦作為相關技術人員補充專業領域之儀器知識的參考工具。

鑑於儀器係結合光、機、電、真空、控制等物理、化學及生命技術之整合系統，種類繁多，各國分類標準及涵蓋範圍亦隨該國產業現況而異，而我國在工業生產統計分類上尚無精密儀器產業類，「儀器總覽」則依儀器用途概分為八大類組，涵括基本物理量量測儀器、光學量測儀器、化學分析儀器、材料分析儀器、表面分析儀器、電子測試儀器、醫療儀器、環境及安全衛生檢測儀器等，從基本簡易的量測儀器到尖端複雜的分析儀器，盡皆包羅其中。每項儀器的內容儘可能以淺顯易懂的文字表達，避免太過專業的術語與公式，並著重基本原理的說明與實際的應用介紹。

本總覽自 84 年 11 月開始規劃，從架構的研擬，儀器項目的分類，到實際內容的撰寫與審核，共邀集了約二百位儀器相關領域的學者專家共同參與，其中包括大專院校教授、研究機構研究人員、醫學中心的醫生及技術人員等，本總覽承蒙專家學者於百忙之中鼎力協助，方能順利付梓，對所有參與撰稿、審稿及編輯的單位與人員，特致謝忱。本總覽內容如有疏漏之處，冀望各界先進不吝指正，俾供未來修訂增補時之參考。

黃文雄

謹誌

中華民國八十七年九月一日

# 編審委員

---

## 總召集人

黃文雄 國科會精密儀器發展中心主任

## 副總召集人

陳建人 國科會精密儀器發展中心副主任

## 分組召集人

張良知 國科會精密儀器發展中心顧問

## 委員

梁振民 中山科學研究院材料研發中心研究員

陳振文 中山科學研究院材料研發中心研究員

陸懋宏 國立交通大學光電工程系教授

賀方涓 工業技術研究院光電工業研究所研究員

薛新國 工業技術研究院光電工業研究所顧問

(按姓名筆畫序)

# 編輯說明

---

## 一、編輯目的

儀器在科學研究與工業生產上是極為重要的工具，且與日常生活的關係，如食品檢驗、環境偵測、醫療診斷等，亦日趨密切。環視國內現有之儀器書刊，或為龐大深入之專書，或為尖端之技術性論文，欠缺對儀器廣泛而完整的介紹。精密儀器發展中心彙編本「儀器總覽」，即希望由全面性的角度出發，以較為淺易卻不失完整的方式，向讀者介紹各種儀器。

因為內容較為淺易，故適合大專院校學生與從事儀器相關工作人員，甚或一般社會大眾，建立對儀器基本的認識與瞭解。因為涵蓋了各種領域的儀器，故也適合對某類儀器相當熟悉之研究人員或儀器廠商參考使用。

## 二、範圍與分類

本總覽收錄之儀器項目以商業化產品為原則。功能過於簡單之工具，因不具備完整的量測或分析功能，不在收錄範圍。所收錄之儀器，依其應用領域，概分為八個類組：

- 基本物理量量測儀器
- 光學量測儀器
- 化學分析儀器
- 材料分析儀器
- 表面分析儀器
- 電子測試儀器
- 醫療儀器
- 環境及安全衛生檢測儀器

各類組依其所含儀器之功能、性質，再細分為不同次項目。

## 三、基本格式

每項儀器原則上以二至四頁之版面介紹，其內容由以下項目所構成：

1. 名稱：儀器的中、英文名稱
2. 關鍵字：列出該儀器內文中重要的關鍵字與關鍵詞，中、英文並列。
3. 基本原理：說明儀器運作的基本原理與概念。
4. 結構示意圖：利用平面結構圖標明儀器的各項元件，或以方塊圖說明儀器各部份的功能。

5. 規格與特徵：說明一般商業化產品的規格及其優、缺點。
6. 應用與用途：說明儀器主要的應用及其操作技巧。
7. 參考文獻：列出相關的書籍及文獻資料，以供讀者更深入探討之參考。

極少部份的儀器，因其特殊性或解說上的需要，未完全遵循上述原則，例如部份醫療儀器，因涉及人體安全，增列儀器使用安全事項。有些儀器則因其較為簡單或較為複雜，篇幅略有增減。這些都不會影響讀者之閱讀。

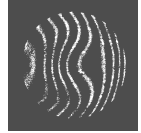
#### 四、出版形式

為便於讀者閱讀與使用，本總覽依八個類組分冊編印，每一冊除有該類組收錄儀器之中、英文目錄外，並將該冊全部關鍵字，分別依中文及英文排序方式整理為索引，以利讀者查閱。全書並編印總目錄一冊，將八個類組的儀器目錄及索引彙整，除方便查閱，亦有助於不同類組間的參照。

在「基本物理量量測儀器」類組中，因收錄之儀器多與度量衡的標準檢測有關，特附錄經濟部公告之「度量衡單位及其所用之倍數、分數之名稱、定義及代號」，供讀者參考。

部份類組所涵蓋的儀器領域較廣，儀器種類與項目非常多，部份儀器項目於本輯中未能收錄，加上新產品陸續推出，本中心將持續增補出版。

# 目錄



## 光譜與光度量測儀器

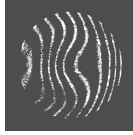
- 1 黑體輻射儀  
Black-Body Radiator
- 5 單光儀  
Monochromator
- 9 光度計  
Photometer
- 11 色度計  
Colorimeter
- 15 波長計  
Wavemeter
- 17 光學多頻道分析儀  
Optical Multichannel Analyzer
- 19 雷射功率／能量計  
Laser Power/Energy Meter
- 22 雷射光束能量分佈儀  
Laser Beam Diagnostics
- 23 光密度計  
Optical Densitometer

## 光干涉量測儀器

- 25 菲佐干涉儀  
Fizeau Interferometer
- 28 邁克爾遜干涉儀  
Michelson Interferometer
- 32 馬赫－陳德干涉儀  
Mach-Zehnder Interferometer
- 34 橫向剪切干涉儀  
Lateral Shear Interferometer

## 光學特性量測儀器

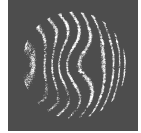
- 37 光學式粗度量測儀  
Optical Profiler
- 40 表面形狀測量儀  
Surface Profile Measuring System



- 
- 43 橢圓偏光儀  
Ellipsometer
  - 45 角度可調式橢圓光譜偏光儀  
Variable Angle of Incidence Spectroscopic Ellipsometer
  - 49 球徑計  
Spherometer
  - 51 雷射測徑儀  
Laser Gauge
  - 53 焦距儀  
Focal Length Meter
  - 57 透鏡定心儀  
Lens Centration Equipment
  - 60 視度儀  
Dioptermeter
  - 62 準直儀  
Collimator
  - 65 自動視準儀  
Autocollimator
  - 68 鏡頭投影解像儀  
Resolving Power Test Projector

#### 光學顯微鏡

- 70 立體顯微鏡  
Stereomicroscope
- 73 工具顯微鏡  
Toolmaker Microscope
- 76 干涉式顯微鏡  
Interference Microscope
- 79 共焦雷射掃描顯微鏡  
Confocal Laser Scan Microscope
- 84 掃描式近場光學顯微儀  
Scanning Near-Field Optical Microscope



## 其他

- 87 雷射測距儀  
Laser Range Finder
  - 90 雷射目標指示儀  
Laser Target Designator
  - 92 雷射掃描解碼器  
Laser Scanner for Barcode Reader
  - 94 熱像儀  
Thermal Imager (TI)
- 
- 97 中文關鍵字索引
  - 99 英文關鍵字索引

# 黑體輻射儀

## Black-Body Radiator

**關鍵字：**黑體輻射、空腔型黑體、平板面型黑體、熱像光電參數量測系統

**Keywords：**black-body radiation, cavity black-body, extended-source black-body, thermal imager testing system

### 一、基本原理

能夠完全吸收入射輻射，並且具有最大輻射率的物體叫做絕對黑體。絕對黑體是一個理想的概念，在自然界並不實際存在，但是用人工的方法卻可以製作儘可能接近黑體的輻射源。取一個球形等溫容器，在球形等溫容器上開一個小孔，所有經過小孔射入容器內的光線經過多次反射後才能由小孔射出。設每次由容器的內表面上反射的光能是入射光的  $k^n$  倍。當第  $n$  次反射時，反射部分為入射部分的  $k$  倍。因為  $k$  永遠小於 1，所以當  $n$  足夠大時， $k^n$  就很小，只有極小部分的光才能經過小孔射出去，因此小孔的吸收率幾乎等於 1。小孔的輻射近似地可以看成為一絕對黑體的輻射。球形等溫容器在吸收入射光後，為了維持其溫度不變，根據能量守恆定律，它必然要重新從小孔輻射出能量，這種輻射的波長分佈是處於溫度  $T$  的普朗克輻射，與入射輻射可能是不一樣的（因為入射輻射不一定是溫度為  $T$  的物體發出的）。與其它物體相比，絕對黑體的輻射本領最高（因為它的吸收本領最高），並遵守朗伯餘弦定律。事實上要製作絕對黑體是不可能的，因為要把一個等溫密封腔內的輻射（腔中輻射是絕對黑體輻射）引出，就得開一個小孔，一旦開了孔，就有一部分入射的輻射從小孔射出，入射輻射不可能全部被吸收，也就不成為絕對黑體了。另一方面，要使容器嚴格保持等溫狀態也不可能，只能控制在一定精度之內。但是，只要滿足腔壁近似等溫，開孔比腔體小得多這兩個條件，就有可能製作一個絕對黑體的模擬器，供紅外儀器作輻射校正（定標）及其它熱源做比較的理想輻射計用。這種模擬器，稱為人造黑體。由於人造黑體十分接近於絕對黑體，為了方便起見，我們就不再嚴格的區分它們，統稱黑體。

黑體的有效比輻射率與腔體形狀、開孔大小、

腔壁的比輻射率  $\epsilon$  及等溫精度有關。假定腔壁是理想的漫反射體，其所給出的黑體有效比輻射率的表示式如下，

$$\epsilon_0 = \epsilon'_0(1 + k)$$

$$\epsilon'_0 = \frac{\epsilon}{\epsilon \left[ 1 - \left( \frac{s_1}{s} \right) \right] + \left( \frac{s_1}{s} \right)}$$

$$k = (1 - \epsilon) \left( \frac{s_1}{s} - \frac{s_1}{s_0} \right)$$

此外  $\epsilon_0$  是黑體的有效比輻射率； $\epsilon$  是腔壁的比輻射率； $s_1$  是開孔的面積。 $s$  是包括開孔面積在內的實際腔體的總內表面積  $\text{cm}^2$ ， $s_0$  是在垂直於開孔平面方向、直徑等於開孔平面算起到黑體最深點的等效體表面。顯然，對球形腔體， $s = s_0$ ， $k = 0$ ；對其它形狀的腔體， $k$  可正可負，但接近於零。腔體的形狀一般有球形、圓柱形、圓錐形三種。黑體輻射儀輻射能量是電磁波，因此遵守電磁波的基本理論，詳述如下：

(1) 吸收 (absorption)、反射 (reflection)、穿透 (transmission) 三者之關係

當一輻射能撞擊物質表面時，會發生部分被該物吸收、部分反射、部分穿透，若假設抵達的能量為一個單位，由能量守恆定律可得三者之關係為：

$$a + r + t = 1$$

其中  $a$ 、 $r$ 、 $t$  各代表該物體對此波長電磁波的吸收、反射、穿透百分率。

(2) Kirchhoff's 定理

在溫度平衡下，物體對同一波長的電磁波而言，其吸收率與放射率相等，亦

$$a_\lambda = e_\lambda$$

因為物質表面對電磁波的吸收率不可能大於一，因此定義理想黑體是最佳的吸收體（也是同溫度下最強的放射體），其吸收率等於 1，而且放射頻譜僅與溫度有關。

### (3) Stefan-Boltzman 定律

理想黑體是全部輻射能僅與其絕對溫度四次方成正比，亦可表示為

$$R = \sigma T^4$$

其中  $\sigma$  稱為 Stefan-Boltzman 常數，約等於  $5.67 \times 10^{-12} \text{ watts/cm}^2 \cdot \text{deg}^4$ 。

又由於真實物體表面並非完全吸收體，而且對許多物質（例如：灰體）而言，它們的放射率與波長無關，因此輻射出來的全部能量修正為

$$R = e \sigma T^4$$

該物體表面之  $e$  值與物質本身特性、表面光滑程度有關。

### (4) Wien 位移定律

黑體的溫度愈高，輻射強度曲線峯值愈往短波長移，而且兩者之間的關係可以下式表示，亦即

$$\lambda_m T = 2893$$

其中  $\lambda_m$ ：輻射峯值所對應的波長大小 ( $\nu_m$ )

$T$ ：絕對溫度 (K)

## 二、黑體輻射儀的種類

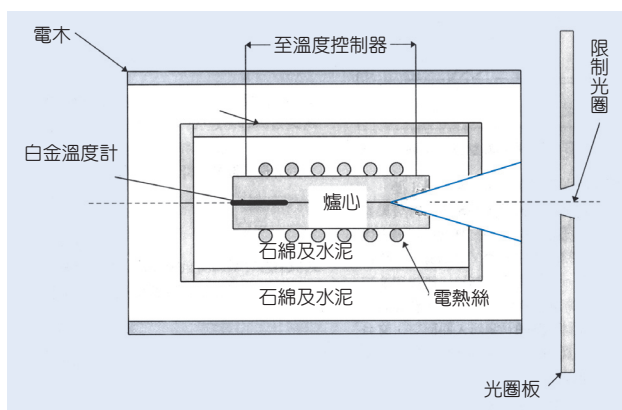


圖 1. 空腔型黑體爐構造圖。

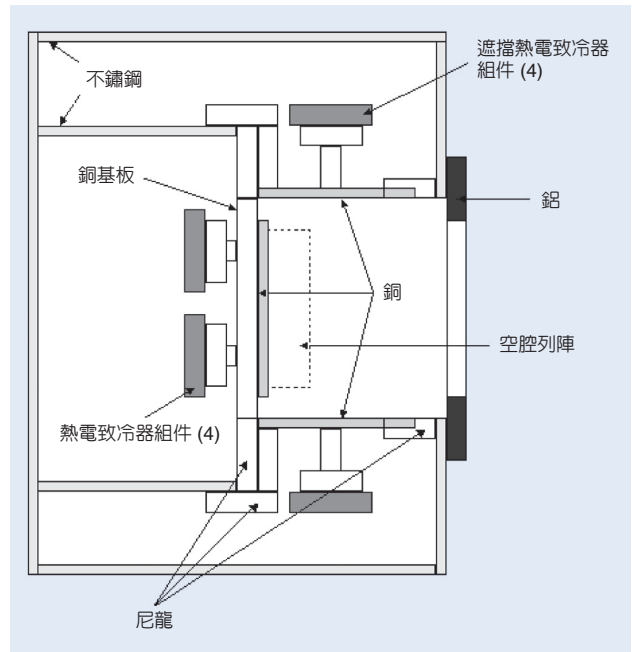


圖 2. 平面型黑體爐構造圖(11)。

圖 1 是一個人造中溫黑體的結構圖，腔心用不鏽鋼製成，不鏽鋼氧化後氧化層很穩定，並且腔壁的比輻射率較高， $\epsilon > 0.8$ 。在腔心外面包一層薄的石棉布或雲母片，然後繞上加熱線圈。靠近開口處可多繞幾圈，以減少溫度梯度。腔體的溫度由腔底附近靠背面插入的鉑溫度計或熱電偶測量（但必須注意，背面插入溫度計的孔不能與腔打通，並且鉑溫度計不能與腔壁接觸），把溫度信號送至溫度自動控制儀，通過控制加熱線圈的電流達到自動控制腔體溫度的目的。加限制光圈的目的是，一是為了減少雜散光干擾，二是為了限制黑體視場，使紅外儀器只能看到黑體腔的中心部分，而中心部分的溫度是比較均勻的。加銅熱屏蔽的目的，既是為了反射外界輻射，也是為了反射腔心熱輻射，使易於保溫。一般空腔型黑體，視場較小，距離較近時，就無法充滿紅外系統的通光孔徑。因此，它只能在實驗室作絕對校正用（可以放得遠一點），而不能附加在紅外儀器上，在紅外儀器工作時，可作相對校正用。附在儀器上的黑體大多是平面型黑體，雖然有效比輻射率不如腔型黑體高，但它的面積可以做得大，以掃描鏡靠近時也能充滿掃描鏡，並可即時做校正，這是一個很大的優點。圖 2 就是一種平面型黑體，它是一種用熱電致冷器 (T. E. cooler) 組件加

熱或致冷的低溫黑體，工作溫度為  $-0^{\circ}\text{C}$  到  $+50^{\circ}\text{C}$ 。

熱電致冷器組件的電流源為一系列寬度調制的電流脈衝。當要求降溫時，加正脈衝，使產生正帕耳 (Peltier) 效應。加負脈衝，使產生負帕耳 (Peltier) 效應。用控制脈寬的方法作溫度控制調節，可以使溫度保持在一定精度範圍內。應當注意的是，加熱的效率比致冷的效率高得多，因此相同的熱增益，加熱電流應當小一些，不加限制的持續加熱容易損壞組件。

圖 2 中的靶包括四個熱電致冷器組件、五對熱電偶和一塊空腔列陣。空腔列陣是由鋁蜂窩做成的，用高比輻射率黑漆塗黑。除了各個蜂窩鄰接的壁是凸出的平面外，每只蜂窩可以看成是一個小的黑體腔，因而整個列陣的有效比輻射率  $\epsilon$  大大提高，此外，有了蜂窩，可以使底板溫度不受外界空氣擾動的影響，易於溫控；也不會像平板那樣直接反射外界的雜散光，影響校正精度。在熱電致冷器組件的基板的正面，安裝五對銅對銅熱電偶，每對與一個熱電致冷器組件相對，另有一對放在中間，與基板相接的是支持空腔列陣的銅板，用滲銀的環氧樹脂將蜂窩黏在上面。四塊塗上黑漆的銅板作為遮擋裝置，它們圍繞空腔列陣，用來限制輻射負荷。每一個遮板用一個熱電致冷器組件來控溫，並埋入一對熱電偶測溫。靶和遮爐裝置各用一台溫度自動控制儀。溫控面積與相鄰部分用尼龍絕熱。靶面大小和隔離紅外掃描鏡的距離要設計得使靶發出的熱輻射剛好充滿掃描鏡，這樣就不會帶來雜散光干擾。熱電致冷器組件在致冷時要在背面加水管冷卻或加散熱片強迫風冷，當然也可以用低溫熱管冷卻。

### 三、儀器規格及特徵

一般黑體爐有兩種結構：空腔體型及平面型，其規格分述如下。

#### 1. 高溫空腔體型黑體爐

空腔直徑：1'

溫度範圍： $50-1000^{\circ}\text{C}$

溫度設定及讀出解析度： $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$

溫度精度： $\pm 2.5^{\circ}\text{C}$

孔徑視角： $11^{\circ}$

最大升溫/降溫時間： $60/240\text{ min}$

輻射率： $0.98\text{ min}$

溫度感測器：Pt/PtRd，10% S type 熱電偶

控制電路：microprocessor-based digital control

#### 2. 低溫平面型黑體爐

平板大小： $4'' \times 4''$

差溫溫度範圍： $-20-70^{\circ}\text{C}$  在  $25^{\circ}\text{C}$  室溫

絕對溫度範圍： $+5-100^{\circ}\text{C}$  在  $25^{\circ}\text{C}$  室溫

溫度設定及讀出解析度： $\pm 0.01^{\circ}\text{C}$

校正精度在  $25^{\circ}\text{C}$  室溫：

$dT < 5^{\circ}\text{C}$ ： $\pm 0.008^{\circ}\text{C}$ ；

$dT < 10^{\circ}\text{C}$ ： $\pm 0.02^{\circ}\text{C}$ ；

$dT > 10^{\circ}\text{C}$ ： $\pm 0.03^{\circ}\text{C}$

溫機時間： $5\text{ 分鐘}$

最大升溫/降溫時間： $5^{\circ}\text{C}/\text{秒}$

輻射率： $0.96 \pm 0.02$  在  $2$  到  $14\ \mu\text{m}$  頻譜

反應時間在  $dT < 10^{\circ}\text{C}$ ：

$0.1^{\circ}\text{C step}$ ：最大  $10\text{ 秒}$

$1^{\circ}\text{C step}$ ：最大  $15\text{ 秒}$

$10^{\circ}\text{C step}$ ：最大  $60\text{ 秒}$

溫度均勻度在  $dT < 5^{\circ}\text{C}$ ： $\pm 0.01^{\circ}\text{C}$  和  $\pm 0.02^{\circ}\text{C}$

當輻射器個別以佔  $80\%$  和  $100\%$  面積計算

控制方式：觸摸面板或遙控—IEEE-488

溫度感測器：Pt/PtRd，10% S type 熱電耦

操作溫度： $0^{\circ}\text{C}-50^{\circ}\text{C}$

儲存溫度： $-20^{\circ}\text{C}-70^{\circ}\text{C}$

### 四、應用範例簡述

圖 3 所示為一紅外熱像儀量測用熱像光電參數量測系統，其中含黑體輻射儀。圖中離軸拋物面鏡及平面鏡組合成一準直系統，提供產生無窮遠目標的一光學系統；黑體爐 (黑體輻射儀)、黑體爐散射板及目標板、黑體爐輻射均勻控制器及搖控器共同構成一熱目標產生器，此熱目標產生器提供量測系統所需要各種溫度及各式各樣目標板組合熱目標，目標板有方形 (量測光電反應率)、十字形 (量測視角)、針孔 (量測光量)、單狹縫、四亮暗等開距目

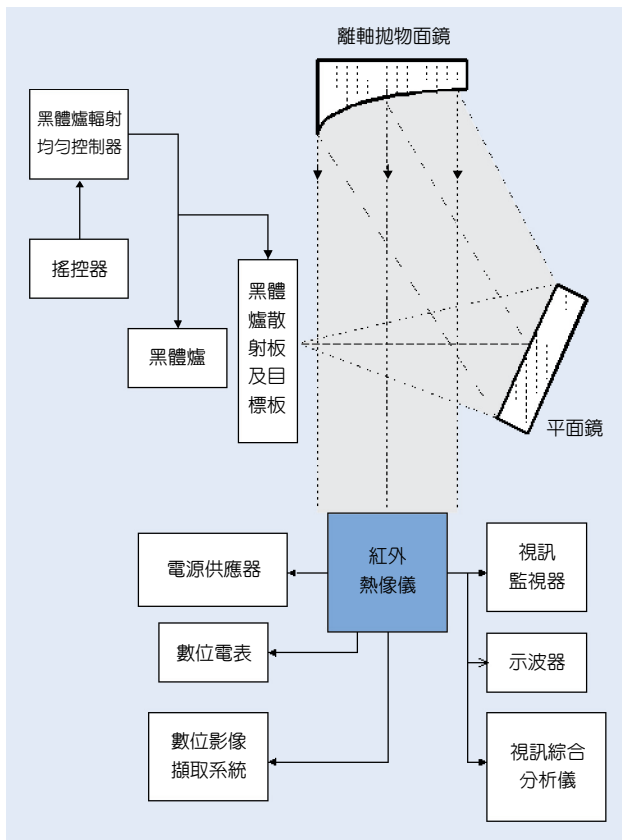


圖 3. 利用黑體輻射儀做紅外熱像儀量測系統。

標板 (狹縫長寬比為七比一，此目標板提供量解析度)、一片含一系列由小至大針孔等各種目標板，熱目標板產生器提供的溫度，其精度、解析度及均勻度的控制皆非常講究；視訊監視器、具視訊觸發

的示波器及視訊綜合分析儀則做為分析紅外熱像儀系統光電參數及視訊訊號之用；數位影像擷取系統則做為分析紅外熱像儀前端接收熱輻射光電轉換感測器光電參數及數位訊號之用。

### 參考文獻

1. W. J. Smith, *Modern Optical Engineering*, New York: McGraw-Hill (1972).
2. R. Kingslake, *Lens Design Fundamentals*, New York: Academic Press (1978).
3. J. M. Lloyd, *Thermal Imaging System*, New York: Plenum Press (1982).
4. F. A. Jenkins and H. E. White, *Fundamentals of Optics*, New York: McGraw-Hill (1957).
5. A. E. Conrady, *Applied Optics and Optical Design, Part I*, New York: Dover (1957).
6. A. Cox, *A system of Optical Design*, New York: Focal Press (1964).
7. D. C. O'Shea, *Elements of Modern Optical Design*, Atlanta: John Wiley & Sons (1985).
8. W. J. Smith, *Modern Lens Design*, New York: McGraw-Hill (1992).
9. R. D. Hudson, *Infrared System Engineering*, New York: John Wiley & Sons (1968).
10. R. W. Boyd, *Radiometry and the Detection of Optical Radiation*, New York: John Wiley & Sons (1983).
11. 張幼文, 紅外光學工程, 上海科學技術出版社 (1981).

作者：陳德請先生為國立中央大學光電博士，現任中山科學研究院材料研發中心副研究員。

# 單光儀

## Monochromator

**關鍵字：**單光儀、分光儀、光柵

**Keywords：**monochromator, spectrometer, grating

### 一、基本原理

單光儀顧名思意就是讓單一波長通過的儀器，但不幸受限於測不準原理、光學元件繞射及色散等問題，使得這單一波長  $\delta$  函數變成有寬度的複雜函數，而這函數和其分光元件及應用研究領域有關，以下先就目前常用分光元件概述如下。

#### 1. 濾光鏡 (filter)

一束光通過帶通濾光鏡，所通過波長為  $\lambda_\theta = \lambda_0 [1 - (n_0/n^*)^2 \sin^2 \theta]^{1/2}$ ，其中  $\theta$  為光束和濾光鏡法線的夾角， $\lambda_0$  為垂直入射時 ( $\theta = 0$ ) 所通過中心波長， $n_0$  為週邊折射係數， $n^*$  為濾光鏡的折射係數。所以當濾光鏡轉一小角度，即可使帶通波長位移。此種分光元件，在光譜影像系統中最常使用。

#### 2. 三稜鏡 (prism)

三稜鏡是最早使用的分光元件，其損耗也是所有分光元件最少者，早期的單光儀即是使用三稜鏡分光，利用光在介質中色散 (dispersion) 效應，其解析度  $R = \frac{dn}{d\lambda} t$ ，其中  $dn$  為折射係數改變量， $d\lambda$  為波長變化量， $t$  為三稜鏡厚度。由於三稜鏡單光儀解析度很差，鮮應用於高解析單光儀，目前大都應用雷射系統調整波長，或為光譜儀系統之前置濾光器。

#### 3. 光柵 (grating)

光柵是單光儀最常用的分光元件。一束光照射在光柵，即有繞射光，其繞射方程式  $\sin\alpha \pm \sin\beta = 10^{-6} nG\lambda$ ，其中  $\alpha$  為入射光相對於光柵法線角度， $\beta$  為繞射光相對於光柵法線的角度， $\lambda$  為繞射光波長， $n$  為繞射光級數， $G$  為光柵條紋密度。而「+」為入射光和繞射光在法線同一邊；而「-」為入射

光和繞射分在法線兩邊；以圖 1 為例，當光柵旋轉  $\theta$ ，得  $\alpha = \gamma/2 - \theta$ ， $\beta = \gamma/2 + \theta$ 。

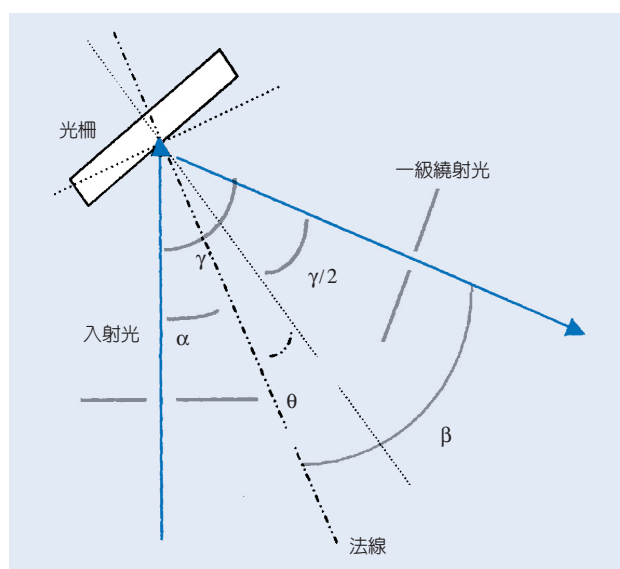


圖 1. 光柵繞射圖。

$$10^{-6} nG\lambda = \sin\alpha - \sin\beta = 2 \sin\left(\frac{\beta - \alpha}{2}\right) \cos\left(\frac{\alpha + \beta}{2}\right)$$

$$= 2 \sin\theta \cos\frac{\gamma}{2}$$

其中  $\cos(\gamma/2)$  為常數，由此式中得知波長 ( $\lambda$ ) 和  $\sin\theta$  呈線性關係。於此藉由 sine 桿推動，可由線性位移計數器推知波長位置。

#### 4. 波長可調聲光濾光元件 (acoustic optical tunable filter, AOTF)

利用高頻超聲波在介質中產生疏密現象，而光束經過這類似光柵條紋的介質產生布拉格 (Bragg) 繞射而分光，當調變超聲波頻率時，配合狹縫，即可調變波長，這是新進聲光波長調變器最大的優點，調變波長迅速，不需任何機械轉動，目前已用

作單光儀內分光元件，製做單一光源帶通濾光系統，搭配 CCD 可應用光譜影像顯微儀和望遠鏡系統。

## 5. 波長可調液晶濾光件 (liquid crystal tunable filter, LCTF)

光束通過偏振片成為偏振光，再到雙色性 (birefringent) 材料，以  $45^\circ$  夾角分成兩束光 e-ray 和 o-ray，由於這兩束光行進過程中相對上互有延遲，產生光程差  $\Gamma(\lambda) = 2\pi\Delta n d/\lambda$ ， $d$  是雙光性材料厚度， $\Delta n$  為雙色性係數，由此得知光程差和波長有關，所以再將此雙色光放入液晶波片，加上電壓以改變其延遲時間後，再進入另一偏振片，繼續通過另一雙光性材料，如此多次通過個個階段，只有某一波長才能同相而存在，其餘波長盡皆濾除，改變電壓，即可調變延遲，就可調變波長。這是一個很新的分光元件，和 AOTF 一樣為非移動性的分光技術，同樣也是應用於光譜影像系統和單光儀。不過 LCTF 和 AOTF 在價格上還是很貴，故未如光柵單光儀普遍。

雖然有上述多種分光元件，產生各式各樣單光儀，本文仍側重於光柵單光儀的說明。光柵單光儀除了分光元件外，尚有週邊光學元件，如狹縫和聚焦反射鏡等，藉以提高解析度和去除不必要雜訊。

## 二、結構示意圖

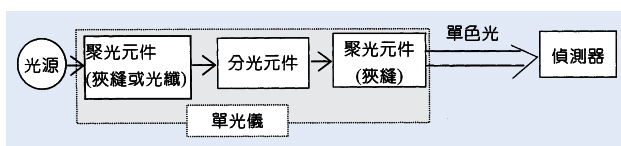


圖 2. 單光儀結構示意圖。

單光儀簡單結構示意圖如圖 2 所示，光源或待測光經狹縫 (或光纖) 後，再由聚焦鏡變成平行光到分光元件 (如光柵、三稜鏡、AOTF 等) 分光後，再經聚焦鏡聚光於狹縫，最後到偵測器，即可量測單色光強度。光柵單光儀最普遍之光學系統有兩種 Fastie-Ebert 和 Czemy-Turner 兩種型式，其餘尚有 Seya-Namioka、Rowland 及 Littrow 等裝置如圖 3 所示。圖 3(a) 中 Fastie-Ebert 僅使用一個反射鏡和

光柵，非常輕便，然其反射鏡大，可收光口徑也大，所以其  $f$  值約  $f/3$  到  $f/5$ ，傳統大氣輝光光譜儀，就是使用此一模式，但由於解析度不高而較少用。而圖 3(b) 的 Czemy-Turner 是目前最普遍的單光儀，不同於 Ebert 模式，其反射鏡較小，所以收光口徑小， $f$  值約  $f/6$  到  $f/10$ ，解析度很高且迷光 (stray light) 較少，缺點就是不易調校而且昂貴。其次是圖 3(c) Seya-Namioka 裝置是使用曲面光柵，其曲面半徑剛好為其結構直徑，此光柵具收光聚焦且分光的功能，解析度很好， $f$  值彈性很大。由於是使用曲面光柵，最好使用全像光柵，以減小迷光和鬼影。另外圖 3(d) 中 Rowland 裝置也是目前最熱門設計模式，也是使用單一曲面光柵及引用最新光偵測技術如 CCD 和陣列受光二極體，由於早期曲面光柵仍是使用尺刻 (ruled) 使系統產生一些迷光和鬼影，所幸近來使用全像光柵和離子蝕刻技術，使得這些問題獲得解決。由於光調校組件少且使用陣列式受光感測器，光通量也大，量測很快且輕便，適合在衛星系統應用，但其收光口徑大， $f$  值就小，解析度並不高。最後圖 3(e) Littrow 裝置是為了改善 Ebert 裝置，使光柵尺寸的可塑性變大，然而光輸入與分光輸出是同方向，所以一定要使光輸入在狹縫上方，而輸出在狹縫下端，因此光柵採用垂直方向旋轉，此種方式在使用上非常不方便，很少使用。

額外要說明是雙單光儀，如圖 3(f) 及 3(g) 所示，採用二個分光元件，最普遍是三稜鏡和光柵，所以可稱雙光柵單光儀。當二個光柵在同一方向旋轉，則為增加型 (additive)，它除了降低鬼影和迷光外，也相對提高解析度；另外一種是二個光柵以反方向旋轉分光，這稱為相減型，解析度不高，取決於中間狹縫，但這有一個優點，就是可當成可調變帶通濾光器，不但中心波長可調，譜帶寬度亦可變，此方面應用常見於高解析光譜儀的前置濾光系統，濾除強光和不需要的光線，可避免迷光和提高光譜鑑別率。而三稜鏡在這種架構原理，也是一樣，其應用常見於雷射共振腔。

為了讓單光儀中的光柵旋轉角度和儀表外的計數器呈線性關係，光柵推動方法大致可分為 sine 桿 (bar) 和 cosecant 桿兩種裝置，這兩種方法可使

在掃描過程中，讓橫桿的位置和波長 (wavelength,  $\lambda$ ) 或波數 (wavenumber,  $\sigma$ ) 呈線性關係，亦即  $\lambda = K \sin \alpha$  或  $\sigma = K \csc \alpha$ ， $\alpha$  為光柵旋轉角度， $K$  為常數。由於最近微處理機技術引進，有些單光儀已直接使用步進馬達配合蝸桿蝸輪直接驅動馬達，唯此種方法一定要使用微處理機才能算出光柵掃描譜線位置，一般手動單光儀波長調變都還是使用 sine 桿來推動光柵，藉由其線性關係，可由轉動計數器得知波長位置。

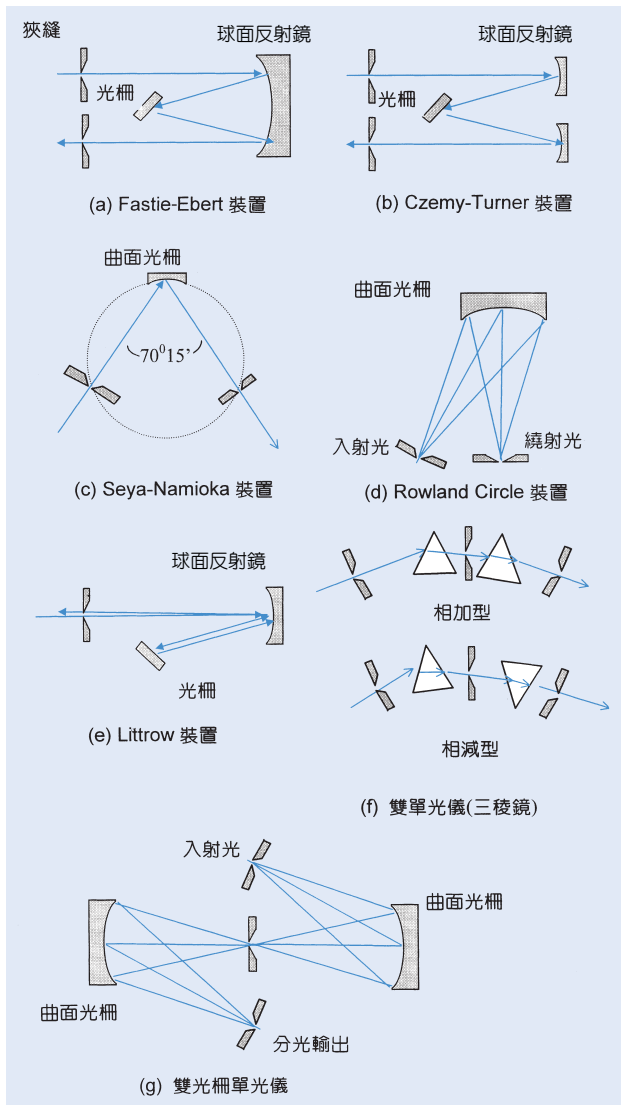


圖 3. 各式單光儀光學系統圖。

### 三、儀器規格與特徵

單光儀內有些光學元件，這些元件包涵很多參數，這些參數對一個單光儀品質有很大決定因數。

#### 1. 解析力 (resolving power)

$$R = \frac{\lambda}{d\lambda} = nN$$

其中  $d\lambda$  是兩條相同強度相近譜線的譜線差， $\lambda$  為其中間譜線， $n$  是繞射光級數， $N$  是光柵總條紋數， $R$  值表示可將此兩條最相近相同強度的譜線解析出來，這是個理論值，和實驗解析度不一樣。

#### 2. 色散 (dispersion)

$$\frac{d\theta}{d\lambda} = \frac{Gn}{10^6 \cos \theta}$$

$$D^{-1} = \frac{d\lambda}{dx} = \frac{d\lambda}{Fd\theta} = \frac{10^6 \cos \theta}{GnF}$$

$d\theta/d\lambda$  為角色散 (angular dispersion)，其單位為  $\text{rad}/\text{nm}$ ， $D^{-1}$  為線性色散 (linear dispersion)，其單位為  $\text{nm}/\text{mm}$ ，其中  $\theta$  為繞射光角度， $n$  為級數， $G$  為單位條紋密度 ( $\text{g}/\text{mm}$ )， $F$  為輸出端聚焦鏡焦距。此參數可估算帶通 (bandpass)，通常此參數和光柵的條紋密度呈反比，條紋密度高，線性色散變小，解析度就變高。另外偵測器如為多頻道信號接受器，如 CCD 和 PDA 等，則由其感光陣列長度，可估算多頻道接受器所接收的光譜寬度。

#### 3. 解析度 (resolution)

單光儀所能解析最小的譜線差，解析度 ( $R$ ) 和狹縫寬度 ( $w$ ) 有關。

$$R = \frac{\lambda}{d\lambda} = w \left( \frac{d\theta}{d\lambda} \right) = \frac{Dw}{F}$$

#### 4. 光通量 (throughput)

光通量指單色光進入單光儀，經過狹縫、光學鏡片、光柵後，光量會有所損耗，光量通過百分比為光通量。

#### 5. $f$ 值 ( $f/\text{number}$ )

單光儀內的聚焦鏡焦距除以光柵或聚焦鏡寬度為  $f$  值， $f$  值小表示聚收光角度大，雖然可以有效聚光，但是解析度差。而  $f$  值大，收光能力差，但解析度好。

## 6. 焦距 (focal length)

為聚焦鏡到狹縫的距離，焦距愈長，表示單光儀色散大，解析度較好，但光信號會變小。

## 7. 帶通 (bandpass)

帶通為線性色散乘以狹縫寬度，這會影響量測譜線的半高寬。

## 8. 級數 (order number)

$n\lambda = \text{常數}$ ， $n$  為級數，繞射光級數愈高解析度愈好，然而迷光現象也愈明顯，通常在選取高級數繞射光可避免高級數短波長的干擾。

## 9. 迷光 (stray light)

為光學元件本身的散射光或雜亂光，這和其鍍膜、光學研磨品質及光學調校有關。色散元件的迷光一定比反射聚焦光學元件的大。另外也和激發光源有關，強光如雷射光造成迷光往往會遮掉主要信號，使得鑑別率變差。所以在拉曼和螢光光譜儀很強調迷光的去除比值 (stray light rejection ratio)，為了增加去除率，以往都額外加上三稜鏡或光柵，變成雙單光儀 (double monochromator)，目前大都用截帶濾光鏡 (notch filter) 或長通濾光鏡 (edged long-pass filter)。另外減少狹縫高度和寬度也有助於改善。

## 10. 光柵 (grating)

光柵的選取，攸關單光儀的品質，一般光柵約有三種，尺刻 (ruled) 光柵、全像 (holographic) 光柵

與離子蝕刻 (ion-etched) 全像光柵，最好的光柵是離子蝕刻。一般而言，尺刻光柵有較好繞射光強度，較適用於近紅外和紅外線，然其在高級數和高條紋數使用，須特別小心，因其鬼影及迷光強度和級數與條紋數平方成正比，且因尺刻光柵有較強迷光，在拉曼和螢光光譜檢測，很少使用此光柵。而當光柵是曲面時，僅能選取全像光柵和離子蝕刻全像光柵。

## 四、應用與用途

單光儀配合光檢測器如光電倍增管、受光二極體及 CCD，及相關信號處理器和驅動控制，即為光譜儀 (spectrometer)，每種物質成份結構都有特性波長，透由光譜儀量測待測物可得成份光譜，即可由所得光譜中特定波長來推斷是屬於何種成份，近似此類光譜儀器，波長由紅外光到超紫外光，有紅外線、可見光、螢光及拉曼等光譜儀。亦有人使用其配合燈源來產生單一光源，然易和其它級數 (order) 混合，須配合濾光鏡片使用。

## 參考文獻

1. H. H. Willard, L. L. Merritt, J. A. Dean, and F. A. Settle, *Instrumental Methods of Analysis*, 6th ed., Litton Educational Publishing, Inc. Chap. 2 (1981).
2. *Guide for spectroscopy*, ISA JOBIN-YVON (1993).
3. H. R. Morris, C. C. HOYT, and P. J. Treado, *Appl. Spectrosc.*, **48**, 857 (1994).

作者：李龍正先生為國立清華大學化學博士，現任國科會精密儀器發展中心副研究員。

# 光度計

## Photometer

**關鍵字：**照度計、亮度計、光通量計、光度計

**Keywords：** illuminance meter, luminance meter, flux meter, photometer

### 一、基本原理

光度學的研究對象，是波長範圍為 380 nm—780 nm 的能被人的視覺所感覺的電磁輻射，即可見光。光度計涵蓋所有量測此頻譜範圍內的相關量度單位，包括照度計 (illuminance meter)、亮度計 (luminance meter)、光通量計 (flux meter) 等。其所分別量測的光度為：照度、亮度、光通量。無論上述哪一種光度計，均由光接收器及讀數顯示器 (先進者會配備電腦) 兩部份組成。當然光接收器是光度計最重要的組成部分，依據被度量值的不同，光接收器會有不同的組成，但都會包含光探測器。光探測器是將光輻射能變成電能的轉換器件，也是最重要的部分。光探測器原則上可分為兩大類<sup>(1)</sup>：熱電探測器和光電探測器。熱電探測器的原理是接收到的光輻射能使熱敏材料升溫，再透過其他方法量測升溫量。光電探測器則是利用光電效應，其響應時間較短達奈秒級，光度計所使用的大部分都是光電探測器，如矽偵測器、光電管等。以下將就照度計、亮度計及光通量計之接收器的原理分別說明。

#### 1. 照度計

照度計之接收器由光電偵測器、人眼光譜光效率函數濾波器及餘弦修正器組合而成。由於一般的光電偵測器的光譜敏感度和人眼的光譜光效率函數 (spectral response function of the eye) 相差很遠，所以照度計的要用人眼光譜光效率函數濾波器進行匹配。另外，光投射在接收器上的響應須符合餘弦法則，故加入餘弦修正器。接收器被光照射後，輸出與照度成正比的光電流，經放大後，在顯示器上顯示出照度值。

#### 2. 亮度計

亮度計為量測發光表面的亮度，其和接收器表面上的照度之間有一定的關係，亮度計的原理即是

按此關係而設計的。量測時讓發光表面和亮度計接收器平面互相平行，則接收器上的照度 ( $E$ ) 和發光表面的亮度 ( $L$ ) 關係式為

$$E = L \cdot \Omega$$

其中  $\Omega$  為接收器所接受到的立體角，利用上式，只要已知照度及接收立體角就可以求得發光體表面的亮度。

### 3. 光通量計

最常用的光通量計是用積分球加上光電量測系統而成，積分球是在空心球殼內壁塗上白色漫反射材料，光源發出的光經球壁的多次漫反射後，在球的內壁上得到均勻的照明，在球壁上開一窗口測得其照度值，此值和光源的總光通量成正比，由此推算出光通量值。

## 二、結構示意圖

### 1. 照度計結構示意圖<sup>(1)</sup>

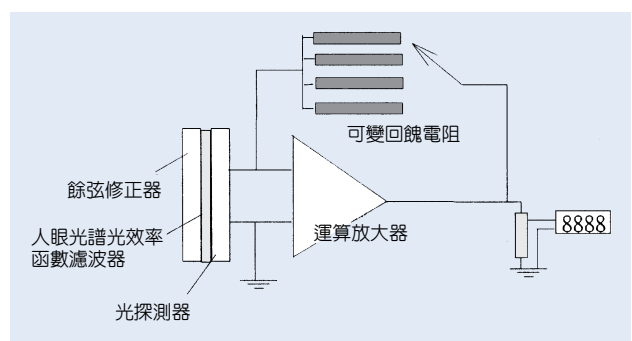


圖 1. 照度計的結構示意圖。

一個包含讀數裝置的照度計如圖 1 所示。為了提高照度計的測量準確度，須將光電流放大，再由讀數顯示器顯示。

## 2. 亮度計結構示意圖<sup>(1)</sup>

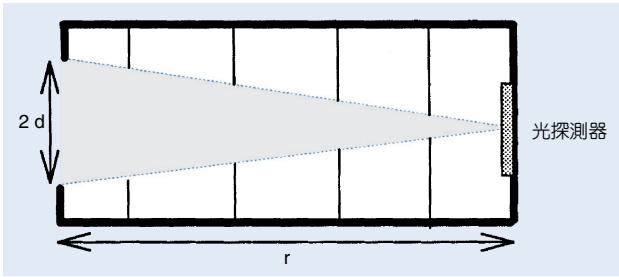


圖 2. 亮度計的結構。

在照度計的前方加上一個帶孔的圓筒以形成一個固定的立體角，即形成一個簡易的亮度計，如圖 2 所示。其亮度可以通過下式計算而得：

$$L = \frac{E}{\Omega} = E \cdot \frac{r^2}{d^2 \pi}$$

另一種為成像式亮度計，為在前方加上一個光學成像系統，即焦點在光偵測器上，此時計算式中須加入透鏡的穿透率因素。

## 3. 光通量計結構示意圖<sup>(1)</sup>

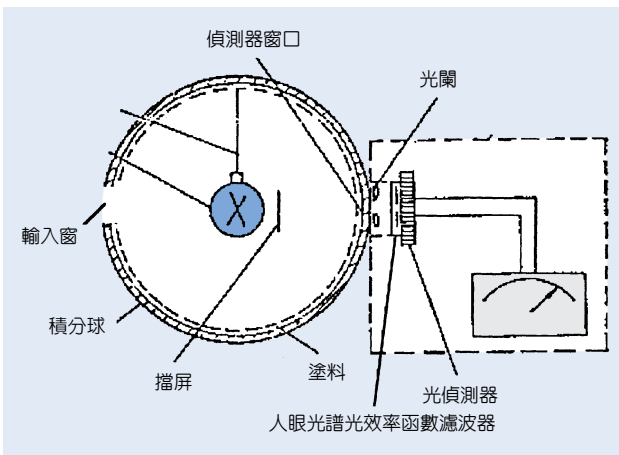


圖 3. 光通量計的結構示意圖。

如圖 3 所示，光通量計中的積分球應符合以下三項要求：

- (1) 它應是一個空心的球體。
- (2) 球體內沒有任何其他的吸收光物質。
- (3) 球內壁的反射塗料的光譜反射比應是中性的，否則經內壁多次反射後的光譜功率分布，被偵測到時就會和原始的分布不同。

## 三、儀器規格與特徵

### 1. 照度計

照度計的最重要參數為可量測之最小照度。量測高亮度時，如投影螢幕的量測，一般的手持型照度計足敷使用，此類照度計大部分使用矽偵測器。但在極低光下的照度量測時，要求照度計具有較高的靈敏度，此時則採用大面積的矽偵測器甚至靈敏度更高的光電倍增管作為光接收器，此類型儀器甚至可量測到  $10^{-6}$  lux。

### 2. 亮度計

亮度計之重要規格如下：

- (1) 可量亮度範圍。
- (2) 是否具有透鏡，此會影響到量測圓大小及量測距離範圍。
- (3) 接收角 (angle of acceptance) 大小。
- (4) 聚焦距離。
- (5) 是否具有觀景窗。
- (6) 量測圓大小。

### 3. 光通量計

以積分球作為量測光通量的光通量計，最重要的規格即是積分球的直徑，市售產品中有些小至 30 cm，也有為提升量測精度甚至有直徑達 5 米以上的積分球，直徑大小的選擇也須考量待測光源的大小。又內部反射塗料的寬廣光譜反射率差異的大小，將是影響精確度的另一重要因素，因光譜反射率精密度要求不同，積分球也可選擇不同的塗料，如氟化鋁或鍍金等。

## 四、應用與用途

光度計是用於光度學上不可或缺的量測工具，舉凡所有和人的眼睛視覺有關的設備或元件之測試均須用到這類量測儀器。如電視螢幕、電影、照明、號誌、燈泡、LED 等都要用到相關的光度計。

### 參考文獻

1. 朱小清, 詹云翔, 光度測量技術及儀器, 中國計量出版社 (1992).
2. Ealing catalog.
3. R. Kingslake, *Optical System Design*, ACADEMIC PRESS INC. (1983).

作者：莊福明先生為國立中央大學光電科學博士，現任工業技術研究院光電研究所工程師。

# 色度計

## Colorimeter

**關鍵字：**光度計、色度計、分光輻射計

**Keywords：** photometer, colorimeter, spectroradiometer

### 一、基本原理

#### 1. 色彩視覺 (color vision)

色彩並非表示我們看到物體的一物理特性，而只是光經過該物體反射或散射回來，經由人眼感覺的結果。在整個輻射能光譜中，只有在一狹窄波段範圍內的光波才能被人眼所偵測到，其波長大約從 400–700 nm，當此波段的光波進入眼睛，人眼的感覺即所謂的「光」。色彩的產生也可以說是在可見光波段內的輻射能到達人眼時，由於各波長的能量分佈不相同，造成所謂的能量不平衡 (energy imbalance) 現象，因而有顏色的產生。

人眼的視網膜主要由數百萬個對光非常敏感之錐狀細胞 (cones) 與桿狀細胞 (rods) 所組成，目前有很多理論用以解釋色彩視覺現象，最常被引用的是楊氏三元素理論 (Young's three-component theory)，假設視網膜上有三種不同的錐狀細胞，分別對紅光、綠光與藍紫光有較佳的感光能力，這些細胞位於視網膜中央，稱為中央黃斑 (fovea) 的區域，利用人眼的轉動將物體最感興趣的部份成像在中央黃斑位置上，由於錐狀細胞較桿狀細胞構造精細，能偵測較多較詳細的物體資料，而所獲得的訊息 (含顏色訊息) 經視神經傳送至大腦，以解譯出物體大小、位置、形狀與顏色等資料，這種以錐狀細胞為主要偵測元的視覺，稱為白晝視覺 (photopic 或 daytime vision)。在低光度或晚上的環境下，眼睛主要依靠位於視網膜外圍的桿狀細胞來偵測物體訊息，此時偵測物體顏色的能力非常弱，稱為微光視覺 (scotopic 或 night vision)。人眼的白天與夜間視覺，對可見光波段內各波長的感光能力 (sensitivity) 並不相同，白天人眼視覺感應曲線的中心波長大約在 555 奈米，夜間視覺的中心波長則向短波長方向位移，約在 510 奈米。

人眼可偵察到顏色的三個屬性：色調 (hue)、

彩度 (chroma) 與亮度 (lightness)。色調是指各種不同主波長的色彩區隔，如紅黃綠等，彩度是指色彩的純度，描述主波長的光譜純色所佔的比例，亮度是指物體表面的亮暗程度。顏色又可分為彩色與無彩色，無彩色是指黑灰白等無色調的色，彩色是指黑灰白以外具有色調的色。

#### 2. 光的三原色

光的三原色是指紅綠藍三顏色光，人眼對進入視網膜的任何二種原色光，具有加色混合或建設性相加 (additive mixture) 的能力，可產生光的二次色 (secondary color)。

紅色光 + 藍色光 = 洋紅色光 (magenta)

綠色光 + 藍色光 = 青色光 (cyan)

紅色光 + 綠色光 = 黃色光

任何一種二次色光與所對應的原色光的加色混合，可產生白色光，例如洋紅色光與綠色光加色混合，可產生白色光，此二顏色稱光的互補色，總共有三組。

洋紅色光 + 綠色光 = 白色光

青色光 + 紅色光 = 白色光

黃色光 + 藍色光 = 白色光

彩色電視機的色彩效果，即利用人眼對顏色光的加色混合。

#### 3. 色品系統

物體顏色的產生主要由下列三因素決定：照射光源光譜能量分佈曲線、被照物體對波長的穿透或反射曲線，以及接收器 (通常是人眼睛)，對各波長的感光能力。1931年由國際照明委員會 (Commission Internationale de l'Éclairage or International Commission on Illumination) 制訂所謂的 CIE 色品系統 (The CIE System)，將照明光源與

觀測者對各波長的感光能力標準化，並引用一套數學計算方法，以數學數值表示色品量測的結果，亦即利用光的三原色以不同的百分比值 ( $x, y, z$ )，表示不同的顏色，並且在 CIE 色品座標圖上標出此點位置。

### (1) 標準照明光源

1931年 CIE 建議三種標準照明光源 A、B、C，分別模擬色溫 2854 K 白熱燈光、中午太陽光，以及多雲白天的照明環境。目前較常用為  $D_{65}$  光源，模擬色溫 6500 K 的白天照明，其光譜能量分佈更接近白天的環境。

### (2) 標準觀測者光譜三刺激值 (spectral tristimulus values) 感測曲線

1931 年 CIE 選擇三種原色做為測試原色，光譜上各顏色可經由調整三原色不同的能量分配而獲得，經由實驗測試與數學轉換修正，獲得標準觀測者  $\bar{x}$ 、 $\bar{y}$ 、 $\bar{z}$  三刺激值感測曲線，稱為色彩匹配函數 (color matching function) (參考圖 1)，其中  $\bar{y}$  函數的選擇與人眼對各波長的白晝視覺 (photopic) 感應曲線相同，又稱為光譜發光效能 (the spectral luminous efficiency)  $V(\lambda)$ ，為波長  $\lambda$  的函數。

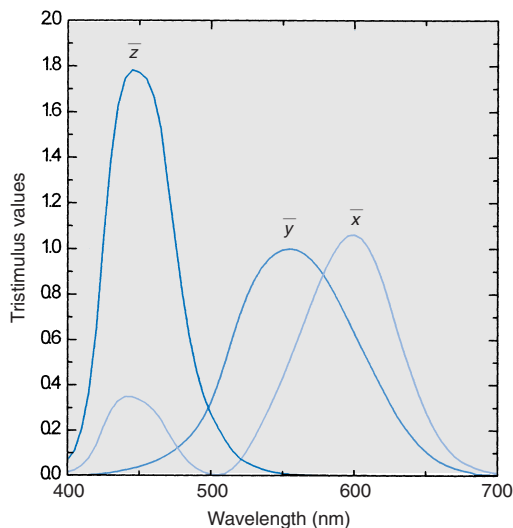


圖 1. CIE 色彩匹配函數。

### (3) CIE 三刺激值的求法

為找出某一顏色光在 CIE 座標圖上的位置與

座標值，首先必須獲得待測面在標準照明光源照明下的能量光譜分佈資料，這些數值再經過 CIE 制訂的標準觀測者色彩匹配函數的加權計算後，即可得到所謂的 CIE 三刺激值 (CIE tristimulus values)  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$ ，分別表示三原色所佔的比例大小。(參考圖 2)。

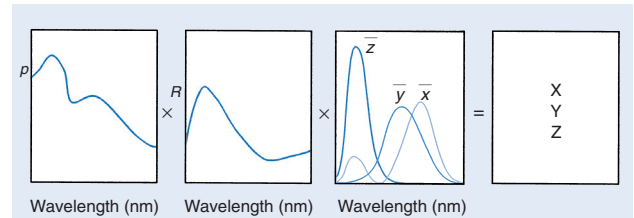


圖 2. CIE 三刺激值之計算方法。

假設：CIE 標準照明光源之相對能量 (power,  $P$ ) 被照物體的反射比 (reflectance,  $R$ ) 或穿透比 (transmittance,  $T$ )，標準觀測者色彩匹配函數  $\bar{x}$ 、 $\bar{y}$ 、 $\bar{z}$  則 CIE 三刺激元數值：

$$X = k \sum P R \bar{x} \text{ or } X = k \int P R \bar{x} d\lambda$$

$$Y = k \sum P R \bar{y} \text{ or } Y = k \int P R \bar{y} d\lambda$$

$$Z = k \sum P R \bar{z} \text{ or } Z = k \int P R \bar{z} d\lambda$$

其中  $P$ 、 $R$ 、 $x$ 、 $y$ 、 $z$  都是  $\lambda$  的函數， $Y$  又稱為光亮度因數 (luminous factor)。

### (4) 色品圖 (chromaticity diagram)

CIE 色品系統定義座標值如下：

$$x = \frac{X}{X+Y+Z}$$

$$y = \frac{Y}{X+Y+Z}$$

$$z = \frac{Z}{X+Y+Z}$$

$$x + y + z = 1$$

$x$ 、 $y$ 、 $z$  稱為色品座標值 (the CIE chromaticity coordinates 或 the trichromatic coefficients)。

為了簡化，我們只利用 ( $x, y$ ) 兩座標值在色品圖上描述物體顏色 (參考圖 3)，在圖上有一馬蹄型光譜軌跡曲線 (the horseshoe-shaped spectrum locus)，曲線上各點代表光譜的各種顏色。由照明

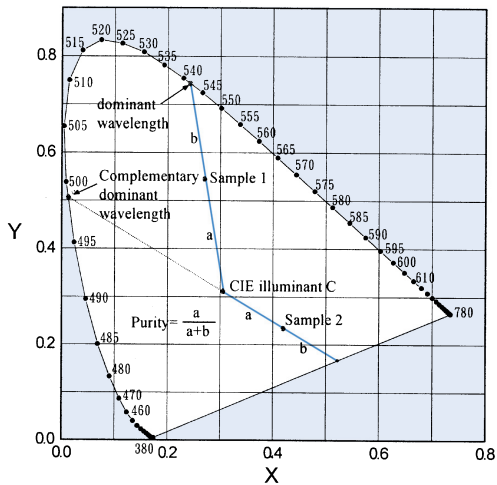


圖 3. CIE 色品圖。

光源與此測量點在座標圖上的相關位置，可求得被測顏色的主波長和純度。

#### 4. 色度計工作原理

色度計主要用於測量被測面的 CIE 色彩三刺激值 X、Y、Z，並計算色品座標值 (x, y)。傳統的色度計係利用三片濾光鏡片，光譜穿透率曲線分別與色彩匹配函數  $\bar{x}$ 、 $\bar{y}$ 、 $\bar{z}$  相同，由於實際濾光鏡片穿透率曲線與理論值會有些許不同，因此使用前必須做一修正，找出校正參數。較精密的色度計有四片濾光鏡片，其中二片構成  $\bar{x}$  曲線。測量時，先利用觀測鏡組對準被測面，並配合校正過的鏡頭調整測量區域大小，此時由待測區域自行發光或反射的光線，將經過濾光鏡片聚焦於檢知器上，檢知器可能為光電倍增管 (photomultiplier tube) 或是光電二極體 (photodiode) 等，通常四片濾光鏡片係組裝於一旋轉輪上，利用轉動鏡片分別測量 X、Y、Z 與 (x, y) 值。

另一種色度計為分光輻射計 (spectroradiometer)，其工作原理係將來自待測區域的光線，經過鏡頭、光柵 (grating) 分光後聚焦至條狀檢知器 (linear arrays) 上，不同波長的光能量由不同檢知元 (pixel) 所偵測，檢知元數目愈多，能解析的波段間隔愈小。所偵測的光譜能量再經過  $\bar{x}$ 、 $\bar{y}$ 、 $\bar{z}$  曲線的數學加權計算，取得 X、Y、Z 與 (x, y) 值，由於不使用濾光鏡片，測量精度較傳統色度計為高。

由於  $\bar{y}$  函數曲線與人眼對各波長的感光能力

曲線相同，若系統已經過亮度校正，則所測量的 Y 值即為待測區域的亮度值 (luminance)，單位為 Footlamberts (FL) 或 Candle/m<sup>2</sup>。

## 二、結構示意圖

圖 4 為使用濾光鏡片的傳統色度計結構圖，圖 5 為分光輻射計結構圖。

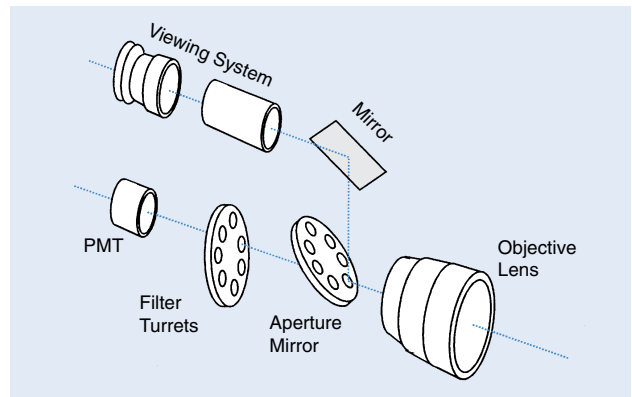


圖 4. 使用濾光鏡片的傳統色度計結構圖。

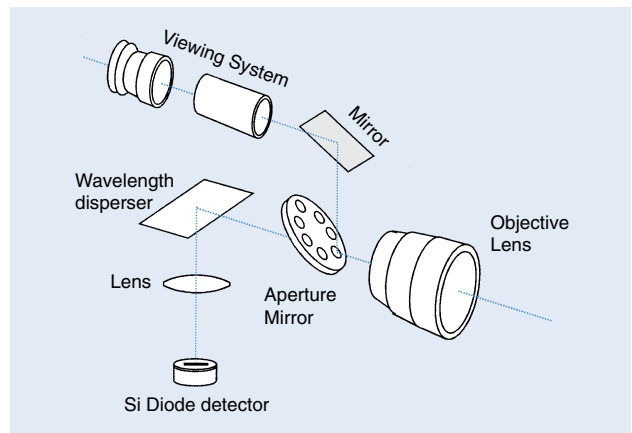


圖 5. 分光輻射計結構圖。

## 三、儀器規格與特徵

市面上的色度計無論是傳統色度計或分光輻射計，為配合測量區域大小的不同，皆提供了多種不同倍率鏡頭供選擇，測量距離有可變與固定兩種，測量視場方面有單一視角與可切換多視角等。鏡頭的選擇、測量距離與視場角的改變，均可改變測量的範圍。由於只要經過亮度校正，三刺激值的 Y 值即為亮度值，色度計可做為亮度計的使用，目前市面上的色度計普遍具有此一功能，傳統色度計甚

至會加上微光視覺 (scotopic) 的濾光鏡片，以測量微光亮度值。

#### 四、應用與用途

一物體的顏色是與下列幾項因素有關：照明光源的特性、物體對光的吸收、穿透或反射的特性，以及與人眼對光的感光能力等。所以我們可藉由光源的改變，加上光學色彩濾光片，或改變物體組成成份等方法，以變化物體被觀測到的顏色。經由色品座標圖的輔助與色度計的測量，顏色的定義將更為清楚與量化。在實際應用方面，從飛機或汽車儀表板的數字顯示、十字路口紅綠燈、彩色電視機或監視器、舞台燈光、衣服染料、傢具塗料等等，均

與顏色息息相關，皆可利用色度計的測量或做色彩比對，以提升產品色彩品質。

#### 參考文獻

1. F. W. Billmeyer, Jr., and M. Saltzman, *Principle of Color Technology*, 2nd ed., New York: Wiley, 25 (1981).
2. G. W. Godfrey, *Principles of Display Illumination Techniques for Aerospace Vehicle Crew Stations*, Florida: Aerospace Lighting Institute, I-41 (1982).
3. 王之江主編, 光學技術手冊, 第一版, 北京: 機械工業出版社, 555 (1987).

---

作者：葉茂勳先生為國立交通大學光電工程博士，現任中山科學研究院副研究員。

# 波長計

## Wavemeter

**關鍵字：**波長、波長計

**Keywords：**wavelength, wavemeter

### 一、基本原理

波長計是利用干涉儀的技術，量測雷射光之輸出波長，特別是用於窄線寬 (linewidth) 之波長可調雷射。當干涉儀之兩臂存在光程差 (optical path difference) 時，輸出端所偵測之干涉光強度，會隨著光程差之變化而作週期性改變，此週期即是待測雷射光之波長。基本的干涉光強度可以表為

$$I = 1 + \cos\left(\frac{2\pi\Delta l}{\lambda} + \phi\right) \quad (1)$$

其中  $\Delta l$  是光程差， $\lambda$  是光波長， $\phi$  則是光程差為零時之相位差。 $\Delta l$  可以經由事先之校正或是以另一穩頻光源測得，而干涉階數 (order of interference)  $N = \Delta l/\lambda$  則是觀測光程差  $\Delta l$  的改變範圍內，週期性干涉條紋出現之數目，將  $N$  與  $\Delta l$  相除時，就可以得到光波長。當改變之光程差愈大，干涉階數愈大，得到的波長解析度愈佳。

一般用於量測波長之干涉儀可以大致區分為動態 (dynamic) 與靜態 (static) 兩種方式，分述如下。

#### 1. 動態式波長計

典型的動態式波長計，是指具有移動元件之波長量測儀器，結構類似於傳統之 Michelson 干涉儀，如圖 1 所示。參考光源通常是一個穩頻之氦氖雷射，用來隨時校正光程差。利用一個雙直角之全反射鏡左右移動，慢慢改變干涉儀兩臂的長度，在待測光偵測器與參考光偵測器分別讀取干涉所形成之週期性光強度訊號，也就是干涉條紋，可以得到下列關係式

$$\frac{\lambda_{\text{待測}}}{\lambda_{\text{參考}}} = \frac{N_{\text{參考}}}{N_{\text{待測}}} \quad (2)$$

其中  $N_{\text{待測}}$  與  $N_{\text{參考}}$  分別是兩個光偵測器所測得之干

涉條紋出現的週期數，也就是干涉階數，而  $\lambda_{\text{待測}}$  與  $\lambda_{\text{參考}}$  分別是二者之波長。為了達到更高的解析度，測量所得之干涉階數必須準確到小數點以下的幾個位數，使量測波長的精確度可以達到波長值之  $10^{-9}$  以下。這可以利用鎖相迴路的方法，得到週期性干涉條紋之相位值；或者是將讀取干涉階數的起始及停止點，設定在兩個干涉訊號皆在同相位之時。

另一種動態式波長計是利用掃描式 Fabry-Perot 干涉儀的方法。當待測光與參考光同時入射此干涉儀，慢慢改變 Fabry-Perot 干涉儀的兩片反射鏡之間距，可以得到週期性干涉條紋，由於這種干涉條紋是很尖銳的脈衝訊號，可以較準確的得到干涉階數，實驗上當間距只要移動 25 mm 就可以得到  $10^{-7}$  的解析度。由於其兩片反射鏡為高反射鍍膜，有頻寬之限制，只能適用於一個有限的波長頻寬的範圍內。

#### 2. 靜態式波長計

靜態式波長計與上述之動態式波長計的差別，在於不需要使用移動元件，所以可以在較短的時間內，完成波長的量測，因此除了可以用於量測連續波雷射之波長外，尚可用於量測脈衝雷射及功率較不穩定的光源。除此之外，另一優點則是不需要一個額外的穩頻之參考光源，以校正光程差。最簡單的靜態式波長計類似於 Fizeau 干涉儀，如圖 2 所示。由待測光源發出之光，經由空間濾波後，形成一束平行光，入射在兩塊玻璃平板上。兩塊平板之間夾著一個楔形之空隙，其間距與夾角分別約為 1 mm 及 1 分。反射光形成空間上之週期性干涉條紋，經由一陣列型光偵測器接收後，可以藉由干涉條紋之空間位置計算出待測光之波長。由於這種方式讀出的干涉條紋數受限於光學平板之大小及平整度，一般可到的解析度約為波長之  $10^{-7}$  左右。

## 二、結構示意圖

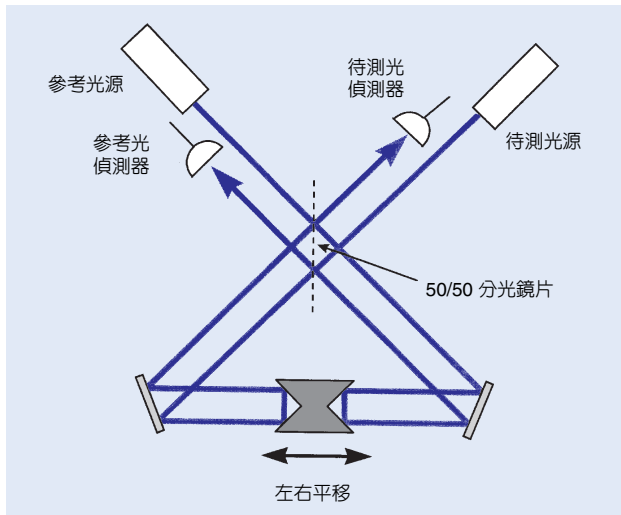


圖 1. 動態式波長計。

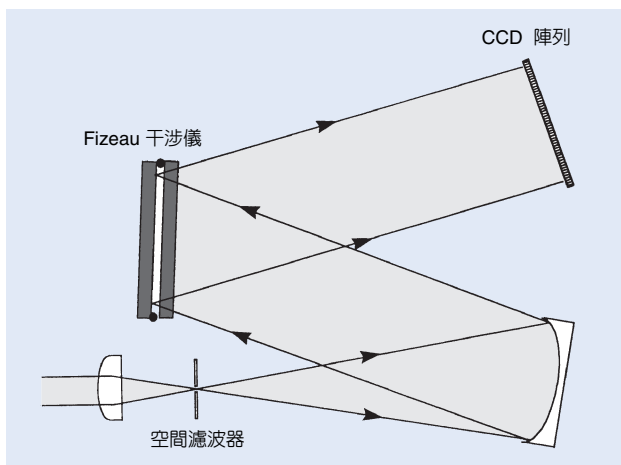


圖 2. 靜態式波長計。

## 三、儀器規格與特徵

目前商品化的波長計有許多型式，動態式的解析度較高，可以高達  $10^{-6}$  至  $10^{-8}$ ，可測波長範圍大

約在 400 nm 至 1800 nm，但是只能用於連續波且功率較穩之雷射。靜態式方面，受限於 CCD 陣列之波長響應，可測波長範圍大約在 400 nm 至 1000 nm，解析度略大於  $10^{-6}$ ，對於待測光之穩定度較不影響。

外型上皆已採用光纖輸入，通常光偵測器必須工作在非飽和的狀態下，否則量測所得的波長會產生很大的誤差，因此必須外置一個可變的光衰減器，以控制輸入光之強度。

部份波長計是採用數值方法，計算干涉條紋之傅立葉轉換。其優點是可以同時讀出兩個以上的波長，特別是用於量測多波長雷射之每個波長值。

## 四、應用與用途

早期的波長計的開發，是為了配合波長可調之染料雷射，用於精密量測物質之吸收及穿透光譜。目前由於緊緻化的波長可調半導體雷射之技術已經相當發達，不論在體積、使用壽命、便利性及價格上，較能迎合使用上的需求，而波長計也成為此雷射之一個附屬的標準配備。

## 參考文獻

1. M. Born and E. Wolf, *Principles of Optics*, 5th ed., Chap. VII, Oxford: Pergamon (1975).
2. J. J. Snyder, *Laser Focus*, **18**, 55 (1982).
3. A. Fisher, R. Kullmer, and Demtroder, *Opt. Commun.*, **39**, 277 (1981).
4. M.-L. Junntila, B. Stahlberg, E. Kyro, T. Veijola, and J. Kauppinen, *Rev. Sci. Instrum.*, **58**, 1180 (1987).

作者：王啟倫先生為國立交通大學光電工程博士，現任國科會精密儀器發展中心專案副研究員。

# 光學多頻道分析儀

## Optical Multichannel Analyzer

**關鍵字：**光學多頻道分析儀、頻譜

**Keywords：**optical multichannel analyzer, spectrum

### 一、基本原理

光學及雷射光電研究中，經常需要對一些光源做頻譜的分析。傳統的光學做法是利用分光鏡將整個頻譜散佈出來，再如果需要針對特定頻寬，單一或數個奈米 (nanometer) 用適當的光檢拾器 (detector) 量測每一強度，並與其他頻譜光強度做一基準化，再將整個結果標明劃出。如果以傳統的方法做此分析，費時費力，且精確度仍需特別小心量測計算方能有成。

拜科技之賜，光學多頻道分析儀結合多頻譜分頻器 (polychromator)、光檢拾陣列器 (detector array)、脈衝電子閘產生器 (gating pulse generator)、電腦微處理器 (computer controller console)、控制器、鍵盤、顯示螢幕及 X-Y 記錄器 (waveform monitor and X-Y recorder) 等，可將連續及脈衝光源瞬間量測及顯示出來。更有甚者，利用電子及電腦技巧，可做時序式 (time resolved) 量測，把脈衝式光源之發射分時顯示出來。

光學多頻道分析儀其結構組成和基本原理包含：(1) 多頻譜分頻器，(2) 光檢拾陣列器，(3) 電子閘器，(4) 電腦處理器，(5) 顯示螢幕及記錄器。

#### 1. 多頻譜分頻器

對任何光源量測，不管是連續光譜如閃光燈或單色光譜如雷射光，我們都希望知道它的光譜範圍，並且能顯示其特定波長時之強度。而這其中最重要的就是分頻器，能將光源依波長序散射開來。

#### 2. 光檢拾陣列器

待測光源經分頻器依波長序散開來後，要定量的量測其強度，並與其它波長強度做一綜比，這時就需要使用光檢拾器。光檢拾器是一種光敏感的半導體元件，可針對光之強度產生不同的電壓電流。

而光檢拾陣列器，則是一系列的光檢拾器緊密排列成一長條組成。光檢拾陣列器中之每一光檢拾器都有相關對應的偏壓 (bias) 電子電路連接控制，因此可做整體的控制及顯示。當然，通常待測的光源有一頻譜的散佈，首先這些頻譜都要在這些光檢拾器的反應範圍內，否則就需選擇更換其他種光檢拾器；另外由於實際材料物理的限制，每一光檢拾器有它的大小以及必須之間距，因此分頻器的散光及光檢拾器的相對面積和位置，就決定了儀器的量測波長範圍及解析度。所以對光學多頻道分析儀，如果不能得到無限的需求，則要配合光源之光譜範圍及要求解析精度做一更換選擇調配。

#### 3. 電子閘器

對一連續且穩定的光源做頻譜分析較簡單，但是如果是一脈衝式光源，且有時序式的變化，則需較精緻的安排。本文的光學多頻道分析儀即是對最複雜的脈衝時序式的光源可做量測分析。

對如雷射泵浦閃光燈，它是一脈衝式，且有時序變化的光源，我們已將光源分頻，也照射在光檢拾陣列器上了，但是為了實際的需求，我們要能控制光源發射及接收，使有適時對應的時間範圍。另外，如果我們要研析其中特定的某一時間範圍內的現象，更需要此電子閘器。在此所用到的電子閘器可操控閘寬在奈秒數級 (nanosecond order)。

#### 4. 電腦處理器

光學多頻道分析儀需針對光源做分頻，再量相對應波段之光強度，並做比對顯示。這些步驟以傳統方法需要一步步量測記錄，但由於有陣列式的光檢拾器，而且有電腦微處理器，尤其目前的個人電腦功能更是卓越，這些量測、記錄、比對、顯示，對電腦控制處理而言，可以說是即時 (real time)。

## 5. 顯示螢幕及記錄器

量測數據經過記錄、處理、比對後當然需要顯示及列印。配合電腦處理器可以記錄儲存大量的數據，並可以用介面控制用印表機列印了。至於傳統的 X-Y 記錄器當然也是一種量測數據的列印方式。

## 二、結構示意圖

光學多頻道分析儀的結構如圖 1 所示。

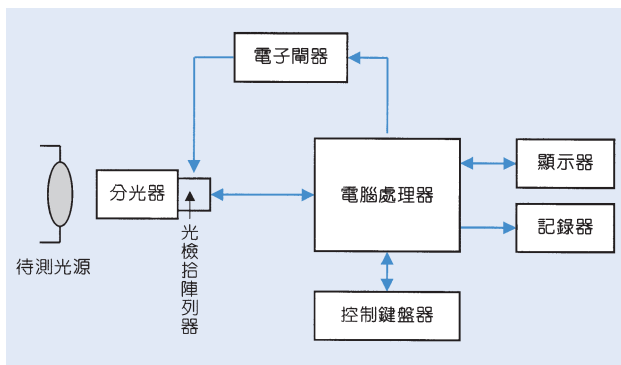


圖 1. 光學多頻道分析儀的結構示意圖。

## 三、儀器規格與特徵

1. 量測波長範圍：400 nm—1100 nm
2. 光檢拾元件：Si
3. 光檢拾陣列器數目：1024
4. 光強度比對：auto-scaling
5. 電子閘控制：gated pulse generator
6. 時序量測能力：time resolved measurements

## 四、應用與用途

光學多頻道分析儀可待測之連續或脈衝式光源做單一或時序性量測。所以不但對傳統連續穩定的光源可做量測，對脈衝式及時序變化光源也可做完整及時序的量測。

## 參考文獻

1. *Optical Channel Analyzer*, Princeton, U.S.A.: EG & G Princeton Applied Research Inc.
2. W. Koechner, *Solid-State Laser Engineering*, 4th ed., Springer Series in Optical Sciences (1996).
3. M. L. Stitch (edited), *Laser Handbook*, 1-5, North-Holland Physics Publishing (1985).

作者：陳振文先生為英國帝國理工醫學院博士，現任中山科學研究院副研究員及國立中央大學兼任副教授。

# 雷射功率／能量計

## Laser Power/Energy Meter

**關鍵字：**雷射、功率計、能量計

**Keywords：** laser, power meter, energy meter

### 一、基本原理

雷射功率及能量測量與一般輻射量測相較，有二點較特別之處。首先是雷射光常具高能量和高功率密度，故需留意偵測器的工作範圍，以避免線性飽合及元件損壞問題。其次，要量測雷射 Q-開關或鎖模技術產生的超短雷射脈衝時，則需具備高頻率響應的快速偵測器及相關儀表。

曾被應用於雷射功率／能量計之度量方法，大致可分成五種類別。即 (1) 熱量法 (calorimetric method)、(2) 光電法 (photoelectric method)、(3) 光化學法 (photochemical method)、(4) 機械法 (mechanical method)、(5) 非線性電場法 (nonlinear field method)。其中較常用的是前二種方法，說明如下。

#### 1. 熱量法

利用熱偵測器 (thermal detector) 受到雷射光照射時，偵測器溫度會上升的技術，來作雷射功率／能量的度量。此上升的溫度再透過多種不同的方式轉換為電的訊號，以便於處理。常見的熱偵測器有下列三種。

##### (1) 包羅計 (Bolometer)

此偵測器由一個染黑的金屬或半導體的條狀物，連接一個有外加偏壓 (bias voltage) 的負載電阻所組成。當受到雷射光照射時，條狀物的溫度上升，並造成其電阻值改變，由於偏壓的存在，此電阻值改變將形成電流的改變，進而轉換為負載電阻上的電壓改變，而此改變的電壓值也就是包羅計的輸出訊號。

##### (2) 熱電偶列 (thermopile)

在兩個不同金屬的接合面處，放置一個輻射吸收體 (radiation absorber)，並和接合面形成熱接觸 (thermal contact)，則外加輻射能將可透過吸收體的

溫度變化，造成金屬接合面的溫度改變，並產生一個電壓的輸出。利用上述效應製成的熱偵測器稱作熱電偶 (thermocouple)，將多個熱電偶串連相接，可使得輸出電壓成為各熱電偶輸出之總和，此即熱電偶列。雖然熱電偶列和包羅計皆是產生一個對應於溫度變化的電壓輸出，然應注意其原理並不相同。

##### (3) 焦電偵測器 (pyroelectric detector)

焦電材料之表面電荷分佈，會隨材料溫度變化而改變，故可在外接電路上產生一個因溫度變化而引起的電流，此即焦電效應 (pyroelectric effect)。利用焦電效應產生的電流轉換為負載上的電壓輸出，為一般焦電偵測器之基本工作方式。

基本上，熱偵測器的反應度 (responsivity) 與入射的雷射波長無關，焦電偵測器也是如此。不過焦電偵測器與一般熱偵測器有一點顯著的不同，一般熱偵測器的反應時間甚慢，約在數秒左右，而焦電偵測器則可快至微秒 ( $\mu\text{sec}$ ) 甚至更短的範圍。此外在使用焦電偵測器時，應特別考慮到偵測器的反應度會隨頻率響應的增高而降低，故此二參數應作適切之配合。

### 2. 光電法

光電法利用光子偵測器 (photon detector) 吸收雷射光，並由偵測器放射電子或產生電子－電洞對 (electron-hole pair)，因而造成一個電性上可量測的變化。光子偵測器亦稱為量子偵測器 (quantum detector)，這表示此種偵測器會計數所吸收的光子，並產生相對應的電載子 (electrical carrier)。事實上，光子偵測器在量測操作時，其產生的載子數總是少於其所吸收的光子數，此二者之比值稱為量子效率 (quantum efficiency)，是偵測器的一個極重要參數。

無論是放射電子或是產生電子－電洞對，光子偵測器所用的材料幾乎全為半導體。光子偵測器的種類眾多，較重要的有下列四種：

#### (1) 光放射偵測器 (photoemissive detector)

包括許多早期使用的光子管 (phototube)，不論其為真空或是充氣的，以及目前大量應用於夜視技術的光倍增管 (photo multiplier)。此類偵測器利用光子打到光陰極 (photocathode) 上，且能量高於陰極表面之工作函數 (work function) 時，將會有電子從光陰極放射出來，並形成電流。而光倍增管則另具有二次放射 (secondary-emission) 的放大機制。

光放射偵測器具有快速的反應時間 (~ns) 以及靈敏的雷射功率／能量測量能力，故在雷射發明的早期，曾扮演了重要的角色。如今，由於固態光偵測器的技術進步，以及光放射偵測器的高真空要求，使得此類偵測器於雷射量測上的應用已較少見。

#### (2) 光導偵測器 (photoconductive detector)

此偵測器一般需連接一個負載以及外加偏壓，當未偵測光子時，偵測器之阻抗遠大於負載，因此外加偏壓多落在偵測器上。當有光子入射時，偵測器內的自由載子增加，造成其阻值下降，使得較多的偏壓落在負載上，並造成外接電路上的電流改變，而達到光偵測之目的。

光導偵測器可使用不同型式的半導體，藉由吸收光子來產生額外的電子或電洞，或是電子－電洞對等不同方式來降低自身的阻抗值。不論何種方法，光導偵測器容易受環境之熱擾影響，故常需透過冷卻的方式來達到穩定且高靈敏之偵測。相對地，也使得此類偵測器較少用於一般之雷射功率／能量度量。

#### (3) PIN 二極體

在 P 型及 N 型半導體中間加入一塊本質區 (intrinsic region)，此塊本質區具較高電阻係數 (resistivity)，此時 PIN 二極體自身會形成一內在電場，透過反向的外加偏壓，更可增強此內在電場。在未有光子入射時，本質區的傳導性極低，當足夠能量的光子入射到本質區時，電子－電洞對在此產生，電子及電洞分別朝 N 型及 P 型半導體流動，即形成訊號電流。

目前市面上絕大多數的固態光子偵測器皆為 PIN 二極體，而此種二極體偵測器的工作特性又與相關的感測電路 (sensing circuit) 息息相關。一般的感測電路分二種，一種是外加反向偏壓並產生電流訊號的光導式 (photoconductive)，此種偵測器與前述光導偵測器之原理不盡相同，然常被混用。第二種是不需外加偏壓，僅藉由高阻抗負載來產生電壓訊號輸出的光壓式 (photovoltaic)。一般而言，光導式被使用的較多。

#### (4) 可崩式二極體 (avalanche photodiode)

除前述之 P 型、N 型及本質區外，在本質區和 N 型區之間多加一層 P 型放大區 (multiplying region)，若在本質區微摻以降低電阻係數，則最大內在電場及最高電阻係數均落在 N 型與 P 型放大區之接合面。當光子在本質區造成電子－電洞對時，電子往 N 型區移動時，會在放大區內造成新的電子－電洞對，透過此種一再放大的崩潰放大 (avalanche multiplication) 過程，此類偵測器能提供較高之靈敏度。

基本上，前述的不同量測方法及多種偵測器皆可用於雷射功率或能量之量測。功率與能量之量測主要區別在於功率量測屬時間上的即時度量，而能量量測則屬時間上的積分度量。通常會對連續雷射作功率測量，對低重覆率脈衝作能量測量，而對高重覆率脈衝作平均功率測量。

## 二、結構示意圖

一般雷射功率／能量計可分為感測頭 (sensor head) 與計量器二部份，感測頭內的偵測器先將訊號作前級放大，而後送至計量器作訊號處理及量測，若需分析脈衝輸出波形或作波寬量測時，常另接示波器如圖 1 所示。

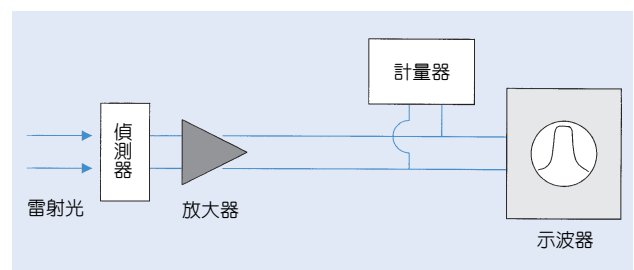


圖 1. 雷射功率／能量計架構圖。

### 三、儀器規格與特徵

雷射功率／能量計的種類繁多，不同偵測器具有不同的反應時間及特性，而相關的感測電路也會影響測量特性。以常見的偵測器來作分類，目前市售商品的主要功能及特性如表 1 所列，其中熱偵測器的反應時間部份並未計入焦電偵測器。

表 1. 不同偵測器功能與特性。

		熱偵測器	光子偵測器
特 性	偵測波長	0.2–35 $\mu\text{m}$	0.2–1.8 $\mu\text{m}$
	反應時間	0.5–10 sec	10 ps– $\mu\text{s}$
	波長輸入	非必須	必須
功 率 量 測	測量範圍	10 $\mu\text{W}$ –300 W	pW–2 W
	最大平均功率密度	30 kW/cm <sup>2</sup>	20 W/cm <sup>2</sup>
能 量 量 測	測量範圍	pJ–10 J	
	最大脈衝寬度	100 msec	
	最大脈衝重覆率	4 kHz	

表 1 中光子偵測器未涵蓋能量測量部份，並非不能測量而是一般需在偵測器後接一個積分電容器，且該電容器的時間常數要夠長，才能精確度量，目前趨勢較不傾向此種作法，故未列入。另

外，在對脈衝列作平均功率測量時，一般而言，重覆率至少應 10 Hz 以上，對低功率脈衝甚至可能要 500 Hz 以上。而在能量部份，若脈衝寬度愈大時，所能允許之最大重覆率將會愈小。

### 四、應用與用途

雷射功率／能量計顧名思義是用來作雷射功率及能量之測量。除了能直接知道這二個重要參數外，各種與雷射相關的應用，也需透過功率與能量的度量來瞭解雷射輸出光束的品質、脈衝波形的好壞、輸出波長之穩定等等。

### 參考文獻

1. F. Grum and R. J. Becherer, *Optical Radiation Measurements*, **1**, Academic Press (1979).
2. J. T. Verdeyen, *Laser Electronics*, 2nd ed., Prentice-Hall International (1989).
3. 廠商資料: Melles Griot, Newport, Scientech, Ophir, ILS 等公司產品資料。

作者：張奇偉先生為國立交通大學光電博士，現任中山科學研究院材料研發中心副研究員。

# 雷射光束能量分佈儀

## Laser Beam Diagnostics

**關鍵字：**雷射、光束、診斷分析

**Keywords：** laser, beam, diagnostics

### 一、基本原理

雷射光束能量分佈儀是將一雷射光源輸出光束之橫截面的能量分佈輪廓做一量測及顯示。它在雷射技術的研析可以做為製作、調整及量測分析用，在理論和實驗驗證上，可有立即且實際的比對。

雷射光束能量分佈儀是由雷射之輸出光束經過能量強度衰減鏡片及匹配鏡片等光學鏡組射入一影像攝影機，再經過電腦用框幕擷取軟硬體讀取及處理並顯現出來。它的組成及基本原理包括：(1) 雷射光衰減及匹配鏡組，(2) 影像攝影機，(3) 電腦及讀取處理軟硬體。

#### 1. 雷射光衰減及匹配鏡組

雷射光是一高功率高亮度光源，在量測時需做適量的強度衰減，另外配合實驗裝備的組成架設，以及影像攝影機之物鏡和偵知器之大小也需要匹配光學鏡片(組)做導引及聚焦。

#### 2. 影像攝影機

雷射光束能量分佈儀需要一高解析度 (high resolution) 及高靈敏度 (high sensitivity) 的固態影像攝影機。它需要可以獲得沒有幾何形像失真及影像的遲滯。電荷耦合元件 (charge couple device, CCD) 影像檢拾器有最佳的配合矽靶成像管及最佳的靈敏度。並且通常備有自動增益控制電路 (automatic gain control, AGC) 以供在使用時光源強度部份的調整。通常影像攝影機有大約 750 (水平) × 500 (垂直) 的圖像素；靈敏度可高達 0.007 fc；以及高動態範圍 (wide dynamic range) 等要點。

#### 3. 電腦及讀取處理軟硬體

今日的個人電腦其處理能量、記憶儲存等都已具有非常大的能力，再加上使用框幕擷取軟硬體，配

合影像攝影機，可以對雷射光束的輸出能量分佈做最真實且即時的量測顯示。

### 二、結構示意圖

雷射光束能量分佈量測儀的結構及功能示意圖如圖 1 所示。

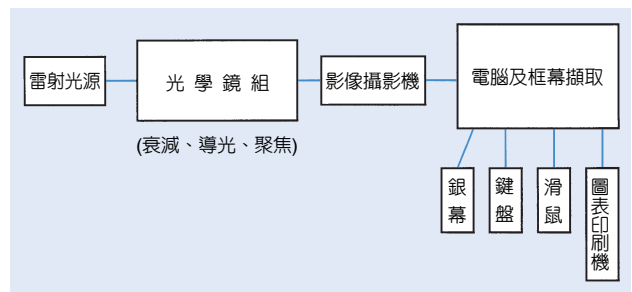


圖 1. 雷射光束能量分佈量測儀的結構示意圖。

### 三、儀器規格及特徵

雷射光束能量分佈量測儀較特殊的裝備是影像攝影機及電腦框幕擷取軟硬體，但在今日儀器市場上也可以找到很多適用的商品。

### 四、應用與用途

本儀器設備最主要的就是可以對雷射 (或其他相關) 光源做其橫截面的能量分佈的量測，並可顯示其輪廓以為研究參考及應用。

### 參考文獻

1. *Solid-State CCD Monochrome Camera*, Cohu Inc. Electronics division, San Diego CA 92138-5623 U.S.A. .
2. *Beamcode*, Big Sky Software Corp., Montana 59772, U.S.A.
3. W. Koechner, *Solid-State Laser Engineering*, 4th ed., Springer Series in Optical Sciences (1996) .

作者：陳振文先生為英國帝國理工醫學院博士，現任中山科學研究院副研究員及國立中央大學兼任副教授。

# 光密度計

## Optical Densitometer

**關鍵字：**光密度計、光密度

**Keywords：** optical densitometer, optical density

### 一、基本原理

當我們欣賞彩色照片或精美的彩色印刷圖片時，可能會發現在室內看到的結果與在室外看到的結果不同，而日光燈下與白熾燈光下看到的又有差異。觀看電影或幻燈片時，如果投影燈用的光源不同，則其效果可能大異其趣。更進一步而言，一位色盲的人與一位正常的人看到的彩色圖片也未必相同。

在實際的染織、印刷及相片沖洗業對於色彩重現 (color reproduction) 非常注重，雖然用人的眼睛來辨識色彩可以做到某種程度的色彩重現工作，但是這種方式無法量化亦不符合實際效益。因此使用大家同意的光源及偵測器 (detector)，就可用來度量基本的色彩，光密度計就是依照這種原理發展而成。

光密度 (optical density) 概分為兩種，一種是反射密度  $D_r$ ，另一種是透射密度  $D_t$ ，其定義分別如下：

$$D_r(\lambda) = \log_{10} \frac{1}{R(\lambda)}$$

$$D_t(\lambda) = \log_{10} \frac{1}{T(\lambda)}$$

其中  $R(\lambda)$  為反射率 (reflectance) 即反射光與入射光功率之比值， $T(\lambda)$  為穿透率 (transmittance) 即透射光與入射光功率之比值。

藉著量測照片之反射光與投影片之透射光中紅、綠、藍三種色彩成分之比例，就可以做為複製品色彩之評估與重現。

### 二、結構示意圖

圖 1 是反射式光密度計之光學結構圖，光線自標準光源發出經凸透鏡聚焦後，入射至樣品表面，

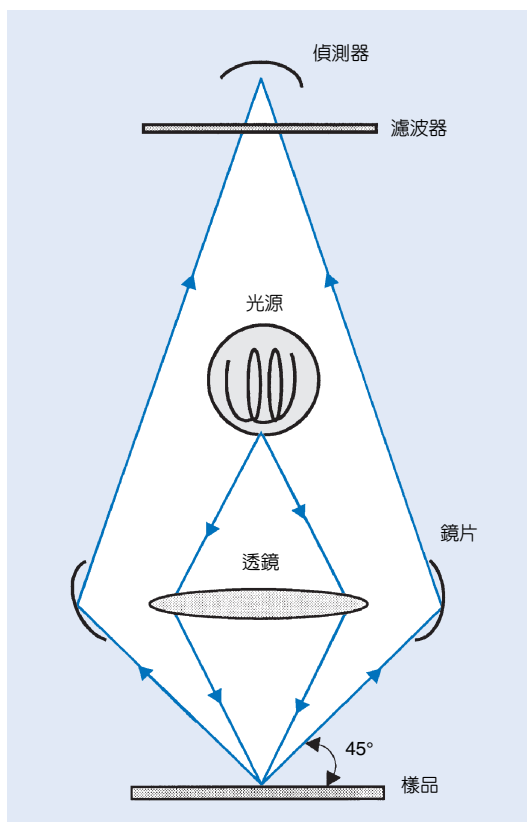


圖 1. 反射式光密度計之光學結構圖。

再依 ANSI (1974) 之規定於入射光垂直入射面夾角 45 度處收集反射光 (見圖 1)，最後再分別經過紅、綠、藍三種濾波器而得到三種光密度值。

圖 2 是穿透式光密度計之光學結構圖，光線由標準光源發出經透鏡及鏡片後，聚焦在樣品上，收集在與入射光平行處之透射光，再經濾波器後由偵測器收集到不同之光密度值。

### 三、儀器規格與特徵

光密度計除了使用之光源與偵測器需要遵照公認之標準 (例如 ANSI) 外，使用之濾波器可使用 Dawson 和 Vogelsong 建議之 MM 濾波器 (量測反射

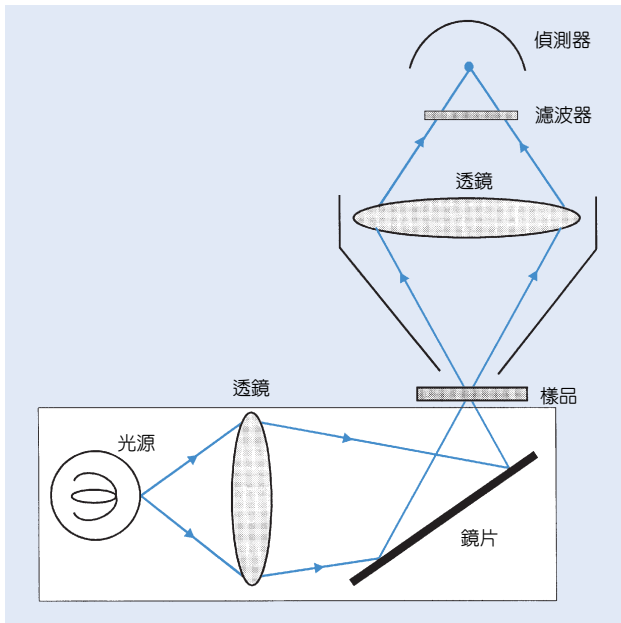


圖 2. 穿透式光密度計之光學結構圖。

密度) 或 AA 濾波器 (量測透射密度)，以建立標準光密度計頻譜響應 (見圖 3 及圖 4) 做為量測之準則。而標準校正色板可遵循 ISO 5/2、ISO 5/3 及 ISO 5/4 之規範而製作。

#### 四、應用

在彩色工業，例如染織、印刷及相片沖洗業，光密度計常被用來評估與監視在色彩重現的過程中，是否有顏色與原樣品不一致之情形發生，以確保色彩的品質。在彩色印表機的開發中各種顯像用的彩色碳粉、墨水或色帶之選用也常透過光密度計來評估其色彩之表現。

#### 參考文獻

1. ANSI, USA (1974).
2. CIE *Colorimetry*, 2nd ed., No 15, 2 (1986).
3. France Grum, C. James Bartleson, *Optical Radiation*

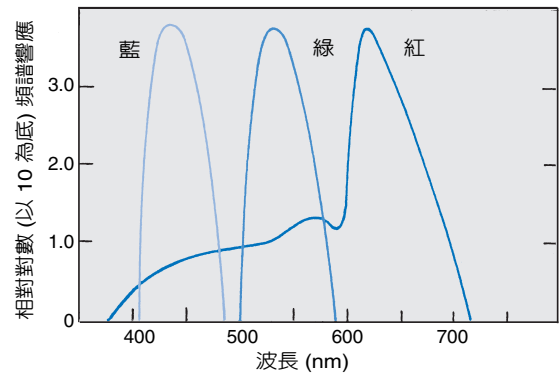


圖 3. 以 MM 濾波器建立之公認反射式光密度計頻譜響應標準，用於量測印刷品之列印密度 (printing densities)。

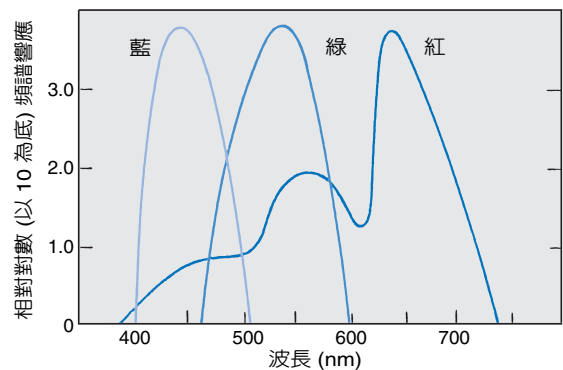


圖 4. 以 AA 濾波器建立之公認穿透式光密度計頻譜響應標準，用於量測正片或投影片之積分密度 (integral densities)。

*Measurements*, 1, 2, Florida: Academic Press (1980).

4. R. W. G. Hunt, *The Reproduction of Colour in Photography, Printing & Television*, England: Fountain Press (1987).

5. 光電科技辭典, 行政院國科會光電小組編印 (1994).

作者：許瑞倉先生為國立中正大學物理碩士，現任工業技術研究院光電研究所列印元件技術部顯像技術課副工程師。

# 菲佐干涉儀

## Fizeau Interferometer

關鍵字：干涉儀、相位移、像差

Keywords：interferometer, phase shift, aberration

### 一、基本原理與結構示意圖

在光學量測之領域中菲佐干涉儀 (Fizeau interferometer) 與牛頓干涉儀 (Newton interferometer) 同為最簡單且最有用之量測工具，都是利用標準參考面與待測面之間的光程差所產生的干涉條紋來評估待測面光學品質之好壞，在此僅對菲佐干涉儀作一簡單介紹。

Fizeau 干涉儀之基本架構如圖 1 所示，由圖中所示：光源通過針孔 (pinhole) 及準直鏡 (collimating lens) 後，形成一平行光。此平行光通過穿透元件 (transmission element) 時，部份光被穿透元件之參考面 (reference surface) 反射回去，另一部份光則通過穿透元件 (transmission element)，照射至待測物體上，稱為量測光 (或稱照物光)。當照物光被待測物體之表面反射回去，通過穿透元件，與參考光會合，便產生干涉。我們可以在光源及準直鏡之間加一分光鏡 (beam splitter)，使得被反射回去的參考光及物體光能夠被分光鏡反射至螢幕 (screen) 上，或經由 CCD 取像使我們可以看到此干涉光所形成之干涉條紋。

當待測面為一光學平面時，菲佐干涉儀所使用之穿透元件為一穿透平板 (transmission plate)，如圖 1 所示。若欲量測具有凹、凸表面之光學元件時，則此時所使用之穿透元件更換為穿透球面鏡

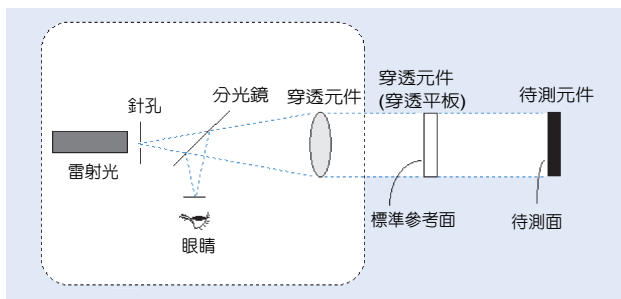


圖 1. 菲佐干涉儀之基本架構。

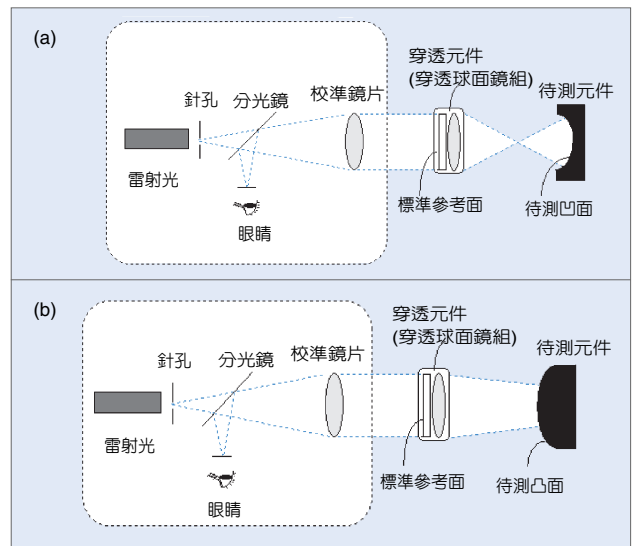


圖 2. (a) 測凹光學面時之菲佐干涉儀架構，(b) 測凸光學面時菲佐干涉儀架構。

(transmission sphere lens)，如圖 2、圖 3 所示。圖 2(a)、圖 2(b) 所示，分別為量測凹面、凸面之光學面時之菲佐干涉儀架構。

若待測物體之光學表面為非球面時，則穿透元件 (transmission element) 必須是零鏡片 (null lens)。

欲對干涉條紋進行運算分析，尚需一套運算法則，最常被用到的為相位移干涉術 (phase shift interferometry)，當菲佐干涉儀與相位移干涉術結合，便可進行完整之波面量測分析了。相位干涉術乃是將參考面或待測物體移動一個位置，使得參考光與物體光之間的相位差改變。連續推動參考面或待測物體，將造成參考光與物體光之間的相位連續變化。將此連續變化之干涉條紋記錄下來，對此連續相位變化之干涉條紋進行相位重建之運算分析，便可得到待測波面之相位重建資料，亦即得到待測波面之形狀資料了。利用此相位重建資料進行查涅克多項式 (Zernike polynomial) 之數學運算，以

得到查涅克多項式之各項係數，進而可得到有關待測面之球差 (spherical aberration)、彗差 (coma aberration)、像散 (astigmatism aberration)、離焦 (afocus) 及傾斜量 (tilt) 之運算資料。另外，亦可利用此相位重建資料進行數學運算，以得到訊制傳遞函數 (modulation transformation function, MTF)、點擴散函數 (point spread function, PSF) 之資料。

## 二、儀器規格及特徵

目前市面上製造菲佐干涉儀產品之公司有：Zygo 公司 (美國)、Wyko 公司 (美國)、Phase Shift Technology 公司 (美國)、光群公司 (台灣)、Fuji 公司 (日本)、Olympus 公司 (日本) 等多家廠商。

主要的規格差異在於光源功率、影像擷取速度、影像放大倍率範圍、影像解析度、光源出口孔徑大小，以及是否有相位移調變機構與量測分析軟體等。另外，亦必須注意是否有不同焦比值 (F-number) 之穿透元件 (或俗謂之標準轉換鏡頭) 可搭配，以測量不同焦比值範圍之透鏡或不同直徑範圍之反射面鏡。

其部份產品型式規格如下：

- (1) 光源：He-Ne Laser (1 mW)
- (2) 校正精密度： $< \lambda/100$  rms
- (3) 峰谷值重複性 (repeatability of peak-to-valley)： $< \lambda/100$
- (4) 均方根值重複性 (repeatability of rms)： $< \lambda/1000$
- (5) 測量光直徑：4 inch 或 6 inch
- (6) 光瞳成像 (pupil imaging)：6：1 連續變焦成像 (continuous zoom imaging with 6：1 range)
- (7) PI-相位：相位移接合器 (phase shift adaptor)
- (8) 數據獲得時間： $< 167$  msec
- (9) 訊號輸出：standard RS-170
- (10) 數位解析度：287 (H)  $\times$  244 (V)
- (11) 電源設備：110 VAC、60 Hz、500 Watts

## 三、應用

菲佐干涉儀除了可對具有凹、凸或平面之光學元件表面進行反射波面性質量測之外 (如圖 1、圖 2 所示)，尚可進行透鏡之穿透波面性質量測，其架構如圖 3 所示。

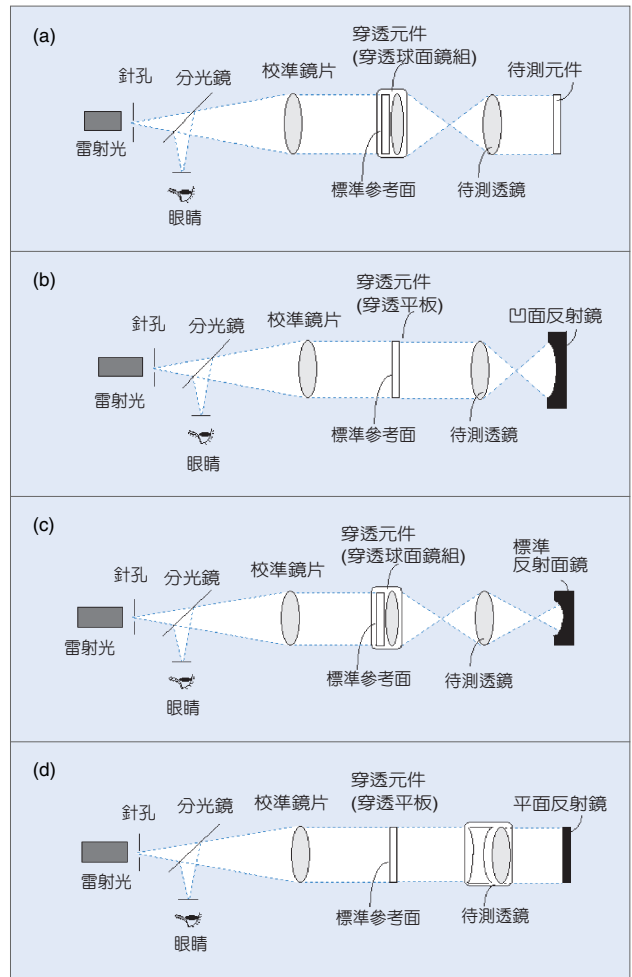


圖 3. 菲佐干涉儀應用於透鏡之穿透波面性質量測。

除此之外，我們尚可利用直角稜鏡及角隅立方稜鏡 (corner cube) 之穿透及反射波面量測，進行直角稜鏡及角隅立方稜鏡之偏差角度之運算分析。另外，我們亦可利用光學平板或光窗 (window) 之穿透及反射波面量測，進行其楔形角度之量測運算分析，其量測之光學架構分別如圖 4 與圖 5 所示。而其偏差角度之計算則為：

$$\varepsilon = \frac{k}{d} \times \frac{\lambda}{4NL}$$

其中： $k$  為直線條紋之變形量， $N$  為稜鏡之折射率， $\pi/2 \pm \varepsilon$  為稜鏡之角度， $d$  為兩個條紋之間的距離， $\lambda$  為光源波長， $L$  為稜鏡表面之半寬度。

綜合上述，我們可歸納菲佐干涉儀可量測之光學元件及光學性質如下：

- (1) 平面鏡、凹面鏡、凸面鏡之光學表面品質量測。

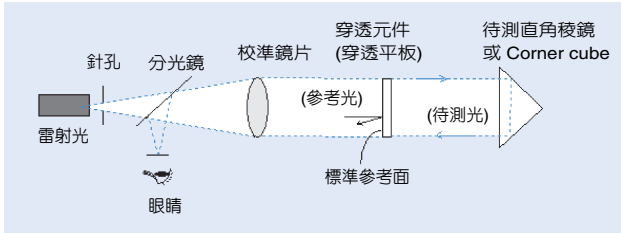


圖 4. 角隅立方稜鏡量測之光學架構。

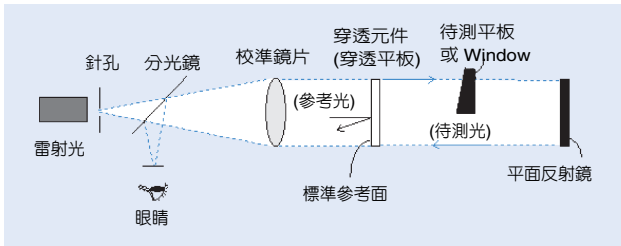


圖 5. 光楔或光學平板量測之光學架構。

- (2) 透鏡之光學表面品質量測及穿透波面性質量測。
- (3) 光窗或光學平板之光學表面品質量測及偏差角度量測。
- (4) 角隅立方稜鏡之偏差角度量測、穿透及反射之光學波面性質量測。
- (5) 曲率半徑量測：當菲佐干涉儀之裝置加上數位尺 (digital meter) 時，即可進行凹、凸光學面之曲率半徑量測。

#### 參考文獻

1. D. Malacara, *Optical Shop Testing*, John Wiley & Sons, Inc. (1992).
2. WYKO 干涉儀使用手冊。

作者：吳宜玲小姐為中原大學應用物理碩士，現任工業技術研究院光電工業研究所副工程師。

# 邁克爾遜干涉儀

## Michelson Interferometer

**關鍵字：**干涉、相干(同調)、干涉學、干涉儀、光程差、干涉圖

**Keywords：** interference, coherence, interferometry, interferometer, optical path difference, interferogram

### 一、基本原理

邁克爾遜干涉儀為一應用極為廣泛之光干涉儀器，由美國科學家 Albert Abraham Michelson (1852 – 1931 年) 所發明，故後人將此類型之干涉儀通稱之為邁克爾遜干涉儀。其基本原理是利用光之波動性質，使兩束光相遇時產生干涉現象，出現明暗不同的干涉條紋，並據此來分析光波或產生該光波的光學元件之特性。

光波相遇時發生振幅相加(非強度相加)之現象稱為光干涉。但兩束光相遇時並不一定會產生干涉現象，僅在符合下列基本條件時方能互相干涉：

1. 波長(頻率)相等(或極接近)；
2. 振動面不相互垂直；
3. 有穩定的初始相位差。

滿足此條件的光稱為相干光(或同調光)。設兩同頻率相干光波  $E_1$ 、 $E_2$  為：

$$E_1 = A_1 e^{i\omega t}$$

$$E_2 = A_2 e^{i\omega t}$$

式中， $A_1$ 、 $A_2$  分別為兩光波之複振幅 (complex amplitude)； $A_1 = A_{01} e^{i\phi_1}$ ， $A_2 = A_{02} e^{i\phi_2}$ ， $A_{01}$ 、 $A_{02}$  分別為兩光波之實振幅 (real amplitude)， $\phi_1$ 、 $\phi_2$  為兩光波之相位； $\omega$  為光波頻率。此兩相干光波相遇時產生振幅相加之干涉現象，合成波為  $E = Ae^{i\omega t}$ ， $A$  為其複振幅，等於兩相干光波複振幅之和，即：

$$A = A_1 + A_2$$

$$= A_{01} e^{i\phi_1} + A_{02} e^{i\phi_2}$$

其平方為：

$$A^2 = A \cdot A^*$$

$$= (A_{01} e^{i\phi_1} + A_{02} e^{i\phi_2})(A_{01} e^{-i\phi_1} + A_{02} e^{-i\phi_2})$$

$$= A_{01}^2 + A_{02}^2 + 2 A_{01} A_{02} [e^{i(\phi_1 - \phi_2)}]$$

$$= A_{01}^2 + A_{02}^2 + 2 A_{01} A_{02} \cos(\phi_1 - \phi_2)$$

合成波光強度  $I$  等於其時間平均值：

$$I = \langle A^2 \rangle$$

$$= \langle A_{01}^2 \rangle + \langle A_{02}^2 \rangle + 2 \langle A_{01} A_{02} \rangle \cos(\phi_1 - \phi_2)$$

$$= I_1 + I_2 + 2 \sqrt{I_1 I_2} \cos(\phi_1 - \phi_2)$$

式中， $I_1$ 、 $I_2$  分別為兩光波之光強度， $(\phi_1 - \phi_2)$  為兩光波相位差。上式即為光干涉之基本方程式，由此式知，合成波光強度中除兩光波光強度之和外尚有第三項，它與兩光波相位差有關，如圖 1 所示，因此，當相位差  $(\phi_1 - \phi_2) = 0, 2\pi, \dots, 2m\pi$  ( $m = 0, 1, 2, \dots$ ) 時，合成波光強度有極大值，等於  $I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2}$ ；當相位差  $(\phi_1 - \phi_2) = \pi, 3\pi, \dots, (2m + 1)\pi$  ( $m = 0, 1, 2, \dots$ ) 時，合成波光強度有極小值，等於  $I_1 + I_2 - 2\sqrt{I_1 I_2}$ 。同時，由於相位差  $(\phi_1 - \phi_2) = \frac{2\pi}{\lambda}(x_1 - x_2)$ ，其中  $\lambda$  為波長， $x_1$ 、 $x_2$  分別為兩光波走過之路程， $(x_1 - x_2)$  稱為光程差，因此合成波光強度又可表之為兩光波光程差之函數：

$$I = I_1 + I_2 + 2 \sqrt{I_1 I_2} \cos \frac{2\pi}{\lambda}(x_1 - x_2)$$

合成波光強度極大值發生在光程差  $(x_1 - x_2) = 0, \lambda, \dots, m\lambda$  ( $m = 0, 1, 2, \dots$ ) 即光程差等於波長之整數倍處；合成波光強度極小值發生在光程差  $(x_1 - x_2) = \frac{\lambda}{2}, \frac{3\lambda}{2}, \dots, (2m + 1)\frac{\lambda}{2}$  ( $m = 0, 1, 2, \dots$ )

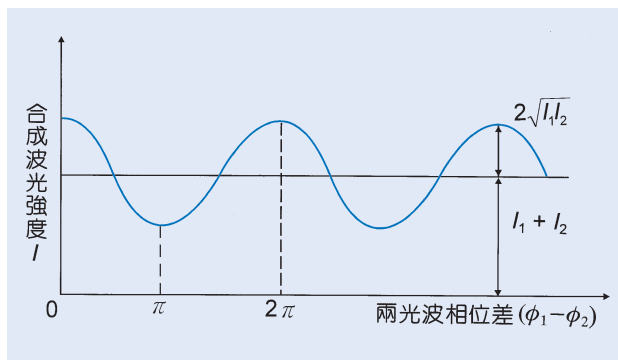


圖 1. 雙光束干涉光強度分析。

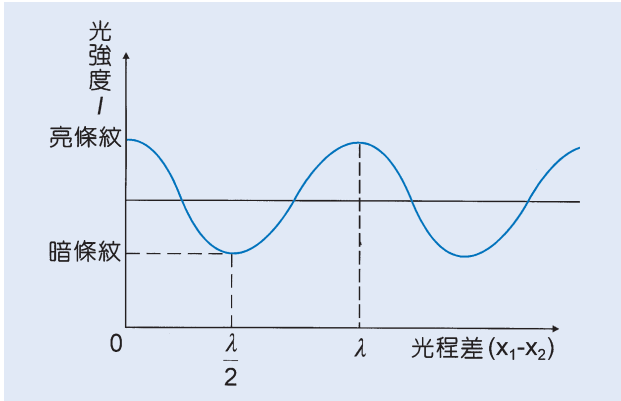


圖 2. 干涉條紋與光程差之關係。

2、……) 即光程差等於半波長之奇數倍處。而出現之干涉條紋即為具有相同光強度諸點之連線，故光強度極大值處形成亮條紋，極小值處形成暗條紋。亮暗干涉條紋與光程差之關係可表之如圖 2。

故當由亮條紋至相鄰亮條紋，或由暗條紋至相鄰暗條紋時就意味著光程差改變一個光波波長。由於光之波長值極小，因此應用光波干涉技術可獲得極高之量測解析度與精確度。

## 二、基本結構

邁克爾遜干涉儀基本結構如圖 3 所示，其光路設計為十字形，入射光線 **1** 行進至分光玻璃平板 **2** 時，被其上所鍍之分光膜分為兩束；一束為透射光，穿過 **2** 後射至反射鏡 **5** 被反射折回至 **2**，並於進入 **2** 時又被分光膜反射回來成為出射光線 **6**；另一束為反射光，被分光膜反射後穿過 **3** 射至反射鏡 **4**，同樣被反射折回，穿過 **3**、**2** 後亦成為出射光線 **6**，因此，出射光線 **6** 中包含兩條被反射鏡 **4**、**5** 反射折回之光線。因為此兩條光線符合前述之相干條件，遂產生干涉現象，出現明暗相間的干涉條紋。Michelson 利用其發明之干涉儀於 1896 年完成了著名的將當時作為國際長度基準之鉑—銻米尺與光波波長直接比較量測之實驗。

Michelson 在其干涉儀中採用的是寬廣光源，入射光線為一發散的光錐，出現的干涉條紋為同心圓狀的環形條紋（等傾條紋）。其後，英國科學家 Frank Twyman 於 1916 年將之改變為將光源置於一透鏡之焦平面上，使入射光源成為平行光束，經如此改變後出現的干涉條紋成為平行直線的帶狀條紋

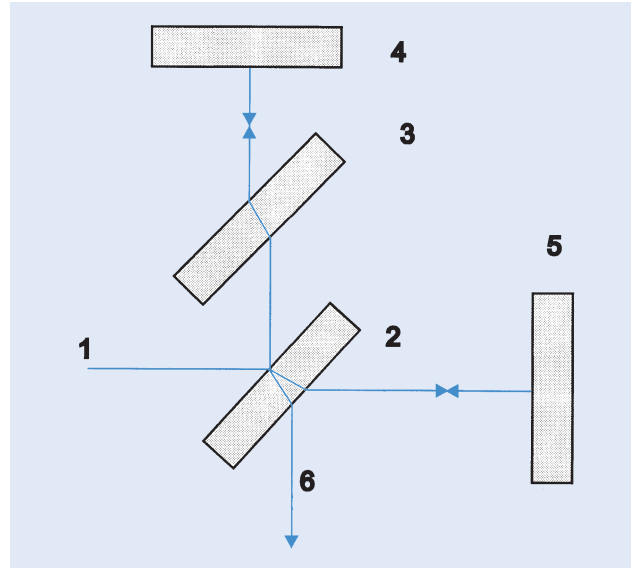


圖 3. 邁克爾遜干涉儀。1：入射光線，2：分光玻璃平板，3：補償玻璃平板，4、5：反射鏡，6：出射光線。

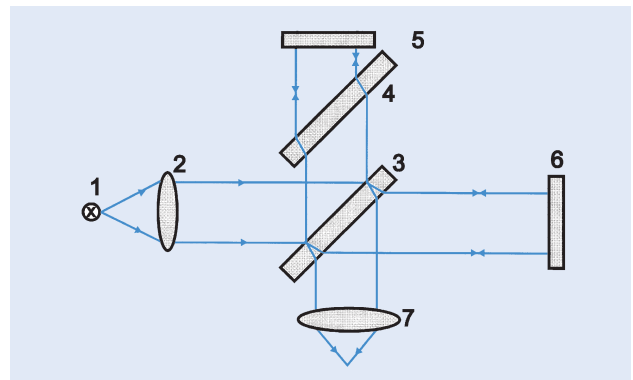


圖 4. 泰曼干涉儀。1：光源，2：準直透鏡，3：分光玻璃平板，4：補償玻璃平板，5、6：反射鏡，7：接收透鏡。

(等厚條紋)。後人亦有稱此種類型之干涉儀為泰曼干涉儀 (Twyman interferometer)。其基本結構如圖 4 所示，與圖 3 不同處是增加了準直透鏡 2，光線在儀器中之行進路程則與圖 3 相同。

邁克爾遜干涉儀於其發明後至今漫長歲月中已經許多科學家作了不少的修飾與改變，如以四方稜鏡代替分光鏡，以角隅稜鏡代替反射鏡，接收改用光電接收器等，近代更發展了許多自動判斷分析干涉條紋的軟體。但是所有這些經過變化修飾後的儀器仍被歸屬為邁克爾遜干涉儀。

表 1. 邁克爾遜干涉儀的應用示意圖。

用途	示意圖	說明
量測位移		由於反射鏡移動每半個光波波長值使接收處光強度明暗變化一次，故以電子計數器記錄下來之變化次數即代表反射鏡之位移距離。
量測長度		1 為被測物，將之貼附在反射鏡 2 上，根據上下表面反射光形成之不同干涉圖可精確測定被測物之長度。
量測平面精度		1 為標準平面鏡，2 為被測物，由干涉圖可精確測定其平面精度。
量測凸球面精度		1 為標準透鏡，2 為被測凸球面，由干涉圖可精確測定其球面形狀精度。
量測凹球面精度		同上，被測物為凹球面。
量測透鏡像差		1 為被測透鏡，由干涉圖可測定其像差。
量測平面平行度 折射率		1 為被測玻璃平板，由干涉圖可精確測定其平面平行度、玻璃折射率。
量測表面粗糙度		1、2 為一組標準顯微物鏡，3 為被測物，由干涉圖可精確測定其表面微觀粗糙度。
測定紅外光譜成分		1 為光電接收器，2 為凹面鏡，由反射鏡 3 移動產生接收器上之光強度變化曲線可測定入射光波之紅外光譜成分。

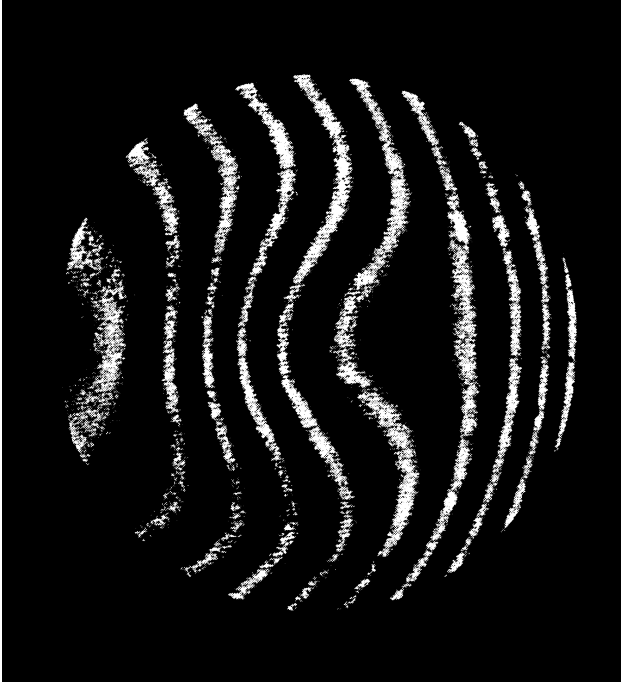


圖 5. 透鏡像差干涉圖。

### 三、儀器規格

邁克爾遜干涉儀的主要規格為光束尺寸的大小及反射鏡、分光鏡的表面平面度精度。光束尺寸愈大，鏡面平面度愈高，價格愈昂貴。目前常見的光

束大小為數公分至 15 公分，鏡面平面度為  $1/10$  至  $1/20$  波長。其它如配備何種光源 (各種光譜燈或雷射)，以及是否有照相附件，是否具備干涉條紋自動分析軟體等亦是衡量儀器性能規格之重要項目。

### 四、用途

邁克爾遜干涉儀之應用極為廣泛，舉凡精密量測之各個領域如：長度、角度、位移、平面或球面形狀精度、玻璃折射率、玻璃平板兩表面平行度、光學鏡片表面形狀精度、光學透鏡像差等，甚至可用以測定物體的紅外光譜成分 (傅立葉光譜儀)。表 1 為其應用示意圖，圖 5 為檢測光學透鏡像差時出現之干涉條紋圖。

### 參考文獻

1. C. Candler, *Modern Interferometer*.
2. J. Dyson, *Interferometer as a Measuring Tool*.
3. M. Fracon, *Optical Interferometry*.
4. P. Hariharen, *Optical Interferometry*.
5. W. H. Steel, *Interferometry*.

---

作者：張良知先生現任國科會精密儀器發展中心顧問。

# 馬赫－陳德干涉儀

## Mach-Zehnder Interferometer

**關鍵字：**干涉、干涉學、干涉儀、光程差、干涉圖、風洞

**Keywords：** interference, interferometry, interferometer, optical path difference, interferogram, wind tunnel

### 一、基本原理

馬赫－陳德干涉儀為一應用廣泛之光干涉儀器，由德國學者 L. Mach 與 L. Zehnder 所發明，後人遂以其姓氏命名之，其最重要之應用為空氣動力學研究。其基本原理為利用光之波動性質，使兩束光相遇時產生干涉現象，由於其中一束光係穿過被研究之氣室（風洞）者，故由產生之干涉圖像可分析氣室中氣體分佈特性。有關光干涉之基本原理請參閱「邁克爾遜干涉儀」一文。

### 二、結構示意圖

馬赫－陳德干涉儀基本結構如圖 1 所示。其光路設計為矩形或平行四邊形，入射光線 1 行進至分光鏡 2 時分成兩束光，一束為透射光，穿過 2 後經過補償玻璃 7 射至反射鏡 8，被其反射折向合光鏡 6；另一束為反射光，折向反射鏡 3，再反射折向並穿過待研究之氣室 4，亦行進至合光鏡 6，在此兩束出射光線會合產生干涉。由於其中一束光線穿

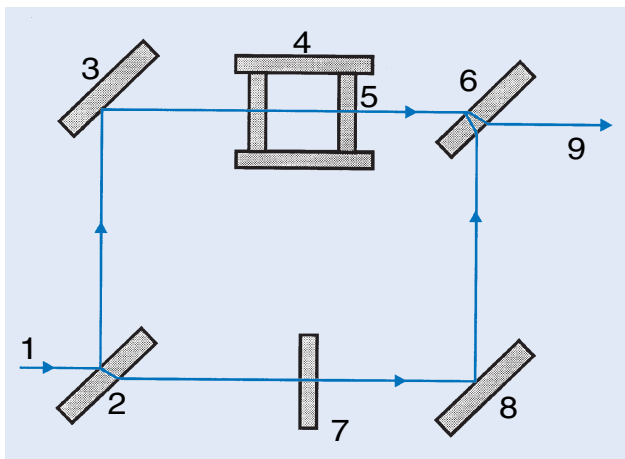


圖 1. 馬赫－陳德干涉儀。1—入射光線，2—分光鏡，3、8—反射鏡，4—氣室（風洞），5—氣室窗口玻璃，6—合光鏡，7—補償玻璃，9—出射光線。

過氣室 4，此氣室中之氣體密度（或壓力）分佈狀況造成光波光程差之不同，故而形成精確反映氣室內部狀況之干涉圖像。

### 三、儀器規格

馬赫－陳德干涉儀的主要規格為光束尺寸之大小及反射鏡、分光鏡、合光鏡的表面平面度精度。光束尺寸愈大可研究之氣室面積愈大，自然儀器價格亦愈昂貴。馬赫－陳德干涉儀使用兩種光源：白熾燈（或閃光燈）及單色光源（如雷射等），因為干涉圖像需要記錄下來，故尚配有照相附件。

### 四、用途

馬赫－陳德干涉儀主要用途為量測氣室中氣流分佈特性，此氣室為一人工風洞，將研究對象如機翼、機身、彈身等模型放入風洞中，它在高速氣流中造成的氣流分佈狀況，即可精確反映在拍得的干涉圖像中。圖 2 為一機翼超音速試驗結果。

馬赫－陳德干涉儀除在空氣動力學研究之應用外，尚有許多其它應用，例如圖 3 所示，當微量轉

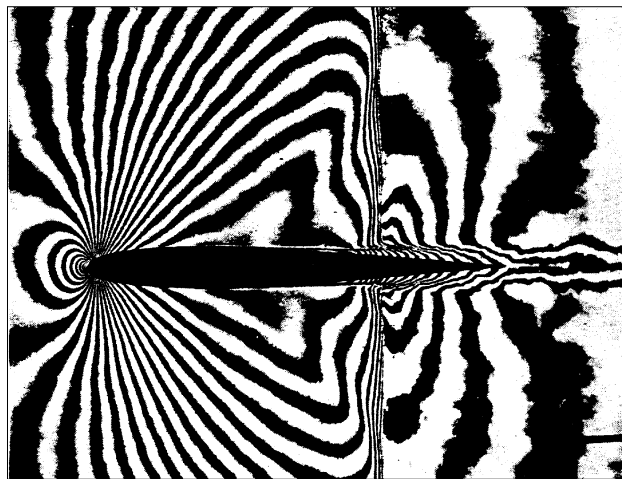


圖 2. 波面剪切干涉。

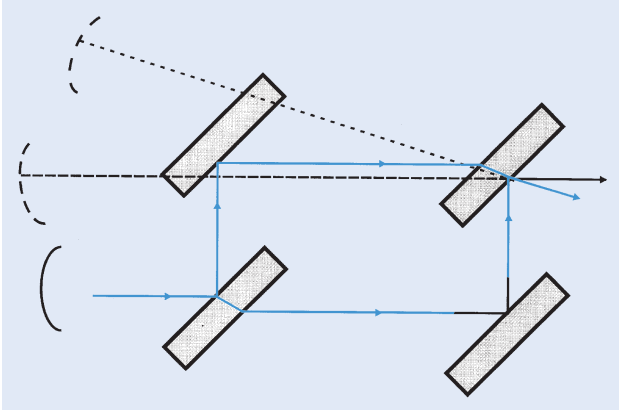


圖 3. 機翼超音速風洞試驗干涉圖。

動其中之合光鏡時可造成兩出射光波之橫向位移，產生所謂剪切 (shearing) 干涉圖，從而量測入射光波波面之品質。

#### 參考文獻

1. C. Cander, *Modern Interferometer*.
2. J. Dyson, *Interferometer as a Measuring Tool*.
3. M. Fracon, *Optical Interferometry*.
4. P. Hariharen, *Optical Interferometry*.
5. W. H. Steel, *Interferometry*.

作者：張良知先生現任國科會精密儀器發展中心顧問。

# 橫向剪切干涉儀

## Lateral Shear Interferometer

**關鍵字：**橫向剪切干涉儀、朗其測試、非球面量測

**Keywords：**lateral shear interferometer, Ronchi test, aspheric surface test

### 一、基本原理

干涉儀基本上是利用干涉條紋觀察待測波面與參考波面的比較。橫向剪切干涉儀則是將平行光波面之本身波面與橫向位移之分身波面兩者作比較。平行光波面亦可以換成是球形波面，此時的橫向位移則為以球形波面之球心為軸之轉動。

若平行光為完全之平行光，或球形波面為完全之球形波面，原波面與位移後之波面的干涉，應該完全不顯現干涉條紋。所以由干涉條紋的多少可以得知所量測波面偏離平行光或球面波的多少。

橫向剪切干涉儀可以直接由干涉條紋觀察到量測波面所帶有的像差，例如非聚焦 (defocus)、傾角 (tilt)、球差 (spherical aberration)、彗差 (coma aberration)、非點像差 (astigmatism) 等。也可以經由計算波面之相位差，推知量測波面與理想球面波之差異，由波面的形狀甚至可得知測量物體的形狀。

#### 1. 由干涉條紋判別像差

若波面像差為  $W(x, y)$ ，則  $x$  方向橫向位移  $S$  分量之波面誤差為  $W(x, y)$ ，兩者之差為  $\Delta W = W(x, y) - W(x + S, y)$ ，當  $S$  很小， $\Delta W$  可寫成是  $\left(\frac{\partial W}{\partial x}\right)S$ 。各種像差在橫向剪切干涉儀之下顯示的干涉條紋如下。

##### (1) 非聚焦

非聚焦之波面誤差可以表示成  $W(x, y) = D(x^2 + y^2)$ ，因此剪切後干涉條紋可表示成  $\Delta W = 2D \times S = n\lambda$ ，顯示干涉條紋為垂直於剪切方向之等間隔直線條紋。

##### (2) 傾角

傾角之光程差是座標的線性函數，表示傾角可用  $\Delta W = Ey = n\lambda$ ，其中  $E$  是原始波面和剪切波面

的傾角。當傾角和非聚焦並存時，干涉條紋為  $\Delta W = 2D \times S + Ey = n\lambda$ ，顯示干涉條紋為不平行於  $x$  或  $y$  方向之等間隔直線條紋。

##### (3) 球差

球差之波面誤差可以表示成  $W(x, y) = A(x^2 + y^2)^2$ ，因此剪切後干涉條紋為  $\Delta W = 4A(x^2 + y^2) \times S = n\lambda$ ，顯示干涉條紋為垂直於剪切方向之三次曲線條紋。

##### (4) 彗星像差

彗星像差之波面誤差可以表示成  $W(x, y) = B y(x^2 + y^2)$ 。當剪切發生在  $x$  方向，干涉條紋的形狀由  $\Delta W = 2BxyS = n\lambda$  的式子決定，顯示干涉條紋為正方雙曲線。當剪切發生在  $y$  方向，干涉條紋的形狀由  $\Delta W = B(x^2 + 3y^2)T = n\lambda$  的式子決定，顯示干涉條紋為橢圓曲線。

##### (5) 非點像差

非點像差之波面誤差可以表示成  $W(x, y) = C(x^2 - y^2)$ 。當剪切方向正好是  $x$  或  $y$  方向時，干涉條紋是垂直於剪切方向的直線條紋，因此極易誤認為是理想球面波。這時可在干涉儀中引入非聚焦，此時  $x$  方向之干涉條紋為  $\Delta W = (2Dx + 2Cx)S = n\lambda$ ，而  $y$  方向之干涉條紋為  $\Delta W = (2Dy - 2Cy)S = n\lambda$ ，當  $D = -C$  或  $+C$  時，都可觀察到完全無干涉條紋的情形。

##### (6) 場曲和畸變

場曲可視為一種非聚焦。畸變是瞳孔變數的線性函數，不能由一般方法測得。

##### (7) 色差

縱向色差相當於是不同波長引起的非聚焦，藉

改變光源波長，觀察是否有非聚焦形式的干涉條紋可知。橫向色差也是瞳孔變數的線性函數，不能由一般方法測得。

## 2. 由計算得知波面相位差

波面可由函數  $W(x, y)$  表示

$$W(x, y) = \sum_{n=0}^k \sum_{m=0}^n B_{nm} x^m y^{n-m}$$

為了重建整個波面，在  $x$  方向取  $S$  的剪切量，在  $y$  方向取  $T$  的剪切量，得下兩式：

$$W(x + S, y) = \sum_{n=0}^k \sum_{m=0}^n B_{nm} (x + S)^m y^{n-m}$$

$$W(x, y + T) = \sum_{n=0}^k \sum_{m=0}^n B_{nm} x^m (y + T)^{n-m}$$

利用 Binomial 原理，上兩式可以整理成以下兩式：

$$W(x + S, y) = \sum_{n=0}^k \sum_{m=0}^n \sum_{j=0}^m B_{nm} \binom{m}{j} x^{m-j} y^{n-m} S^j$$

$$W(x, y + T) = \sum_{n=0}^k \sum_{m=0}^n \sum_{j=0}^{n-m} B_{nm} \binom{n-m}{j} x^m y^{n-m-j} T^j$$

將剪切後波面與原波面作比較，計算兩波面之差量，得下兩式：

$$\Delta W_S = W(x + S, y) - W(x, y) = \sum_{n=0}^{k-1} \sum_{m=0}^n C_{nm} x^m y^{n-m}$$

$$\Delta W_T = W(x, y + T) - W(x, y) = \sum_{n=0}^{k-1} \sum_{m=0}^n D_{nm} x^m y^{n-m}$$

以上兩式對應於橫向剪切干涉儀量得的干涉條紋，其中

$$C_{nm} = \sum_{j=1}^{k-n} \binom{j+m}{j} S^j B_{j+n, j+m}$$

$$D_{nm} = \sum_{j=1}^{k-n} \binom{j+n-m}{j} T^j B_{j+n, m}$$

$C_{nm}$  和  $D_{nm}$  由干涉條紋利用最小二乘法計算得到。由上兩式， $C$ 、 $D$ 、 $S$  和  $T$  已知，解方程式可得  $B$ 。原波面誤差可由  $B$  組成之多項式函數表示出。

## 二、結構示意圖

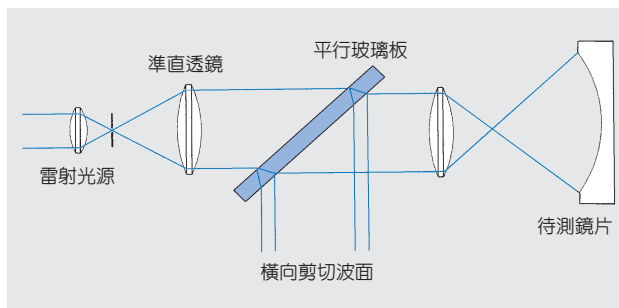


圖 1. 利用平行玻璃板之橫向剪切干涉儀。

橫向剪切干涉儀的結構，依如何作剪切這個動作，有很多種類。最簡單的一種是利用平行玻璃板的方式。雷射光經聚光透鏡及空間濾波器，得到理想點光源，再經準直透鏡變成平行光，再經透鏡變成球面波，球面波經待測鏡片反射後，帶著測量的訊息，再經透鏡變成平行光，到平行玻璃板後，在平行玻璃板的第一面和第二面反射，兩反射波面依平行板的厚度會錯開一平移量。

## 三、儀器規格與特徵

橫向剪切干涉儀的種類非常多，主要依光源是使用白色光源或雷射光源分成兩類。在雷射光發明以前，考慮白光的同調性是很重要的因素。白光的橫向剪切干涉儀除了要能提供原波面與剪切波面的干涉外，須保持剪切的兩波面所經的光程等長。因為所用光學結構的關係，作剪切時的波面，有的利用球面波，有的利用平行光。待測波面須經透鏡轉換成適合的波面。用平行玻璃板作橫向剪切干涉

表 1. 橫向剪切干涉儀之種類。

系統結構	光源	量測波面	剪切量
Jamin 干涉儀	白光	平行光	可調
Michelson 干涉儀	白光	皆可	可調
Cyclic 干涉儀	白光	平行光	可調
Triangular 干涉儀	白光	平行光	可調
Mach-Zehnder 干涉儀	白光	皆可	可調
兩厚平凸透鏡	白光	球面波	固定
兩稜鏡	白光	球面波	可調
平行板	雷射	平行光	固定
兩玻璃片	雷射	平行光	可調

儀，結構最簡單，但剪切量隨玻璃厚度而決定。如果用兩玻璃板，調整玻璃板間厚度就可改變剪切量。改變剪切量可以改變干涉儀對像差量的敏感度。

#### 四、應用與用途

橫向剪切干涉儀主要用在量測波面所帶之訊息。這個訊息可能是像差，可能是波面受到的擾動，也可以是待測物形狀的偏離。一般常見的用途有以下幾種。

##### 1. 量測鏡頭性能

將平行光通過鏡頭，出來的波面經過橫向剪切干涉儀，由干涉條紋的形狀及多少，得知像差的種類和大小。另外橫向剪切的動作，恰等於 Convolution 的作用，橫向剪切干涉儀稍加改裝，亦可以直接量測 MTF。

##### 2. 判別平行光

用一片平行玻璃片，觀察波面經由第一面反射和第二面反射的干涉條紋，是最簡單的判斷平行光的方法。

##### 3. 量測玻璃材質均勻度

將平行光通過待測玻璃材質，出來的波面經橫向剪切後，由波面之相位差，計算材質的不均勻度。

##### 4. 量測曲率半徑

將平行光經聚光後成球面波，利用干涉儀判別平行光的能力，決定待測球面鏡置於聚光點和重合球面波的位置，記錄中間移動距離就得曲率半徑。

##### 5. 大口徑風洞實驗

將平行光通過風洞，出來的波面經橫向剪切後，由波面之相位差，計算待測物之變化。

##### 6. 非球面形狀量測

用干涉儀量測非球面形狀是由干涉條紋計算出非球面與參考球面之差量。因為差量常太大，普通干涉儀所得干涉條紋往往太密，這時就可利用橫向剪切干涉儀降低對差量的敏感度，先得到干涉條紋，經解析得到位相差，換算得到波面的差量，推算出非球面的形狀。

#### 參考文獻

1. D. MaLacara, *Optical Shop Testing*, A Wiley-Interscience Publication (1992).
2. M. P. Rimmer, & J. C. Wyant, *Appl. Opt.*, **14**, 142 (1975).
3. M. V. R. K. Murty, *Appl. Opt.*, **3**, 535 (1964b).
4. M. V. R. K. Murty, *Appl. Opt.*, **3**, 531 (1964b).

---

作者：黃俊杰先生為日本東京工業大學工學博士，現任工業技術研究院光電研究所研究員。

# 光學式粗度量測儀

## Optical Profiler

**關鍵字：**光學粗度量測儀、干涉儀

**Keywords：** optical profiler, interferometer

### 一、基本原理與結構示意圖

粗度量測儀係用以測量物體表面的粗糙程度，或是表面極小區域的幾何形狀。一般粗度量測儀的測量範圍最大在 10 mm 至 100 mm 之間，最小可至幾個奈米 (nm)，它提供被測範圍內的表面高度起伏圖形與量化數據，利用這些數據的分析或是傅氏轉換，可取得被測面的相關訊息。粗度量測儀的類型可分為接觸式與非接觸式兩種。若由量測系統區分，可分為掃描式與成像式兩種，掃描式包括接觸式、掃描探針顯微鏡 (scanning probe microscope, SPM) 與光焦檢測儀 (optical focus sensor) 等，成像式則以光學顯微鏡為主。另一種系統區分方式是干涉式 (interferometric) 與非干涉式 (noninterferometric) 兩種。探針粗度量測儀 (stylus profiler) 是接觸式量測儀的主要類型，且大部份為非干涉式。非接觸式量測儀則以光學顯微鏡為主，且多數為成像式與干涉式系統。光學顯微鏡可測量的範圍較 SPM 大，但小於光焦檢測儀與探針量測儀，利用更換不同的顯微物鏡，測量的範圍可由  $50 \mu\text{m}^2$  至  $5 \text{mm}^2$  不等。以下將就光學干涉式的粗度量測儀做一介紹。

光學式粗度量測儀由於是非接觸式測量，並不會損傷被測物表面，且檢測非常靈敏，高度測量精度可達  $0.1 \text{ \AA}$  均方根值 (rms)。其工作原理係利用測量來自被測點與參考點反射光之間的相位差，再將其轉換成所需的高度差數值。由於被測表面的特性不同，也會引進不同的相位移，因此被測面若由兩種以上材質所組成，則將會造成測量誤差，此情況下通常可在被測面上鍍一層反射物質以解決此一問題。早期利用光學干涉方法測量微小表面的有 Nomarski 顯微鏡 (1955)、多束光干涉儀 (Tolansky 1960) 與 FECO 干涉儀 (Bennett 1976)，這些儀器只提供定性的干涉條紋數據，再利用內差法以取得條紋間的數據。從 1980 年，利用測量相位的干涉儀

可均勻地在干涉圖取樣，且自動化與量化的計算各點的相位。

光學干涉式粗度量測儀，依使用的干涉儀可分為三種類型：傳統干涉式粗度量測儀、共心光束 (concentric-beam) 干涉粗度量測儀與偏極光粗度量測儀。

#### 1. 傳統干涉式粗度量測儀

應用 Michelson、Mirau、Linnik 或 Fizeau 干涉儀架構，將標準型顯微鏡的物鏡更換為干涉儀的物鏡 (包含參考面)，利用壓電轉換器 (piezo-electric transducer, PZT) 的微量移動物鏡，改變與被測面之距離，則自被測面與參考面反射的兩光束，在檢知器像面形成的干涉條紋，將因相位差改變而產生位移或變形等現象，再經由干涉條紋相位取樣技術，以取得表面高度數量化的數據。而被測面放置的位置，必須位於物鏡景深以及光源的同調長度 (coherent length) 範圍內，以獲得較佳亮暗對比度的干涉條紋。

圖 1 為使用 Fizeau 干涉儀架構學之粗度量測儀結構示意圖。

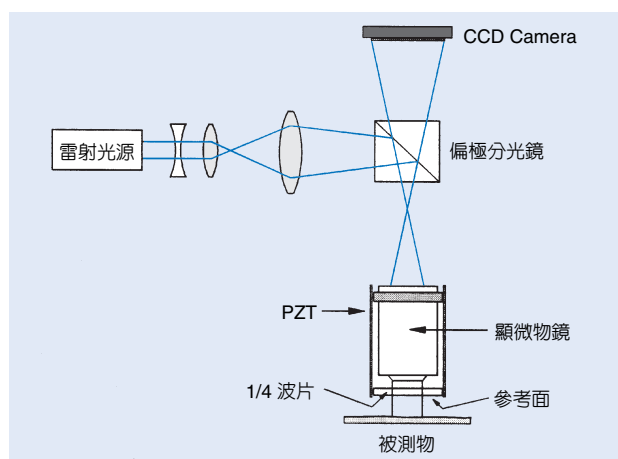


圖 1. 使用 Fizeau 干涉儀架構之粗度量測儀。

## 2. 共心光束干涉粗度量測儀

該類型粗度量測儀，由 Huang (1983) 首先發展出來，被測光束與參考光束在被測面的檢測區域不同。被測光束聚焦於被測面上，參考光束則與被測光束共線 (collinear) 與同心 (concentric)，但有離焦 (defocus) 現象，所以在被測面上形成一小區域。被測光束的聚焦點位置，相對於周圍參考光束的區域之高度差，將可被量測出來。

圖 2 為共心光束干涉粗度量測儀架構圖，利用雙折射率材料以產生共心的被測與參考兩光束。

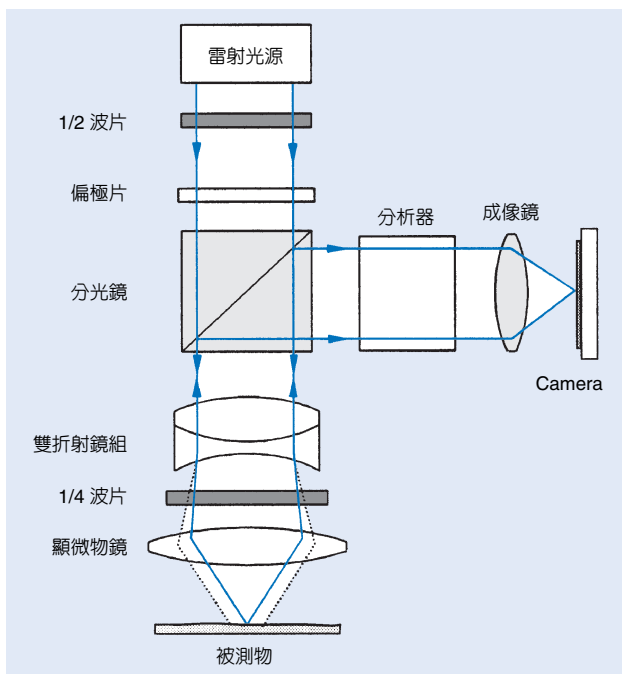


圖 2. 共心光束干涉粗度量測儀。

## 3. 偏極光粗度量測儀

此類型粗度量測儀，應用一個 Wollaston 稜鏡與偏極光技術將光束一分為二，再經由顯微物鏡於被測面上形成兩個聚焦點，利用相位量測技術測量出這兩聚焦點的相對高度差值，由 Sommargren 於

表 1. Zygo Model 5500 Heterodyne Profiler 主要規格表。

儀器名稱	工作類型	高度測量 範圍	高度測量 靈敏度	掃描速度	掃描長度	取樣點數	測量時間
Zygo Model 5500 Profiler	偏極光粗度 量測儀	0.1 – 3000Å (PV)	0.1Å (PV)	30秒 /360度	1 mm 圓周	1024	約 1 分鐘

1981 年首先發展出來，其測量精度小於 0.1 Årms，兩聚焦點之一為參考點，另一聚焦點隨著被測面的轉動，掃描以參考點為中心而軌跡為圓的被測點。Makosch 與 Solf (1981)，Eastman 與 Zavislan (1983) 也分別發展出類似系統，不同處在於它們測量被測表面的斜率 (slope) 而非高度，且掃描軌跡為直線而非圓周。

圖 3 為 Sommargren 系統的主要元件架構圖，被測物置於一旋轉台上，以兩聚焦點之一為其旋轉中心且做為參考點，另一聚焦點 (檢測點) 則隨著旋轉台轉動，可偵測到半徑 160 μm 圓周長度為 1 mm 的高度變化。

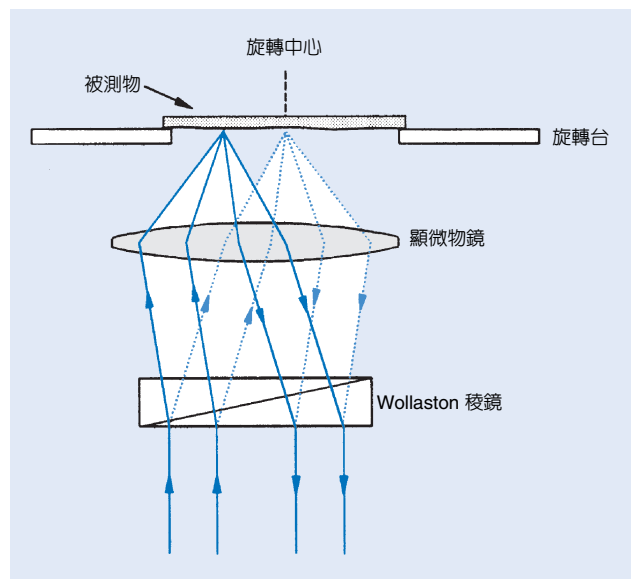


圖 3. Sommargren 系統的主要元件架構圖。

## 二、儀器規格與特徵

目前市面上有多種光學粗度量測儀，表 1 為 Zygo Model 5500 Heterodyne Profiler 之主要規格表。

### 三、應用與用途

傳統測量被測面平整度 (flatness) 的干涉儀，精度可達  $1/10 \lambda$ ， $\lambda$  為使用光源之波長 (一般使用氦氖雷射  $\lambda = 6328 \text{ \AA}$ )，測量面積與所使用的參考鏡有關，一般最大可達直徑 100 mm 以上之口徑大小，若應用相位移 (phase-shifting) 量測技術，則測量精度可達  $1/100 \lambda$ 。光學粗度量測儀係應用干涉儀原理，配合顯微物鏡的使用，所發展出可測量小區域範圍內的表面粗糙度或其幾何形狀的儀器，因此在檢測表面形狀或輪廓方面，兩者分屬不同層次的測量等級與用途。

不同類型的光學粗度量測儀各有其優缺點與不

同的應用範圍，選用時必須考量被測面特性、所需的橫向與縱向測量範圍、精度、測量時間或設備成本等。在測量時間方面，光學量測儀通常較 SPM 或探針量測儀快速許多。

#### 參考文獻

1. D. Malacara, *Optical Shop Testing*, 2nd ed., New York: Wiley, 687 (1992).
2. D. J. Whitehouse, *Handbook of Surface Metrology*, England: Rank Taylor Hobson Ltd., 453 (1994).
3. G. E. Sommargren, *Applied Optics*, **20** (4), 610(1981).

---

作者：葉茂勳先生為國立交通大學光電工程博士，現任中山科學研究院副研究員。

# 表面形狀測量儀

## Surface Profile Measuring System

**關鍵字：**表面形狀、探針、線性變量差動轉換器、階高

**Keywords：** surface profile, stylus, linear variable differential transformer, step height

### 一、基本原理

近幾年來，探針式物體表面量測儀器已廣泛地被使用於先進的生產、品管及研發領域中。此種儀器橫向 (lateral) 小於 500 Å、垂直小於 5 Å 的高解析度，而且操作容易是受到歡迎的主要原因。本文是以日本真空技術株式會社所製造的表面形狀測量儀為例，有別於另一種稱為軸承式階高測量器 (pivoting step measurers)<sup>(1)</sup>，是真正可直接量測到物體表面資訊者。

圖 1 所示表面形狀測量儀的測量裝置中，探針下是一個可程式控制的高精密度平台，根據使用者所輸入的掃描長度、速度和針壓來移動其上覆載的樣品，由樣品在固定的探針下移動，取得樣品的表面資訊。

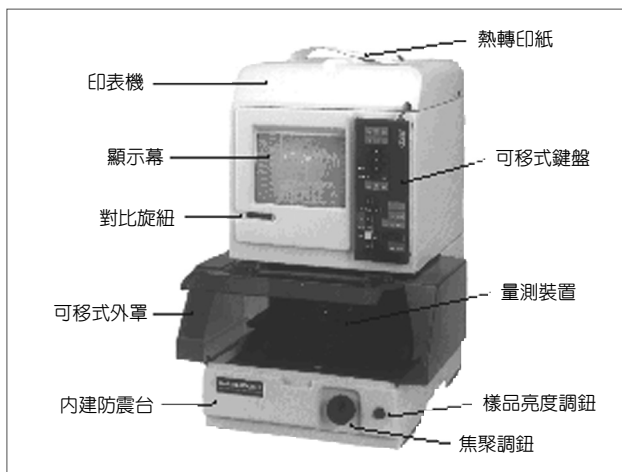


圖 1. 表面形狀測量儀結構解說圖。

探針 (stylus) 是機械地耦合至線性變量差動轉換器 (linear variable differential transformer, LVDT) 的機心 (core) 中，當樣品移動時，接觸樣品表面的探針因樣品的表面高低起伏，而在垂直方向產生移動，探針運動亦引起 LVDT 機心的位置相對的變化，並產生和位置變化成比例、對應的電子類比訊

號，接著透過高精密之類比數位轉換器轉換成數位訊號。單一掃描的數位化訊號被存在電腦記憶體中，用來顯示、處理、測量和列印。圖 2 為其訊號產生及處理流程圖，圖 3 顯示量測結果，表 1 為量測參數之說明。

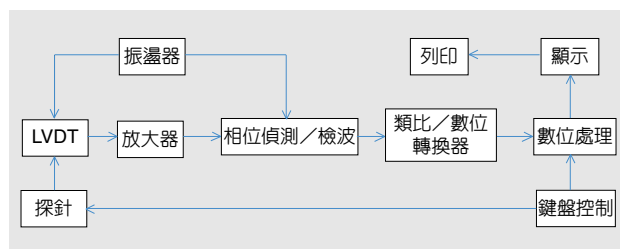


圖 2. 表面形狀測量儀之訊號處理流程圖。

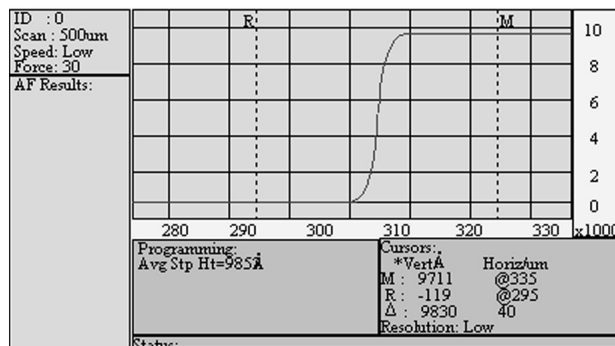


圖 3. 階高 (step height) 測量結果顯示圖。

表 1. 測量參數說明。

ID	樣品編號	avg stp Ht	平均階差	R	參考點
scan	掃描長度	vert/Å	垂直高度 (Δ)	Δ	階差, M-R
speed	掃描速度	horiza/μm	水平深度 (μm)		
force	針壓	M	測量點		

### 二、結構示意圖

一台先進的可程式控制表面結構量測系統，其量測之表面結構精度在微英寸以下，而膜厚精度可至 131 μm 以下。圖 1 是系統結構圖，主要包含量

測裝置、鍵盤、顯示幕、印表機及防震台。測量精度愈高之儀器對環境例如灰塵、震動的影響愈敏感，故圖 1 之系統中加一外罩以隔離灰塵，並以內建式防震台降低震動的影響。量測裝置主要由探針、照射光源、伸縮鏡頭、可旋轉之樣品載台及高精度移動平台構成，如圖 4 所示。

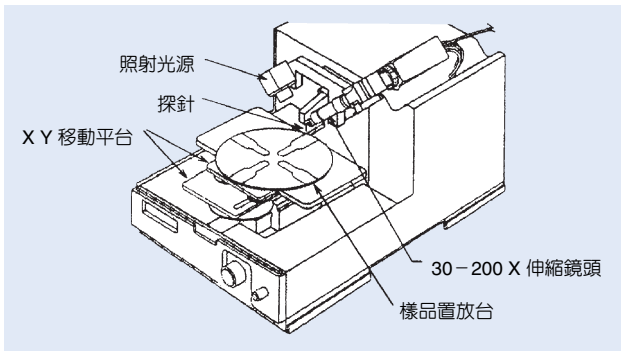


圖 4. 表面形狀測量儀之量測裝置示意圖。

### 三、儀器規格與特徵

所有探針式表面形狀測量儀皆使用頂端是鑽石頭 (diamond-tipped) 的鋼材探針，理想的針頭應該沒有水平方向尺度，也就是與物體表面接觸只有一點，而非一面或一線，但真實世界中此理想狀況很難達到，尤其在材質的剛性與應力考量之下，一般要求探針之針頭呈  $45^\circ - 70^\circ$  的圓錐狀，頂端是半徑 5 到  $15 \mu\text{m}$  的半球，如圖 5 所示。若是欲量測更高解析度，或是柔軟的物質表面，球狀針頭之應力太大，恐會傷及物質表面，刀狀針頭的選擇能改善此缺點。

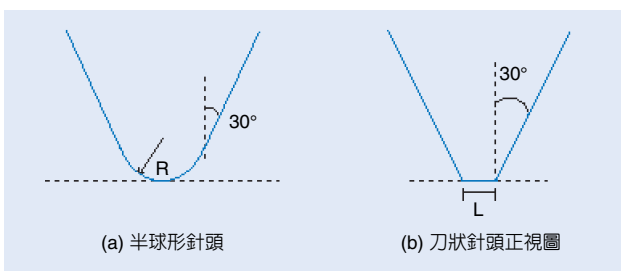


圖 5. 探針形狀示意圖。

針頭尺寸減小同時，針壓與掃描速度必須一併修正，因為針頭尺寸縮減，會提高施予樣品之針壓，雖然針壓越大，測量結果越佳，但為避免傷害樣品表面，針壓必須調低，一般表面形狀測量儀之

針壓是可程式調整。使用低針壓時，掃描速度不能高，否則當測量高階差表面時，探針會舉離物體表面。

探針尺寸會使測量系統所能量到的最小寬度或最高深度受到限制，因此量測樣品之前，可先以圖 6 中之公式計算是否超出探針之量測能力。

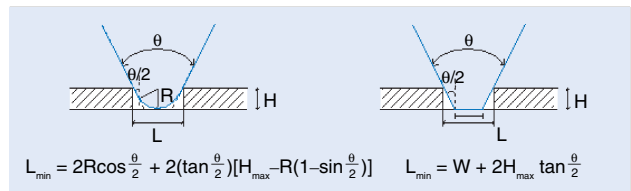


圖 6. 探針尺寸與樣品表面凹槽寬深之關係。

探針是此種測量系統的關鍵零件，由於精密度高所以價格昂貴，操作不當容易造成毀損，這是操作上必須小心注意的地方。以日本真空技術株式會社所製造的表面形狀測量儀為範例，詳述其規格及特徵如下。

#### 1. 儀器規格

##### (1) 外觀

尺寸：16" 寬 × 27.5" 長 × 24" 高

重量：45 公斤

顯示器：9" 黑白陰極射線管

##### (2) 環境要求

電源：100/115/220 Vac ± 10 %、50/60 Hz、200 VA

操作溫度：21 °C ± 3°C

##### (3) 探針

尺寸：12.5  $\mu\text{mR}$ 、5  $\mu\text{mR}$ 、2.5  $\mu\text{mR}$  (標準)、0.1  $\mu\text{m} \times 2.5 \mu\text{m}$

針壓：1 - 40 mg 可程式控制

##### (4) 樣品

最大厚度：45 mm

最大重量：0.5 kg

最大直徑：6"

##### (5) 樣品平台

直徑：165 mm，可 360° 旋轉。

XY 平台之移動：X 方向 ± 76 mm、Y 方向 ± 76 mm

##### (6) 鏡頭倍率：30 × - 200 × 手調

- (7) 掃描參數
  - 長度：50  $\mu\text{m}$ —50 mm
  - 速度：快、中、慢
  - 時間：1—50 sec
- (8) 垂直顯示範圍：100  $\text{\AA}$ —1310 k $\text{\AA}$ 
  - 垂直解析度：1  $\text{\AA}$  /65 k $\text{\AA}$ 、10  $\text{\AA}$  /655 k $\text{\AA}$  或 20  $\text{\AA}$  /1310 k $\text{\AA}$
  - 資料量：2000、4000、8000 點 (解析度最高)
- (9) 水平對準：手動、自動或游標
- (10) 分析功能：共 22 種，例如斜率、曲率、階差等。

## 2. 儀器特徵

- (1) 高解析度：階高在觀測範圍 65 k $\text{\AA}$  時可解析至 1  $\text{\AA}$ 。
- (2) 可調式針壓：1—40 mg，依據量測表面之軟硬程度，可設定不同之針壓。1 mg 的針壓可量測非常柔軟的表面，且將損傷減至最低，例如光阻與照相感光乳劑處理前後的檢查。
- (3) 高重覆性 (repeatability)：這是由於高電子穩定性、防震動桌、高精度探針之控制等因素所致。
- (4) 高放大倍率：使容易精確定位探針的位置或待量測表面的接觸位置。
- (5) 光纖輔助照明：提供照明而不會使測量區發熱。
- (6) 電腦分析速度快：掃描分析時間從 1 sec 至 50 sec。
- (7) 掃描範圍大：水平範圍 50  $\mu\text{m}$ —50 mm，垂直範圍最大 1310 k $\text{\AA}$ 。
- (8) 操作方便：從掃描、顯示、放大、到資料分析和列印，只要一個指令即可完成。
- (9) 機型小、測量範圍大 (可大至 7")。
- (10) 內建式 RS-232C 傳輸。

## 四、應用與用途

表面形狀測量儀廣泛使用於工業界，以做為研究、發展、評估和生產的監控工具。顧名思義其主要用途是物質表面之解析，例如曲率、粗糙度，進

而增進研究開發的品質管理與保證，例如光學薄膜之膜厚控制。其較詳細之用途可歸納於下。

### 1. 物質表面特性之觀測

- (1) 各種物質表面之粗糙度，尤其要求針壓必須很低的物質，例如紙、塑膠、磁帶、木材、紡織品等。
- (2) 軟碟機、硬碟機、光碟機之表面粗糙度。
- (3) 光學透鏡和濾光片之表面形狀。
- (4) 表面拋光或鍍膜之後的表面粗糙度。
- (5) 微機電鑽石車削 (diamond turned) 零件之表面。

### 2. 品質控制

- (1) 單或多層膜的膜厚與形狀、半導體或電子元件的化學蒸鍍磊晶 (chemical vapor deposition)。
- (2) 蝕刻式樣和光阻光罩 (photo resist masks) 的品質控制。
- (3) 太陽能電池表面電鍍之厚度。
- (4) 金屬結晶界面線與裂痕之檢查。
- (5) 校正標準片、經緯線 (graticules or reticle)、光柵的研發與生產。

### 3. 研究發展

- (1) 精密軸承與潤滑之研究。
- (2) 金屬與玻璃先進的熱處理與退火技術。
- (3) 高解析度光阻基板其感光乳劑的構造與厚度。
- (4) 金屬與其他物質表面的腐蝕、氧化的化學效應。

### 參考文獻

1. *Geometric Considerations of Surface Profilers and Pivoting Step Measurers: Technical Paper*, No. 3-1, Sloan Technology Corporation.
2. *Installation, Operation, and Maintenance Manual*, Veeco Instruments Inc., Sloan Technology Division.

作者：黃白萍先生為國立中央大學理碩士，現任工業技術研究院光電工業研究所工程師。

# 橢圓偏光儀

## Ellipsometer

**關鍵字：**橢圓偏光儀、橢圓偏光分析、偏極光、折射係數、消散係數

**Keywords：** ellipsometer, ellipsometry, polarized light, refractive index, extinction coefficient

### 一、基本原理

橢圓偏光儀為量測偏極光，在穿透試片或被試片反射後，其極化狀態 (polarization state) 改變的一種分析儀器。所謂偏極光 (polarized light) 是指單一波長的光，其電場可分解成垂直於波行方向的具有固定相角差之兩個分量。在橢圓偏光分析 (ellipsometry) 中，以圖 1 的反射實驗設置為例，偏極光的極化狀態  $\chi$  是用垂直於入射平面之電場分量 ( $\xi_s$ ) 比上平行於入射平面之電場分量 ( $\xi_p$ ) 來表示；而極化狀態的改變則是以入射光與反射光之極化狀態比值  $\rho$  或者兩個角度  $\psi$  與  $\Delta$  來表示；其中， $\psi$  ( $0^\circ - 90^\circ$ ) 代表  $\rho$  的絕對值大小，而  $\Delta$  ( $0^\circ - 360^\circ$ ) 則是  $\rho$  的相角。上述各參數間的函數關係可表為如下：

$$\rho = \frac{(\xi_s / \xi_p)_I}{(\xi_s / \xi_p)_R} = \frac{\chi_I}{\chi_R} = \tan(\psi) e^{i\Delta}$$

式中的  $\rho$  或  $\psi$  與  $\Delta$  都可藉由儀器中的光學元件偏轉角度來量得。由於整個量測僅涉及相對量而無關於光的絕對強度量測；因此在所有利用光學方法來檢測試片的物理參數中，橢圓偏光分析是屬於最精準的一種。

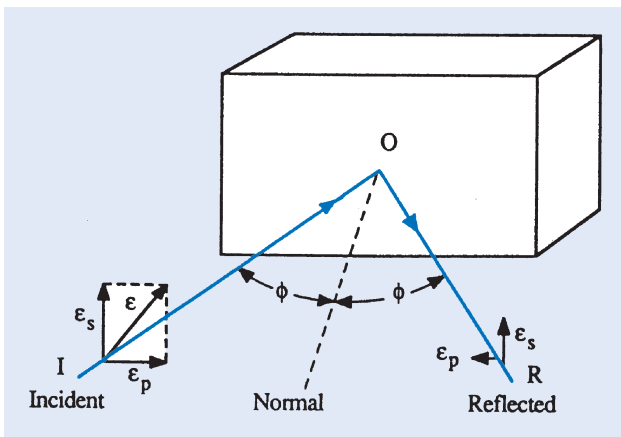


圖 1. 偏極光經反射後，其極化狀態改變示意圖。

### 二、結構示意圖

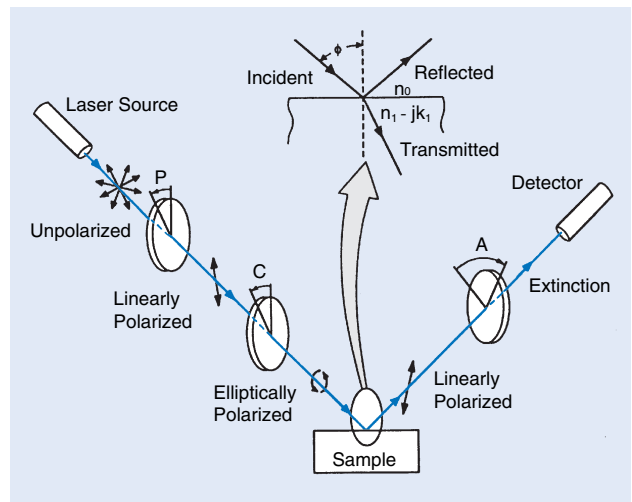


圖 2. 橢圓偏光儀之結構示意圖。

### 三、儀器規格與特徵

圖 2 所示為一般橢圓偏光儀的基本結構圖，在此仍以反射實驗之設置做為例子。圖中的光源可為單一波長的雷射光或者是白光產生器再加上單光儀 (monochromator) 藉以調變所需的波長。從光源出來的光一般為非偏極光 (unpolarized light)，因此須藉一偏光片 (polarizer) 將其轉成線性偏極光 (linearly polarized light)，同時固定其極化狀態。圖中的補償片 (compensator) 在光學上稱為延相器 (retarder)，其作用在於將線性偏極光轉成橢圓偏極光 (elliptically polarized light)。補償片為選擇性配備，並非在每一橢圓偏光分析都要用到。析光片 (analyzer) 其實就是另一個偏光片，只是在橢圓偏光儀中因為其作用是在分析反射光的極化狀態而賦予不同的名稱。最後的檢測器 (detector) 是用來量測經過析光片的光強度，其可為光電倍增管 (photomultiplier) 或者光電二極體 (photodiode)。

時下的橢圓偏光儀依其量測的方式可分為三類，茲分述如下。

### 1. 歸零式橢圓偏光儀 (null ellipsometer)

歸零式橢圓偏光儀是最早發展出來的橢圓偏光分析儀。圖 2 其實就是它的結構示意圖。其量測是靠轉動偏光片、補償片與析光片的角度，直到進入檢測器的光強度為零時，從這些偏轉的角度讀數 ( $P$ 、 $C$ 、 $A$ ) 就可得到  $\psi$  與  $\Delta$ 。它的優點是設備簡單、系統性誤差 (systematic errors) 檢測容易，且可以減至最小。其最大的缺點是必須調整多個角度，因而檢測速度太慢。

### 2. 偏光調變式橢圓偏光儀 (polarization modulation ellipsometer)

偏光調變式橢圓偏光儀是將圖 2 中的補償片改成依時性調相器 (time-dependent polarization modulator)。在量測時，偏光片與析光片的角度皆為固定，然後從光強度依時變化的關係進而求出  $\rho$  值。由於調相器可以極高的速度運作，因此檢測速度可以很快，每次量測僅需約 10 毫秒。速度快是它的優點，其缺點則是調相器對溫度非常敏感，同時也需較強的光源；此外，在光譜式量測 (spectroscopic measurement) 的應用上也非常困難，因為調相器的調幅和波長相關。

### 3. 旋轉析光片式橢圓偏光儀 (rotating analyzer ellipsometer)

旋轉析光片式橢圓偏光儀和上述第二種近似，但不用調相器而是將析光片以低速轉動 (10–60

Hz)。在量測時，也是同樣地將偏光片的角度固定 (在此補償片，視量測準確度的要求，為選擇性使用)，然後從光強度依時變化的關係進而求出  $\rho$  值。旋轉析光片式橢圓偏光儀是目前比較常見的一種，其優缺點也介於上述兩種之間。也因此，比較耗時又對準確度有相當要求的光譜式量測皆採用此種結構。

## 四、應用與用途

偏極光的極化狀態改變和受測試片的光學參數如折射係數 (refractive index) 與消散係數 (extinction coefficient) 有關；因此，橢圓偏光分析最早的應用即是用來量測各種材料的光學參數。然而，偏極光的極化狀態改變對材料的表面變化，如有無披覆層、披覆層厚度或是此層材質的變化，又非常地敏感；所以，其應用目前已擴展到各種薄膜製作、表面化學反應、以及表面吸附與活化的檢測上面。再者，橢圓偏光分析是一非破壞性檢測，同時因光子的能量低，對大多數的反應並不構成干擾，所以，此分析方法非常適合線上品管與即時 (in-situ) 觀察的用途。

## 參考文獻

1. R. M. A. Azzam and N. M. Bashara, *Ellipsometry and Polarized Light*, San Diego: Elsevier Science Publishers B. V. (1987).
2. H. G. Tompkins, *A User's Guide to Ellipsometry*, New York: Academic Press (1993).
3. K. Riedling, *Ellipsometry for Industrial Applications*, New York: Springer (1988).

作者：甘炯耀先生為美國史丹福大學材料科學博士，現任國立清華大學材料科學工程系副教授。

# 角度可調式橢圓光譜偏光儀

## Variable Angle of Incidence Spectroscopic Ellipsometer

關鍵字：橢圓偏光儀、橢圓偏光術

Keywords：ellipsometer, ellipsometry

### 一、基本原理

橢圓偏光儀乃是利用橢圓偏光術 (ellipsometry)，以測量表面及薄膜光學特性的儀器。而橢圓偏光術是指一種光偏極態入／光偏極態出的測量方法。顧名思義，橢圓偏光術是測量一束偏極光經過樣品反射，其偏極態改變情形的方法；藉由比較反射光與入射光的振幅及相位變化，以決定表面特性及薄膜的光學常數及厚度。橢圓偏光術亦有測量穿透光的振幅及相位變化，但使用上以反射式橢圓偏光術較為普遍。

光偏極態的特性可藉由平面波的兩分量：垂直入射面的電場分量  $S$  偏極及平行入射面的電場分量  $P$  偏極的相位及振幅而定。當一束光從各向同性的光學表面反射時，將造成  $P$  及  $S$  偏極光的振幅及相位的改變，其反射係數分別為  $r_p$  及  $r_s$ 。此兩數皆為複數可分別表示為

$$r_p = |r_p| e^{i\delta_p}$$

$$r_s = |r_s| e^{i\delta_s}$$

其中  $|r_p|$  及  $|r_s|$  分別為反射係數的振幅大小， $\delta_p$  及  $\delta_s$  則為兩者之相位。橢圓函數  $\rho$  (ellipsometric function) 定義為  $P$  和  $S$  偏極光之反射係數比值。一般皆寫為

$$\rho = \tan \psi e^{i\Delta}$$

其中  $\tan \psi$  是反射係數振幅比， $\Delta$  為因反射所造成之  $P$  及  $S$  偏極光的相位差，其關係為

$$\tan \psi = \frac{|r_p|}{|r_s|}$$

$$\Delta = \delta_p - \delta_s$$

$\psi$  及  $\Delta$  即為橢圓偏光儀所要測量的角度，一般稱之為橢圓偏極角或橢圓參數。

角度可調式橢圓光譜偏光儀 (variable angle of incidence spectroscopic ellipsometer) 除了可連續改變入射角及作光譜掃描之外，測量原理及結構與一般橢圓偏光儀相同。一般橢圓偏光儀多採用偏極片 (polarizer)－補償器 (compensator)－待測物 (sample)－分析片 (analyzer) 的 PCSA 基本結構。常見的橢圓儀有下列幾種。

### 1. 消光法的歸零式橢圓儀 (null ellipsometer)

消光法的歸零式橢圓儀所使用的方法是旋轉系統中光學元件的角度，使得偵測器所偵測到的光訊號強度最小，再根據這些光學元件的角度，計算出兩個橢圓參數。歸零式橢圓儀依據其所使用的消光方法，可分為兩大類：(1) 古典歸零式橢圓儀 (classical null ellipsometer, NE)，其旋轉光學元件的方式有手動的或是以伺服馬達旋轉的。(2) 調變歸零式橢圓儀 (modulated null ellipsometer, MNE)，此種系統是利用兩個法拉第盒 (Faraday cell) 或 ADP 晶體之勃克爾盒 (Pockels cell) 的調制器取代旋轉偏極片及分析片。古典歸零式橢圓儀的優點在於其結構簡單，而且也不需要用到太多的電子裝置。然而操作不方便且量測速度太慢是其最大缺點，因此現在已經很少人使用這種方法。至於調制歸零式橢圓儀雖具有自動化量測的功能，然而其使用了太多的電子裝置，且測量速度也不快，除了實驗室研究中尚有人使用，商品化的橢圓儀則無此類型的設計。

### 2. 相位調制的光度量橢圓儀 (photometric ellipsometer)

相位調制的光度量橢圓儀是利用相位調制技術，將其中的一個光學元件加入調制訊號，然後利用鎖相放大技術處理所偵測到的光訊號強度，經由傅利葉分析方法得到兩個橢圓參數。相位調制的光

度量橢圓儀依其所使用的相位調制技術的不同，主要有兩類：(1) 旋轉分析片、或旋轉偏極片、或同時以不同旋轉頻率旋轉分析片及偏極片的旋轉式橢圓儀 (scanning ellipsometer)。旋轉式橢圓儀所使用的調制頻率大約在 100 Hz 以下，所以它的反應週期約為 10 毫秒 (ms)。由於它所用到的光學元件較少，所以比較沒有光學元件特性與波長相關的問題。因偏極片有很好的消光比，光線經旋轉偏極片後，其偏極態能很準確的控制，所以操作原理較簡單為其優點。但是因旋轉元件會使光線有小的橫向位移，使得偵測器上的光點有抖動 (jitter) 現象，造成訊號的渦流調制。(2) 利用光彈性調制器調制光偏極態的相位調制橢圓儀 (phase-modulated ellipsometer, PME)。相位調制橢圓儀典型調制頻率為 50 kHz，所以它的反應週期約為 20 微秒 ( $\mu\text{s}$ )，故很適合測量動態變化。另外因其在量測過程中光線經過固定的偏極片及分析片，因此所有光學元件無機械上的轉動，所以在待測物及偵測器上無光點的抖動現象，不會造成訊號的渦流調制。但因光線經光彈性調制器後，一個弦波的相位延遲會導入於入射光的極化上，使其偏極態較難掌握，故操作原理較為複雜。又因調制振幅和四分之一波片之相位延遲和波長有關為其缺點之一。由於它用到了較多的光學元件和自動化所需要的機械裝置和控制電路，因此造價昂貴是其最大缺點。然而相位調制的光度量橢圓儀是利用調制技術及電子訊號處理，使系統的反應速度很快，非常適用於自動化量測，因此被歸類為自動化橢圓儀 (automatic ellipsometer)。

#### (1) 旋轉式橢圓儀

旋轉式橢圓儀大部份皆使用一個同步旋轉的分析片，來測量從待測物表面反射的光波極化狀態，此類系統稱為旋轉分析片橢圓儀 (rotating analyzer ellipsometer, RAE)。RAE 系統早在 1937 年就由 Kent 及 Lawson 發展成功，只是限於當時的技術，該系統的準確度只達到 1 弧分。而後，許多有關自動化 RAE 系統陸續被提出，其中較為著名的是 1973 年 Hauge 和 Dill 所發展的橢圓厚度測量分析器 (ellipsometric thickness analyzer, ETA)。Hauge 和 Dill 利用此系統，主要是量測在生產時矽晶片上的介質膜。整個系統運作的全部時間，包括待測物的對準、資料存取、分析及記錄大約要 5 秒鐘。而對

矽晶片上的  $\text{SiO}_2$  及  $\text{Si}_3\text{N}_4$  薄膜厚度的測量精確度可達 0.1 nm。次年，Meulen 和 Hien 以 ETA 系統為基礎，發展可測量溫度高達 1450 K 的基片及薄膜的高溫橢圓儀。然而由於它所使用的光源為氬氙雷射，波長無法改變，不能測量寬光譜。波長掃描 RAE 在 1973 年由 Aspnes 提出。Aspnes 用它來測量可見光及近紫外線 1.8 eV 到 5.5 eV 光譜的材料介電常數。之後，Aspnes 繼續發展，提出高精確度的波長掃描 RAE 系統，資料存取週期小於 7 毫秒，橢圓參數  $\psi$  及  $\Delta$  與介電常數  $\epsilon$  的精確度分別高達  $\pm 0.0005^\circ$ 、 $\pm 0.001^\circ$ 、 $\pm 0.002^\circ$ 。第二種旋轉式橢圓儀是使用旋轉偏極片調制相位方式的旋轉偏極片橢圓儀 (rotating polarizer ellipsometer, RPE)。其光學元件安排順序是光源、旋轉偏極片、待測物、固定式分析片、單光儀及偵測器。Theeten、Chang、Aspnes 和 Adams 為了研究 plasma oxidation of GaAs surface，以此種方式設計了旋轉偏極片橢圓儀。此系統架構的優點在於可將單光儀置於反應裝置與偵測器之間，因此可以消除光線到達偵測器前時，由反應裝置所產生的光線，因而大大提高系統的訊號雜訊比。

由於無論是 RAE 或 RPE 都是將偵測器所偵測到的訊號，以傅立葉展開，求得直流 (DC)、基頻及倍頻的強度，再計算得到橢圓參數。因為無法從直流訊號去除任何雜訊，導致誤差的產生。因此才有同時以不同的旋轉頻率、旋轉偏極片及分析片的第三種旋轉式橢圓儀 (rotating polarizer & analyzer ellipsometer, RPAE)。Azzam 在 1978 年曾經利用此種技術，分析片旋轉頻率為偏極片的三倍方式調制相位，來測量 Jones 及 Mueller 矩陣。在 1989 年時，Chen 和 Lynch 就分別用 25.5 Hz 及 51 Hz 的旋轉頻率、旋轉偏極片及分析片，再透過測量 51 Hz、102 Hz 及 153 Hz 的交流訊號振幅，量到橢圓參數。他們並且用此系統量測金膜的介電常數，得到相對誤差在 1.0 % 以下。

#### (2) 相位調制橢圓儀

相位調制橢圓儀早在 1969 年時，Jaspersen 和 Schnatterly 首先利用光彈性調制器製成相位調制橢圓儀。光彈性調制器是以  $10 \times 20 \times 50 \text{ mm}$  的石英晶體； $-18^\circ \text{ X}$  切的壓電轉換器接合在熔質石英上，石英晶體上外加 50 kHz 的弦波電場，因壓電

效應而在熔質石英產生應力，造成雙折射，以調制光偏極。他們亦利用此系統測量 300 nm 到 500 nm 的金屬銀之介電常數，並得到精確度達 1%。此系統架構、原理比起旋轉式橢圓儀較為複雜，然而運作速度較快。往後的相位調制橢圓儀皆以此系統為基礎，不斷研究改良，使系統的精確度更適用於快速量測。在 1973 年時，Treu、Callender 和 Schnatterly 針對弦波振盪器的電路進行改良，使振盪器的  $Q$  值可以即時變化，而建立穩定的調制極化器。其偏極調制的偏差小於 0.25%。同年，Jaspersen、Burge 和 O'Handley 提出校正調制振幅的方法，提高整個系統的精確度及穩定度； $\psi$  及  $\Delta$  的測量精確度達  $0.001^\circ$ ，而系統量測時間超過 1 小時後，精確度仍達  $0.01^\circ$ 。系統與電腦連接後，全部資料處理速度達每組資料只需 1 秒鐘之快，因此他們利用此系統研究金屬銀膜蒸鍍過程，橢圓參數隨膜層成長的變化。之後，在 1978 年時，Bermudez 和 Ritz 則利用偏極片、調制器、1/4 波片及分析片與光軸不同的角度安排，建立三套不同測量及校正的配置，改良了波長掃描式相位調制橢圓儀 (wavelength-scanning polarization-modulation ellipsometer, WSPME)，並經過一序列對金屬銀膜的實驗量測，系統的精確度  $\psi$  及  $\Delta$  分別達到  $0.03^\circ$  及  $0.1^\circ$ ，以及準確度分別達到  $\pm 0.07^\circ$  及  $\pm 2.0^\circ$ 。Huber、Baltzer 及 von Allmen 在 1985 年改變了配置的組合，形成四種裝置，以達到同時測量及校正之目的，使系統變得更精簡又容易操作的儀器。由於相位調制橢圓儀都使用鎖相放大器，從偵測器偵測到的訊號中，取出直流，基頻及倍頻的強度，再計算得到橢圓參數。Drévilion 及其同事在 1982 年捨棄鎖相放大器不用，改以數位方式處理，將所偵測到的訊號用 8-bit、12.8 MHz 取樣速度的類比—數位轉換器數位化，再利用快速微處理機做傅利葉轉換，直接得到各諧頻資料。他們亦對整個系統作了詳細的誤差分析，估計系統全部誤差  $\psi$  及  $\Delta$  可達到  $0.5^\circ$  以內，而資料的取存精確度則達  $5 \times 10^{-4}$ 。由於使用數位式傅利葉轉換，可以不需要額外的儀器，就可取得其它高次諧頻的資料。不像使用鎖相放大器一樣，每增加一個諧頻資料，就需要增加一部鎖相放大器。因此 Acher、Bigan 及 Drévilion 在 1989 年時，提出利用第三諧頻訊號作

為量測時，校正調制振幅的方法，提高調制振幅的精確度到  $0.5^\circ$  以內，因而提昇了相位調制橢圓儀的精確度。

### 3. 相位偏移式橢圓儀

自動化橢圓儀除了相位調制的光度量橢圓儀之外，在 1994 年由 C. W. Chu 等人所提出的相位偏移式橢圓儀 (phase-shifting ellipsometer)，其是以氬氛雷射作為光源，ADP 晶體所製成的勃克爾盒作為相位偏移器，以相位偏移技術將線偏極光的相位偏移  $0$ 、 $\pi/2$ 、 $\pi$  而製作的橢圓偏光儀。

以上所介紹之橢圓儀：NE、MNE、RAE、PME 等四種都各有其用處，Aspnes 在 1975 年就對它們做過詳細的理論評估。Aspnes 從光訊號的雜訊 (noise) 著手，考慮在 shot-noise 的限制條件下，NE 的精確度  $2\delta\psi = \delta\Delta = 0.01^\circ$ ，而以 Faraday cell 方式製成的 MNE 的精確度則為  $0.001^\circ$ ；若是以勃克爾盒方式製成的 MNE 則比以法拉第盒方式差。另外 RAE 的精確度比 MNE 好上 21% 倍以上，而 PME 則與 RAE 相似，但 PME 的系統運作速度比 RAE 快很多。

C. W. Chu 等人分析其相位偏移式橢圓儀因元件調整對光的不準所造成的系統誤差， $\psi$  及  $\Delta$  分別小於  $0.032^\circ$  及  $0.190^\circ$ 。且從設計原理很容易了解，因相位偏移的不準將僅對  $\Delta$  造成影響，且其誤差量正好等於相位偏移誤差量，因此很容易作修正。另外此方法不但操作方便，而且原理簡單又因無機械移動，故系統精確度極高，且理論上系統誤差也較小。

## 二、結構示意圖

角度可調式橢圓光譜偏光儀結構基本上採用偏極片—補償器—待測物—分析片的基本結構如圖 1

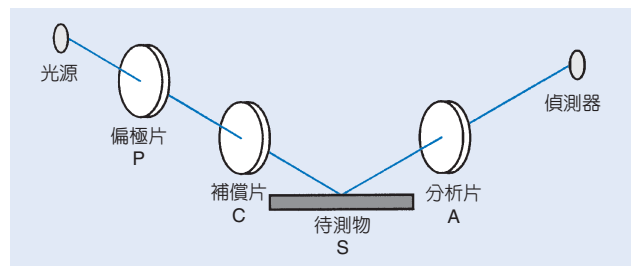


圖 1. 角度可調式橢圓光譜偏光儀。

所示。光源、偏極片、補償器架在同一旋轉臂上，而分析片及偵測器則在另一旋轉臂上，藉由精密步進馬達旋轉，可以連續改變入射角  $\theta$ 。光源部份含括單光儀及平行光儀，則可作光譜掃描，量測元件則視其所使用之何種一般橢圓儀型式，而改為其對應元件，如基本原理所述。

### 三、儀器規格與特徵

角度可調式橢圓光譜偏光儀的測量精確度及準確度，端賴其使用的基本測量原理，而有不同的結果，如第二節基本原理所述。現有商品化產品中，大都採用旋轉分析片橢圓儀 (RAE) 或相位調制橢圓儀方式 (PME)，能達到快速量測目的。所使用之偏極片及分析片的消光比為  $10^{-5}$  或  $10^{-6}$ ，精密步進馬達旋轉角度準確達  $0.01^\circ$ 。光譜掃描範圍視需要而定，可為紫外線、可見光及紅外線等波段。

由於橢圓儀僅能測量橢圓參數，藉由軟體的運算，尋找較佳的薄膜光學常數及厚度。然而對於單一波長只有一組  $\psi$  及  $\Delta$  兩個參數，欲同時求得薄膜的折射率、消光係數及厚度三個變數是不可能的。因此採用以下三種方法解決此一問題。(1) 光譜掃描方式以測量多組波長的  $\psi$  及  $\Delta$ ，再以調適 (fitting) 方法，尋找薄膜的光學常數之色散係數及薄膜厚度，以滿足  $\psi$  及  $\Delta$  的測量光譜曲線。此方法對於一個未知材質的薄膜而言，其誤差往往很大。(2) 固定式多入射角量測方法，以單一波長、兩種不同入射角，測量兩組的  $\psi$  及  $\Delta$ ，即可很準確計算出薄膜的折射率、消光係數及厚度。然一般為了能消除雜訊影響，大都採用三組以上入射角方式，測得三組以上  $\psi$  及  $\Delta$  參數，以增加準確度。(3) 角度可調式光譜掃描方法，此方法是結合前二種方法之優點，在寬入射角範圍內可作連續角度變化及光譜掃描測量。此方法最大優點在於可根據不同待測物特性，利用多入射角量測方法，可以很準確計算出薄膜的折射率、消光係數及厚度。而且在入射角的選擇上，可以選擇接近待測物之 pseudo-Brewster angle 之入射角測量。當入射角接近 pseudo-Brewster angle 時，所測量到的  $\Delta$  值在  $90^\circ$  附近，此範圍的  $\Delta$  值提供了最好的測量靈敏度。角度可調式橢圓光譜偏光儀即具有第三種測量方法之特性，為一般橢圓偏光儀所無法相比的。

### 四、應用與用途

薄膜光學常數的測量，橢圓偏極測量是一種極為精準的測量方法，透過橢圓參數可以很準確的計算各種光學特性及物理性質。橢圓偏極測量方法早在 1930 年代就已產生。1936 年 O'Bryan 就利用此方法，測量多種金屬的光學常數，而 Leberknight 則在 1939 年利用此方法，進行金屬鐵及鎳表面的氧化膜的研究。由於當時計算技術的限制，以致進展緩慢。只有少數文獻報告，以橢圓偏極術測量高反射基片上薄膜的特性。在 1957 年時，Archer 則用它來測量拋光後矽及鍍表面上氧化膜的成長，並計算其膜厚。隨著計算機的出現，計算技術的不斷發展，橢圓偏極術得到廣泛的應用。1962 年 Archer 以精確的橢圓理論，詳細地分析橢圓參數  $\psi$  及  $\Delta$  隨折射率、消光係數及厚度的變化情形，並得到在矽基片上的  $\text{SiO}_2$  膜之折射率達  $\pm 0.004$  及厚度  $\pm 0.1$  到  $0.5$  nm 的準確度。而後，人們陸續的發展，成功地用來測量金屬膜、介質膜、有機膜和半導體的折射率、消光係數、膜厚及色散特性，而且也用來測量薄膜的偏極特性、表面粗糙度、非均勻性、各向異性。由於它的高精確度，使它在電光效應、光彈性效應、法拉第旋光效應、電化學的研究及生物和藥學方面之應用皆占有一席之地。另外亦可用來測量折射率及吸收率因溫度的改變所產生的變化。特別是由於它對超薄薄膜的高靈敏度，使它在超薄薄膜的厚度及折射率的測量和薄膜生長初始階段的研究中非常有效。因橢圓偏極測量是一種非破壞性的量測，所以有利於在生產過程中實現自動控制和監測，以及在真空中觀察利用離子束轟擊基片，以達清潔基片的效應，或其光學特性的變化情形。

### 參考文獻

1. R. M. A. Azzam and N. M. Bashara, *Ellipsometry and Polarized Light*, North-Holland (1977).
2. D. E. Aspnes and A. A. Studna, *Appl. Opt.*, **14**, 220 (1975).
3. O. Acher, E. Bigan and B. Drévilion, *Rev. Sci. Instrum.*, **60**, 65 (1989).
4. C. W. Chu, C. C. Lee, I Y. Fu, J. C. Hsu and Y. Y. Liou, *Japanese J. Appl. Phys.*, **33**, 197 (1994).

作者：朱正煒先生為國立中央大學光電博士，現任工業技術研究院光電工業研究所工程師。

# 球徑計

## Spherometer

**關鍵字：**球徑計、曲率半徑

**Keywords：**spherometer, radius of curvature

### 一、基本原理

球徑計利用量測矢高 (sagitta) 的方式，量測光學鏡片之曲率半徑 (radius of curvature)，其量測精度與待測面之曲率半徑及球徑計特性有關。

球徑計利用位於同一平面之一圈小球與待測面接觸 (如圖 1)，在其中心有一可調高低之移動柱，並可讀取其移動距離。量測時首先將球徑計以一平面之基準面歸零，調整移動柱與外圈小球同平面，此時之高度讀數為  $a$ ；再將待測面置於量測儀上，同時調整此一移動柱與待測面接觸，此時高度讀數為  $b$ ， $a$  與  $b$  之差即為此待測面之矢高。參考圖 1，利用三角定理

$$y^2 + (R + r - h)^2 = (R + r)^2$$

可知  $R = \frac{h}{2} + \frac{y^2}{2h} - r$

因待測面為凸面或凹面之不同，考慮小球半徑實際待測面曲率半徑為

$$R = \frac{h}{2} + \frac{y^2}{2h} \pm r$$

加號用於量測凹面，減號用於量測凸面。凸面待測面之矢高為  $h - r$ ，凹面待測面之矢高為  $h + r$ 。

圓周小球一般置於同一圓盤上，方便使用。此儀器用於量測球面曲率半徑，小球數目需為三個以上，一般採用三個小球即足夠 (如圖 2(b))。同樣的原理也可用於量測柱面鏡之曲率半徑，使用二個小球，相距 180 度 (如圖 2(a))，可達到量測目的；若使用四個小球，兩兩相距 90 度 (如圖 2(c))，亦可量測球面或柱面鏡之曲率半徑，但此時之  $y$  值隨量測球面或柱面而不同，量測球面  $y$  值取圓盤半徑，若用於量測柱面，則如圖 2(c) 中所示。

### 二、結構示意圖

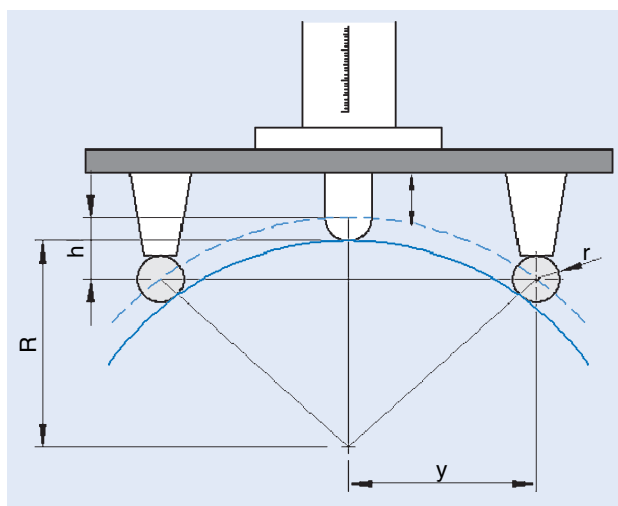


圖 1. 球面曲率半徑量測儀量測示意圖。

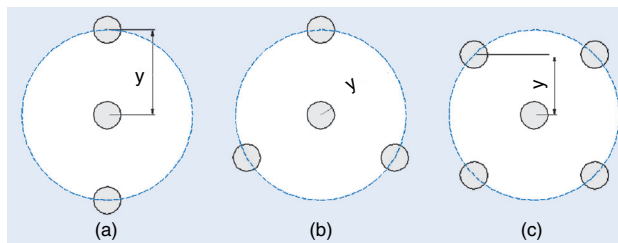


圖 2. 接觸用小球安排示意圖。(a) 可量測柱面曲率半徑，(b) 可量測球面曲率半徑，(c) 可量測球面或柱面曲率半徑 (此時之  $y$  值隨量測球面或柱面而不同)。

### 三、儀器規格與特徵

利用此方式之量測精度與待測面之曲率半徑及儀器特性有關。其誤差可以下式表示，與儀器距離讀取精度、小球圓盤半徑  $y$ 、 $\Delta R/R$  及矢高有關。

$$\Delta R = \frac{\Delta h}{2} \left[ 1 - \frac{y^2}{h^2} \right]$$

一般商用高度規 (height gauge) 及分釐卡頭 (micrometer) 可讀取至  $\pm 0.005$  mm 精度，有些專用之球面曲率半徑量測儀高度讀取精度可達  $\pm 0.001$  mm。商用之小球圓盤半徑  $y$ ，可由 10 mm 至 100 mm，甚至更高，可隨待測面之大小，更換小球圓盤之大小。取  $y$  為 50 mm 且高度讀取誤差為  $\pm 0.005$  mm，其相對誤差 ( $\Delta R/R$ ) 如圖 3 所示。曲率半徑愈大表示愈接近平面，因此誤差變大，若曲

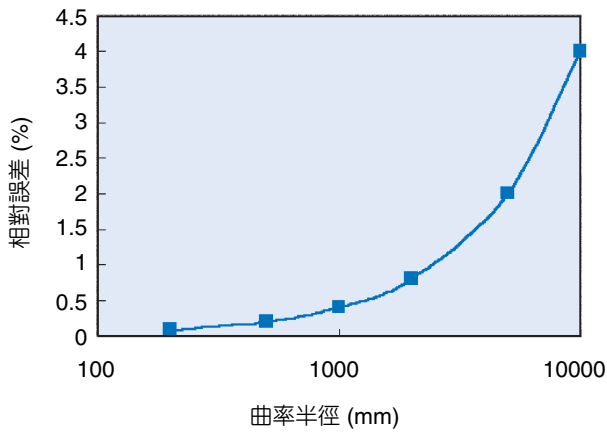


圖 3.  $y$  為 50 mm 且高度讀取誤差為  $\pm 0.005$  mm，相對誤差與曲率半徑關係。

率半徑小於 5 公尺，以球徑計量測相對誤差可小於 2%。

由上式可知，小球圓盤半徑  $y$  愈大，可降低量測誤差，因此若待測面夠大，宜更換大圓盤量測。若待測面小於最小圓盤半徑，便無法以球徑計量測，須考慮其它方式，如光學光具座 (lens bench) 搭配目鏡 (microscope)，有興趣讀者可參考文獻<sup>(1)</sup>。

#### 四、應用與用途

球徑計之用途只有一個，即量測待測面之曲率半徑。不同精度之量測儀用於不同場合，本量測儀一般於品管或實驗室中使用；鏡片製作現場則使用其它較為簡便之量測方法，如以模片 (template) 或標準片 (test plate) 等方式。

#### 參考文獻

1. R. H. Noble, in *Optical Shop Testing*, Daniel Malacara ed., New York: John Wiley and Sons (1978).
2. C. G. Shiue, T. S. Liao, S. T. Chang, C. F. Kao, and Y. F. Chen, *Rev. Sci. Instrum.*, **67**, 1688 (1996).

作者：黃鼎名先生為國立成功大學航太博士，現任國科會精密儀器發展中心專案副研究員。

# 雷射測徑儀

## Laser Gauge

關鍵字：雷射測徑儀、 $f\theta$  鏡組

Keywords：laser gauge,  $f\theta$  lens

### 一、基本原理

雷射測徑儀是一種利用雷射光束的單波長與小擴散角的特性，配合光學系統與電訊處理的技術，來量測物體尺寸的儀器，圖 1 為其工作原理。雷射光束經反射面鏡  $M_1$  射向旋轉面鏡或多面轉鏡  $M_2$ ，旋轉面鏡的轉軸中心在準直鏡的焦點上 (多面轉鏡不同)，因此雷射光束經過  $M_2$  的掃描，由準直鏡  $L_1$  以平行光束射出，被測工件放在準直鏡的焦點處。掃描光束以平行光通過工件再經過聚焦透鏡將光束送至檢知器上。由於掃描光束被工件遮擋，因此檢知器的訊號會有一凹陷，凹陷的寬度再與相關參數匹配就可計算出工件的寬度。其詳細運作原理如下：

準直鏡  $L_1$  非一般傳統的準直鏡，而是所稱的  $f\theta$  鏡組，當光束由  $L_1$  射出時，其射出高度 ( $h$ ) 與轉鏡  $M_2$  的掃描角度 ( $\theta$ ) 與  $L_1$  的焦距關係為

$$h = f\theta \quad (1)$$

其中  $\theta$  與  $M_2$  的角速度 ( $\omega$ ) 和時間 ( $t$ ) 的關係為  $\theta = \omega t$ ，所以光通過  $L_2$  的掃描速度 ( $v$ ) 為  $h$  對時間的微分，即

$$v = \frac{dh}{dt} = f \frac{d\theta}{dt} = f\omega \quad (2)$$

由於  $f\theta$  鏡組的特性，使光束是以等速度和  $f\omega$  掃過工件，工件的直徑 ( $D$ ) 與掃描速度和工作直徑與被測時間 ( $t$ ) 的關係為

$$D = vt = f\omega t \quad (3)$$

式 (3) 表示工件直徑可以反射鏡的旋轉角速度和時間來表示。由於工件量測精度與掃描鏡的角速度和  $f\theta$  鏡組的焦距等參數成正比例的關係。所以如何擷取工件遮蔽時間與穩定的角速度就是量測工件直徑的

重要關鍵，這也就是雷射光掃描量測的基本原理。

為了提高量測的精度，在雷射光聚焦大小、檢知器頻寬、掃描速度、取樣次數、相位誤差與  $f\theta$  鏡組的焦距等參數都得整體考量。公式 (3) 是一個理想的情形，高精密的  $f\theta$  鏡組是不易達到的，以軟體修正誤差是目前最常用的改良方法。

### 二、結構示意圖

圖 1 的裝置中  $L_1$  是  $f\theta$  鏡組， $L_2$  是聚焦鏡組， $M_2$  是多面轉鏡， $M_1$  是反射鏡，其目的在縮小系統尺寸 (注意入射角為銳角入射)，工件置於  $L_1$  後焦點附近。在掃描訊號被工件遮擋後，就會有如示波器上的波形。

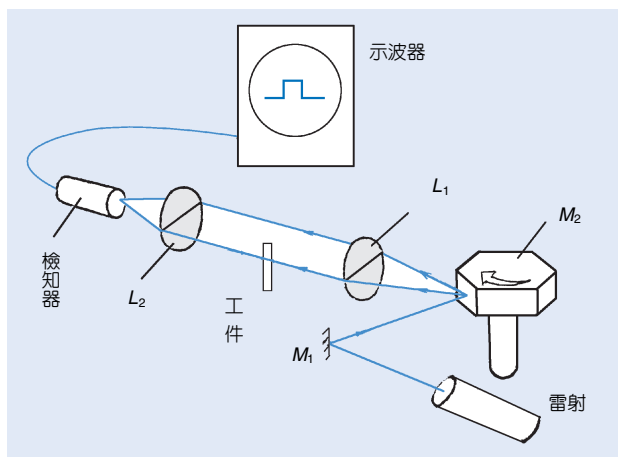


圖 1. 雷射測徑儀裝置示意圖。

### 三、儀器規格與特徵

雷射測徑儀大都應用在生產線上電線電纜、光纖等的直徑量測，規格亦大都配合這些被測工件來規範。由於系統講求輕薄短小，因此雷射光源也由早期的氦氖雷射轉換成半導體雷射，茲將其一般規範列於表 1。

表 1. 雷射測徑儀的雷射光源，氦氖雷射與半導體雷射之比較。

光源	氦氖雷射	半導體雷射
量測直徑	> 50 mm	~30 mm
重覆精度	± 1 μm	± 2 μm
量測精度	± 1 μm	± 2 μm
顯示精度	0.1 μm	0.1 μm
縱向量測線性範圍	—	—

#### 四、應用與用途

雷射測徑儀最重要的應用是電線、光纖等需要

抽絲拉線直徑的即時檢測。由於其檢測速度快且具精密，在產品品質控制與生產速度上有極大的幫助，因此在電線電纜產業上，已成為必備檢測設備。

#### 參考文獻

1. 光學計量儀器設計 (下冊), 王因明主編, 上海機械學院.
2. Optical Instrument.

作者：薛新國先生為英國 Reading 大學光學博士，現任工業技術研院光電工業研究所專職顧問。

# 焦距儀

## Focal Length Meter

關鍵字：焦距儀、準直儀、直動準直法、望遠鏡法、牛頓法

Keywords：focal length meter, collimator, autocollimator, telescope's method, Newton's method

### 一、基本原理

光學系統中的主點、焦點和節點，我們統稱為基點。它們在系統中的位置會因鏡片曲率半徑、折射率和厚度之不同而改變，這六個點決定了光學系統成像的基本性質。將此三對基點分別略述如下；如圖 1 所示，平行於光軸射至厚透鏡的平行光線最後和光軸的會聚點，為此系統的第二焦點，最後從系統射出的光線之延伸線，會和原先平行於光軸的入射光線有一交點，過此交點對光軸做垂線，與光軸交於  $H''$  點，這一點我們稱為第二主點 (secondary principal point)， $H''$  到  $F''$  的距離長稱為系統的第二焦距長  $f''$ ， $A_2$  到  $F''$  的距離長我們稱為後焦距長  $f_b$  (back focal length)。

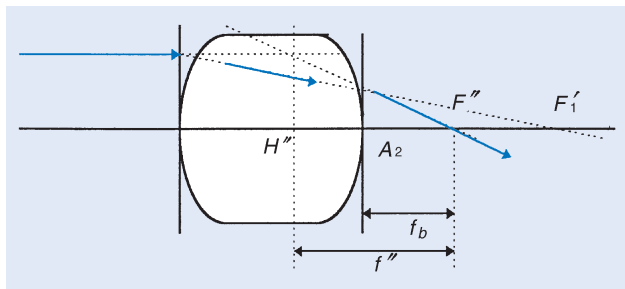


圖 1. 第二焦點及第二主點。

至於第一焦點和第一主點，我們通過第一焦點的入射光線，由系統射出時必平行於光軸，這條光線的延伸線會和原先過焦點的入射光線相交，過此交點對光軸做垂線，交光軸於  $H$  點，此點稱為第一主點 (primary principal point)， $H$  到  $F$  的距離長為此系統的第一焦距長 ( $f$ )，而頂點  $A_1$  到  $F$  的距離長則稱為前焦距長 (front focal length)，用符號  $f_f$  表示之。至於  $f$  與  $f''$  之間的有一定關係式。平行於光軸的光線射至厚透鏡，遇到第二主平面時，會以折向第二焦點的方向前進，而經過第一焦點的入射光線在碰到第一主平面後，會以平行於光軸的方向

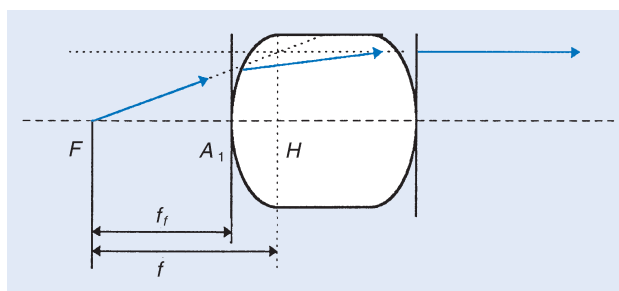


圖 2. 第一焦點和第一主點。

前進。

如圖 3 所示，一光線以某個  $\theta$  角入射至系統，若以相同角度從系統射出，那麼入射和射出光線與光軸的交點，稱之為第一節點和第二節點，分別用  $N$  及  $N''$  表示。換句話說，入射方向指向第一節點的斜線，會以相同角度從第二節點射出。正因為過節點的光線不發生偏折，所以常稱節點是一對角放大率為 +1 的共軛點。雖然經過節點的光線不產生偏折，但會有相當程度的位移，其效果就如同經過一平行平板玻璃一樣。

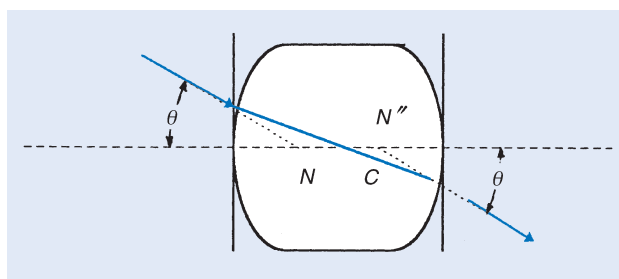


圖 3. 第一節點和第二節點。

以下略述常用幾種基本焦距量測原理。

#### 1. 薄凸透鏡之焦距

##### (1) 物在無窮遠處法

將一凸透鏡置於光學測試台 (滑軌) 透鏡支撐架上，將此測試台朝向遠處某光源，例如放在室外

視野寬廣之燈，該距離至少在 30 公尺以上。在凸透鏡右方置一毛玻璃屏幕，並移動此毛玻璃屏幕，使凸透鏡將遠處之光源清晰成像在此毛玻璃屏幕上，量測凸透鏡與毛玻璃屏幕之間距離，便是所要薄凸透鏡之焦距。

### (2) 成像法

比較上述方法，此方法為用一距離較近目標。置一十字線物標於光學測試台(滑軌)之左方一端支撐架上，且以一燈照明之。一凸透鏡置於光學測試台(滑軌)之中央透鏡支撐架上，在凸透鏡右方置一毛玻璃屏幕，並適當移動此毛玻璃屏幕及凸透鏡，使凸透鏡將十字線物標清晰成像在此毛玻璃屏幕上，量測十字線物標、凸透鏡與毛玻璃屏幕三者之間距離，並代入幾何光學成像公式，即可將薄凸透鏡之焦距求出。

### (3) 自動準直法

若由在 O 點之點光源發散之光，被凸透鏡 L 會聚為平行光，在被一平面鏡片 M 所反射，且再 O 點處得一焦點，量測 O 點與凸透鏡之間距離，即可將薄凸透鏡之焦距求出。

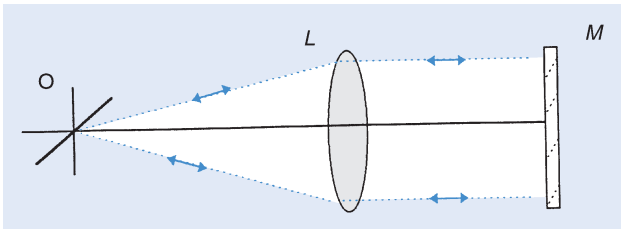


圖 4. 自動準直法。

### (4) 望遠鏡法

將一望遠鏡置於光學測試台(光學滑軌)之右方，做適當之間隔，使對遠處之物清晰成像。置一十字線物標於光學測試台(光學滑軌)之左方一端支撐架上，且以一燈照明之。一凸透鏡置於光學測

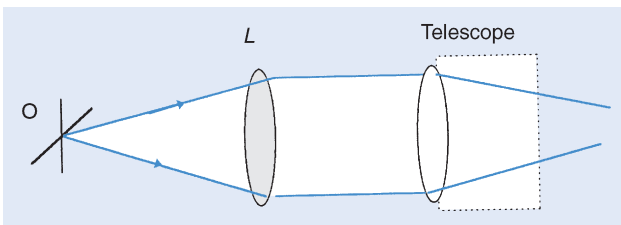


圖 5. 望遠鏡法。

試台(光學滑軌)之中央透鏡支撐架上，由望遠鏡中觀察。左右移動凸透鏡，一直看到清晰十字線物標成像。量測十字線物標與凸透鏡之間距離，即可將薄凸透鏡之焦距求出。

## 2. 薄凹透鏡之焦距

在一光學測試台之一端安置十字線物標 O，經凸透鏡 A 而在毛玻璃屏幕  $S_1$  上成一物像，由此實驗場合，將凹透鏡嵌在透鏡支撐架中，且插進會聚光柱路經 L 處，移動此屏至此像再聚焦於  $S_2$  處，由透鏡 A 在  $S_1$  處產生之像做為該負透鏡之物標，故距離  $LS_1$  為  $v$  其符號亦為正，用成像公式  $1/f = 1/v - 1/u$ ，負透鏡之焦距即可測得，其中  $u$  及  $v$  分別為物距與像距。所有由光學測試台得到的讀數均應視為一其中一組解，移動負透鏡至一新位置再重複做此實驗。

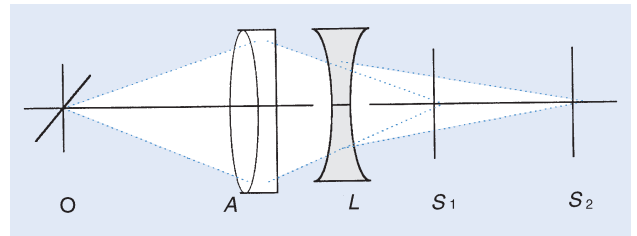


圖 6. 薄凹透鏡之焦距。

## 3. 牛頓法

牛頓提出一種透鏡成像公式，可說明由一目標物至一透鏡或透鏡系統之第一焦點之距離與由物像至第二焦點之距離  $X'$  的乘積應等於透鏡焦距之平方，故有  $X \cdot X' = f^2$  之關係，用此方程式適於求得一透鏡系統 L (此系統中兩透鏡相同) 之焦距。

首先須求定兩焦點  $F$  及  $F'$  之位置 (見圖 7)，暫時在距 O 之正確位置處插入一個透鏡 C，俾 OC 成為一準直儀，且可由此射出一平行光柱，將此透鏡系統置平行光柱之通路中，兩焦點中之一個  $F'$ ，可由毛玻璃屏幕定其位置，再記錄之。就此位置可將十字線標之像聚焦，因該系統之兩透鏡相同，圖示透鏡系統之  $F$  及  $F'$  位置，前者  $F$  距第一透鏡與後者  $F'$  距第二透鏡之距離相同；若欲使用不同透鏡，則在此場合， $F$  及  $F'$  必須將此組合之每個末端輪流朝向準直器分別求定之。故求得  $F$  及

$F'$  之兩個固定點後，再移動準直用的透鏡  $C$ ，且十字線  $O$  亦移動，於是毛玻璃屏幕  $S$  亦移動直至十字線之像在屏上又清晰出現，且測得  $F'S$  之距離，此二距離乘積之平方根即此透鏡系統之焦距。

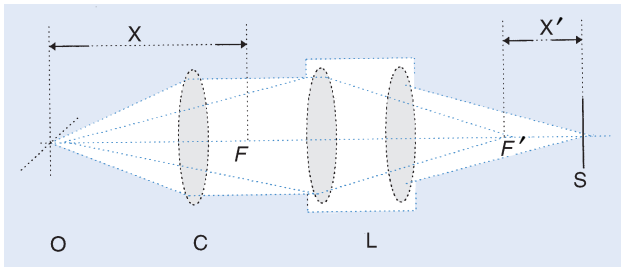


圖 7. 牛頓法。

#### 4. 疊紋偏折術

疊紋偏折術在近軸近似法中量測光線的偏折是一個很強工具，它是基於疊紋效應，類似干涉術之光學測試法，可用來量測透明物體與反射表面一些特性，此法顯示出光束受到相位物體或反射表面而歪曲之圖形，利用疊紋偏折術量測焦距 5 m 以上透鏡，得光線的最大偏折角約為  $a/2 \times f$  ( $a$ : 光束直徑  $f$ : 透鏡焦距)，當其值約小於  $10^{-2}$  徑，即可視為近軸區。對於一理想透鏡，距光軸半徑  $r$  處，偏折角度  $\phi(r) = r \div f$ 。因此疊紋偏量  $h$  比例  $r$ ，可得焦距  $f = d \div (\theta \tan \alpha)$ ，其中  $d$  為光柵  $G_1$ 、 $G_2$  之距離， $\theta$  為光柵  $G_1$ 、 $G_2$  夾角，而  $\alpha$  可量出來。或可由縱向疊紋量出  $f = dp' \div (p + 1)$ ， $p'$  是縱向疊紋間距， $l$  是透鏡到最後光柵  $G_2$  之距離。

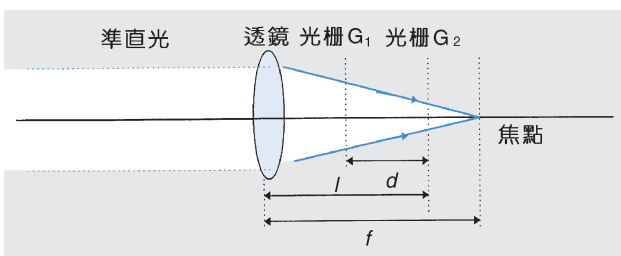


圖 8. 疊紋偏折術。

#### 5. 面形 CCD 影像感測器法

通常做 CCD Camera 光電參數測試，首先需架設一模擬無窮遠的目標，即建立準直光學系統，以獲得標準測試程序所需標準光源。其中測試 CCD Camera 解析度時，採用 4-BAR 目標板，目標板亮

暗間距為  $1/2$  Nyquist 頻率，因此當監視器 4-BAR 目標板影像很清楚且 BAR 周圍非常銳利，表示目標板每一亮或暗間距被成像時，剛好佔據 CCD 影像感測器二個像元，此時準直光學系統焦距、目標板每一亮或暗間距及 CCD 影像感測器像元大小皆已知，透鏡系統之焦距即可求出。面形 CCD 影像感測器測焦距法如圖 9 所示。

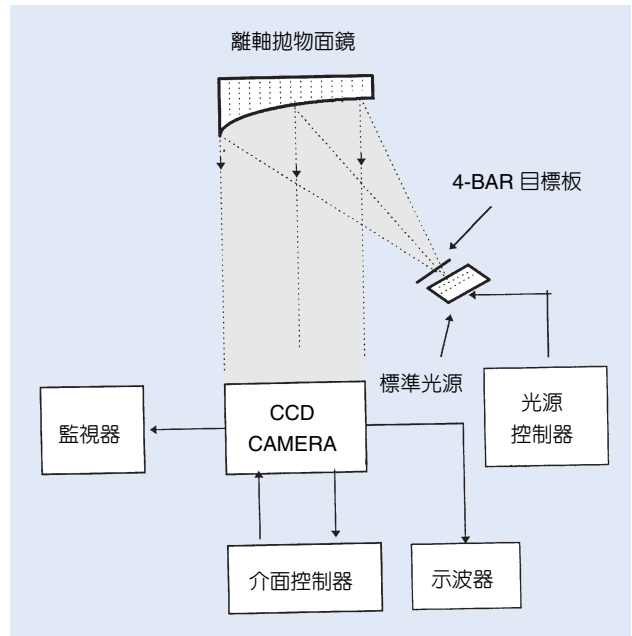


圖 9. 面形 CCD 影像感測器測焦距法。

#### 6. 測節器測焦距法

一透鏡系統的節點乃在系統之軸上的點，一入射光線以某個  $\theta$  角入射至系統，若以相同角度從系統射出，那麼入射和出射光線與光軸的交點，稱之為第一節點和第二節點，分別用  $N$  及  $N''$  表示。由上述原理易見透鏡系統繞第二節點旋轉，一物標之物像將靜止不動；又若入射光線是平行的， $N''$  到  $F''$  即為透鏡之焦距。然則，若  $N''$  並非此透鏡之旋轉中心，則物像將由此側遊向彼側。故此方法可測量一透鏡系統之焦距，唯必須有一架設透鏡旋轉裝置，其旋轉軸垂直光軸，此旋轉裝置使透鏡可以前後移動，此外有一準直儀及一目鏡以觀察物像。此等配件均安裝在光學測試台上，且此透鏡適度安置直至物像用目鏡觀看顯示靜止不動為止。於是旋轉中心與物像平面間之距離即得此透鏡之焦距。欲得到一絕對的數值，則必須使用一校正手續，則可

直接由測試台讀數，再轉換為其真正數值。圖 10 即一應用此法包括節點移動裝置在內的光學測試台。

## 二、焦距儀結構

一般焦距儀結構通常包含下列幾個部分 (見圖 10)：測試台 (含滑軌、光學尺)、鏡片支撐架、支撐臺 (nodal slide)、顯微鏡、標準目標片、顯示器、準直儀濾光鏡及光源等。測試台 (bench) 目的作為顯微鏡與支撐臺相關位置數據讀取；準直儀為製作一無窮遠目標供待測透鏡或透鏡系統聚焦之用；支撐臺提供鏡片支撐架支撐、旋轉、左右平移及上下移動之用，顯微鏡則為觀看目標物之像之用；濾光鏡則為選擇紅綠藍三色中某一顏色之用；標準目標片則提供給透鏡系統作不同測量目的 (如焦距、像差) 之用所需目標物 (如十字線、針孔、解像率板及單狹縫等)；光源則提供給目標物的照明，光源之前必須加一毛玻璃將光源加以均勻化；顯示器則顯示測量所得之結果。

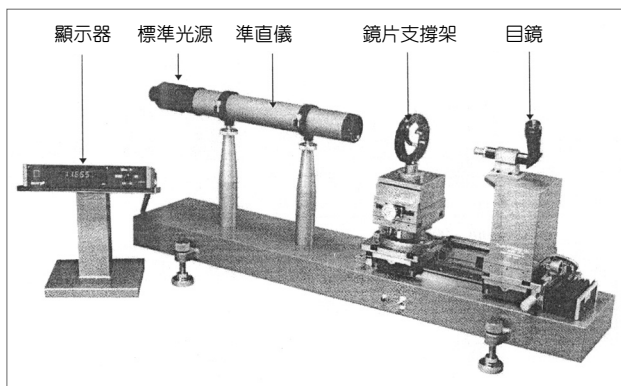


圖 10. 節點法測焦距儀。

## 三、儀器規格與特徵

焦距儀的儀器規格如表 1 所列。

優點：操作簡單、準確度高、維修容易。

缺點：僅適用於短焦距透鏡、小口徑透鏡、可見光透鏡等量測，可擴充性低。

## 四、應用

應用於測量透鏡或透鏡系統焦距、像差 (包括

表 1. 焦距儀的儀器規格表。

名稱		規格
測試台	測試台長度	560 mm
	測試範圍	200 mm
鏡片支撐架	標準鏡片支撐架	$\phi 25 \text{ mm} - \phi 80 \text{ mm}$
	其它	特殊設計
支撐臺	上下	$\pm 5 \text{ mm}$
	左右	$\pm 20 \text{ mm}$
	前後	$\pm 20 \text{ mm}$
	旋轉	$\pm 80^\circ \text{C}$
顯微鏡	目鏡	$4\times, 10\times, 20\times$
	物鏡	$10\times$
	前後移動距離 (精調)	$\pm 20 \text{ mm}$
	前後移動距離 (粗調)	直線軌道
測試片	標準測試片	$1.5 \text{ lines/mm} - 6 \text{ lines/mm}$
顯示器	數位顯示	$1 \mu\text{m}$
準直儀	焦距	500 mm
	有效直徑	$\phi 50 \text{ mm}$
濾光鏡		紅綠藍
光源		鎢絲燈 (6V、3W)

球面、彗星、像散、像場彎曲、畸變及色差)、解析度及鏡片曲率半徑等。

## 參考文獻

1. W. J. Smith, *Modern Optical Engineering*, New York: McGraw-Hill (1972).
2. R. Kingslake, *Lens Design Fundamentals*, New York: Academic Press (1978).
3. J. M. Lloyd, *Thermal Imaging System*, New York: Plenum Press (1982).
4. F. A. Jenkins and H. E. White, *Fundamentals of Optics*, New York: McGraw-Hill (1957).
5. A. E. Conrady, *Applied Optics and Optical Design*, New York: Dover, Part I (1957).
6. A. Cox, *A System of Optical Design*, New York: Focal Press (1964).
7. Donald C. O'Shea, *Elements of Modern Optical Design*, Atlanta: John Wiley & Sons, Inc (1985).
8. W. J. Smith, *Modern Lens Design*, New York: McGraw-Hill (1992).
9. Y. L. Lay, R. S. Chang, P. W. Chen, and D. C. Chen, *CCD Grating Generated Moire Pattern For Close-Range Measurement* Photonics and Optoelectronics (1997).

作者：陳德請先生為國立中央大學光電所博士，現任中山科學研究院材料研發中心副研究員。

# 透鏡定心儀

## Lens Centration Equipment

關鍵字：對心

Keywords：centration

### 一、基本原理

透鏡定心儀是一種應用在透鏡完工前最後一道次的加工設備，目的在將拋光好的透鏡定心，使其前後兩個鏡面的曲率中心點能夠位於光軸上（圖 1）。如果鏡片定心未達標準，就會影響鏡片或組裝後鏡組的成像品質。一般透鏡定心有兩種方法，即機械定心法、光學定心法和雷射定心法。以下分別就這三種方法做一說明。

#### 1. 機械定心法

機械定心是利用一對空心之同軸夾頭將透鏡固定住，夾頭之一為固定，另一個可調。夾頭邊緣以非平面方式製作，因此與透鏡的接觸只有圖 2 中的 p 點是夾頭與鏡片的接觸點，p 點所受的力是由可調夾頭對 p 點夾緊時所生之向心力  $F$ ， $F$  可以用垂直分量  $F_v$  和水平分量  $F_h$  來表示，而其中的  $F_v$  因可調夾頭的彈簧力，會使鏡片推向軸心，使得鏡片之光軸與定心夾頭之機械軸心對齊。由圖 2 可明顯看出  $F_v$  與鏡片直徑成正比。當鏡片夾緊時與夾頭間的摩擦力  $F_b$  與  $F$  成正弦關係時，鏡片將被固定住即

$$F_b \sim \mu F \cos \theta \quad (1)$$

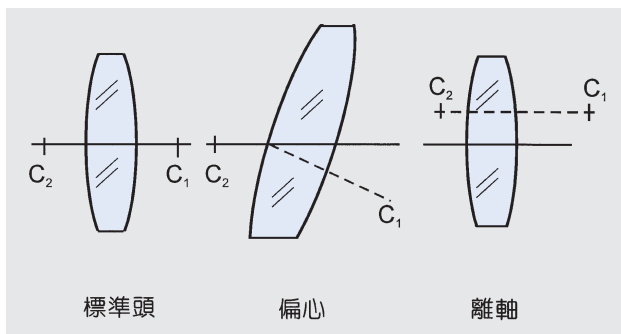


圖 1. 透鏡定心的基本應用。

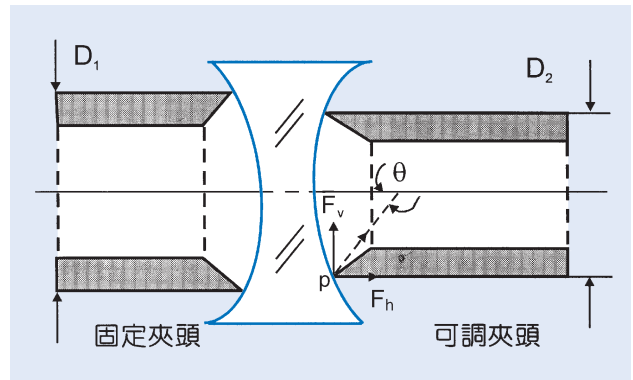


圖 2. 機械定心法的結構示意圖。

而  $\mu$  為摩擦係數與夾頭直徑  $D$  和鏡片曲率半徑  $r$  的關係約為

$$\mu \sim \frac{D}{2r} \quad (2)$$

考慮兩個透鏡面，則一般對心條件可得：

$$\left| \frac{D_1}{2r_1} \pm \frac{D_2}{2r_2} \right| = k \quad (3)$$

其中新月型鏡片因摩擦力相減的關係取負號，其餘取正號。(3) 式中當  $k > 0.15$  時對心較易，精度較高，當  $0.15 > k > 0.1$  時，對心困難度適中，當  $k$  小於 0.1 時則對心困難。機械對心法所用的夾頭，兩端的大小可依透鏡兩個面的曲率半徑做適當的調整，大小直徑不需一樣，依照第 (3) 式安排設計夾頭尺寸就可。

#### 2. 光學對心法

由於機械對心法受限於夾頭大小及鏡片曲率等因素，精度無法提升，光學鏡片對心是為了解決這些問題而發展出來的技術。圖 3 是光學對心法的基

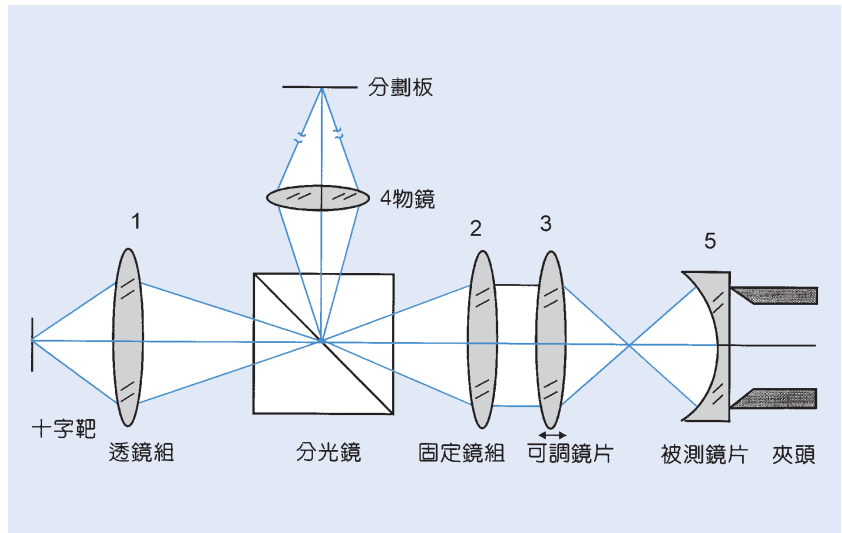


圖 3. 光學定心法的結構示意圖。

本架構：將對心的十字亮線標靶以燈源照亮，利用聚光鏡將光線投射到被測鏡片上，由於被測鏡片曲率半徑的不同，必須配合一個物鏡將十字標靶成像在分劃板上，再經由目鏡或偵測器觀測十字靶在分劃板上的位移，就可計算出對心的偏差值。當鏡片被固定在夾頭上，夾頭轉動時，如果鏡片兩個面的曲率中心不在中心軸上時，十字靶的像就會以圓周來運動，運動半徑越大，代表鏡片偏心越嚴重，鏡片偏心值  $\sigma'$  與分劃板上的讀取偏心誤差的  $\sigma$  關係可參考圖 4，即

$$\sigma' = 4M\sigma \quad (4)$$

(4) 式中， $M$  為物鏡  $L$  的放大倍率，由於反射的關係  $\sigma$  值會放大兩倍，再加上取直徑運動，我們實際量得的偏心值應為  $\sigma'$  值的一半。要量測精度高，可適當的調整物鏡的倍率。

圖 3 中，聚光鏡與物鏡先將十字靶成像在被測物前後方，這個像與被測鏡片表面的曲率半徑和物鏡形成一個光學系統，透過分光鏡將十字線以實像投在分劃板上。由於各種被測鏡片焦距，曲率半徑不同，為了將十字線成像在分劃板上，可將物鏡分成兩組，一組固定，一組可滑動以調整成像位置，使經由被測鏡片反射的像落在分劃板上。圖 3 中的放大倍率為鏡組 2 和鏡組 3 的合成倍率乘以顯微物鏡的倍率。(注意：如被定心的鏡片太小，可移開可調夾動而以瀝青直接將鏡片固定在固定夾頭

上。) 十字線的像先經聚光鏡成像在分光鏡上，鏡組 2 的焦點設在此實像上，因此相關位置可藉由造鏡者成像公式來完成。

### 3. 雷射定心法

雷射定心法是以雷射光取代光學定心法的光源，由於雷射光是藉由能量傳送到被定心鏡片，再反射或穿透聚點在四象限偵測器上。因此，光學系統的安排是在使雷射光打到偵測器上的雷射束不要太大即可。

## 二、結構示意圖

圖 3 為光學定心法中觀測顯微鏡的示意圖，鏡組 3 為可調鏡組，目的在將十字靶的像因不同的被測工作表面曲率所成不同距離的像送至光網或分劃板上。這個裝置大都應用在定心機上。

## 三、儀器規格與特徵

表 1. 三種定心法的比較。

定心法	極限定心範圍 (弧秒)	優劣點
機械定心	30"	*精度較低 *速度快 *操作方便
光學定心	10"	*精度高 *速度較慢
雷射定心	< 10"	*精度高 *操作易

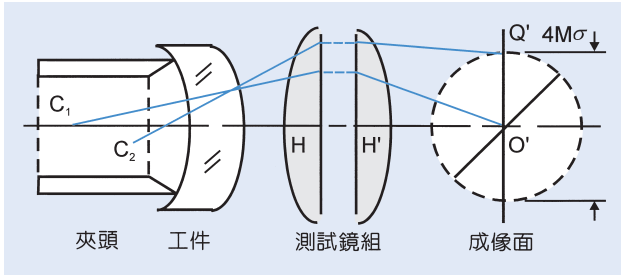


圖 4. 對心誤差示意圖。

#### 四、應用與用途

透鏡定心儀主要用途就是以夾頭固定鏡片，配合光學方法或機械摩擦特性來達到光學透鏡兩個鏡

面與光軸一致。本設備除了可達到鏡片定心的要求，也可利用砂輪對鏡片外徑研磨使其達到設定的大小。

#### 參考文獻

1. 光電與真空, 第二卷第一期.
2. LOH 鏡片定心機手冊.

作者：薛新國先生為英國 Reading 大學光學博士，現任工研院光電所專職顧問。

# 視度儀

## Diometer

關鍵字：視度、視度儀、望遠鏡

Keywords：diopter, diometer, telescope

### 一、基本原理

視度 (diopter) 是應用在成像距離的一種單位，其定義為

$$D = \frac{1}{l} \quad (1)$$

式 (1) 中  $D$  為視度值， $l$  為以公尺為單位，由眼睛瞳孔至成像的距離。當物像成像於瞳孔前， $D$  值為負數，反之，成像於瞳孔之後， $D$  值為正，當物像成像於無窮遠處時， $D$  值為零。量測視度的儀器稱為視度儀。大體說來視度儀有兩種型態，一為視度筒用於量測望遠系統的目鏡，使用時直接將視度筒放在被測目鏡出瞳附近，使其儘量與視度筒的物鏡或入瞳重合，其結構參考圖 1。其中分劃板和目鏡是做在同一滑動鏡筒 B 內，可前後滑動。當透過物鏡 1 的目標物清晰成像在分劃板上時，讀取在筒外的讀數就可知道望遠鏡目鏡所在的視度位置。當分劃板上最清晰的像落在物鏡的焦距上時視度為零，靠近物鏡的視度為正，反之為負。視度筒上的標尺由零視度起依下式移動，將視度刻劃值刻在視度筒上，利用公式 (1)，即可計算出視度在鏡筒上的刻劃為：

$$d = \left( \frac{\pm DF^2}{1000 + DF} \right) \quad (2)$$

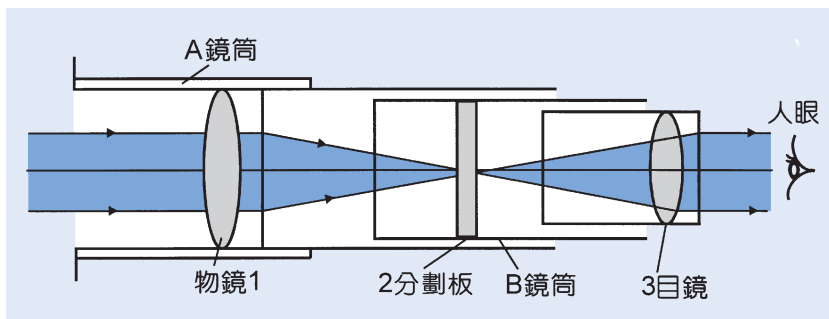


圖 1. 無焦系統望遠鏡視度儀。

式 (2) 中  $D$  和  $F$  的單位為毫米 mm， $D$  為視度值，負值為負視度，正值為正視度，而以焦點位置來定位零視度。例如：視度為 0.25 D、 $F = 100$  mm，可得在鏡筒軸向移動距離為  $-2.44$  mm，即成像位置在焦距前 2.44 mm 處，刻劃精度的要求可依需求設定。由於公式 (2) 是近軸關係，視度儀的物鏡  $F/NO$  要適當。焦距太大会造成鏡筒太長，太短會降低精度。

當視度儀被用來量測眼睛鏡片時，其架構與前者又略有不同，只是要被測的是眼鏡鏡片的視度值而非望遠鏡系統。可在被測鏡片前加裝一個準直儀 (collimator)，在準直儀的物鏡焦點上放一個投射靶 (圖 2)，在另一端即被測鏡片，同樣的放一個如圖 1 的視度裝置就可量測單一鏡片的視度值了。在視度值讀取方面，不若視度筒直接將視度值刻劃在鏡筒上，而是藉由光學顯像裝置把視度值投影在偵測器或毛玻璃上，分劃板、成像鏡與偵測器等相關位置為固定，前後移動以量測視度值。

### 二、結構示意圖

視度儀的結構 (圖 1) 非常簡單，用來量測無焦 (afocal) 系統即望遠系統的架構。

圖 2 是單一鏡組視度量測儀，不同於圖 1 的架構是準直鏡組與接收系統的安排。

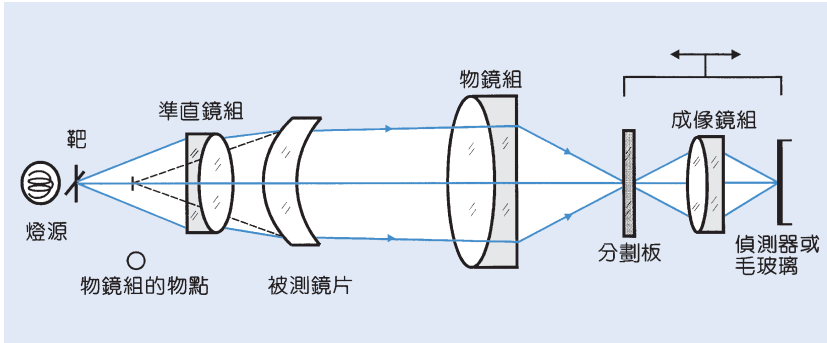


圖 2.  
單鏡組視度儀。

### 三、儀器規格與特徵

視度儀的規格依需求而有不同，大體上是以人眼的容忍誤差 (tolerance) 來決定，人眼在 0.25 視度左右不易明顯界定精確值，因此視度值的精度也大都不會超過 0.2 D 的數值來設計，規格之設定如下：

	望遠鏡	眼鏡鏡片
量測精度	~0.2 D	~0.25 D
視場角	10° - 20°	—
倍率	2.5× - 5×	—
量測視度範圍	± 6 D	± 10 D

### 四、應用與用途

視度儀的主要用途如 (1) 測定望遠鏡目鏡的視度值，(2) 測定鏡片組的視度值，(3) 測定望遠鏡、鏡片象散值。

#### 參考文獻

1. W. J. Smith, *Modern Optical Engineering*, NY: McGraw-Hill (1972).
2. R. Kingslake, *Lens Design Fundamental*, NY: Academic press (1978).
3. 德國 Trioptics 目錄.

作者：薛新國為英國 Reading 大學光學博士，現任工業技術研究院光學系統組專任顧問。

# 準直儀

## Collimator

關鍵字：準直儀

Keywords：collimator

### 一、基本原理

準直儀基本上是一個發射出平行光之光學鏡筒，其光學系統是望遠鏡光學系統的應用。在此由望遠鏡系統的工作原理和特性開始。

#### 1. 望遠鏡系統的工作原理和特性

望遠鏡是觀察遠距離物體的光學儀器，由於它擴大了遠處物體對人眼的張角，所以給人一種物體被拉近的感覺，並且可以清楚的看到物體的細節。

望遠鏡光學系統和顯微鏡一樣，也是由物鏡和目鏡組成，物鏡的像場焦點與目鏡的物場焦點重合，所以當物鏡接受無窮遠處物體發出之平行光束而成像於像場之焦平面上時，再次被目鏡成像於無窮遠處，因此平行光射入望遠鏡後，仍以平行光輸出。

#### 2. 準直儀的工作原理和特性

在精密測量中常採用倒置望遠鏡系統來改善光束發散角獲得較佳的平行光束，準直儀即是如此。在望遠鏡光路中，將目鏡去掉，並在物鏡焦面處放置分劃板，並加以照明，則此分劃板上發出之光，經物鏡後形成平行光束，如圖 1 所示，此平行光束可作為衡量直線性的工具，所以稱之為準直儀。

通常由準直儀得到的平行光，實際上只有分劃板上的軸上點（即物鏡焦點） $F$  發出的光，經物鏡後才成為與光軸平行的一束平行光。而因為分劃板位於物鏡的焦平面上所以分劃板上每一點發出之光線，經物鏡後也將成為一束平行光，但並不平行於光軸，如圖 1 中分劃板上之  $B$  點發出之光線經物鏡後產生的平行光束和光軸夾角  $\theta$ ， $\tan\theta = FB/f$ 。因此由準直儀得到的並非一束單純的平行光，而是由若干束平行光所組成， $\theta$  角為發散角。準直儀的焦距越長則發散角越小，準直儀的精度也就越高。

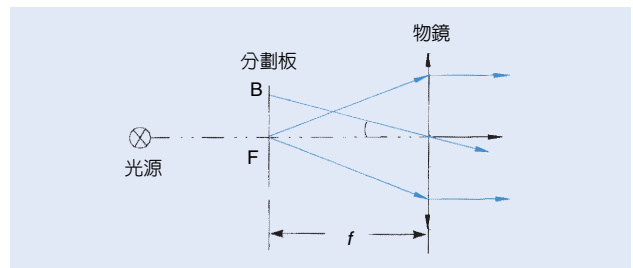


圖 1. 準直儀的工作原理示意圖。

因應各種量測需求，準直儀所需之焦距與孔徑大小不同，欲提高系統精度，需製作長焦距之準直儀，但系統之焦距長，系統長度亦需增加，因此有反射式準直儀的設計。反射式準直儀乃利用一至二個二次曲面組成，基本上是天文望遠鏡系統的倒置，利用反射鏡減短系統長度，系統架構有許多種不同形式如圖 2 所示，在大口徑長焦距的量測系統中常採用離軸拋物面或倒置 Cassegrain 望遠鏡架構等系統。

以雷射為光源可製成雷射準直儀，由於雷射方向性好且能量高集中，即使是簡單的光學系統也可以使很細的雷射光束照射到很遠的地方，因此可以作為一條空間的基準直線，用來進行長距離的準直度測量，大型機械不同軸度測量以及機械加工，機械安裝等的直線度監測。

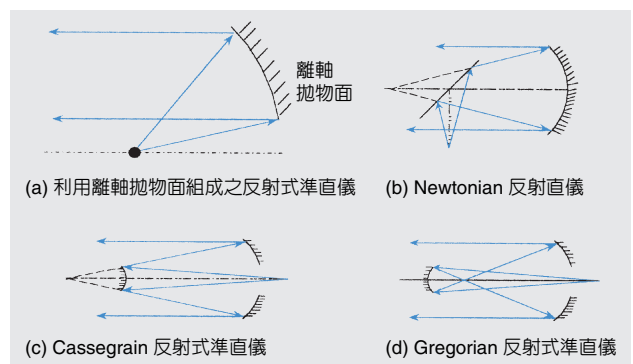


圖 2. 各種型式之反射式準直儀。

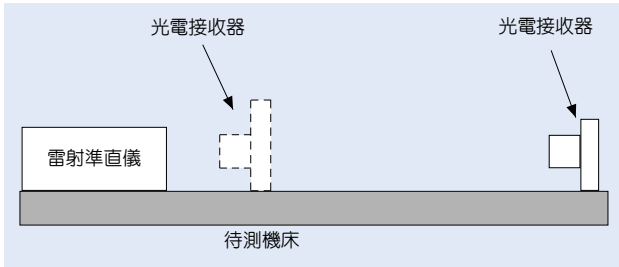


圖 3. 雷射準直儀工作原理示意圖。

圖 3 所示為雷射準直儀的工作原理，整個測量系統包含準直儀、雷射光源、光電接收器及顯示電路等，其中準直儀部份是由氦氖雷射及準直光學系統組成。以雷射發出的雷射光經準直光學系統，發射出一束直徑約 10 毫米的平行光束，這條光束就是平直度測量的基準線。光束截面的光強分佈相對於光束中心對稱，因此這條基準線實際上是這束平行光束的能量中心線。

在光電接收器上安裝一個四象限光電池，通過光電接收器檢測雷射光束能量中心位置。當雷射光束照射到四象限光電池上時，每個象限分別產生與被照射光能量成正比的電壓輸出，光電池 1 與 3 的電壓差值表示光束能量中心上下偏差，光電池 2 與 4 的電壓差值表示光束能量中心左右偏差。

進行量測時，首先應反覆調整準直儀使光電接收器分別置於機床或待測位移線之兩端，光電接收器在兩端點電表顯示均為零，使雷射光束以兩端點為基準的基準線，然後逐點移動光電接收器檢測機床表面相對於這條雷射基準線的不平直度大小。

雷射準直儀有以下三個優點：

- (1) 測量的讀數直接顯示偏移量，無需數學處理，特別適用於機床導軌的安裝與調整，其檢測精度在 10 米內可達 0.01 毫米。
- (2) 能同時顯示機床垂直與水平兩方向的不直度。
- (3) 雷射能量強，適用於長導軌測量。

## 二、結構示意圖

傳統式準直儀結構如圖 1 所示，亦可為圖 2 所示之反射式準直儀。圖 4 為雷射準直儀的光學系統結構示意圖，基本上是一個倒置的望遠鏡系統，可以是都卜勒型式，也可以為伽利略型式。都卜勒型式可以在物鏡與目鏡的公共焦平面處放置一個小孔

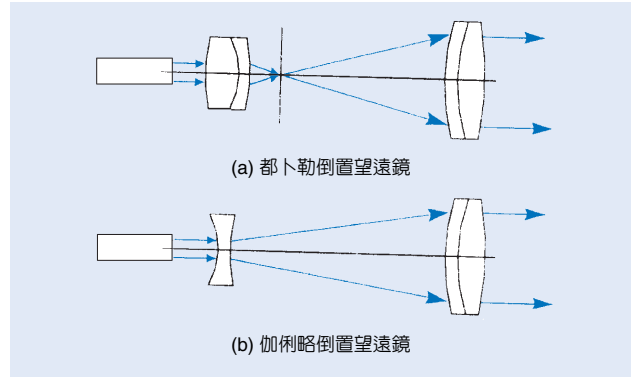


圖 4. 雷射準直儀結構示意圖。

徑光闌消除雜散光。

## 三、儀器規格與特徵

準直儀基本上是一個光學鏡筒，外形通常為圓柱狀，其規格要求通常是波長範圍、焦距、孔徑大

表 1. 市售雷射準直儀之規格。

直徑	25 mm	50 mm	150 mm
焦距	101.5 mm	227.2 mm	762.1 mm
波面品質	$\lambda/6$	$\lambda/6$	$\lambda/4$
波長範圍	450—750 nm	450—750 nm	475—650 nm
F 數	4.1	4.5	5.1

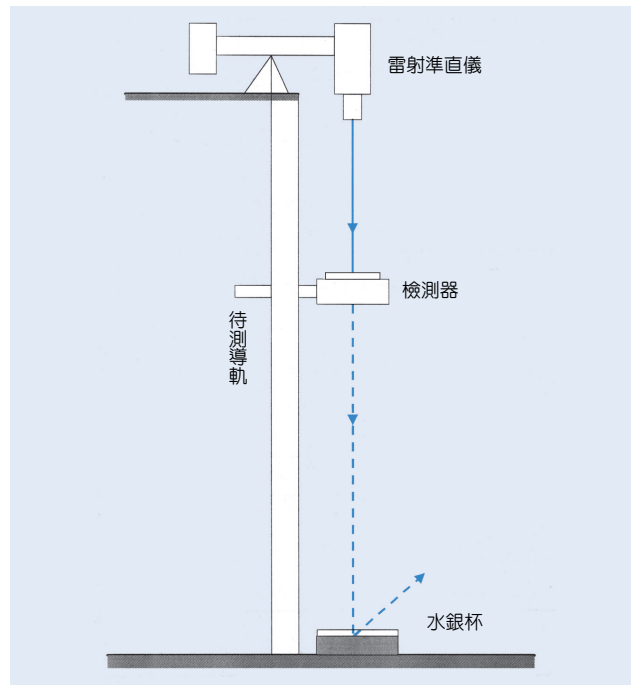


圖 5. 利用雷射準直儀組成之雷射鉛垂儀。

小、體積及波面品質等。表 1 為市面上雷射準直儀之規格。

#### 四、應用與用途

準直儀之應用相當廣泛，可作為衡量直線性的工具，以平行光束作為直線的基準，將準直儀系統內加入分光元件與目鏡即成為自準儀，可組成光學測角儀、平直度儀、光具座等，與 CCD 或光電晶體等檢測器組合可成為光學轉換函數量測儀等。而雷射準直儀更可應用於機床導軌的安裝、長導軌的測量及鉛垂儀應用於高樓建築的電梯導軌安裝等。圖 5 即為利用雷射準直儀組成之雷射鉛垂儀的示意圖，被測導軌不僅要求平直度而且要求垂直地面，

因此鉛垂儀的雷射光束要調整垂直地面，此時在地面放置水銀杯，由水銀液面的自動水平，使入射雷射光束經水銀面反射後返回鉛垂儀，以達到雷射光束之垂直調整。接收器沿被測導軌移動，進行量測。

#### 參考文獻

1. W. J. Smith, *Modern Optical Engineering-The Design of Optical Systems* (1984).
2. 精密儀器便覽, 台灣台北: 松錄文化事業 (1990).

---

作者：高淑芬小姐為國立中央大學光電所碩士，現任工業技術研究院量測技術發展中心副工程師。

# 自動視準儀

## Autocollimator

關鍵字：自動視準儀、反射原理

Keywords：autocollimator, principle of reflection

### 一、基本原理

自動視準儀係應用光線的兩個平面反射原理<sup>(1)</sup>，當光源發出入射光線，經由對物透鏡投射平行光束於一反射面時，若

- (1) 反射面係垂直於平行光束，則反射光束將沿原入射光路折回，並會聚於原光源上，如圖 1(a) 所示。
- (2) 反射面略有傾斜  $\theta$  時，則反射光束將以  $2\theta$  反射角折回，並會聚於偏離原光源一  $d$  之偏位距離，如圖 1(b) 所示，其中  $f$  為對物透鏡之焦距。

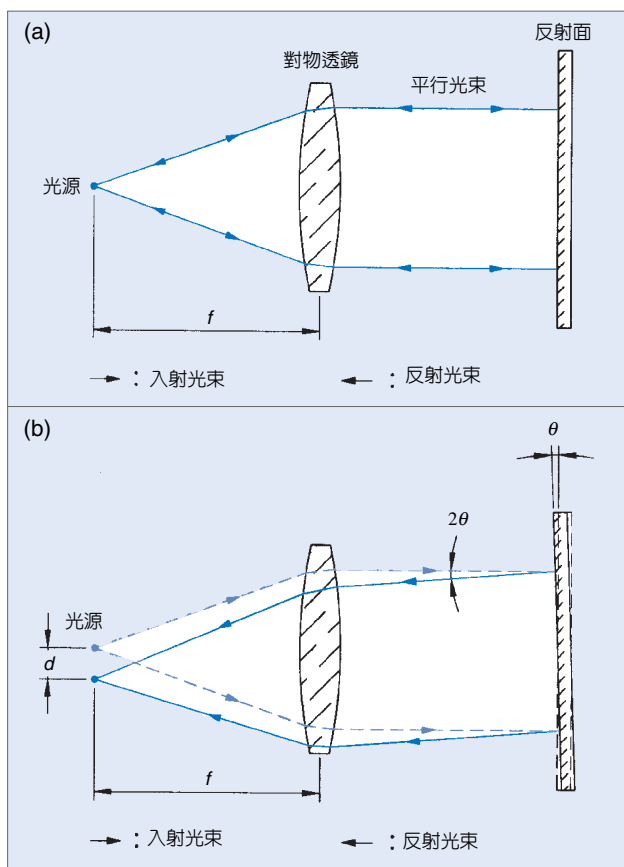


圖 1. 光線的平面反射原理。

因此，可得關係式為

$$d = f \tan 2\theta \cong f \cdot 2\theta \quad (\because \theta \rightarrow 0)$$

此位移量  $d$  可由自動視準儀讀得，再經由自動視準儀之數據處理機構，直接輸出角度  $\theta$  之量測值。

### 二、結構示意圖

自動視準儀一般可分為光學式與光電式兩種，其內部結構略有不同。

#### 1. 光學式自動視準儀

光學式自動視準儀之結構如圖 2 所示<sup>(2)</sup>，光源發出光線經十字線標板 (影像標板)，將十字影像投射至分光鏡，再經過對物透鏡組形成平行光束，投射至平面反射面。

若反射面係垂直於入射光束，則反射光束將反射至刻線標板之中心位置上。

若反射面略有傾斜  $\theta$  時，則反射光束將以  $2\theta$  反射角折回，並反射至偏離刻線標板中心一  $d$  之偏位距離，再由測微器可量測得傾斜角度  $\theta$  之值。

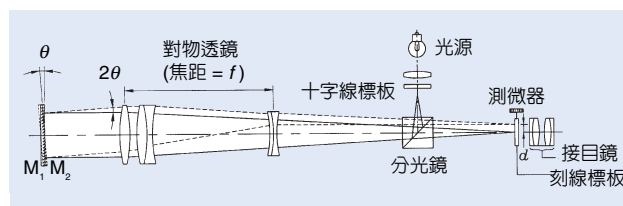


圖 2. 光學式自動視準儀結構圖。

#### 2. 光電式自動視準儀

光電式自動視準儀之結構如圖 3 所示，其結構與光學式的大致相同，惟讀數機構改由影像接收器 (photocell) 感測反射影像之偏位  $d$ ，再由數據處理

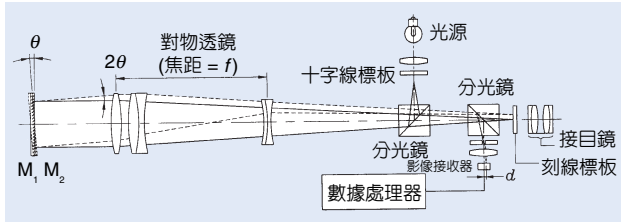


圖 3. 光電式自動視準儀結構圖。

器計算出傾斜角度  $\theta$  之值。

### 三、儀器規格與特徵

自動視準儀之規格主要有量測範圍 (measuring range) 與解析度 (resolution)，而光學式自動視準儀之量測範圍較光電式的為大，但其解析度則較光電式的為差。一般而言，光學式自動視準儀的量測範圍為  $20'$  至  $30'$ ，解析度為  $0.5''$  至  $1''$ 。而光電式自動視準儀的量測範圍為  $10'$  至  $20'$ ，解析度可達  $0.1''$  至  $0.01''$ 。

自動視準儀又可分為單軸向與雙軸向兩種。單軸向自動視準儀在量測時，只能作水平軸 (horizontal axis) 或垂直軸 (vertical axis) 之單軸向量測角度，若要量測另一軸向時，則自動視準儀之鏡筒必須旋轉  $90^\circ$ 。而雙軸向自動視準儀在量測時，則可同時量測水平軸與垂直軸之角度，故使用時較為方便。

自動視準儀的其他主要規格為準確度 (accuracy)、重覆性 (repeatability) 及最大工作距離 (maximum working distance) 等，其中最大工作距離為反射面與自動視準儀之間的最大允許分隔距離，若兩者分隔大於此工作距離時，則自動視準儀可能無法量測到有效的量測值。因此，使用者必須根據使用需求而選擇適當的自動視準儀。

### 四、應用與用途

自動視準儀之主要用途為量測反射面之微小角度的變化量，其在精密量測上之應用非常廣泛，為精密角度量測上不可或缺的精密量測儀器。在量測時，通常要配合其他元件使用，甚至需要兩座自動視準儀一起使用。其應用有：

(1) 直線度 (straightness) 量測：需配合反射座 (reflector) 使用，如圖 4 所示。

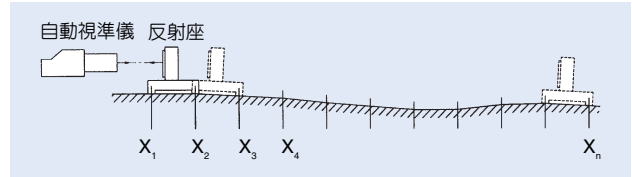


圖 4. 直線度量測。

(2) 平面度 (flatness) 量測：需配合反射座及反射鏡 (reflecting mirror) 使用，如圖 5 所示。

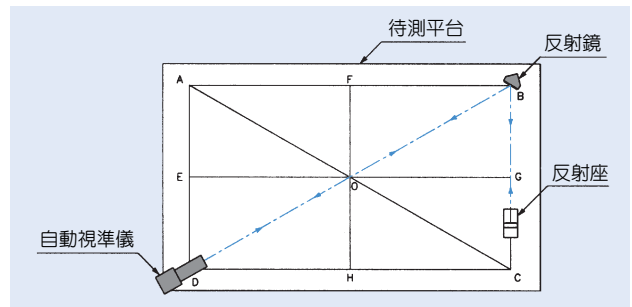


圖 5. 平面度量測。

(3) 垂直度 (squareness) 量測：需配合反射座及五稜鏡 (pentagonal prism) 使用，如圖 6 所示。

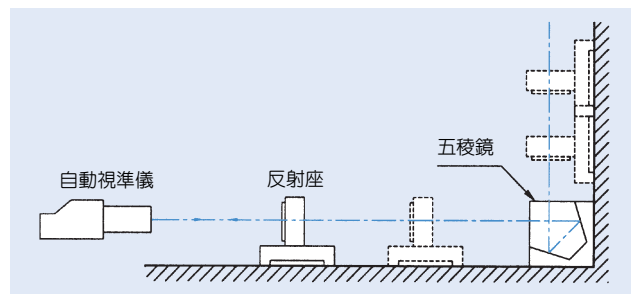


圖 6. 垂直度量測。

(4) 角度塊規 (angle blocks) 校正：需要兩座自動視準儀及配合標準角度塊規使用，如圖 7 所示。

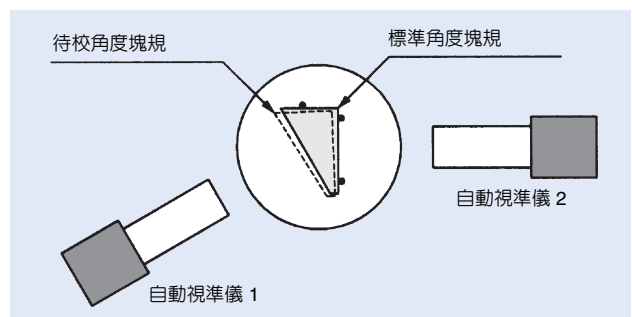


圖 7. 角度塊規校正。

(5) 多邊規 (polygons) 校正：需要兩座自動視準儀及配合轉盤使用，如圖 8 所示。

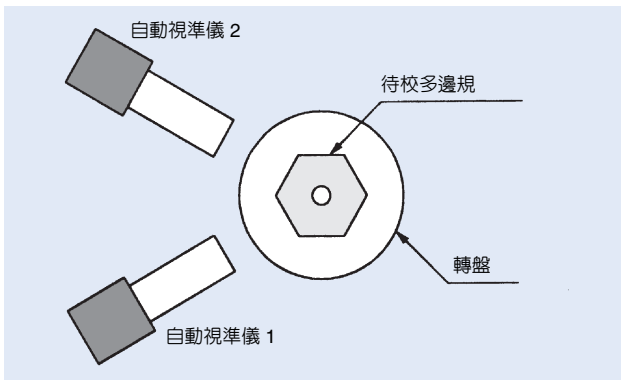


圖 8. 多邊規校正。

(6) 分度盤 (indexing table) 校正：需配合標準多邊規使用，如圖 9 所示。

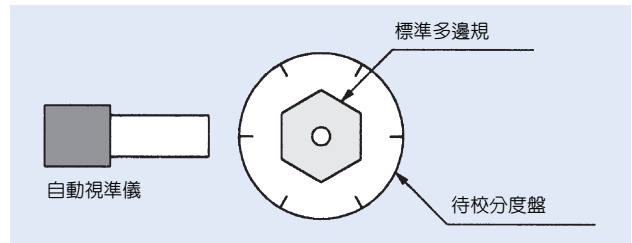


圖 9. 分度盤校正。

#### 參考文獻

1. *Handbook for Microptic Automatic Position Sensing Autocollimators, 142/17 and 142/16 (Types TA80 and TA81)*, Rank Taylor Hobson Limited.
2. *Autocollimator 6B6D Instructions*, Nikon Corporation.

作者：呂錦華先生為國立中央大學機械工程碩士，現任工業技術研究院量測技術發展中心長度研究室研究員。

# 鏡頭投影解像儀 Resolving Power Test Projector

**關鍵字：** 投影解像儀、鏡頭、分辨率測試圖

**Keywords：** resolving power test projector, objective, resolution test chart

## 一、基本原理

投影解像儀是最傳統、最方便和便宜的光學鏡頭評價設備，其原理很簡單。製作一系列的等寬等距的垂直和水平長條線在一個分辨率測試圖 (resolution test chart) 上，將強光源打在此標靶上，並以待測鏡頭將標靶投影在螢幕上，以目視的方式分辨這些標靶，針對各欲檢測的視場觀察可以分辨到哪一組標靶，並對照表格即可得知待測鏡頭的分辨率。投影裝置如圖 1 所示，其中裝置鏡頭的夾具須可以前後移動變動後焦，以方便找到最佳成像面。標靶則有各式各樣的標準，如最常用的 3 條狀的 USAF1951 測試標靶 (圖 2)、5 條狀的 NBS 1963A 測試標靶 (圖 3) 及日本 JIS 制定的各種標準標靶等；另有一種星狀測試標靶 (star test target) (圖 4) 可用來評價大倍率的鏡頭，評價其在焦點上的成像品質。而標靶的尺寸大小則根據不同種類鏡頭所需的像幅大小而制定，而具多種頻率的長條標靶必須涵蓋所有鏡頭須檢驗的視場，一般性的配置如圖 5 所示。

## 二、結構示意圖

鏡頭投影解像儀的結構如圖 1 所示。

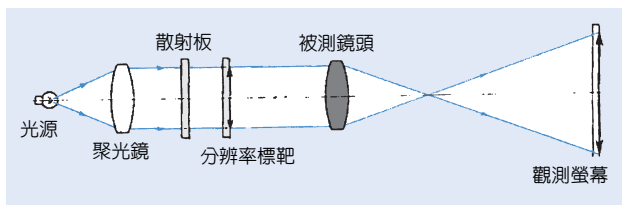


圖 1. 鏡頭投影解像儀架構圖。

在圖 2 中，群號 (group number,  $G$ ) 和靶號 (element number,  $E$ ) 與空間頻率的關係為<sup>(4)</sup>：

$$\text{Spatial Freq. in lines/mm} = 2 \left[ G + \frac{E-1}{6} \right] \quad (1)$$

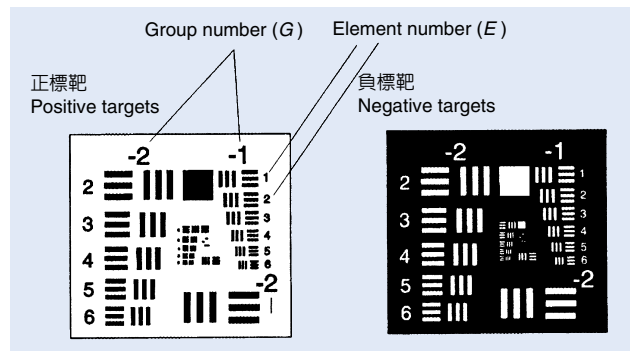


圖 2. USAF1951 測試標靶。

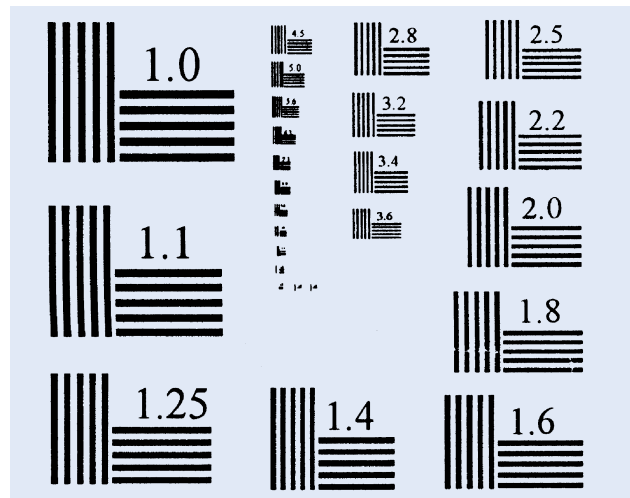


圖 3. NBS 1963 A 測試標靶。

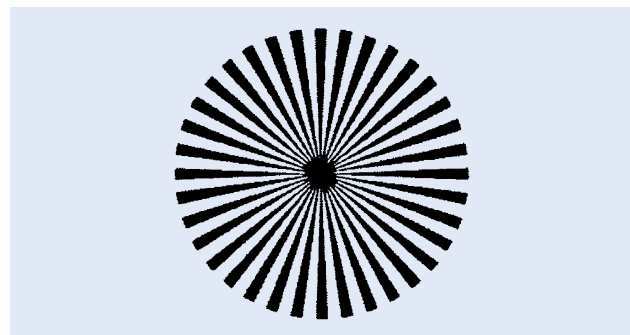


圖 4. 星狀測試標靶。

表 1. USAF 1951 分辨率標靶和空間頻率轉換表。

Element Number	Group Number									
	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6	7
1	0.25	0.50	1.00	2.00	4.00	8.00	16.0	32.0	64.0	128
2	0.28	0.56	1.12	2.24	4.49	8.98	17.95	36.0	71.8	144
3	0.31	0.63	1.26	2.52	5.04	10.1	20.16	40.3	80.6	161
4	0.35	0.71	1.41	2.83	5.66	11.3	22.62	45.3	90.5	181
5	0.40	0.79	1.59	3.17	6.35	12.7	25.39	50.8	102.0	203
6	0.44	0.89	1.78	3.56	7.13	14.3	28.51	57.0	114.0	228

Line Pairs/mm

表 1 為 USAF1951 分辨率標靶和空間頻率轉換表，根據式 (1) 換算而來。

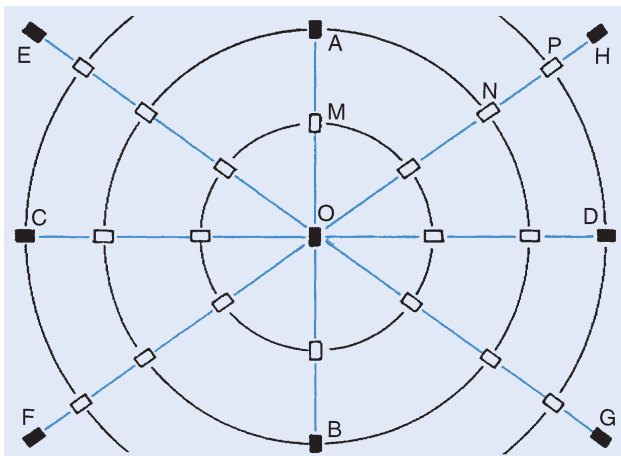


圖 5. 標靶在像幅上的一般配置圖，圖中每一個方框皆有一組分辨率標靶。

### 三、儀器規格與特徵

鏡頭投影解像儀可用在任何成像鏡頭的檢驗上，本儀器並無特定規格，主要依據鏡頭種類和規格的不同來選擇鏡頭投影解像儀，若鏡頭須投射的距離較遠，系統有很大的放大倍率時，要求投影機有較強的光源以免因影像放的太大而亮度太弱。而

若只使用在很短焦距的情況，如 CCD 鏡頭，此類鏡頭的像幅小，投影距離短，倍率也較小，可選擇小型的投影機。其他一般性原則為測試標靶的大小必須涵蓋鏡頭需求的視場、標靶解析度須足夠解析鏡頭。另外可選擇正標靶或負標靶，正標靶一般用在諸如顯微鏡、放大鏡的鏡頭投影測試上，負標靶則建議用在準直儀之類的鏡頭上。

### 四、應用與用途

鏡頭投影解像儀可用在任何成像鏡頭品質的檢驗上，如照相機、空中照相機、影印機鏡頭、微縮影鏡頭、傳真機鏡頭、掃描機鏡頭、投影機鏡頭等。

### 參考文獻

1. Ealing catalog (1992).
2. *Optics Guide 4*, Melles Griot catalog (1994).
3. JIS 光學 handbook (1994).
4. C. Wyant, *Optical Testing*, Optical Sciences Center, University of Arizona (1976).

作者：莊福明先生為國立中央大學光電科學博士，現任工業技術研究院光電研究所工程師。

# 立體顯微鏡

## Stereomicroscope

**關鍵字：**立體顯微鏡、共物鏡式立體顯微鏡、格林諾式立體顯微鏡

**Keywords：**stereomicroscope, common objective type stereomicroscope, Greenough type stereomicroscope

### 一、基本原理

立體顯微鏡不同於傳統的雙目式顯微鏡 (binocular microscope) 在於其不僅能夠看被測物的二維放大影像，還能看到物體的深度 (depth)，觀看立體顯微鏡需要有兩個不同的視角，如何達到這個目的就是立體顯微鏡的關鍵。立體顯微鏡有以下幾種特性：

- (1) 不若一般顯微鏡觀看的是倒像，利用倒像稜鏡組使物鏡的倒像反正，以便使用者有實物觀察的感覺。
- (2) 立體顯微鏡的工作距離較長，以便於使用者在工件上操做。在低倍率時，工作距離經常超過 60 mm。
- (3) 放大倍率大都由非常低的倍率約 2 倍左右，開始變倍至二、三百倍左右，受限於光學系統和

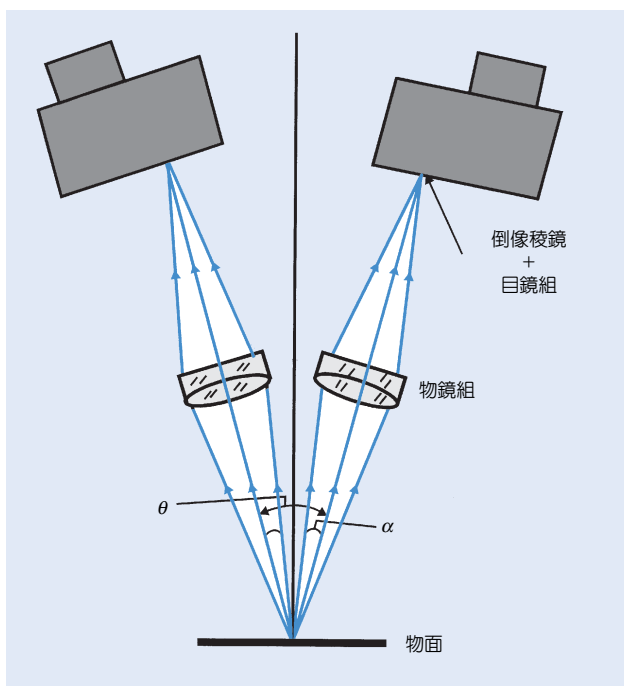


圖 1. 格林諾式立體顯微鏡。

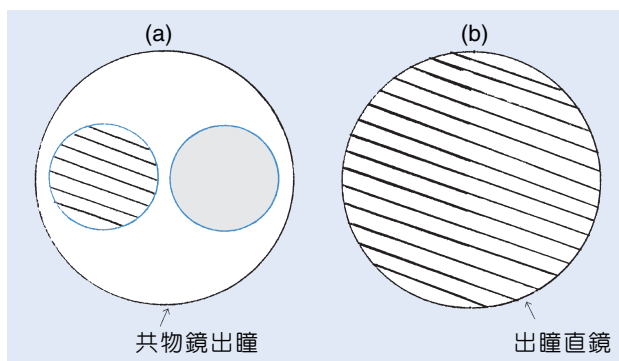


圖 2. (a) 立體顯微鏡左右出瞳不同，且均小於共物鏡的瞳直徑。(b) 一般雙光路顯微鏡出瞳視野。

使用目的的不同，在低倍率時需要能有較大的視場，以利觀測。

- (4) 景深較深，這是因為立體顯微鏡有三維的影像，景深不深會造成三維效果失真，但也因此，解像率無法太高。

立體顯微鏡的主要型式有兩種，即格林諾式 (Greenough type) 和共物鏡式 (common main objective, CMO)，就這兩種立體顯微鏡做一說明。

#### 1. 格林諾式

圖 1 是格林諾式立體顯微鏡的基本架構，它是由兩個獨立低倍率顯微鏡以大於  $6^\circ$  左右的夾角組成的雙目觀測顯微鏡。由於  $6^\circ$  的夾角，左右兩眼看到的視場不同 (圖 2)，視野的重疊經過大腦影像合一 (fuse) 的作用，就可看到立體的像。格林諾式立體顯微鏡的優點是結構簡單、景深長，缺點是雙目斜看工件，觀測上較不舒服，解像率因物鏡無法做大而提升。

#### 2. 共物鏡式

圖 3 為共物鏡式顯微鏡，它是針對格林諾式的

缺點而開發出的立體顯微鏡。CMO 式的左右光軸是垂直雙目，左右視野是以一個共用物鏡及其後的聚焦系統所組成，倒像與傾角稜鏡位於聚焦系統的焦距內。由於聚焦系統必須分佔 CMO 的兩邊，也使得解像率無法提升太高，且因左右光路不對稱的結果，使得系統像差較難校正。

## 二、結構示意圖

圖 1 與 圖 3 為立體顯鏡的兩種主要型態。格林諾式是由兩個獨立的顯微鏡所組成，如果要達到變化倍率的效果，就得把物鏡組設計成變焦物鏡。但共物鏡式的變倍鏡組是在後物鏡組，且由於來安置倒像稜鏡組，因此後半段距離要夠長，大都採用無焦式變倍望遠鏡再配合一個長焦鏡組，來達到系統變化倍率的目的。

## 三、儀器規格與特徵

目前全世界生產立體顯微鏡的廠家很多，規格並不統一，但主要還是在高價位與低價位的區分。高價位的倍率與解像率較高，大都採用 CMO 式，格林諾式則以低倍率、大視場 (field of view) 為

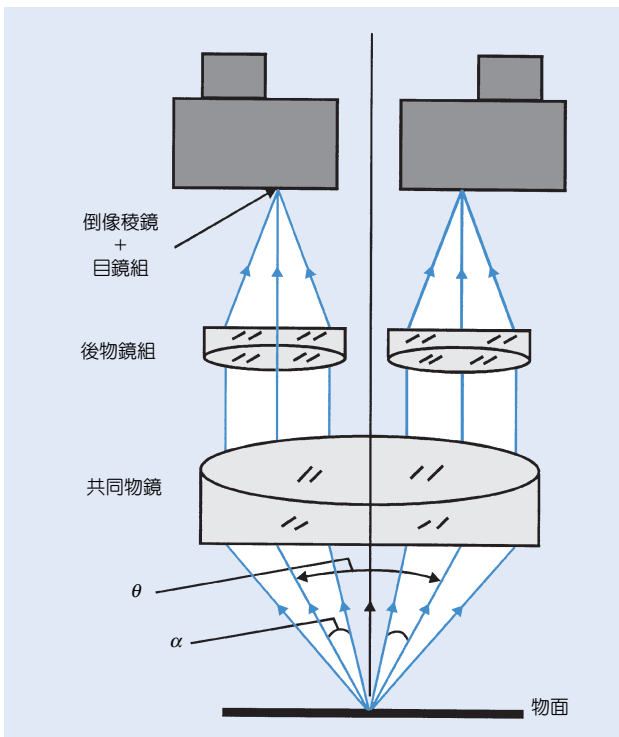


圖 3. 共物鏡立體顯微鏡。

表 1. 物鏡式與格林諾式立體顯微鏡之比較。

	CMO 式	格林諾式
雙人觀測	可選擇	無
系統總放大倍率	可達 400×	100× 以下
目鏡倍率	10×, 15×, 20×, etc	同 CMO
拍照方式	目鏡或分路取像	同 CMO
工作距離		大
變倍範圍	7:1 左右	同 CMO
物鏡數值孔徑 (N.A.)	可達 0.13	< 0.05
視場	小	大
雙目可調距離	55 mm—75 mm	同 CMO
觀測傾角 (度)	45°, 30° 可選擇	垂直

主。為了取像拍照，在設計上都加裝有取像裝置，茲就這兩種顯微鏡的大致規格以表 1 說明。

## 四、應用與用途

立體顯微鏡與傳統顯微鏡不同處，在於前者可以看到三維的影像，工作距離較長，但解像率或分辨率較差，針對它的優點，立體顯微鏡的主要用途已被使用在表 2 的領域。

表 2. 立體顯微鏡的主要用途及應用領域。

解剖學	anatomy	組織學	histology
考古學	archeology	檢查	inspection
裝配	assembly	金屬材料	metal working
生物學	biology	切片法	microtomy
黏壤	bonding	礦物學	mineralogy
植物學	botany	貨幣學	numismatics
化學	chemistry	眼科學	ophthalmology
集成電路	chips	耳科學	otology
晶體學	crystallography	古生物學	paleontology
教學	education	寄生生物學	parasitology
電子學	electronics	病理學	pathology
胚胎學	embryology	集郵	philately
工程學	engineering	半導體工業	semiconductor
昆蟲學	entomology	取權分析	specimen
寶石學	gemology	外科醫學	surgery
地質學	geology	晶片	wafers
		動物學	zoology

## 參考文獻

1. R. Seidenberg, *Stereo Microscopy: A Review*, Laboratory, 66, Oct., (1981).
2. R. Kingslake, *Applied Optics and Optical Engineering*, **3**.
3. S. G. SHIUE, PhD thesis, University of Reading (1984).
4. *Stereo Zoom Series Microscopes*, Bausch & Lomb Instruction Manual.

---

作者：薛新國先生為英國 Reading 大學光學博士，現任工業技術研究院光電工業研究所專職顧問。

# 工具顯微鏡

## Toolmaker Microscope

關鍵字：工具顯微鏡

Keywords：toolmaker microscope

### 一、基本原理

利用光學成像原理，以物鏡、目鏡等光學透鏡將待測物放大成像。並輔以 X-Y 微調移動定位機構與光學尺等精密位移量測組件，進行孔徑與圓柱體外徑等測定。

### 二、結構示意圖

工具顯微鏡的儀器結構如圖 1 所示。

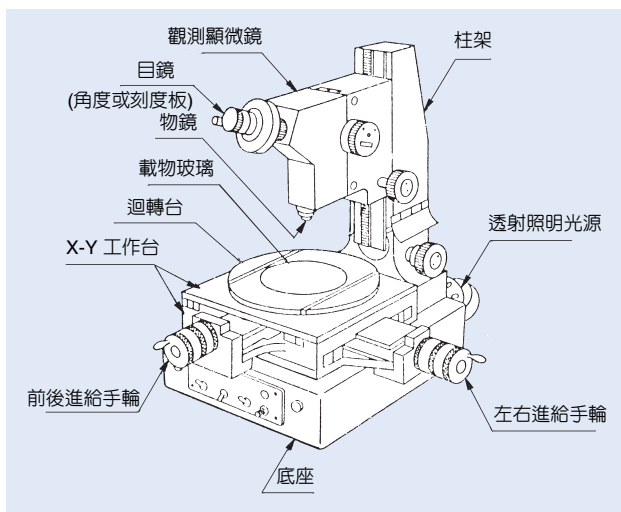


圖 1. 工具顯微鏡的儀器結構圖。

### 三、儀器規格與特徵

工具顯微鏡主要規格包括工作臺最大荷重、工作臺 X-Y 軸行程、Z 軸行程、可量測距離、位移讀取最小值、位移精度、旋轉臺可旋轉角度、旋轉精度、成像放大倍率、目鏡倍率、物鏡倍率、焦深、工作距離、物鏡視野、物鏡數值孔徑等。附屬設備包括超長工作距離 (ultra long working distance) 的物鏡，以防止對焦時物鏡撞有待測物。例如 20 倍焦距大於 10 mm 的物鏡，並有夾具以固定待測物，或 V 型支架以固定圓柱型待測物，也可安裝傾斜臺以便將待測物傾斜至某些角度觀察。

### 四、應用與用途

在光學測定機中最常用的測定器有投影測定器及工具顯微鏡兩種。這類使用光學成像原理的量測機具有以下幾點共同特性：

- (1) 採非接觸測定，故最適合容易變形測定物之測定。
- (2) 操作簡單，可進行孔徑測定與圓柱體外徑測定。
- (3) 使用其他附屬設備，即可輕易測定更複雜形狀之測定物。
- (4) 可以加上夾具、旋轉臺與 X-Y 工作台等配件，控制和調整待測物的觀察角度與位置。

而目前對於測定數位化及自動化已日漸普及，預計未來被使用的機會會越來越多。

工廠用工具顯微鏡主要是使用在小型零件之工程檢驗或者夾具之測定。工具顯微鏡比較大型，測定範圍較廣而且備有許多附件。由於測定範圍較廣，所以一般支柱均可傾斜。萬能測定顯微鏡的測定範圍比工具顯微鏡更廣，精度也較高，並且備有各類型附件，可以適應任何形狀之測定。以下將以工具顯微鏡為主加以介紹。

大型工具顯微鏡的迴轉工作台是採裝配式，亦由精密 X-Y 移動工作台和觀測顯微鏡製成的。具有同軸照明光源，而穿透照明設備是採用遠心照明。支柱和工作台一體成型可以左右傾斜，螺紋測定非常便捷。眼觀測部裝有投影裝置，可從事投影像之觀測。並可外接攝影機與監視器，以便直接觀察量測。工具顯微鏡的應用測定，可包括下列幾項。

#### 1. 直角座標測定

測定時必須使測定物的直角座標方向和 X-Y 工作台的移動方向一致時方可進行測定。採用直角

座標測定時由十字移動工作台的移動量就可直接讀取直角座標值，若是大型工具顯微鏡，使用瞄準用十字線將直角座標測定上的物像、連接到觀測目鏡後，即可正確測定。而在進行測定物直角座標方向和十字移動工作台之校正時，使用裝設在大型工具顯微鏡上的裝配式旋轉工作台就可校正，至於小型工具顯微鏡只要加裝旋轉台附件即可。

## 2. 極座標測定

令旋轉工作台的回轉中心對準觀測眼的中心點，其次再使測定物極座標原點對準觀測眼中心點，而角度基準線則對準十字移動方向，取此刻之 $\theta$ 為 $0^\circ$ ，使用旋轉工作台和 X-Y 工作台即可測定 $(R_0)$   $(R_1, \theta_1)$   $(R_2, \theta_2)$ 。而大型工具顯微鏡在台面玻璃上均刻有很小的十字指標，故設定好台面十字標後再對準回轉中心即可測定。小型工具顯微鏡需事先調整觀測眼的角度刻為 $0^\circ$ ，再對準觀測透鏡十字線和十字移動台的移動方向後就可測定。

## 3. 角度測定

使用旋轉工作台或角度觀測目鏡即可測定。一般而言角度觀測目鏡的精度較佳，所以普遍都採用角度觀測目鏡。

## 4. 高度測定

雖然小型工具顯微鏡無法測定高度，但是若把度盤規裝在支柱的上端，然後利用顯微鏡的上下移動量就可以測定高度。然而，由於焦點深度、支柱傾度及度盤規和光軸間等因素誤差，欲正確測定相當困難。

## 5. 孔徑測定

一般是使用目鏡上的十字線刻劃進行孔穴內徑測定，則先將十字線刻劃以外切方式對準貼齊內孔邊緣，並記錄此位置座標。再利用 X-Y 工作台上任一軸上的移動，移動至十字線刻劃對準貼齊內孔的另一邊緣，再讀取此另一位置座標的測定值。將此兩個相對孔邊緣的位置座標相減，即可獲得孔穴內徑。

## 6. 圓柱體外徑測定

若是小型工具顯微鏡，則可使用傾斜中心，若是大型工具顯微鏡則使用中心支撐台，非中心支撐台及 V 形支撐台，使測定物的軸心對準工作台的左右移動方向進行測定。假如要正確測定時，將角度觀測透鏡對準零點，使測定物的一邊輪廓對準旋轉工作台上的十字線。再使另一邊對準十字線，此刻如果兩側具有角度差。因此必須使用二角的中間值設定。測定時是讀取 Y 軸的讀數，故要選定最佳的光圈直徑。

## 7. 螺紋測定

### (1) 外徑和螺紋內徑

測定的方法和圓柱體的測定方法相同。

### (2) 有效直徑測定

導程角較小的螺紋不需使支柱或傾斜中心傾斜，祇要把十字線對準螺紋的齒腹就可以測定。假如祇有導程角而使支柱或傾斜中心傾斜容易產生誤差。因此，若使用十字線測定者，祇要導程角傾斜對準螺紋齒後再讀取測定值，其次再依相同方法測定相對之測定值，由二者的差即可求得有效徑。

### (3) 節距測定

使用小型工具顯微鏡時，只要使傾斜中心傾斜而使用導程角測定即可，而大型工具顯微鏡則以支柱傾斜方式再用導程角測定節距。

### (4) 螺紋角度測定

可用傾斜中心或支柱傾斜的方法進行測定，但測定值是指螺紋垂直斷面角度，所以須經計算後才能解得螺紋軸斷面的角度（請參考投影測定器中，螺紋角度測定方式）。

## 8. 測定精度

### (1) 放大倍率精度

根據 JIS 規範指出，輪廓測定用對物透鏡的放大倍率精度，是指當測定範圍為 1/2，其誤差須在 $\pm 0.25\%$ 以內。例如一般工具顯微鏡的觀測數是

21 mm，若使用 3 倍對物透鏡，那麼在 1/2 的觀測範圍內，它的誤差是  $\pm 9 \mu\text{m}$ 。

(2) 十字指標線的對準精度

因個人操作及端面形狀會產生很大的差異，一般是  $1-3 \mu\text{m}$  左右。

(3) 測定台移動精度

移動精度與移動距離有關。

0—50 mm  $4 \mu\text{m}$  以下。

50—100 mm  $5 \mu\text{m}$  以下。

100—150 mm  $6 \mu\text{m}$  以下。

(4) 螺紋之有效徑： $\pm 5 \mu\text{m}$ 。

**參考文獻**

1. 精密量測便覽, 初版, 台北: 松錄文化事業 (1990).
2. Nikon 工具顯微鏡型錄, 台灣 (1996).
3. Olympus 工具顯微鏡型錄, 台灣 (1997).

---

作者：王述宜先生為國立中山大學機械博士，現任國科會精密儀器發展中心專案副研究員。

# 干涉式顯微鏡

## Interference Microscope

**關鍵字：**干涉式顯微鏡、干涉、顯微鏡

**Keywords：**interference microscope, interference, microscope

### 一、基本原理

干涉儀的原理可藉由各種干涉式顯微鏡的設計，應用在顯微物體的研究。光束透過透明樣品或由不透明樣品反射，然後與具有光程差的另一光束進行干涉，可完整地將透明樣品的結構或不透明樣品的表面輪廓結構清楚的顯現，光程差可在影像上轉換成強度差。

大眾熟悉的 Michelson、Mach-Zehnder 及 Jamin 干涉儀原理，與熟知的牛頓環光學表面檢測原理，皆已經應用到顯微鏡上。同時，一些特別為顯微鏡設計而且與古典干涉儀不同的的干涉儀 (micro-interferometers) 也已設計建立。干涉式顯微鏡可以對光學路徑長度 (optical-path length) 做定量分析，其樣品的結構也可藉由影像結構上的干涉圖案更清楚地顯現，而且也更容易解讀。

假如使用白光做為光源，所得的干涉環是類似大家熟悉的彩色牛頓環 (Newton's rings)。若利用鈉燈 (sodium lamp) 或含濾波片的汞燈等單色光做為光源，所產生的影像會更清晰而且比較容易解讀。

干涉式顯微鏡的組成可以相當簡單也可以相當複雜，視其需求而定。最簡單的組成是用鍍銀的光學分光板 (silvered semireflecting glass plate) 放置在 45 度角，將發光源分光，其中一道光束由樣品反射，而另一道光束則由參考面反射，參考面可藉由小角度的傾斜產生相位差 (phase difference)。兩道光束在一簡單的顯微光學系統或一複顯微光學系統內干涉，在影像上產生干涉環或干涉帶。也可將光學分光板和其相關的光源系統轉換成垂直照射不透明物體用的物鏡。薄的透明物體，如生物樣品，則可將其固定在兩個半鍍銀的光學板之間。

另一種分光的裝置是使用由雙折射性晶體所作的稜鏡，如方解石 (calcite)，稱為 Wollaston 或 Nomarski 稜鏡。在 Baker 系統中就是利用雙折射性

可旋轉平板達成可連續調變相位差，這在檢測薄晶體或礦石薄片時特別有用。

為了使干涉式顯微鏡發揮至最大，可利用兩組分開的複顯微鏡，一組用在樣品觀測用的光束上，另一組用在參考光束上。Leitz 干涉式顯微鏡即是很先進的例子。此系統由稜鏡將光源分成兩束平行光，將其中一道光束經由一組完整的複顯微鏡經進入樣品，而另一道光束則經由另一完整的複顯微鏡進入可傾斜平板的相位延遲元件，以及楔形補償器，然後在進入物鏡之前，將兩道光束在另一稜鏡上干涉。兩組光學系統皆配有偏極器 (polarizer)、檢偏器 (analyzer) 與適當的光圈。這樣的排列可使樣品隨意的移動，與參考光路的區域保持隔離。並且樣品可由某一平台移至另一平台，因此任何因樣品移至另一平台所造成的條紋偏移可以回復。

### 二、結構示意圖

干涉式顯微鏡是利用樣品的影像與干涉環 (干涉帶, interference rings or bands) 重疊而達到增加對比度 (contrast) 的方法，其干涉條紋是可控制寬度及密度。基本結構如圖 1 所示，將發光源 (illuminating radiation) 分成兩道光束，一道光束進

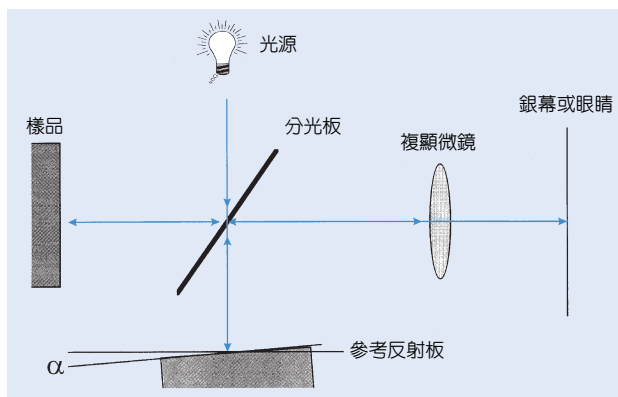


圖 1. 典型分光干涉系統結構。

入經由樣品，另一道光束作為可控制光程差 (optical path difference) 的參考光，然後將兩道光束結合而得到所要的干涉環。目前商品化的干涉式顯微鏡可分為反射式與穿透式兩種，其典型的結構如圖 2 和圖 3 所示。

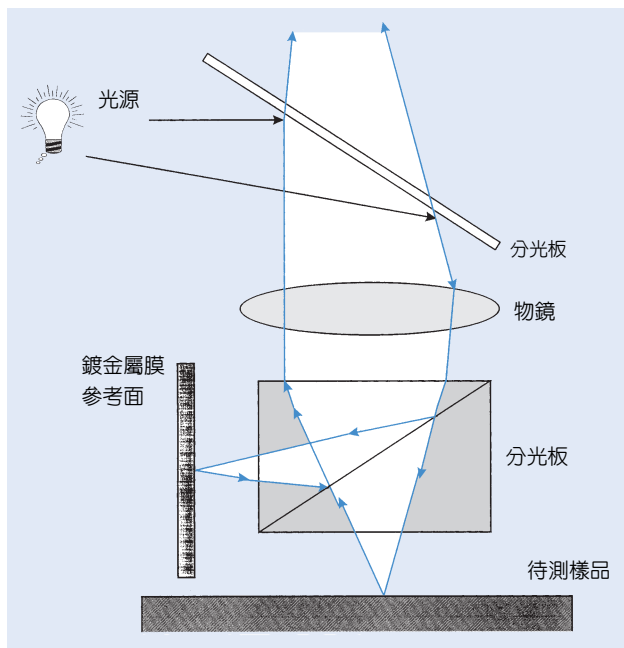


圖 2. 典型的反射式干涉顯微鏡結構。

### 三、儀器規格與特徵

#### 1. 反射式系統 (reflected-light systems)

##### (1) 牛頓環式的裝置

由 Bausch & Lomb 所組成的相當簡單的裝置。這個裝置將試片面對著樣品表面懸放在顯微物鏡的下方，所產生的表面輪廓干涉圖案與牛頓環相似，但屬於顯微尺寸。

##### (2) Michelson 式的裝置

此裝置由 Linnik 提出，Michelson 干涉儀相似的排列，但在量測與比較的懸臂上利用相配的物鏡組成。

##### (3) Zeiss 的系統

Zeiss 的系統與 Linnik 提出類似，在量測與比較的懸臂上利用相配的物鏡組成，但利用兩組分光鏡做分光與組合，由於 Zeiss 顯微鏡結構非常緊密，所以樣品與物鏡間的振動和移動可以減至最低。有三組可調玻璃楔 (glass wedge) 做條紋的方向與空間變化。

#### 2. 穿透式系統 (transmitted-light systems)

已經有許多穿透式系統的干涉式顯微鏡裝置，但每一種裝置有其優劣，沒有一種裝置是特別優於其它裝置。大部分的缺點包括數值孔徑的限制、雙影或鬼影、特別樣品的夾具座，以及精巧昂貴的構造。一些商品化的儀器如下：

##### (1) Leitz 干涉式顯微鏡

此系統的光路類似於 Mach-Zehnder 干涉儀的架構，並用一對相配的物鏡與聚光系統。聚光系統所用的數值孔徑為 0.3，因此限制了解析度但可得出精準的相位量測。將一可旋轉的玻璃板置於物鏡上方，可提供做為條紋的方向與空間之調整。並含有單色光與白光的切換裝置。此裝置並利用玻璃楔式的補償板 (compensator plate) 得出與光波長相關的光程差之定量量測。

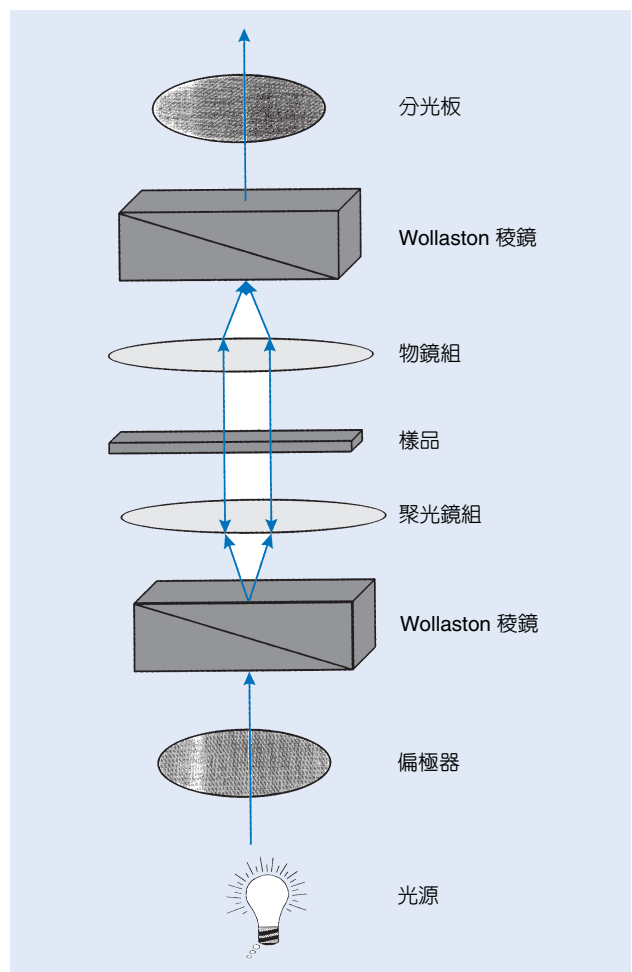


圖 3. 典型的穿透式干涉顯微鏡結構。

### (2) Famin-Lebedeff 系統

利用晶體光學置於樣品的上方與下方，可以依據觀測波前 (wave front) 離焦或位移產生一干涉式的參考波前。Lebedeff 在 1930 年時按之前 Jamin 所述的干涉儀發展出一切剪式系統 (shearing system)。此系統成為美國光學公司與 Zeiss 公司所用的切剪式系統之基礎。美國光學公司也完成一雙聚焦式波前系統。在美國光學公司的系統中，有三個物鏡，分別為 10 倍、40 倍及 100 倍，100 倍的切剪量 (shear separation) 約 0.33 mm。在 Zeiss 公司的系統中，有三組相配的物鏡與聚光系統。其數值孔徑為 0.22、0.65、1.00。切剪量分別為 0.55 mm、0.17 mm 與 0.05 mm。

### (3) Dyson 系統

Dyson 干涉式系統是由 Cooke、Troughton 與 Simms 所完成。干涉光束分在樣品的上方與下方形成四角環繞的干涉路徑，而每一光束皆可指向樣品。此系統之干涉儀平板，有一個楔型角做為條紋的方向與空間之調整。而且有兩個物鏡，一個倍率 40，數值孔徑為 0.85，另一個倍率 95，數值孔徑為 1.3。

## 四、應用與用途

干涉式顯微鏡可在樣品的深度與高度有非常小變化時提供清楚的感應，而且可由計算連續的干涉環量測出實際的變化量。將此方法進一步的改進，利用偏極化的光做為光源，可精準地量測雙折射性光纖 (birefringent fibers) 與晶體的折射率。

### 參考文獻

1. A. J. Hale, *The Interference Microscope in Biological Research*, Edinburgh and London: Livingstone (1958).
2. S. Tolansky, *Multiple-Beam Interference Microscopy of Metals*, New York: Academic Press (1970).
3. W. Krug, J. Rienitz, and G. Schulz, trans. J. H. Dickson, *Contribution to Interference Microscopy*, London: Hilger & Watts (1964).
4. M. Francon and S. Mallick, *Polarization Interferometer, Application to Microscopy and Macroscopy*, New York: Wiley (1971).

---

作者：陳永富先生為國立交通大學電子博士，國科會精密儀器發展中心副研究員。

# 共焦雷射掃描顯微鏡

## Confocal Laser Scan Microscope

關鍵字：共焦雷射掃描顯微鏡

Keywords：confocal laser scan microscope

### 一、基本原理

共焦掃描顯微鏡通常採用雷射作為光源，是雷射掃描顯微鏡的一種特殊設計。傳統顯微鏡的解析度是在光波繞射限制下所求得，按理來說，任何顯微鏡都無例外，而共焦掃描顯微鏡具有更高解析度似乎違背光繞射理論。Lukosz 提出一個原理，它指出可以用縮小視場的方法來提高解析度，為了獲得一定的視場可以用掃描方法來實現。利用上述原理的最簡單方法就是放置一個小孔在十分接近於樣品表面處。如果孔比顯微鏡觀察的繞射極限還要小，則解析度將不再由光波所決定，而是由小孔所決定。對於微波，這種方法已經被證明是有效的。但是對於光波，由於在繞射極限時的光點已經十分小（通常在  $\mu\text{m}$  量級），要做成比光點更小的孔置於十分接近於樣品表面處，在技術上是難以實現的。

為了利用 Lukosz 原理於光波範圍，我們採用光學的方法，把點狀光電探測器由顯微鏡反方向形成的像點與光源經透鏡聚焦在樣品面上的點相重合，也就是說，顯微鏡的物鏡和光源的聚焦透鏡有共同的焦點，此焦點正好落在觀察樣品的表面，如圖 1 所示，這就是所謂「共焦」的含意。

共焦顯微鏡首先由 Minsky 在 1957 年提出。當時他還未用雷射作為光源，而目前共焦顯微鏡幾乎

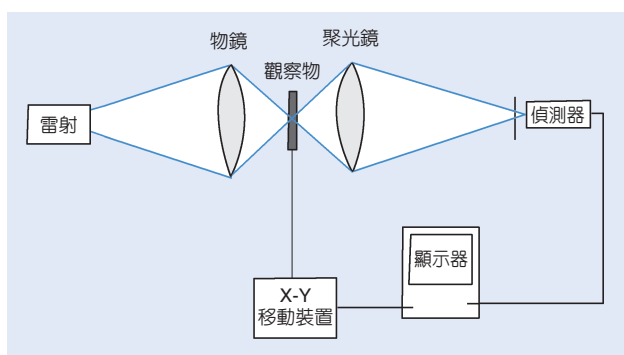


圖 1. 共焦雷射掃描顯微鏡原理圖。

都採用雷射光源。共焦雷射掃描顯微鏡作為一個同調光學系統，它對樣品面上之點所形成的像（實際上即為系統點擴散函數 PSF）為樣品前方透鏡形成之像和後方透鏡形成之像的乘積。這使得點像的中心部份被大大增加，而外圍的環狀光圈顯著地被減弱。Brakenhoff 利用 He-Cd 雷射（波長為 325 nm）和浸沒透鏡，其解析度達到  $0.1 \mu\text{m}$ 。

根據光學理論，在 Fraunhofer 近似下，如果不考慮透鏡像差，傳統顯微鏡對光軸上一點光源所形成的像強度分佈為：

$$I(v) = \left[ \frac{2J_1(v)}{v} \right]^2 \quad (1)$$

其中  $v = 2\pi r(\text{NA})/\lambda$ 。這裡  $J_1(v)$  是一階 Bessel 函數，NA 是顯微鏡物鏡的數值孔徑， $\lambda$  是光波波長， $r$  是像平面上至光軸的距離。在 (1) 式中已經把  $r = 0$  處之強度設定為 1，這就是熟知的 Airy 光斑。上式說明傳統顯微鏡成像形成的光斑大小是由物鏡所決定。即使採用掃描方式，後面所用的集光鏡對解析度並無影響。

對於共焦顯微鏡，如果物鏡和集光鏡具有相同的數值孔徑，對軸上點源所形成的像強度分佈，在與 (1) 式相同的條件下，可表示成

$$I(v) = \left[ \frac{2J_1(v)}{v} \right]^4 \quad (2)$$

(1) 和 (2) 式所描繪的函數曲線示於圖 2。從圖 2 可以看出共焦顯微鏡形成的光斑要比傳統顯微鏡小。如果以強度降到中心強度一半作光斑大小之度量，共焦顯微鏡要比傳統顯微鏡小 27%。理論上，如果共焦顯微鏡中共焦的兩組透鏡，有一組透鏡採用環形，可使上述成像光斑進一步縮小，比一般顯微鏡小 40%。如果按照 Rayleigh 判斷，共焦雷射

掃描顯微鏡能分辨的兩點間最小距離要比傳統的同調光顯微鏡小 32%，而比傳統的非同調光顯微鏡小 80%。因此，從理論上來說，共焦型雷射掃描顯微鏡比傳統顯微鏡具有較高的解析度，像點也更加精細和清晰。

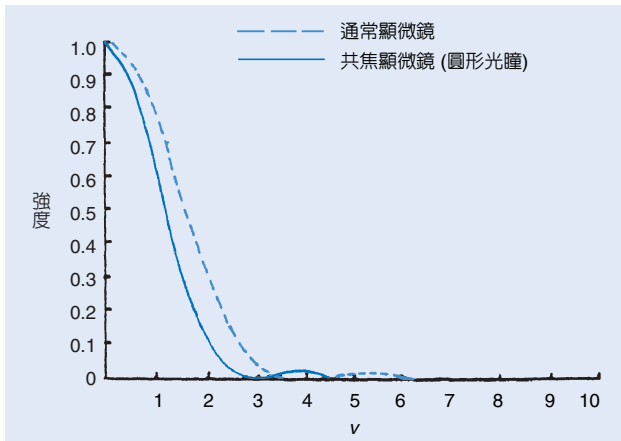


圖 2. 一軸上點狀物體形成的像強度分佈。

共焦掃描顯微鏡的另一個重要特徵是有關景深的問題。以傳統顯微鏡來觀察一點狀目標，當目標偏離焦平面時，將產生散焦的現象，所形成的點像將隨著散焦而擴散，中心強度會降低。在不考慮其他像差的情況下，傳統顯微鏡對於一軸上之點狀目標，當目標偏離聚焦平面時，像中心強度的變化可以表示成

$$I(u, v=0) = \left( \frac{\sin \frac{u}{4}}{\frac{u}{4}} \right)^2 \quad (3)$$

其中  $u = \frac{2\pi a^2}{\lambda f^2} (\Delta z)$ 。這裡  $\Delta z$  表示偏離焦平面的距離， $a$  是透鏡通光的半徑， $f$  是透鏡焦距， $v=0$  表示在光軸上。對於共焦型顯微鏡，上述強度變化將成為

$$I(u, v=0) = \left( \frac{\sin \frac{u}{4}}{\frac{u}{4}} \right)^4 \quad (4)$$

式 (4) 和式 (3) 比較，可以明顯看出共焦型顯微鏡像點的強度隨離焦距離的衰減要比傳統型顯微鏡快得多，這可由圖 3 直觀地看出。當被測點偏離

物鏡的焦平面時，光源在偵測面上所形成的光點會擴大，中心點光強度會減弱，該中心點經集光鏡所形成的像點將不再落在偵測面上 (即圖中的針孔面)，而是在它的前方或後方，如此在探測面上形成了一個散焦的光斑。而在針孔處所接受到的信號經過兩次散焦的影響，強度大大減弱。因此，共焦顯微鏡可以只對聚焦平面內的目標成像，而不在聚焦面的目標因強度大大衰減而看不到，這就是所謂深度識別 (depth discrimination)。圖 4 是用傳統掃描顯微鏡和共焦掃描顯微鏡觀察一個相對聚焦平面略有傾斜的目標所得到的像。從圖中可清楚看出共焦顯微鏡只對位於聚焦面上的那部份目標成像。利用共焦顯微鏡的這種特性，我們可以對觀察樣品進行分層 (sectioning) 掃描，從而獲得觀察樣品的三維結構。最近也出現以白光 (鹵素燈 100 W) 照明的共焦掃描顯微鏡 (CSM)，它採用特殊設計的光學系統，使得觀察物體表面深度的變化以不同的顏色顯示出來，這提供了一種以色彩的變化來顯示被觀察表面的三維結構。

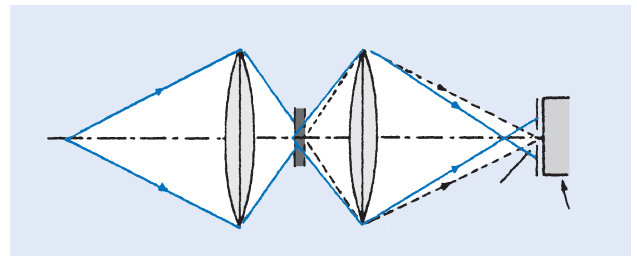


圖 3. 共焦型顯微鏡的深度識別，當樣品在焦平面上 (虛線)，透過的光聚焦在針孔上；當樣品不在焦平面上，在針孔面形成一個散焦的點，所測到的強度大大減弱。

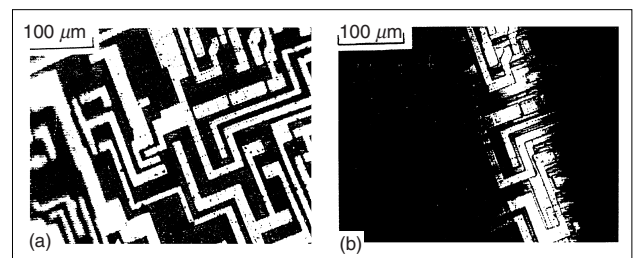


圖 4. (a) 用一般顯微鏡得到的一個傾斜樣品的像。(b) 用共焦雷射掃描顯微鏡所得到的同一樣品的像，只有在焦平面那一部份才被看到。這裡利用 He-Ne 雷射 ( $0.63 \mu\text{m}$ )，物鏡 NA = 0.5，針孔直徑為  $10 \mu\text{M}$ 。

## 二、結構示意圖

圖 1 所示的共焦顯微鏡結構是透射式，適用於透明目標。對於不透明目標可以採用反射式結構。圖 5 是德國 Zeiss 公司生產的反射式共焦雷射掃描顯微鏡的結構示意圖。一擴束的雷射光經過一掃描器和透鏡①後入射在物鏡②上，然後聚焦在目標③上平面④中的一點。由該點散射的光再反向經過物鏡②、透鏡①和掃描器投射在一分光鏡⑤上。反向散射光經分光鏡轉向 90 度，經透鏡聚焦在一針孔光欄⑦上，通過針孔的光將被光電偵測器⑥所接收。圖中虛線表示在縱向 (z 方向) 掃描時，光束在針孔光欄上造成散焦，使大部份光被針孔光欄所阻擋，從而構成深度識別。

## 三、儀器規格

### 1. 顯微鏡部份

- (1) 與一般顯微鏡的標示相同
- (2) 樣品平台在 x 和 y 方向移動距離  $150 \times 150 \text{ mm}$
- (3) 在 x、y 方向馬達傳動樣品移動精度為  $0.25 \mu\text{m}$ ，在深度 z 方向精度為  $0.05 \mu\text{m}$ 。
- (4) 掃描器：由 2 個伺服控制電流計式鏡掃描器構成。
- (5) 掃描速率： $512 \times 512$  像素 / 0.5 秒至 64 秒。

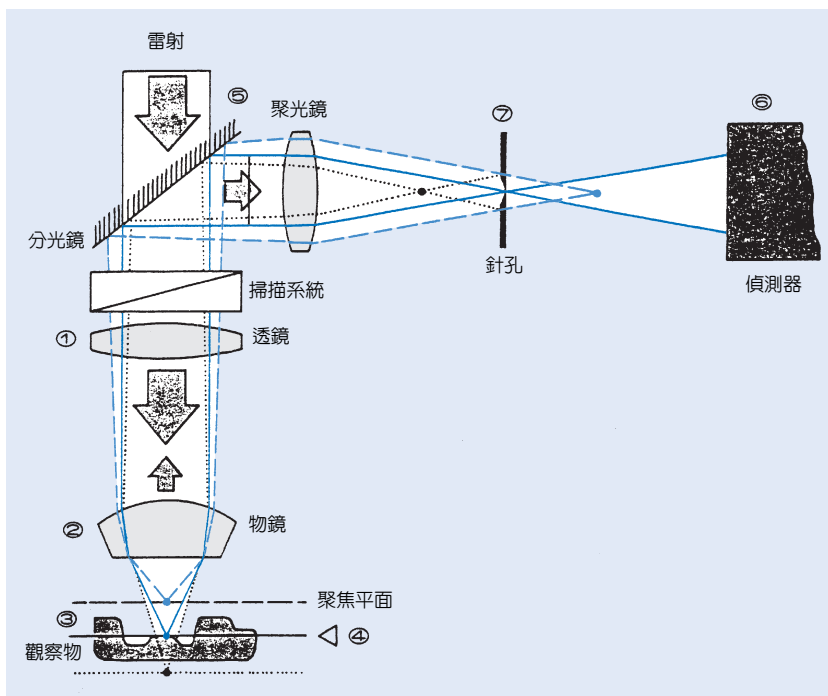


圖 5.  
共焦型雷射掃描顯微鏡結構圖。

- (6) 偵測器：光電倍增管 (PMT) 用於反射式光偵測，Si 光二極體用於透射式光偵測。
- (7) 共焦光圈可變，並由電腦控制。

### 2. 雷射部份

- (1) 內置雷射為氬-氬雷射，波長  $633 \text{ nm}$ ，功率  $5 \text{ mW}$ 。
- (2) 外加雷射可採用氫離子雷射波長  $488 \text{ nm}$ ，功率  $10 \text{ mW}$ ；或波長  $488 \text{ nm} + 514 \text{ nm}$ ，功率為  $5 + 5 \text{ mW}$ 。也可採用氬氬雷射，波長  $1152 \text{ nm}$ ，功率  $1 \text{ mW}$ 。

### 3. 電腦及其軟體

採用 IBM PC 相容電腦來控制，並附有各種控制和顯示功能的軟體。在這部份發展較快，隨時間變化也較大。

## 四、應用

自從 Zeiss 公司 1984 年第一次推出雷射掃描顯微鏡產品後，由於雷射掃描顯微鏡的許多獨特優點，特別是共焦掃描顯微鏡的超高解析度，而被許多領域所採用。總括說來可以分成三個主要方面：半導體方面應用、材料科學方面和生物學方面的研究。

## 1. 半導體方面應用

隨著半導體器件向微型化、高密度集體化迅速推進，對半導體材料和製作過程的品質控制也有愈來愈高的要求。由於雷射掃描顯微鏡的高解析度，在這方面已獲得十分重要的應用。

### (1) 光刻掩模的檢查

在製作薄膜電路或矽積體電路 (SIC) 中，由於光刻過程的缺陷而嚴重限制了電路生產的成品率。在光刻中所引起之微米大小的缺陷會造成相鄰導線間的短路或其它電路的故障，因此掩模 (光罩) 中缺陷的檢查將直接影響積體電路器件的成品率。

對於薄膜電路和矽積體電路，掩模的物理特徵基本上是相同的，它們都是把一定的圖形刻在鍍於玻璃基片上的不透明金屬膜上。因此利用雷射掃描顯微鏡將可十分方便地對這類掩模進行高解析度的檢查。這兩種掩模有一個重要差別是對於矽積體電路而言，成百上千相同的圖形按一定的規律排列在一塊晶片上，每一個圖形代表一個器件，這成百上千的器件都是在同一塊基片上完成光刻和其它製作步驟；而對於薄膜電路，在同一基片上可能存在，也可能不存在重覆的圖形。因此，在發展實際的檢查系統時，將採用不同的結構。

### (2) 半導體晶片表面的檢查

直徑大於 150 mm 的大面積薄 ( $\leq 0.56$  mm) 矽晶片，經高度磨光後用於製作微電子電路的初始基片。由於磨光技術的發展，利用放大倍率為 200 倍的干涉對比度技術也無法看到表面的細部結構。在這接近物理上完美的表面有可能存在一些微小的缺陷，像殘留微粒、刻痕及小坑等。通常直接用人眼在適當光照條件下進行檢查。在這樣接近完美的基片表面，以適當光照條件，可以看到  $1 \mu\text{m}$  大小的缺陷。隨著積體電路愈來愈複雜，密度愈來愈高，次微米缺陷也顯得愈來愈重要，利用人來檢查已經無法做到。而人對維護健康的意識日益高漲，也促使利用高精度的雷射掃描顯微鏡進行基片表面的自動檢查。此外，雷射掃描顯微鏡還可用來檢查成品表面。由於成品表面上已存在複雜的電路結構，缺陷檢查將是一個十分困難的任務。專門設計的雷射

掃描顯微鏡可用來檢查電路表面上附著的塵埃粒子，單獨顯示在螢光屏上。

### (3) 半導體器件的研究—光束感應電流

隨著積體電路密度的不斷增加，電路愈趨複雜，電子顯微鏡被廣泛地用來作為一個有力的工具以研究半導體器件的性能。電子顯微鏡不僅具有非常高的解析度，而且還能以各種不同方式研究器件的電子特性，這些特性是無法經表面觀察而得到的。這些方式中常用的有 X 光分析、電壓對比度、光束感應電流和陰極螢光 (cathode luminescence)，其中光束感應電流和陰極螢光是由於入射電子束在樣品中產生多餘的電子—電洞對所形成。自從雷射掃描顯微鏡的出現，用雷射來代替電子束在樣品中產生多餘載流子引起了人們相當大的興趣，這就是所謂光束感應電流技術 (optical beam induced current, OBIC)，利用光束感應電流法可以免去電子束所需要的真空系統，同時成本也大幅的降低。

光束感應電流的基本原理如圖 6 所示。當雷射光子能量大於半導體能隙寬度時 ( $E > E_g$ )，在半導體中即可產生電子—電洞對。如果電子—電洞對產生在 P-N 結面附近，電子就會從 P 型區擴散到 N 型區，從而在外電路中引起一電流。當雷射束在表面掃描時就可以建立一幅等效的電子圖像。

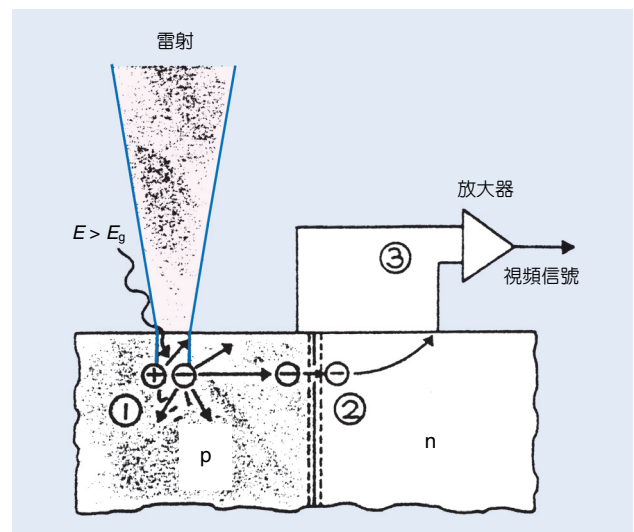


圖 6. 光束感應電流 (OBIC) 原理圖。

## 2. 生物學方面的研究

由於共焦型雷射掃描顯微鏡的超高解析度，對於生物細胞及基因 (genetics) 等的研究有相當大的幫助，特別是利用電子方法增強對比度，可以比較清楚地看到不同狀態的微小差異。如果不用螢光法觀察，就不需要對生物樣品進行染色，這可以避免在染色過程中殺死或改變有生命的細胞，圖 7 顯示了共焦雷射掃描顯微鏡的超高解析度。圖 7 是觀察一纖維染色體的圖像，它是直接以光透過培養的唾液腺細胞核而得到的，染色體染成橙色，利用 488 nm 的 Ar<sup>+</sup> 氬離子雷射掃描，測量波長大於 515 nm 的螢光發射。圖 7(a) 是非共焦雷射掃描顯微鏡所得的，而圖 7(b) 是用共焦雷射掃描顯微鏡所得到的，顯然後者的解析度要比前者的好很多。

目前微生物學方面是共焦雷射掃描顯微鏡應用的一個十分重要領域。

## 3. 材料科學及其它方面的應用

除了上述半導體工業方面的應用外，在腐蝕方面、陶瓷材料、高分子材料、金屬表面及照相感光乳膠方面都有重要的應用。特別是雷射掃描顯微鏡可以用來研究物體表面的非線性光學性質。例如利用雷射聚焦於物體表面，而由非線性光學效應形成倍頻光，倍頻光的產生量同材料結構和取向密切相關，這對材料表面物理的研究幫助很大。此外，所產生的倍頻光強度正比於雷射光強度的平方，倍頻光強度隨著散焦而迅速減弱，這將大大增強了深度識別的效應。雷射掃描顯微鏡也可以用雷射激發樣品原子或分子的螢光，觀察螢光分佈，從而對材料的結構和物理性質進行研究。

由於雷射掃描顯微鏡是近年來迅速發展起來的一種高解析度測量技術，它不僅僅是簡單的測量，還可以利用雷射與樣品相互作用對樣品的各種光電

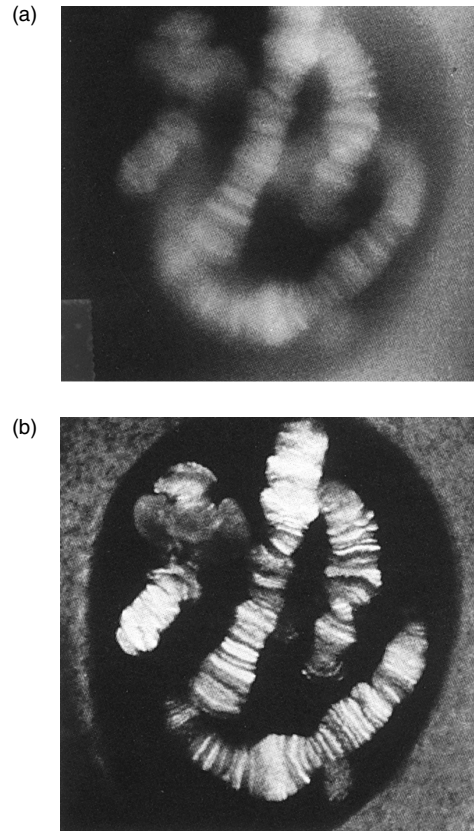


圖 7. 用非共焦雷射掃描顯微鏡 (a) 和共焦雷射掃描顯微鏡 (b) 所觀察到的染色體螢光像。

效應進行研究。由於它有如此獨特的優點，它將會在許多領域中獲得廣泛的應用。

## 參考文獻

1. W. J. Alford, R. D. Vanderneut, and V. J. Zaleckas, *IEEE*, **70** (6), 641 (1982).
2. T. Wilson and C. Sheppard, *Theory and Practice of Scanning Optical Microscopy*, London: Academic Press Inc. (1984).
3. Zeiss (West Germany) LSM 產品說明書.

作者：陸懋宏先生為美國亞利桑納大學光學博士，現任國立交通大學光電工程研究所教授。

# 掃描式近場光學顯微儀

## Scanning Near-Field Optical Microscope

**關鍵字：**掃描式近場光學顯微儀、掃描式近場光學顯微術、近場光學、光學顯微鏡

**Keywords：**scanning near-field optical microscope, scanning near-field optical microscopy, near-field optics, optical microscope

### 一、基本原理

掃描式近場光學顯微儀 (scanning near-field optical microscope, SNOM or NSOM) 的基本原理是由英國的 Syngé 及美國的 O'keefe 分別在 1928 年及 1956 年所提出，是利用在遠小於一個波長的距離內 (亦即是近場中) 來進行光學量測，避免在大於一個波長的距離後 (即是遠場中)，光波動性質的呈現與干擾，以獲得超越繞射極限 (diffraction limit) 之空間解析度的方法。近場顯微的基本原理在 1972 年由 Ash 與 Nichols 以波長為 3 cm 的微波，實驗證實可在近場中達到約 1/60 波長的空間解析度。

一般的光學量測或儀器皆係在遠場中工作，即在遠大於一個波長的距離下作觀察，無法避免光之波動性質所造成的干涉與繞射效應，故其空間解析度受限於繞射極限 ( $0.61\lambda/N.A.$ )。而近場光學顯微儀目前的作法則是使用由熔拉或腐蝕光纖波導所製成之探針，在外表鍍上金屬薄膜以形成末端具有 10 nm 至 100 nm 直徑尺寸之光學孔徑 (optical aperture) 的近場光學探針，再可以作精密位移與掃描探測之壓電陶瓷材料 (piezo-electrical ceramics) 配合原子力顯微技術 (atomic force microscopy, AFM) 所提供之精確的高度回饋控制，將近場光學探針非常精確地 (垂直與水平的方向的空間解析度可分別達到 0.1 nm 與 1 nm) 控制在被測樣品表面上 1 nm 至 100 nm 的高度，進行三維空間可回饋控制的近場掃描 (scanning)，而具有毫微米光學孔穴之光纖探針即可作接收或發射光學訊息之用，由此獲致一真實空間之三維近場光學影像，因其與樣品表面距離遠小於一般光波波長，所測之訊息皆屬近場光學作用之訊息，故無平常習見的遠場光學中繞射極限的光學解析度限制。目前這類型之近場光學顯微儀

主要是由美國的 Betzig 及 Vaez-Iravani 在 1992 年所發展出來的，至今仍快速地在改進中。

理論上，近場光學是可提供樣品表面小至分子尺寸的空間解析度的，但由於近場光學顯微儀之光學空間解析度實際取決於其光纖探針末端光學孔徑的大小，以及近場光學探針與樣品表面間的距離，故目前一般實際可獲得之最小近場光學顯微解析度約是 20 nm，受限於光學孔徑大小的製作技術。

目前之近場光學顯微儀可得到光學顯微影像之空間解析度遠優於傳統光學顯微鏡，接近於電子顯微鏡的高解析度，但卻無可能會造成毀損或改變樣品表面的高能量電子束，勿需在真空環境中進行檢驗，可在空氣中、水中或各種溶液中進行光學觀測，樣品不需繁複製備手續，屬於非破壞性檢測方法。且因它是一種光學方法，故具有傳統光學顯微鏡的優點，包括可利用光波的偏振性 (polarization)、相位 (phase)、波長及螢光性等來作為光學顯微影像的對比 (contrast)，加上可對樣品作反射或透射之各種光學光譜訊息的分析與量測，尤其是所獲得之各種光學訊息是極其區域性 (localized) 的光學訊息，能提供樣品表面小至分子尺寸的光譜訊息。

### 二、結構示意圖

近場光學顯微儀依據量測之需要及樣品之光學性質，通常以圖 1 所列之五種工作模式為主，分成穿透式與反射式兩大類。

#### 1. 穿透式

(1) 探針照明模式 (illumination mode)：以光纖探針之光學孔徑作為近場之點光源，光經樣品穿透至另一方之偵測器而被接收的模式。

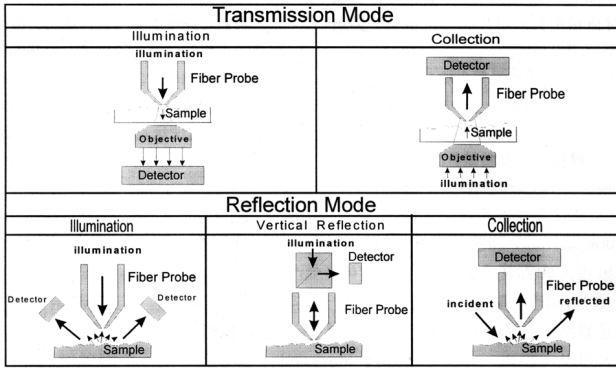


圖 1. 目前近場光學顯微儀在一般情形下的五種工作模式。

(2) 探針集光模式 (collection mode)：光源由樣品另一方送入，穿透樣品後經由光纖探針在近場中接收的模式。

## 2. 反射式

(1) 探針照明斜向收光模式：光經由光纖探針在近場中送出至樣品表面反射後，由側向的偵測器接收光學訊號的模式。

(2) 垂直反射模式 (vertical reflection mode)：光經由光纖探針在近場中發射至樣品表面，經垂直反射後再由同一光纖探針在近場中接收光學訊號的模式。

(3) 斜向照明探針集光模式：光源由側面打在樣品上經反射後由光纖探針在近場中接收光學訊號的模式。

圖 2 是目前利用剪力 (shear force) 式顯微技術作近場光學探針之力學回饋控制的穿透式近場光學

顯微儀的典型結構示意圖。圖 2 中之近場光學探針是經由一訊號產生器 (function generator) 之諧波訊號來驅動其振動之雙層壓電陶瓷片 (bimorph) 所振動的，通常振動的頻率是在近場光學探針的本徵共振頻率 (resonance frequency) 處附近，而其振幅則可由諧波驅動訊號之振幅來控制。半導體雷射 ( $\lambda_1$ ) 則經透鏡聚焦於近場光纖探針上，再由位移檢測光二極體 (position sensitive photo diode, PSPD) 偵測出近場光纖探針的次微米以下之微小振幅的大小及相位，經鎖相放大器放大訊號後輸入回饋控制系統。其主要目的是在利用近場光纖探針尖端與樣品表面間之剪力或凡得瓦爾力 (Van der Waals) 等之力作用，來作為近場光纖探針與樣品表面間距離之量測與回饋控制之用，以可作三維精密位移之壓電陶瓷管 (piezo tube) 來精確地控制探針在樣品表面上約數個奈米 (nm) 的高度作近場的掃描探測，且此一回饋控制訊號可提供原子力顯微影像，亦即是樣品表面幾何形貌 (topography) 的顯微影像。

在近場光學訊號方面，圖 2 半導體雷射 ( $\lambda_2$ ) 的電流供應器 (current source) 經訊號產生器 (function generator) 的訊號調制後，再經光纖耦合裝置導入近場光學用之光纖探針的另一端，在光纖探針尖端形成一近場之點光源，再隨著前述之原子力 (或剪力) 作用之回饋機制的控制，在樣品表面上近場之範圍內做掃描。穿透樣品之光學訊息則被透鏡接收送入光電倍增管 (photo multiplier tube) 中，再經鎖相放大器放大後輸入電腦，顯示出近場光學的顯微影像。故目前如圖 2 般典型之穿透式近

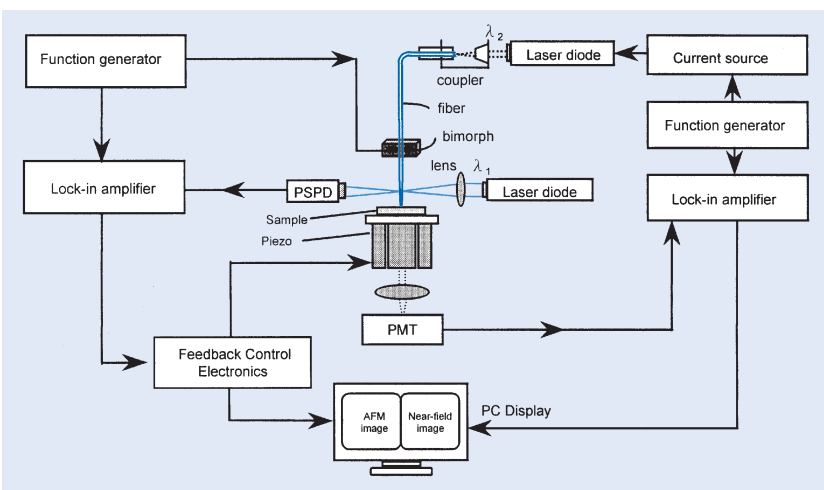


圖 2. 直式光纖探針及剪力回饋控制之穿透式近場光學顯微儀結構示意圖。

表 1. 目前幾種常用顯微系統的分析與比較。

	傳統光學顯微鏡 (OM)	掃描式電子顯微鏡 (SEM)	穿透式電子顯微鏡 (TEM)	原子力顯微儀 (AFM)	近場光學顯微儀 (SNOM)
側向解析度	300 奈米 (nm)	3 奈米 (nm)	原子級 (0.1 nm)	原子級 (約 0.1 nm)	可達分子級 (約 20 nm)
縱向解析度	20 奈米 (nm)	10 奈米 (nm)	無	原子級 (約 0.01 nm)	分子級 (約 0.1 nm)
成像範圍	1 毫米 (mm)	1 毫米 (mm)	0.1 毫米 (mm)	0.15 毫米 (mm)	0.15 毫米 (mm)
成像環境	無限制	真空	真空	無限制	無限制
樣品準備	無	鍍導電膜	手續繁雜	無	無
成份分析	有	有	有	無	有

場光學顯微儀通常是可同時提供近場光學顯微影像及樣品之表面幾何形貌的顯微影像的，兩者可相互對應參考。

除了如圖 2 所示直式光纖探針及剪力回饋控制之穿透式近場顯微儀之外，亦有利用彎曲式光纖探針及間歇非接觸式 (tapping mode) 原子力顯微技術作探針之近場高度回饋控制之各式 (如圖 1) 近場光學顯微儀。其架構與圖 2 皆十分類似。

### 三、儀器規格與特徵

近場光學顯微儀的規格和目前市面上商業用的原子力顯微儀十分相似，不同的是近場光學顯微儀使用光纖探針來探測樣品表面的近場光學訊號。表 1 是目前幾種常用顯微系統的分析與比較。

### 四、應用與用途

如圖 2 所示之近場光學顯微儀是自 1992 年才發展出之架構，目前各種新的改進仍在持續發展中，不過在其應用上已有些著名的成果，包括：(1) 單一染料分子及單一蛋白質的近場光化學及其動態量測、(2) 線型量子井 (quantum well) 半導體結

構的近場光學顯影及光譜分析、(3) 近場區域性拉曼光譜在表面上的量測、(4) 記錄密度高達 45 至 100 Gbits/inch<sup>2</sup> 之近場光學超高密度的光學記錄儲存等。另外，在毫微米技術 (nanotechnology) 領域中，近場光學顯微儀除了可有極高之空間解析度用以取得極小區域的近場光學訊息作為光學顯微影像或近場光譜研究外，亦可成為改變或主導樣品表面上次微米尺寸之結構的一種新方法，進而成為奈米製程 (nano-fabrication) 與奈米微影 (nano-lithography) 技術中重要的新工具。預期近場光學顯微儀將被大量且迅速地應用於生物、醫學、半導體及各式材料的研究上。

### 參考文獻

1. E. Betzig and J. K. Trautman, *Science*, **257**, 189 (1992).
2. E. Betzig, J. K. Trautman, R. Wolf, E. M. Gyorgy, P. L. Finn, M. H. Kryder, and C. H. Chang, *Appl. Phys. Lett.*, **61**, 142 (1992).
3. X. S. Xie and R. C. Dunn, *Science*, **265**, 361 (1994).
4. 蔡定平, 物理雙月刊, **18** (3), 375 (1996).

作者：蔡定平先生為美國辛辛那提大學物理博士，現任國立中正大學物理系副教授。

# 雷射測距儀

## Laser Range Finder

**關鍵字：**雷射、雷射測距、雷射測距儀

**Keywords：** laser, laser ranging, laser range finder

### 一、基本原理

雷射測距儀是使用 Q-調制 (Q-switched) 之固態 (solid state) 雷射，其輸出能量約 10 毫焦耳；脈寬約 20 奈秒 (nanosecond,  $10^{-9}$  秒)；功率約 0.5 MW (megawatts,  $10^6$  W) 之雷射脈衝，對準目標測距物擊發，使雷射脈衝飛馳擊中目標，並收集偵測此雷射光之反射光，再計算自雷射光發射出去以及接收到反射回來之雷射光的飛行時間 (time of flight)，用數位邏輯電子電路以時間和光速關係換算成距離並顯示出來，如此一套完整自足的系統叫做雷射測距儀。

雷射測距儀相關的基本原理有：(1) 雷射，(2) 雷射發射，(3) 測距原理，(4) 回波接收，(5) 距離計數，(6) 電子系統，(7) 望遠鏡觀測及 (8) 系統對光。

#### 1. 雷射

雷射 (LASER) 是 Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation，高階躍遷輻射激厲放大之光的英文字母集寫。是一種處於高激態能階躍遷產生自發 (spontaneous emission) 輻射光子經過有能階倒量的雷射材料，而在共振腔軸向產生激厲倍比粹引放大的同調光；簡言之，即為輻射的受激發射的光放大。

雷射是一種單波長 (single wavelength)、高同調性 (high coherence)、高亮度 (high brightness)、高方向性 (high directive) 的光源。

#### 2. 雷射發射

自發輻射光所激厲的受激發射光在全反射鏡、雷射材料 (棒)、部份反射鏡所構成的共振腔軸向可輸出傳統 (conventional) 雷射光，例如固態雷射 (YAG)，它是一種總長數百拾微秒 (microsecond,  $10^{-6}$  秒) 的隨機脈衝串。如果針對此種雷射光做開

門式開關，也即是對共振腔做 Q 值的調制，則可得到單一個奈秒 (nanosecond,  $10^{-9}$  秒) 級的高功率脈衝 (giant pulse) 雷射。另外如果在共振腔中調制其耗損 (loss) 匹配，也可以得到一串微微秒 (picosecond,  $10^{-12}$  秒) 級的鎖模脈衝雷射。

通常裸 (raw) 雷射輸出光束，比起傳統的光源已具有非常好的方向性，約數個毫徑 (milliradian)。但是在大多數雷射應用上，都會再加上光學優化，利用一準直光學鏡組 (collimator/beam expander)，使雷射光的輸出有更好的方向及準直性。

當然雷射光之產生要使雷射材料受激發達到能階倒量 (population inversion)，這需要用各種不同的手段來達成。對固態雷射來講可以用閃光燈來完成。選擇符合設計特性之閃光燈 (徑量、極距、充氣種類、充氣壓力、玻璃材料、觸發方式、觸發極性等等)，它會使雷射棒經反射或漫射腔達到激態以遂行雷射輸出。

#### 3. 測距原理

雷射測距儀其測距的原理是利用一輸出雷射脈衝，瞄準待測目標，使雷射脈衝打擊在目標上，再利用測距儀上的雷射光檢拾器經過接收光學鏡組的聚光，收集反射的雷射光源，完成發射及接收。再測得雷射發射與接收之時距，將此時距換算成距離顯示，這就是雷射測距儀的原理。

雷射脈衝在大氣中來回傳輸飛行，以及與目標物的入射、反射等有一測距公式可參考：

$$R^2 = \frac{P_t}{(2\pi h f)} \times \frac{(q\tau)^{\frac{1}{2}}}{(\Delta\lambda B F_m)^{\frac{1}{2}}} \times \frac{D/\omega}{\text{SNR}} \times \frac{\rho \cos \phi \exp(-2\mu R)}{\left[ \rho \cos \theta \exp(\pm\mu R) + \frac{1}{4}(1 - \exp(\pm\mu R)) \right]^{\frac{1}{2}} H_s^{\frac{1}{2}}}$$

#### 4. 回波接收

測距儀的雷射光雖然是一種高功率 (megawatt,  $10^6$  W) 的雷射脈衝，但在大氣中傳輸散弱，再經目標反射，所傳回來可接收到的雷射脈衝功率也只有奈瓦及微瓦數量級。所以測距儀雷射光的接收需要一大口徑的聚收光學鏡組，將適當視角內的反射雷射光收聚起來，聚焦到雷射光檢拾器 (detector) 上。通常對遠距離 (大於 5 公里以上) 的測距，這種檢拾器是需要高靈敏度的崩潰式雷射光檢拾器 (avalanch photodiode, APD)。

#### 5. 距離計數

測距儀的原理是利用雷射光脈衝發射接收的時距依光速換成距離顯示。這其中當然最重要的是偵知雷射發射的開始時間  $T_0$ ，再配合振盪器，通常是 30 MHz，利用接收到之反射雷射光的停止時間  $T_f$ ，再利用數位電子技術轉換成距離，並用數字顯示器顯示出測量距離來。

#### 6. 電子系統

雷射測距儀有七大電子系統，首先它要有一電能來源，通常是電池及低壓電源供應之電路；另外為了產生雷射，必須將雷射材料激發到倒量能階狀態，對閃光燈等此類激發光源，則需要一個脈衝形成電路 (pulse forming network, PFN)；再有閃光燈之觸擊閃光，是利用一高壓觸擊脈衝電路；至於雷射光的接收其 APD 檢拾器需要數佰伏的偏壓，並且此接收的信號要再經過前置放大及多級放大，並配合自動增益控制 (AGC) 及誤警率 (FAR) 電路共同完成接收電路；還有距離計數的晶體振盪和數位邏輯與顯示電路；當然雷射測距儀一定有它自己的中央控制電腦晶片做全機系統及功能的中樞操控；最後也是目前所有系統裝備都要有的自我測試系統電路了。

#### 7. 望遠鏡觀測

雷射測距儀要對既定目標進行測距量測，當然要有一望遠鏡系統能觀測及標定目標。這望遠鏡系統通常需要有 7 至 8 倍放大倍率，有十字標線 (有螢光)，並且通常是與雷射接收光學同一物鏡，再

經轉折稜鏡元件，將雷射光及目視可見光分別導引至雷射光檢拾器及望遠鏡的目鏡。當然如果用在同一系統，尤其是同一光徑，雷射光保護片 (laser protection filter) 一定要適當的安裝，以免造成觀測人員之視網膜受傷。

#### 8. 系統對光

雷射測距儀包含了三大光徑，雷射發射光徑、雷射接收光徑以及望遠鏡目瞄光徑。這三大光徑需要做對光 (boresight)，如此才可看到那個目標，即測到那個目標。

### 二、結構示意圖

從上節基本原理中我們可以知道雷射測距儀的原理和基本結構組成，圖 1 即是雷射測距儀的基本示意圖。

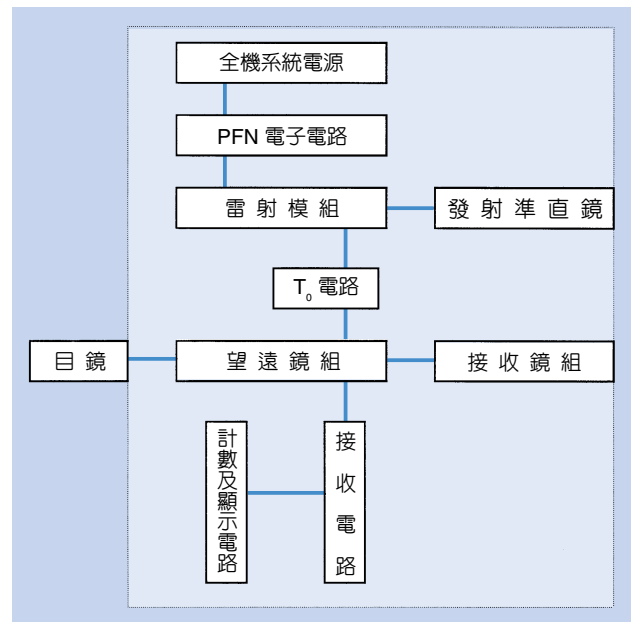


圖 1. 雷射測距儀的結構示意圖。

### 三、儀器規格與特徵

雷射測距儀有各種不同的規格與特徵，表 1 中就波長種類、測距範圍及精度、測距技術方式、技術及產品之成熟度等做一比較分析。

### 四、應用與用途

雷射測距儀的應用非常廣，從軍事上的觀測標

表 1. 雷射測距儀分類及規格特徵比較。

雷射種類	雷射波長	人眼安全波長	測距範圍	測距精度	測距技術	產品數量
亞格雷射 (YAG)	1.06 $\mu\text{m}$	否	典型：10 公里 最遠：20–30 公里	5 公尺／2.5 公尺	TOF	最多
摻鉕離子玻璃雷射 (Er <sup>+3</sup> : Glass)	1.54 $\mu\text{m}$	是	10 公里	5 公尺／2.5 公尺	TOF	中
拉曼移頻雷射 (Raman shifted)	1.54 $\mu\text{m}$	是	典型：10 公里 最遠：20–30 公里	5 公尺／2.5 公尺	TOF	多
光參振盪雷射 (OPO)	1.54 $\mu\text{m}$ –1.58 $\mu\text{m}$	是	10 公里	5 公尺／2.5 公尺	TOF	中
紅寶石雷射 (Ruby)	0.69 $\mu\text{m}$	否	10 公里	5 公尺／2.5 公尺	TOF	中
半導體雷射 (semiconductor)	0.8 $\mu\text{m}$ –0.9 $\mu\text{m}$	否	3–5 公里	1 公尺 (或更小)	TOF 及 Phase	多
二氧化碳雷射 (CO <sub>2</sub> )	10.6 $\mu\text{m}$	是	10 公里	10 公尺	TOF	中
氦氖雷射 (He-Ne)	0.63 $\mu\text{m}$	否	數拾、數百公尺	1 公分 (或更小)	Phase	多

定及指標導引攻擊，到工業民生的量測、自動駕駛及警示、雷射雷達顯像，以及打高爾夫球運動的測距等等，可以說是具有各種不同的用途。其所應用的也就是本項目所敘述之技術，做介面的整合及系統包裝而即可達成。

### 參考文獻

1. M. L. Stitch, *Laser Handbook*, 1-5, North-Holland Physics

Publishing (1985).

2. A. Yariv, *Optical Electronics* (1986).

3. W. Koechner, *Solid-State Laser Engineering*, 4th ed., Springer Series in Optical Sciences (1996).

作者：陳振文先生為英國帝國理工醫學院博士，現任中山科學研究院副研究員及國立中央大學兼任副教授。

# 雷射目標指示儀

## Laser Target Designator

**關鍵字：**雷射、雷射測距儀、雷射目標指示儀

**Keywords：**laser, laser rangefinder, laser target designator

### 一、基本原理

雷射目標指示儀是一種多脈衝率 (每秒 8 發以上)、雷射測距、追瞄、定位及指標儀器。通常它具有完全的雷射測距儀功能，且是高脈衝率。當然配合各種不同的需求，它可以有多種不同組成及介面，但整體功能和組成大致相同。

雷射目標指示儀的基本原理包含雷射測距儀的基本原理以及下列的重要特異：(1) 多脈衝率，(2) 雷射發射的熱鏡效應 (thermal lensing)，(3) 光學元件鍍膜技術，(4) 能量供給及 (5) 測距導引範圍。

#### 1. 多脈衝率

通常的雷射測距儀系統是人為手動擊發量測的，也就是說對準目標或目標待測物瞄準後，再啟動雷射測距系統獲得數據。但是對某些量測可能要連續的量測顯示，或以某些頻率 (每秒幾次) 來量測顯示。雷射目標指示儀就有這樣的能量，這也就是雷射目標指示儀最重要的特徵：多脈衝頻率。

雷射目標指示儀的脈衝重覆率，可依需求或功能有 1 Hz、3 Hz、5 Hz、8 Hz、10 Hz、20 Hz、25 Hz 等不同的重覆率。依儀器使用的場合、需求，可有單一種或多種頻率的雷射目標指示儀。當然比較完整精密的雷射目標指示儀，通常都會有可選擇的脈衝率，但是為了成本效益，很少是包含所有不同的脈衝頻率。

#### 2. 雷射發射的熱效應

有關雷射目標指示儀的脈衝率必須斤斤計較，其實最重要的就是在不同的雷射脈衝頻率下，雷射發射模組部份，牽涉到雷射材料的泵浦，能階躍遷，雷射能量粹取的雷射光輸出以及雷射材料的熱鏡效應。固態雷射傳統雷射光輸出可在數佰微秒 ( $10^{-6}$  秒) 完成，也就是說實際上這樣的雷射系統，

它可有的脈衝頻率可高達數千 Hz 以上。但實際上，固態雷射的輸出脈衝頻率通常小於這個頻率。最主要的是固態雷射材料，不管是亞格晶體雷射棒或是玻璃雷射棒，它都有一散熱係數及速率。而且雷射發射、輸入的能量只有一小比例是以雷射光形式輸出能量，絕大比例是以熱的形式在雷射棒中緩慢散消的。如此一來，如果雷射的輸出脈衝率增加，一定要有散熱系統，而且要均勻且快速的將雷射棒中積存的熱消散掉，否則在雷射材料中，會造成一種熱鏡效應 (thermal lensing)。即雷射棒中之截面區會有聚透鏡等效現象而造成雷射效益衰減及聚焦損毀雷射材料的狀況發生。因此通常在雷射目標指示儀上，通常其雷射腔包含泵浦閃光燈，及雷射棒之處通常有水冷 (liquid cooled) 式或氣冷 (forced air) 式散熱裝置，並且隨雷射目標指示器之脈衝率而有不同容量之冷卻設計。

#### 3. 光學元件之鍍膜技術

雷射目標指示儀是一種多脈衝率雷射測距儀，所有雷射光學鏡面及端面等都有抗反射或全反射及其它特殊相關的光學鍍膜，其目的就是針對某些端面，達到全穿透或全反射以及部份反射等功能。而這些鍍膜在雷射測距儀使用上已經需要耐高光密度之高損壞臨界值，現在使用在雷射目標指示儀上，其每秒脈衝數目是一、二十倍，因此所有光學元件之鍍膜，以及雷射材料之鍍膜需要更高技術處理，不但使其達到沒有熱能積存，更要注意鍍膜之均勻性及清潔度，以免造成熱點而損毀。

#### 4. 能量供給

任何輸出都是由於適當的輸入轉換而得，雷射發射也是如此。因此雷射目標指示儀之脈衝頻率以及每一發雷射輸出的大小，也都因此受到限制。通

常對每一單發雷射來講，當然大輸入能量就會有大輸出雷射，但是也受到泵浦的均勻性，PFN 電路能量釋放及傳輸等的限制。所以每一單一雷射脈衝輸出的能量和功率也都有限制。此外，多脈衝率也要看雷射目標指示儀之電源能量供應、充電速度、儲能及釋能時序等的限制，因此通常雷射目標指示儀，其單一雷射能量輸出約可達 100 mJ，功率約 5 Megawatt，而脈衝率在 1 至 25 Hz 間。

### 5. 測距導引範圍

典型的雷射目標指標儀，其測距能力視需求可遠至 30 公里，而針對導引功能而言，拾數公里外即可有效導引，當然這是視需求設計而定。目前一些導引距離大多在 10 公里以內，以確保導引之正確性及有效性。

### 二、結構示意圖

雷射目標指示儀的結構如圖 1 所示。

### 三、儀器規格與特徵

雷射目標指示儀的雷射種類、測距指標及測距精度等儀器規格列於表 1。

### 四、應用與用途

雷射目標指示儀可有許多用途，在軍事國防上可以做雷射導引攻擊裝備，並且由於其係高功率雷

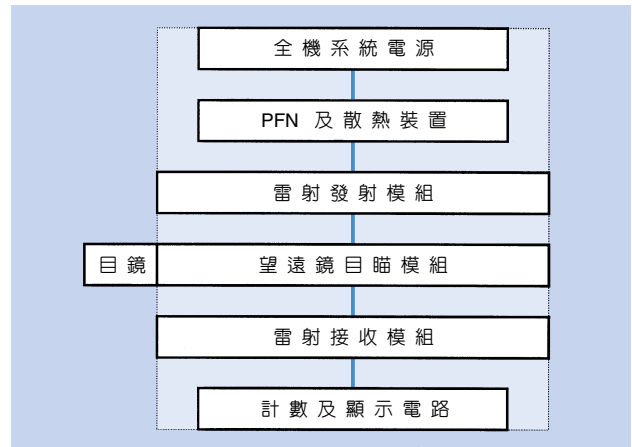


圖 1. 雷射目標指示儀的結構示意圖。

射裝備有對敵致盲的振撼功能。至於在工業及民生用途上，可做遠、中、近距離之目標定位、量測及顯示之儀器裝備。是一種可由大至小距離範圍、粗至精量測精度之儀器裝備，只要配合適當的介面整合及系統包裝即可達成各種不同用途。

### 參考文獻

1. M. L. Stitch, (edited), *Laser Handbook*, 1-5, North-Holland Physics Publishing (1985).
2. A. Yariv, *Optical Electronics* (1986).
3. W. Koechner, *Solid-State Laser Engineering*, 4th ed., Springer Series in Optical Sciences (1996).

作者：陳振文先生為英國帝國理工醫學院博士，現任中山科學研究院副研究員及國立中央大學兼任副教授。

表 1. 雷射目標指示儀的規格與特徵。

組成結構	雷射發射及目瞄望遠鏡	雷射發射及雷射接收	雷射發射及雷射接收及目瞄望遠鏡	雷射發射、雷射接收、目瞄望遠鏡及距離顯示
雷射種類	1.06 $\mu\text{m}$	1.06 $\mu\text{m}$	1.06 $\mu\text{m}$	1.06 $\mu\text{m}$
	1.54 $\mu\text{m}$	1.54 $\mu\text{m}$	1.54 $\mu\text{m}$	1.54 $\mu\text{m}$
	0.8–0.9 $\mu\text{m}$	0.8–0.9 $\mu\text{m}$	0.8–0.9 $\mu\text{m}$	0.8–0.9 $\mu\text{m}$
測距指標範圍	最遠 20公里	最遠 20公里	最遠 20公里	最遠 20公里
	最近 數拾,佰公尺	最近 數拾,佰公尺	最近 數拾,佰公尺	最近 數拾,佰公尺
測距精度	5公尺	5公尺	5公尺	5公尺
	1公尺以下	1公尺以下	1公尺以下	1公尺以下
產品數量	中	中	中	最多

# 雷射掃描解碼器

## Laser Scanner for Barcode Reader

**關鍵字：**雷射掃描解碼器、光筆型、雷射槍型

**Keywords：**laser scanner for barcode reader, light pen, laser scanner

### 一、基本原理

本雷射掃描解碼器是全像式掃描碟片在應用上之延伸，本應用為多線平行掃描之條碼閱讀機。而全像式掃描碟片為這條碼閱讀機之基礎元件，光機之設計也是以碟片設計發展為主。解碼器可解市面上一般之條碼。

本雷射掃描解碼器之論理基礎可細分為四個部份，詳述如下。

#### 1. 全像式掃描碟片之設計與拍攝

如上所述碟片是條碼閱讀機之心臟，而碟片之設計首先要決定條碼閱讀機之掃描性質。本雷射掃描解碼器以六線平行掃描應用為主。碟片是以六扇面組成，因每一扇面代表一條掃描線。這是做成六條平行掃描線之基礎。

#### 2. 全像式條碼閱讀機之光機設計

這設計跟前片設計有一密切的關係。碟片之入射角度與繞射角度均為光機設計之重點；入射角為光源入射碟片之角度，繞射角為光通過碟片後離開條碼閱讀機之角度。

光機設計除了入射角與繞射角外還有回收光之設計。這也是訊號處理前之一大重點；若設計不理想，這會影響以後之訊號處理，可能使訊號無法放大因而不能解碼。

#### 3. 電子處理

電子處理可分為電源供應器和訊號處理兩種。電源供應器供應如光源 (雷射二極體)、馬達、訊號放大電路和解碼器之電能。而訊號處理包括開始訊號處理和條碼訊號處理；開始訊號處理為讀條碼訊號之前告知解碼器在開始訊號後便是條碼之訊號，這可幫助解碼器在解碼時速度變快和解碼準確。訊

號放大電路首先接收探測器接收回來之訊號，然後利用放大線路和濾波線路使訊號放大和過濾雜訊，這時之訊號還不能直接送給解碼器，因解碼器只接收 TTL 訊號 (TTL 訊號則是 0 或 1 之訊號)；因此除了放大和濾波線路外還要加上 TTL 線路，使放大訊號變為 TTL 訊號。

#### 4. 解碼器的選擇

解碼器在國內已有不少廠商有研發和生產之能力，所以利用市面上之解碼器再配合雷射掃描系統。而解碼器之選擇有內藏與外加式兩種；內藏式則是解碼器放在條碼閱讀機內，外加式則是解碼器外接在條碼閱讀機上。解碼器接收訊號之選擇有兩種；一種是需要開始訊號，如上述第三部份電子處理所述；另一種是不需要開始訊號。解碼器之解碼速度選擇，這要看條碼閱讀機之應用範圍，當然速度越快越好；但解碼器之解碼速度要能配合掃描速度，若不合無法解碼。

### 二、結構示意圖

雷射掃描解碼器的結構示意圖如圖 1 所示。

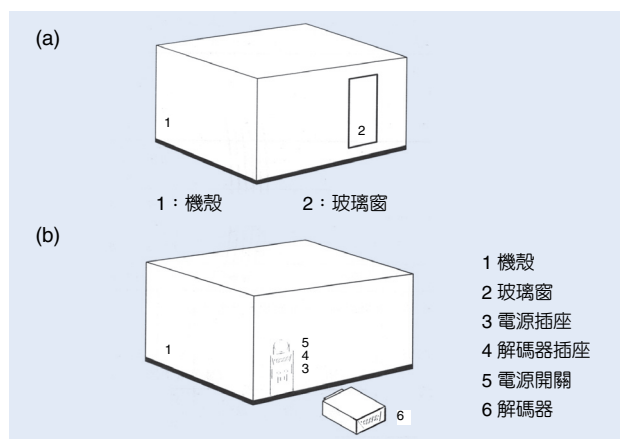


圖 1. 雷射掃描解碼器的 (a) 外型及 (b) 結構示意圖。

### 三、儀器規格與特徵

#### 1. 儀器規格

- (1) 光源：670 nm，5 mW 之半導體雷射
- (2) 掃描碟直徑：120 mm
- (3) 掃描碟面數：6 面
- (4) 掃描碟效率：20 % (min)
- (5) 掃描線數目：6 條 (如圖 1 所示)
- (6) 掃描線之型式：平行掃描
- (7) 平行線間之距離：  
2 mm ± 0.5 mm @ 離碟片 115 mm 處  
5 mm ± 1 mm @ 離碟片 250 mm 處
- (8) 掃描線之弧度比： $H/L = 0.1$
- (9) 解碼器速度：30 次/秒－50 次/秒
- (10) 解碼器可解之碼：EAN/UPC13、Code 39、  
CODABAR、I 2OF5、EAN/UPC12
- (11) 解碼器之應用：光罩式 CCD scanner
- (12) 雷射槍 (laser scanner)
- (13) 光筆 (light pen)

#### 2. 掃描特徵

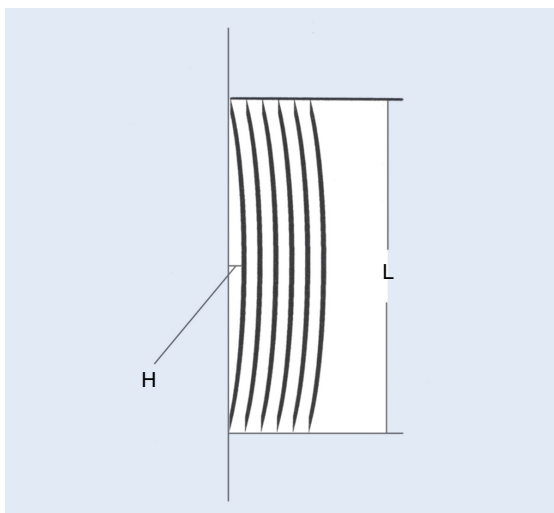


圖 2. 雷射掃描解碼器的掃描線圖。

#### 3. 掃描線之景深 (從碟片算起)

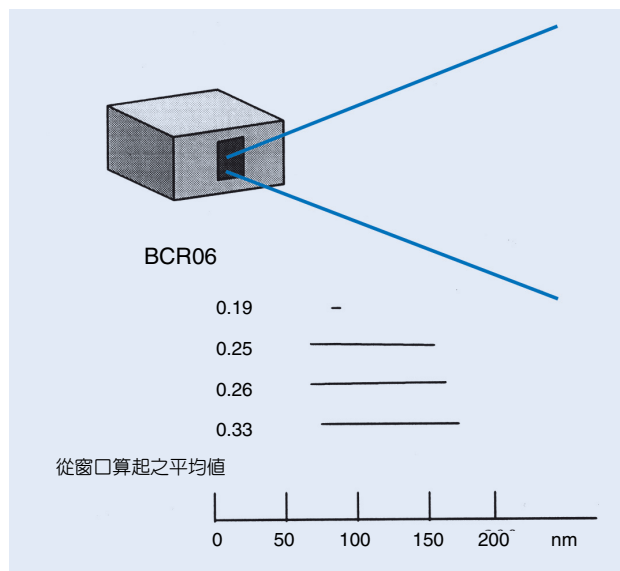


圖 3. 雷射掃描解碼器掃描線之景深示意圖。

#### 四、應用與用途

本雷射掃描解碼器除了可配合本所研發之雷射六線平行掃描器外，還可配合市面上光筆型、CCD m 型及雷射槍型之條碼閱讀機。

雷射掃描解碼器最主要之用途為可解市面上一般條碼，而條碼之應用可用在自動化與非自動化管理上。自動化管理如倉儲之貨品進出之管理及貨品分類等之管理。非自動化管理如員工識別、貨品買賣及識別等之管理。

#### 參考文獻

1. 商品條碼國家標準說明會講義.
2. TBR-2200 操作說明書.

作者：黎邦先生為 Salford 大學應用光學碩士，現任工業技術研究院光電工業研究所副工程師。

# 熱像儀

## Thermal Imager (TI)

關鍵字：熱像儀

Keywords：thermal imager

### 一、基本原理

熱像儀基本上是一種將不可見的紅外線影像轉換成可見的視訊影像和具有溫度量測的技術儀器；目前它之所以廣範被採用，在於其四大特點：

- (1) 它運用一種被動技術 (passive technique)，故不需任何光源，可在白天和黑夜中操作。
- (2) 它非常適合偵測同一景像中，不同溫度和不同放射率 (emmissivities) 的區域。
- (3) 紅外線熱輻射比可見光更易穿透煙霧，使一些視線阻礙的物件可被偵測出來。
- (4) 它是一種即時和遙測的技術。

為何如此呢？首先我們必須了解紅外線熱影像為何？根據普蘭克定律 (Planck's law)，任何物體溫度高於絕對零度都會發出熱輻射，只是熱輻射的有效波長範圍會隨物體溫度的高低而有所不同，由於攝氏數百度到地表溫度之物體所發出之輻射，主要是落在紅外線波段 ( $0.75 \mu\text{m} - 15 \mu\text{m}$ )，因此地表充滿人眼看不到的紅外線。而在此紅外線波段 ( $0.75 \mu\text{m} - 15 \mu\text{m}$ ) 中，只有兩個波段 ( $3 \mu\text{m} - 5 \mu\text{m}$  和  $8 \mu\text{m} - 13 \mu\text{m}$ ) 的熱輻射可穿透大氣，且不易為大氣所吸收，其餘波段的熱輻射大部份受到大氣的吸收

而衰減，所以熱像儀採用轉換熱輻射為電訊號之檢知元件 (detectors) 皆選擇此兩波段者為多，如表 1 所示。

表 1 中所列為常見各種不同材質的檢知元件其各具有不同工作方式、偵測波長和操作溫度，如矽化鉑 (PtSi) 而該工作之波段為  $3 - 5 \mu\text{m}$ ，方式為蕭特基 (Schottky)，和操作溫度 77 K，代表該檢知元件在該波段和溫度下，才可達最大之轉換效益；然而如何有效使檢知元件工作效益達到最高呢？紅外線鏡組過濾背景雜訊，和有效收集紅外線並聚光於檢知元上，而致冷器和杜瓦瓶 (dewar) 整合包裝是使檢知元件快速冷卻到其工作溫度，並保持在工作溫度，當然目前有所謂室溫熱像不需冷卻，即可正常工作。

二維熱影像的產生依掃描 (scan) 方式可區分為機械式掃描如汞鎘銻元件最常使用，和電子掃描如矽化鉑元件，兩種方式有效的將檢知訊號讀出。

最後當然要將檢知元件轉換出之電訊號，變成定性分析用之熱影像，或另一種定量分析用之熱像輻射溫度資料，透過電子訊號處理系統來驅動、修補檢知元的缺陷 (如：非均勻性 (nonuniformity)，

表 1. 常見的檢知元件。

	HgCdTe	InSb	PtSi	HgCdTe	Bolometer	Pyroelectric
Spectral Wavelength	$3 - 5 \mu\text{m}$	$3 - 5 \mu\text{m}$	$3 - 5 \mu\text{m}$	$8 - 12 \mu\text{m}$	$8 - 12 \mu\text{m}$	$8 - 12 \mu\text{m}$
Operating Mode	PV	PV	Schottky	PV	PC	PC
Operating Temp	95 - 120 K	80 K	77 K	80 K	25 °C	25 °C
Detectors/readout circuit	Hybrid	Hybrid	Monolithic Hybrid	Hybrid	Monolithic	Hybrid

和溫度的計算、校正)，和視訊加工 (加色) 轉換，即可達到此目的地。至於詳細的設計內容可參閱參考文獻，在此並不詳加介紹。

## 二、結構示意圖

熱像儀的基本結構圖如圖 1 所示，而大部份熱像儀操作十分簡易，只要啟動電源，讓它冷卻達到操作於工作溫度，即可開始正常取像和資料；物體的熱輻射透過大氣，有效集輻射於檢知元件上，透過電子訊號處理系統驅動、掃描、修正和成像等步驟，將結果以視訊方式輸出。當然配合熱像儀輔助操作的一些資料分析、記錄用之軟硬體，更可使熱像儀的功能發揮更大。

## 三、儀器規格與特徵

目前商用之熱像儀的型式頗多，功能上大同小異，主要的規格差異在於使用之檢知元件、掃描方式和電子訊號處理的能力，而一般熱像儀常用的規格參數有三種：

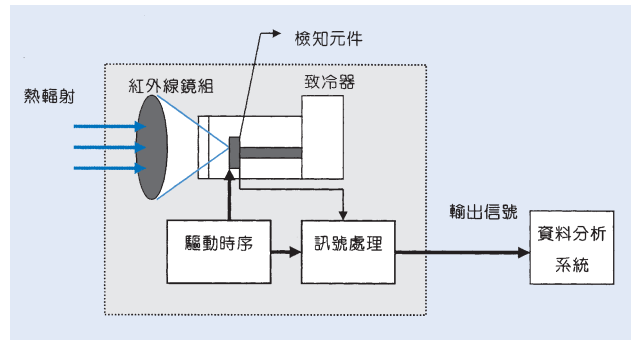


圖 1. 熱像儀基本結構圖。

- (1) 空間解析度：MTF (modulation transfer function) 此參數最主要用以表示在空間中可辨別之最小物體大小。
- (2) 敏感度：NEDT (noise equivalent temperature difference) 可辨別之最小明顯溫差 (apparent temperature)。
- (3) 整體系統參數：MRTD (minimum resolvable temperature) 此參數結合前兩項的系統參數，為在不同大小的標準測試靶，可辨別之最小明顯

表 2. 目前世界常見熱像儀 (含測溫儀)。

公司	國家	機型	檢知器種類	偵測波長	重要規格
Cincinnati Electronics	美國	CE IRC-160ST	InSb 160 × 120	2.2 μm – 4.6 μm	NEDT : 0.025 °C
		IRRIS-256ST	InSb 256 × 256	2.2 μm – 4.6 μm	N : -20 – 300 °C E : -20 – 1500 °C
Mitsubishi	日本	IR-M-500	PtSi 512 × 512	3 μm – 5 μm	NEDT : 0.15 °C
		Thermograph 300	PtSi 256 × 256	3 μm – 5 μm	-20 – 2000 °C
AGEMA	瑞典	Thermovision 550FPA	PtSi 320 × 240	3 μm – 5 μm	N : -20 – 300 °C E : -20 – 2000 °C
Amber	美國	Radiance PM	InSb 256 × 256	3 μm – 5 μm	N : -20 – 600 °C E : -20 – 2000 °C
Inframetrics	美國	ThermacAM PM100 PM200 PM300	PtSi/CMOS 256 × 256 Hybrid	3.4 μm – 5 μm	N : -20 – 260 °C N : -20 – 450 °C N : -20 – 450 °C E : -20 – 1500 °C
Nippon Avionics	日本	AVIO TVS-2000ST	InSb 10 elements	3 μm – 5.4 μm	MRTD : 0.1 °C

溫差 (apparent temperature) 在物體和背景溫度。

至於其測試方式可詳見參考文獻中，此三項參數最常使用的為 NEDT，一般而言此參數越小越佳，比如 NEDT：0.01 °C 自然比 0.05 °C 的好；另一類測溫用的熱像儀則再加上兩個規格：(1) 測溫範圍 (如一般 N：-20—450 °C 和加強 E：-20—1500 °C)，範圍越大越好；(2) 精確度：± 2 °C 或 ± 2 %，一般而言此值越小越佳。

最後，以表 2 列舉一些常見商用的熱像儀和其相關規格。

#### 四、應用與用途

整體而言，紅外線熱像儀之應用依任務可區分為軍事、國防上應用，和一般的商業應用兩種，軍事、國防上應用以飛彈尋標器 (missile seeker)、夜視觀測和紅外線搜尋及追蹤系統 (infrared search-and-track system) 為主；而商業應用主要的有製程控制、環境監控、保全、醫療和研究開發等。而依

功能可區分兩種用途，一種作為定性分析用之熱影像夜視系統如一般軍事方面的應用、土木結構的監控，火災監控和海防夜間安全監控等；另一種作為定量分析用之熱像輻射量測系統，如工業產品製程溫度監控、工廠設備預防檢測、電力系統檢測、非破壞性檢測、熱設計分析、醫療輔助檢測、環保監控等用途。

#### 參考文獻

1. J. L. Miller, *Principles of Infrared Technology: A Practical Guide to the State of the Art*, Van Nostrand Reinhold (1994).
2. Edited by S. G. Burnay, T. L. Williams, and C. H. Jones, *Applications of Thermal Imaging*, Bristol: J W Arrowsmith Ltd (1988).
3. G. Gaussorgues, *Infrared Thermography*, Chapman & Hall (1994).

---

作者：黃瑞峰為國立交通大學電子研究所碩士，現任中山科學研究院材料研發中心助理研究員。

# 中文關鍵字索引

$f\theta$  鏡組  $f\theta$  lens 51

## 三劃

工具顯微鏡 toolmaker microscope 73-75

干涉 interference 15, 16 25-29, 55, 76-78, 84

干涉式顯微鏡 interference microscope 76-78

干涉圖 interferogram 28, 30-33, 37, 76, 77

干涉儀 interferometer 15, 16, 25-37, 39, 76-78

干涉學 interferometry 28, 32

## 四劃

分光儀 (光譜儀) spectrometer 5, 8

分光輻射計 spectroradiometer 11, 13

分辨率測試圖 resolution test chart 68

反射原理 principle of reflection 65

牛頓法 Newton's method 53-55

## 五劃

功率計 power meter 19

平板面型黑體 extended-source black-body 1

立體顯微鏡 stereomicroscope 70, 71

## 六劃

光束 beam 5, 6, 8, 22, 28, 31, 32, 37, 38, 51, 55, 62-65, 76, 77, 82, 87

光度計 photometer 9-11

光柵 grating 5, 8, 12, 42, 54

光密度 optical density 23, 24, 90

光密度計 optical densitometer 23, 24

光通量計 flux meter 9, 10

光程差 optical path difference 6, 15, 25, 28, 29, 32, 34, 76, 77

光筆型 light pen 92, 93

光學多頻道分析儀 optical multichannel analyzer 17, 18

光學粗度量測儀 optical profiler 37-39

光學顯微鏡 optical microscope 37, 84, 86

光譜儀 (分光儀) spectrometer 5, 8

共物鏡式立體顯微鏡 common objective stereomicroscope 70

共焦雷射掃描顯微鏡 confocal laser scan microscope 79, 80-83

曲率半徑 radius of curvature 27, 36, 49, 50, 53, 56-58

自動視準儀 autocollimator 53, 65-67

色度計 colorimeter 11, 13, 14

## 七劃

折射係數 refractive index 5, 43, 44

投影解像儀 resolving power test projector 68, 69

## 八劃

波長 wavelength 1, 2, 5-8, 11, 12, 28, 39, 81, 87

波長計 wavemeter 15, 16

空腔型黑體 cavity black-body 1, 2

表面形狀 surface profile 31, 39, 40-42

近場光學 near-field optics 84-86

近場光學顯微術 scanning near-field optical microscopy 84

近場光學顯微儀 scanning near-field optical microscope 84-86

非球面量測 aspheric surface test 34

## 九劃

亮度計 luminance meter 9, 10, 13

相干 (同調) coherence 28, 29, 35, 37, 79, 80, 87

相位移 phase shift 25, 26, 37, 39

風洞 wind tunnel 32, 33

## 十劃

朗其測試 Ronchi test 34  
格林諾式立體顯微鏡 Greenough type stereomicroscope  
70, 71  
消散係數 extinction coefficient 43, 44  
能量計 energy meter 19-21

## 十一劃

偏極光 polarized light 37, 38, 42, 43-45, 47  
探針 stylus 40-42  
望遠鏡 telescope 6, 53, 54, 60-63, 88, 91  
望遠鏡法 telescope's method 53, 54  
球徑計 spherometer 49, 50

## 十二劃

單光儀 monochromator 5-8, 43, 46, 48  
焦距儀 focal length meter 53, 56  
視度 diopter 60, 61  
視度儀 dioptermeter 60, 61  
診斷分析 diagnostics 22

## 十三劃

階高 step height 40, 42  
黑體輻射 black-body radiation 1-4  
準直儀 collimator 54-56, 60, 62-64, 69  
照度計 illuminance meter 9, 10  
雷射 laser 5, 6, 8, 15-17, 19-22, 25-27, 31, 32, 35, 37-39,  
43, 47, 51, 52, 57, 58, 62-64, 79-83, 85, 87-93

雷射目標指示儀 laser target designator 90, 91  
雷射掃描解碼器 laser scanner for bar code reader 92, 93  
雷射測徑儀 laser gauge 51, 52  
雷射測距 laser ranging 82, 87-89  
雷射測距儀 laser rangefinder 87-89  
雷射槍型 laser scanner 92, 93

## 十四劃

像差 aberration 25, 26, 30, 31, 34-36, 56, 70, 79, 80  
對心 centration 57-59

## 十五劃

熱像光電參數量測系統 thermal imager testing system 1, 3  
熱像儀 thermal imager (TI) 3, 4, 94-96  
線性變量差動轉換器 linear variable differential transformer  
(LVDT) 40

## 十六劃

橫向剪切干涉儀 lateral shear interferometer 34-36  
橢圓偏光術 ellipsometry 45  
橢圓偏光儀 ellipsometer 43-48  
頻譜 spectrum 2, 3, 9, 12, 17, 24

## 十九劃

鏡頭 objective 13, 26, 36, 41, 68, 69

## 二十三劃

顯微鏡 microscope 37, 56, 58, 62, 69, 70, 86

# 英文關鍵字索引

## A

aberration 像差 25, 26, 30, 31, 34-36, 56, 70, 79, 80  
aspheric surface test 非球面量測 34  
autocollimator 自動視準儀 53, 65-67

## B

beam 光束 5, 6, 8, 22, 28, 31, 32, 37, 38, 51, 55, 62-65, 76, 77, 82, 87  
black-body radiation 黑體輻射 1-4

## C

cavity black-body 空腔型黑體 1, 2  
centration 對心 57-59  
coherence 相干 (同調) 28, 29, 35, 37, 79, 80, 87  
collimator 準直儀 54-56, 60, 62-64, 69  
colorimeter 色度計 11, 13, 14  
common objective stereomicroscope 共物鏡式立體顯微鏡 70  
confocal laser scan microscope 共焦雷射掃描顯微鏡 79, 80-83

## D

diagnostics 診斷分析 22  
diopter 視度 60, 61  
dioptermeter 視度儀 60, 61

## E

ellipsometer 橢圓偏光儀 43-48  
ellipsometry 橢圓偏光術 45  
energy meter 能量計 19-21  
extended-source black-body 平板面型黑體 1  
extinction coefficient 消散係數 43, 44

## F

$f\theta$  lens  $f\theta$  鏡組 51  
flux meter 光通量計 9, 10  
focal length meter 焦距儀 53, 56

## G

grating 光柵 5, 8, 12, 42, 54  
Greenough type stereomicroscope 格林諾式立體顯微鏡 70, 71

## I

illuminance meter 照度計 9, 10  
interference microscope 干涉式顯微鏡 76-78  
interference 干涉 15, 16 25-29, 55, 76-78, 84  
interferogram 干涉圖 28, 30-33, 37, 76, 77  
interferometer 干涉儀 15, 16, 25-37, 39, 76-78  
interferometry 干涉學 28, 32

## L

laser gauge 雷射測徑儀 51, 52  
laser rangefinder 雷射測距儀 87-89  
laser ranging 雷射測距 82, 87-89  
laser scanner for bar code reader 雷射掃描解碼器 92, 93  
laser scanner 雷射槍型 92, 93  
laser target designator 雷射目標指示儀 90, 91  
laser 雷射 5, 6, 8, 15-17, 19-22, 25-27, 31, 32, 35, 37-39, 43, 47, 51, 52, 57, 58, 62-64, 79-83, 85, 87-93  
lateral shear interferometer 橫向剪切干涉儀 34-36  
light pen 光筆型 92, 93  
linear variable differential transformer (LVDT) 線性變量差動轉換器 40  
luminance meter 亮度計 9, 10, 13

## M

microscope 顯微鏡 37, 56, 58, 62, 69, 70, 86  
monochromator 單光儀 5-8, 43, 46, 48

## N

near-field optics 近場光學 84-86  
Newton's method 牛頓法 53-55

## O

objective 鏡頭 13, 26, 36, 41, 68, 69  
optical densitometer 光密度計 23, 24  
optical density 光密度 23, 24, 90  
optical microscope 光學顯微鏡 37, 84, 86  
optical multichannel analyzer 光學多頻道分析儀 17, 18  
optical path difference 光程差 6, 15, 25, 28, 29, 32, 34, 76, 77  
optical profiler 光學粗度量測儀 37-39

## P

phase shift 相位移 25, 26, 37, 39  
photometer 光度計 9-11  
polarized light 偏極光 37, 38, 42, 43-45, 47  
power meter 功率計 19  
principle of reflection 反射原理 65

## R

radius of curvature 曲率半徑 27, 36, 49, 50, 53, 56-58  
refractive index 折射係數 5, 43, 44

resolving power test projector 投影解像儀 68, 69

resolution test chart 分辨率測試圖 68

Ronchi test 朗其測試 34

## S

scanning near-field optical microscope 近場光學顯微儀 84-86

scanning near-field optical microscopy 近場光學顯微術 84

spectrometer 分光儀 (光譜儀) 5, 8

spectroradiometer 分光輻射計 11, 13

spectrum 頻譜 2, 3, 9, 12, 17, 24

spherometer 球徑計 49, 50

step height 階高 40, 42

stereomicroscope 立體顯微鏡 70, 71

stylus 探針 40-42

surface profile 表面形狀 31, 39, 40-42

## T

telescope 望遠鏡 6, 53, 54, 60-63, 88, 91

telescope's method 望遠鏡法 53, 54

thermal imager (TI) 熱像儀 3, 4, 94-96

thermal imager testing system 熱像光電參數量測系統 1, 3

toolmaker microscope 工具顯微鏡 73-75

## W

wavelength 波長 1, 2, 5-8, 11, 12, 28, 39, 81, 87

wavemeter 波長計 15, 16

wind tunnel 風洞 32, 33

---

## 儀器總覽－光學量測儀器

---

發行人／蔡定平

發行所／財團法人國家實驗研究院儀器科技研究中心

新竹市科學工業園區研發六路 20 號

電話：(03) 5779911 轉 303,304

傳真：(03) 5773947

編輯／伍秀菁・汪若文・林美吟

美術編輯／吳振勇

初 刷／中華民國八十七年十月

初版三刷／中華民國九十七年六月

行政院新聞局出版事業登記證局版臺業字第 2661 號

定 價／單冊新台幣 250 元・全套新台幣 2200 元

郵撥戶號／0017343-1 國研院儀器科技研究中心

打 字／志丞商業設計社 (03) 5617562

印 刷／宇豐廣告實業社 (03) 5258350

---

ISBN 978-957-022-526-6 (套)

ISBN 978-957-022-529-7

國家圖書館出版品預行編目資料

儀器總覽 = Introduction to instrumentation  
/ 伍秀菁, 汪若文, 林美吟編輯. -- 初版. --  
新竹市 : 國研院儀科中心, 民87  
冊 ; 公分  
含索引  
ISBN 957-02-2526-2 (一套 : 平裝)

1. 精密機械工業 - 儀器 - 手冊, 便覽

471.026

87012756