

Conoscope 的應用－液晶顯示器 視角快速量測和晶體光軸取向判斷

Application of Conoscope – Fast Viewing-Angle Measurement of TFT-LCDs and the Optical Axis Determination of Liquid-Crystals

陳伯綸

Po-Lun Chen

Goniometric 儀器是一種掃描式光學表現量測架構，因為需要旋轉量測待測物或偵測器，此量測方法不適用於大型顯示器，且最大的缺點是量測費時相當久，往往一完整的視角分布圖需耗時數小時之譜。Conoscopic 儀器把待測物量測點來的光，經特殊的轉換透鏡達二維的偵測陣列後，待測物表現之光延伸視角分布錐筒可同步立即分析出。一個標準的 conoscopic 圖的量測時間只約為 200 毫秒，提供最快速的視覺表現評估量測。本文並討論 conoscope 的另一重要應用，為晶體光軸取向判斷，這對於畫素中液晶光軸排列是否如設計運作之判斷有極大幫助。

Goniometric instrument is a scanning machine with scanning either device under test (DUT) or detector sensor for the measurement. This setup is not practical for large displays and the measurement time is as long as several hours. While at the conoscopic approach, and extended cone of light coming from the measuring spot on DUT is analyzed simultaneously with a special transform lens and a two-dimensional detector array. A conoscopic measurement provides a very fast optical performance characterization with the measurement time about 200 ms. Besides, we discuss another important conoscopic application for determining the optical axis orientation of crystals. This judgment helps to verify if the optical axis of liquid crystal follows the operation principle of an intended design.

一、前言

液晶電視 (LCD-TV) 的應用對於顯示品質的要

求更勝於桌上型螢幕，因此平面顯示器的量測方法已不再足夠。消費者或終端用者需要一個有意義的視角定義以做最後購買的決定。目前許多 LCD-TV

的宣傳都強調視角超過 170° 以上，但事實上這些顯示器的品質並不如所期望的。

自從 1970 年第一個液晶顯示器 (LCD) 找到其應用空間，如計算機、手錶，這些產品在顯示器額緣大小上的要求極關鍵，輕薄省電即為考量重點。但其缺點則是斜向視角可讀性和自發性顯示器比起來受到了限制，但這不是很嚴苛，因為在如此小的手持式顯示器其觀察的方向本來就有限。隨著尺寸的增加和資料顯示密度的提升，視覺表現和影像品質變得重要，於是用以衡量斜向視角下的可讀性的指標「視角」(viewing angle) 便被提出。現在「視角」一詞廣被使用，但其定義卻未真正統一。

本文介紹一種快速的擷取顯示器光線輸出分布的方法— conoscope。

二、薄膜電晶體液晶顯示器的量測

薄膜電晶體液晶顯示器 (TFT-LCD) 是一門結合光電、物理、電機、電子、化工、材料等多領域的產物，其涉略到的量測技術也跨足相當多的領域。以其整個產品的開發流程來看可分為：

(1) Array 製程

- 原子力顯微鏡 (atomic force microscopy, AFM)
- 二次電子顯微鏡 (secondary electron microscopy, SEM)
- 光阻 (photoresist) 厚度量測
- 電訊號測試 (testing) 機器
- 元件分析儀

(2) Cell 製程

- 配向層 (alignment layer) 厚度量測⁽¹⁾
- 液晶盒間隙 (cell gap) 量測⁽²⁻⁵⁾
- 液晶預傾角 (pretilt) 量測⁽²⁻⁵⁾
- 電壓保持率 (voltage holding ratio) 量測⁽⁶⁾
- 殘留直流電壓 (residual DC) 量測⁽⁷⁾

(3) Module 製程

- 一般電子量測儀器
- 光學式機構尺寸分析

(4) 光學分析

- 視角 (viewing angle) 量測
- 反應速度 (response time) 量測

• 色座標 (color coordinator) 量測

本文則針對一個顯示器最後為人眼視覺觀察所需要的光學特性分析之視角量測方法做說明，並對於一種快速擷取各視角特性的方法— conoscope 做介紹。此外還討論其另外的應用— 晶體光軸取向判斷。

三、新的「視角」定義

視角和應用、視覺表現的需求有關，因此視角的定義和判斷標準必須配合不同應用下所得到的使用者需求。舊的「視角」定義為對比 (contrast ration, CR) 大於 10 的視域範圍，這已不適用於 LCD-TV 的應用。好的視覺表現需要滿足下列條件：

- (1) 在視域範圍內，微小亮度 (luminance) 變化；
- (2) 在暗和亮的環境下，不只是在垂直方向有好的灰階解析度；
- (3) 在視域範圍內，優良的顏色表現；
- (4) 快速切換反應速度，不只是黑白間的切換。

四、視角量測 (Measurement) 和評估 (Evaluation)

基本上，以視覺方向 (viewing direction) 為函數的亮度 (luminance) 和顏色 (color) 有兩種量測 (measurement) 與評估 (evaluation) 的方法：conoscopic 和 goniometric。

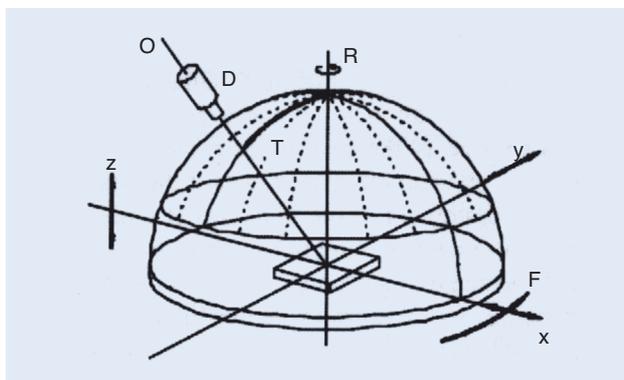


圖 1. Goniometric 儀器是一個掃描式機器，其包含一個光偵測或顏色感應器 D。

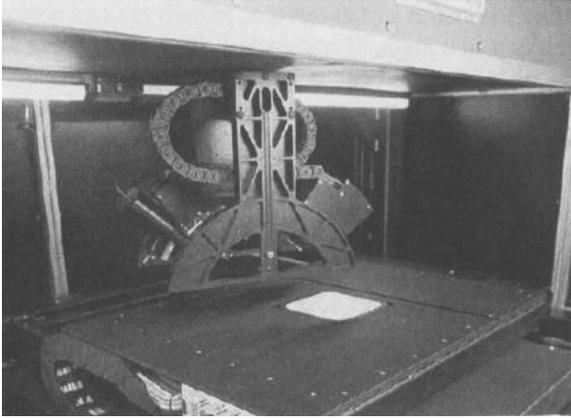


圖 2. 德國 autronic-Melchers 的 DMS-900 屬於 goniometric 式儀器。

1. Gonioscopic 方法

Gonioscopic 儀器是一個掃描機器，其包含一個光偵測 (photometric) 或顏色 (colorimetric) 感應器 (sensor) D ，如圖 1 所示。以德國 autronic-Melchers 公司的型號 DMS 系列 goniometric 儀器為例，包含兩個馬達化移動軸 (R, T) 來產生某一固定的顯微鏡光軸 O 方向。而另兩馬達化的軸 (x, y) 允許待測物 (device under test, DUT) 的自動掃描。因為需要旋轉量測待測物或偵測器，此量測方法不適用於大型顯示器。以 autronic-Melchers 的 DMS-900 為例⁽⁸⁾ (如圖 2)，最大可量到 60° 。其最大的缺點是量測費時相當久，往往一個完整的視角分布圖需耗時數小時之譜。

2. Conoscopic 方法

因為 goniometric 方式需要使偵測器掃描所有有興趣的角度，因此 conoscopic 方式被提出。在這

種方法中，由待測物量測點來的光，經由特殊的轉換透鏡 (transform lens) 和二維的偵測陣列 (detector array) 後，光延伸出的錐筒 (cone) 可同步立即分析出。圖 3 所示即為 conosccope 的光學原理：基本平行光束 (elementary parallel beam) 的錐筒 C 傳遞經過樣品 S (置於轉換透鏡 (transform lens) L_1 的前焦平面上 (focal plane))，此 C 來自於量測點 (measuring spot)，則藉由此透鏡 L_1 ，同步立即被收集分布於一個大立體角 (solid angle) 範圍內。 F_1 、 F'_1 、 F_2 、 F'_2 分別為透鏡 L_1 和 L_2 的前 (front) 焦平面和後 (rear) 焦平面。 IF 為 F'_1 上的轉換圖樣 (transform pattern)， A_2 為可變光圈 (aperture)， L_2 為繼像透鏡 (relay lens) 用以投影 IF_1 到達 IF_2 平面上的偵測陣列。

圖樣 IF_1 (換言之，conoscopic 圖) 就在轉換透鏡 L_1 的前焦平面 F'_1 上產生，此圖樣在不同位置上的強度乃相對於一特定傳播方向基本平行光束強度。光束平行於光軸 (optical axis) 傳播，在 conoscopic 接收端形成 IF_1 圓形圖樣的中心點。而以固定傾斜角 θ 傳播的光束出現在 IF_1 圖樣上的則是一個以圍繞此中心點的同心圓，其同心圓半徑正比於傾斜角 θ 。

在圖樣 IF_1 上，基本平行光束 C 的方向強度分布被轉換成二維光強度分布，而在圖樣中的顏色相對於一個光傳播方向 (θ, ϕ) 。第二個光學系統投射了圖樣 IF_1 到彩色 CCD 偵測陣列以估計方向強度和顏色分布。事實上 CCD 偵測到的即是一個視角分布的一次傅利葉轉換 (Fourier transform) 結果，量測結果經過一次反傅利葉轉換 (inverse Fourier transform) 的理論計算結果，可回推該待測物的發光視角分布。

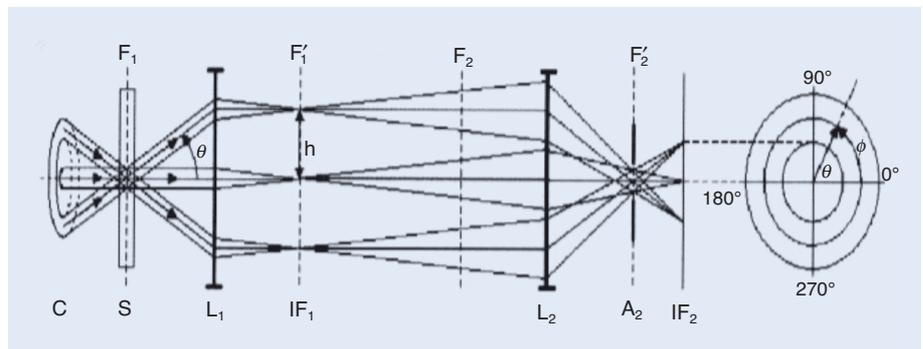


圖 3. Conoscope 儀器的光學運作原理。

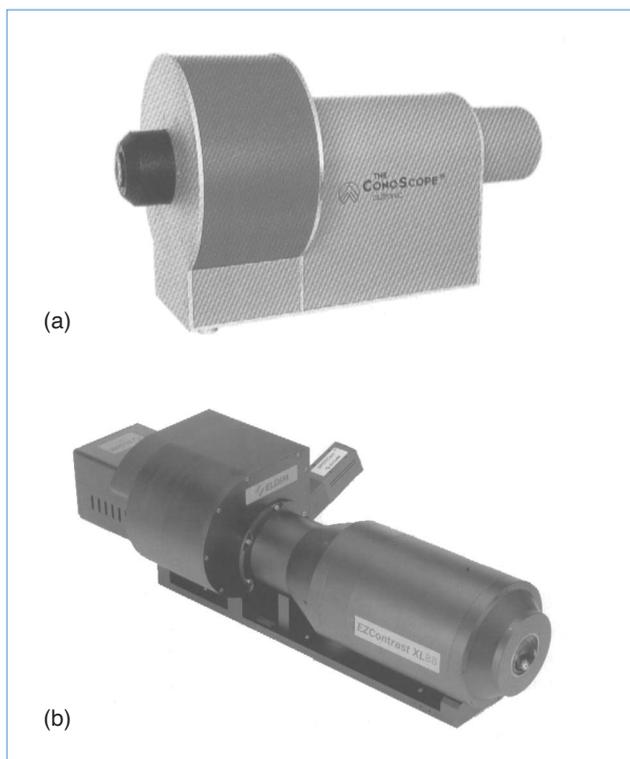


圖 4. 商業化的 conoscopic meter：(a) 德國 autronic-Melchers 的 ConoScope™ 和 (b) 法國 ELDIM 的 EZContrast XL88。

這種 conoscopic 方式的快速視角量測儀器已有德國 autronic-Melchers 的 ConoScope™⁽⁸⁾ 和法國 ELDIM 的 EZContrast⁽⁹⁾ 兩種商用產品，見圖 4(a) 和 (b)。其中法國 ELDIM EZContrast 的最新機種 XL88 可量到視角 $\pm 88^\circ$ ，且精度達 0.25° 。一個標準的 conoscopic 圖的量測時間約為 200 ms，換言之，conoscope 是最快速的視覺表現評估儀器，是用以量測所有視角的光學特性或對比的最佳選擇。若整合了光電倍增管 (photomultiplier, PMT) 後，也可量測反應速度和閃爍 (flicker)。

用於視角的量測，以一個扭轉向列式 (twisted nematic, TN) 液晶顯示器為例，分別量測此一顯示器的亮態 (bright state) 和暗態 (dark state)。圖 5(a) 和 (b) 分別表示其亮態和暗態之操作原理。而圖 5(b) 是以 Conoscope 量出的亮態的等輝度 (ISO-luminance) 的視角分布圖，圖 5(c) 則是以 Conoscope 量出的暗態的等輝度的視角分布圖。而

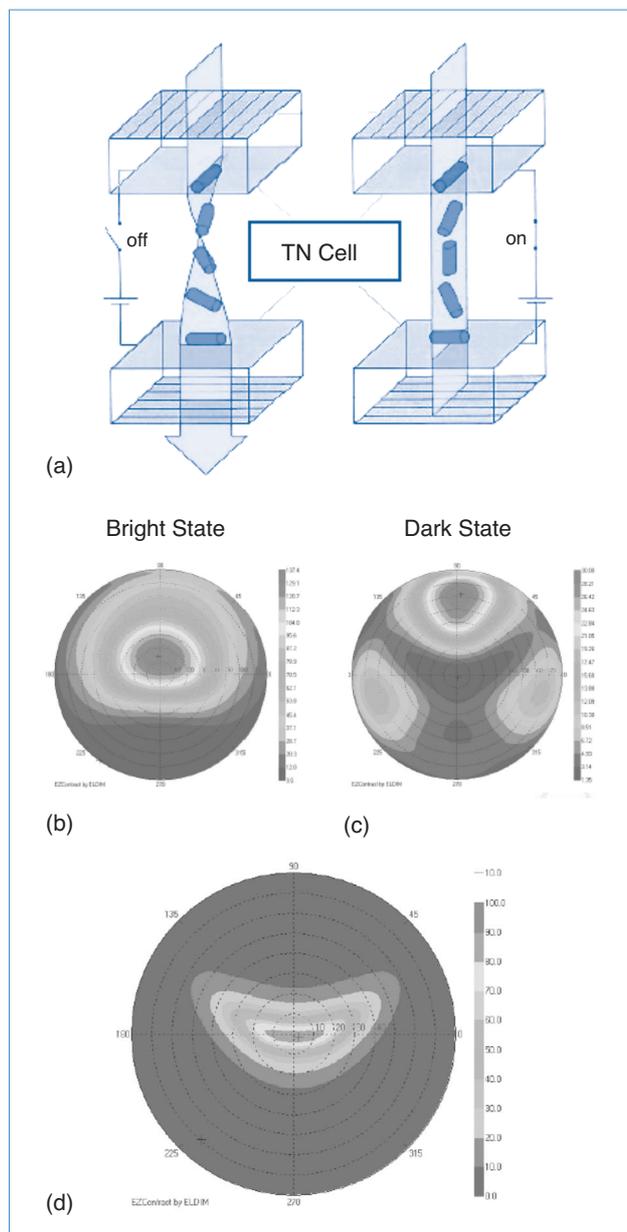


圖 5. TN mode 液晶顯示器：(a) 亮態 (bright state) 和暗態 (dark state) 操作原理；(b) 以 conoscope 量出的亮態的等輝度 (iso-luminance) 的視角分布圖；(c) 以 conoscope 量出的暗態的等輝度的視角分布圖；(d) 將 (b) 圖除以 (c) 圖即為等對比 (iso-CR) 的視角分布圖。

不同視角的對比特性即是以 (b) 圖除以 (c) 圖所得結果，如圖 5(d) 所示，即為等對比 (ISO-CR) 的視角分布圖。

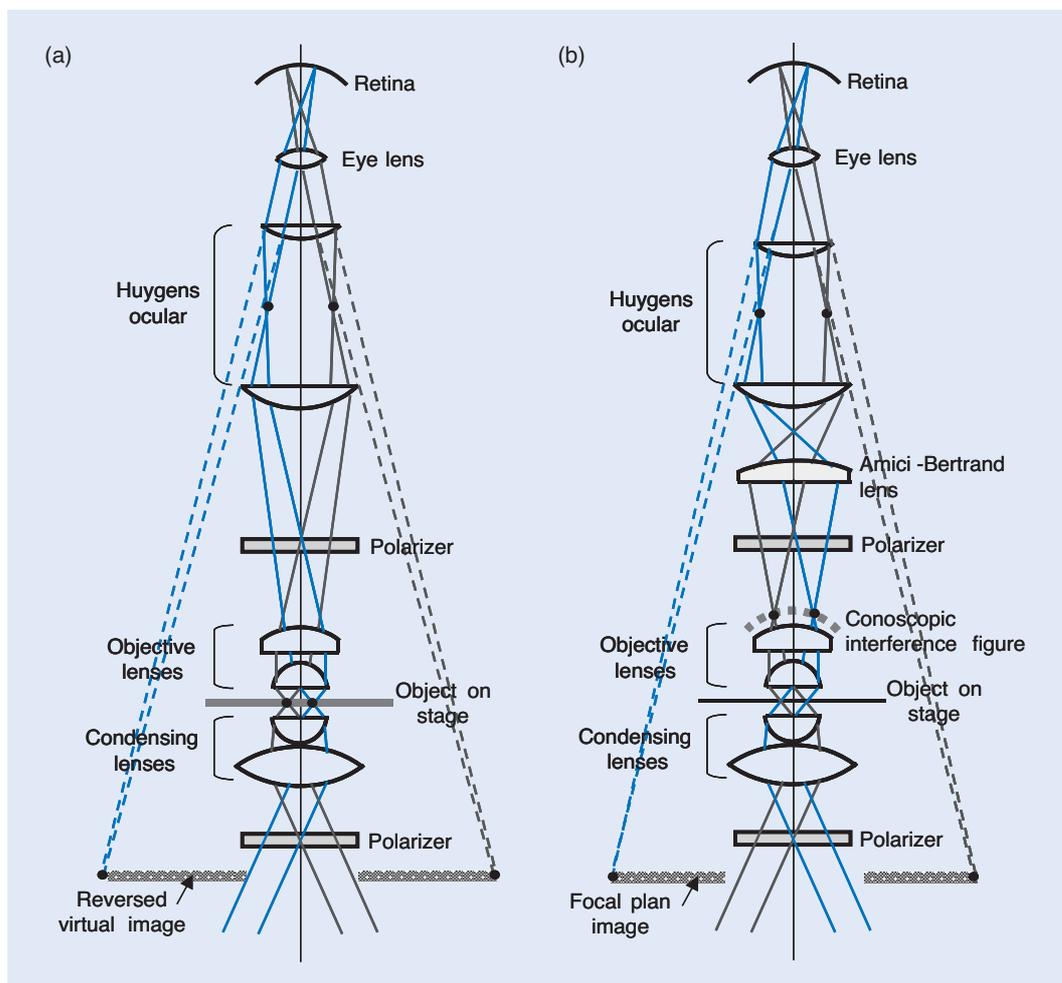


圖 6.
(a) conoscope 顯微鏡；(b) 一般 orthoscope 正交顯微鏡。

五、Conoscope 在判斷晶體光軸取向上之應用

Conoscope 也可用來判斷晶體 (crystal) 光軸的取向 (orientation)，這種功能對於液晶顯示器的開發助益頗多。此種 conoscope 應用的儀器架設見圖 6(a) 所示，而圖 6(b) 則為一般正交顯微鏡 (orthoscope)。此種 conoscope 裝置當一個具有非等向性 (anisotropic) 晶體放於其平台上時，便可看到干涉所產生的圖形。基本而言，orthoscope 是將焦點放在平台上的物體，而 conoscope 是將焦點放在物鏡的後焦平面上，而最後人眼在這兩種不同儀器架設上所看見的分別為平台上待測晶體 (crystal) 的放大反像 (reversed image) 和焦平面上 (focal plane) 之一次傅利葉轉換 (Fourier transform) 的 conoscope 干涉圖 (interference figure)。

1. 原理

當光經過液晶顯示器偏光片 (polarizer) 後，變成極化光，再經過 condensing lens 後就有不同角度的線極化光 (linearly polarized light) 入射於晶體。對於每一角度的入射線極化光，在晶體內都可分成 e-ray (非尋常光) 和 o-ray (尋常光)，由於 e-ray 和 o-ray 有不同的折射率 (refractive index) n_e 和 n_o 存在，使光傳播發生相位上的延遲，於是最後 e-ray 和 o-ray 在通過第二個極化片 (polarizer) 後，便在極化方向產生干涉圖形。

(1) 單光軸 (Uniaxial) 晶體垂直 (Homeotropic) 排列

考慮 e-ray 和 o-ray 相位差的變化 δ ，事實上 e-ray 和 o-ray 在晶體中有不同 \mathbf{k} 值，但由於 $(n_e - n_o)$ 很小，可看成 e-ray 和 o-ray 有相同的 $\mathbf{k} = \frac{\vec{ON}}{|\vec{ON}|}$ 。於是

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda} |\vec{ON}| (n_o - n_{\text{eff}}) = \frac{2\pi}{\lambda} d \sec\theta (n_o - n_{\text{eff}}) \quad (1)$$

由 $\frac{1}{n_{\text{eff}}^2} = \frac{\cos^2\theta}{n_o^2} + \frac{\sin^2\theta}{n_c^2}$ 得

$$n_o - n_{\text{eff}} \cong (n_o - n_c) \sin^2\theta \quad (2)$$

因此

$$\delta \cong \frac{2\pi}{\lambda} d \cdot \sin^2\theta \cdot \sec\theta \cdot (n_o - n_c) \quad (3)$$

又因 θ 不大， $\sec\theta \cong 1$ ，所以

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda} d \cdot \sin^2\theta \cdot (n_o - n_c) \quad (4)$$

當 $d = \text{constant} = c \Rightarrow |\vec{ON}| \sin^2\theta = \text{constant} = c$ ， $|\vec{ON}| = (x^2 + y^2 + z^2)^{1/2}$ ，又 $|\vec{ON}| \sin^2\theta = (x^2 + y^2)^{1/2}$ ，可得

$$|\vec{ON}| \cdot (|\vec{ON}| \sin^2\theta) = x^2 + y^2 \quad (5)$$

所以

$$(x^2 + y^2)^2 - c^2(x^2 + y^2) - c^2z^2 = 0 \quad (6)$$

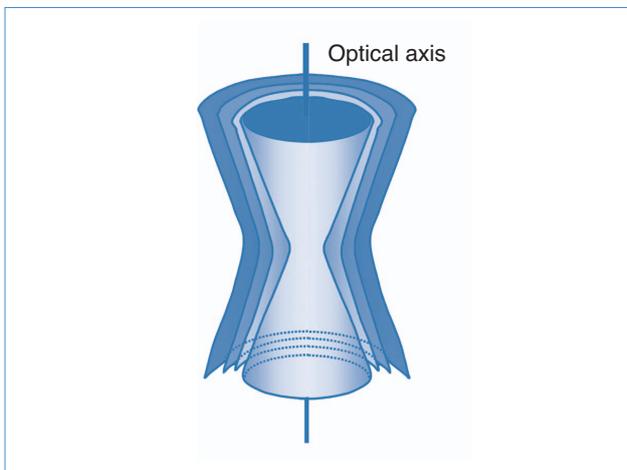


圖 7. 層狀的單軸 Bertin's surface。

而式 (6) 所描繪出的即為 Bertin's surface，見圖 7。

(2) x-y 面及 y-z 面的干涉圖樣

若考慮 x-y 面的干涉圖樣，即令 $z = d = \text{constant}$ ，並由式 (6)，則

$$x^2 + y^2 = \frac{c^2 + \sqrt{c^2 + 4c^2d^2}}{2} = \text{constant} \quad (7)$$

結果如圖 8(a) 所示。

若考慮 z-y 面的干涉圖樣，即令 $x = d = \text{constant}$ ，並由式 (6)，則

$$y^2 + \frac{2d^2 - c^2}{2} = \pm c\sqrt{z^2 - c^2} \quad (8)$$

結果如圖 8(b) 所示。

(3) e-ray 和 o-ray 通過 Analyzer 後造成的干涉圖形

光經過第一片偏光片 (polarizer) 後，在晶體的兩個固有模態 (eigen-mode) e-ray 和 o-ray 可表示為

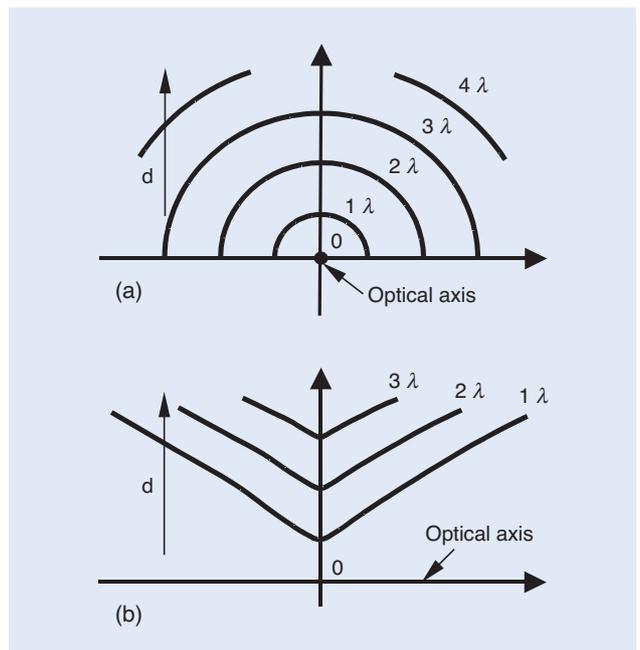


圖 8. 在 conoscope 下，(a) x-y 面的干涉圖樣；(b) z-y 面的干涉圖樣。

$$|\vec{ON}_1| = E \sin \alpha \quad (9)$$

$$|\vec{ON}_2| = E \cos \alpha \quad (10)$$

通過第二片偏光片 (即 analyzer) 後，分別為

$$|\vec{OD}| = E \sin \alpha \cos \alpha \quad (11)$$

$$|\vec{OC}| = E \cos \alpha \sin \alpha \quad (12)$$

其中 α 為光電場振動方向和偏光片之夾角，則其光強度分別表示為

$$I_1 = E^2 \sin^2 \alpha \cos^2 \alpha \quad (13)$$

$$I_2 = E^2 \cos^2 \alpha \sin^2 \alpha \quad (14)$$

兩平行光具有相位差 δ 的干涉光強度為

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \delta = I_0^2 \sin^2 2\alpha \cdot \sin^2 \frac{\delta}{2} \quad (15)$$

$$\text{當 } \alpha = 0, \frac{n\pi}{2} \Rightarrow I = I_{\min} = 0 \quad (16)$$

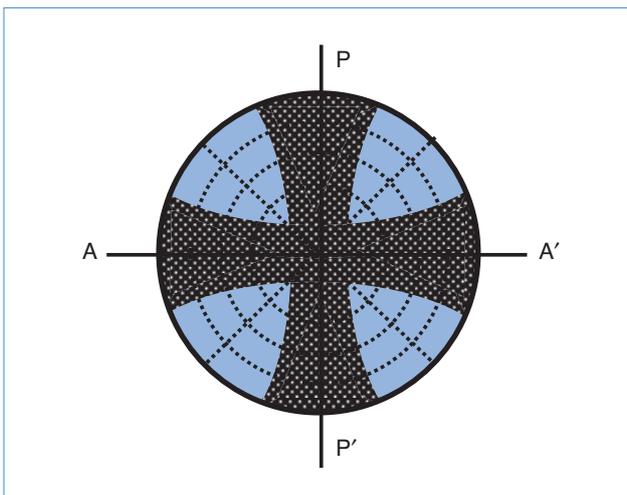


圖 9. 在 conoscope 下，使用單波長綠光雷射，單軸晶體之光軸垂直於投射面 (projection plane) 時所見之干涉圖樣，其中 polarizer 之穿透軸在垂直方向，而 analyzer 之穿透軸在水平方向。

$$\text{當 } \alpha = \frac{(2n+1)\pi}{4} \Rightarrow I = I_{\max} = E^2 \sin^2 \frac{\delta}{2} \quad (17)$$

上式代表我們在焦平面上或虛焦平面上看到的圖樣為一個十字暗紋，如圖 9 所示的干涉圖樣。

將式 (4) 代入式 (15) 可得

$$I = I_0^2 \sin^2 2\alpha \cdot \sin^2 \left[\frac{\pi d}{\lambda} \sin^2 \theta \cdot (n_e - n_o) \right] \quad (18)$$

上式是針對某一 λ 而言，對於白光 (多波長)， λ 由 $0.45 \mu\text{m}$ 到 $0.75 \mu\text{m}$ ，於是可看到彩色環。我們將所看到的環形分成兩部分：一是 isogyres 和

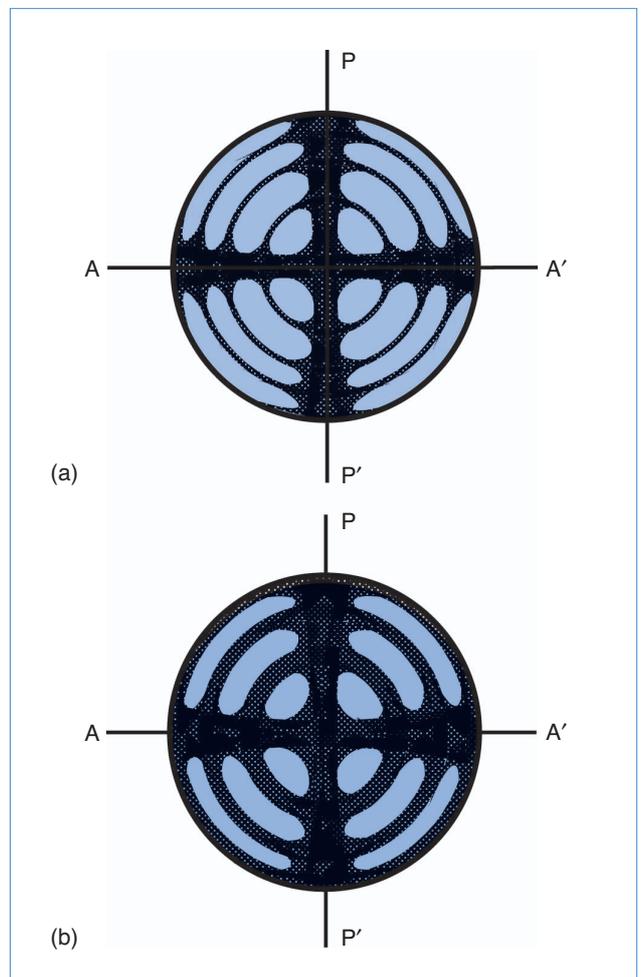


圖 10. x - y 面在 conoscope 下最後的干涉圖樣，其中 (a) 的光波長 λ 小於 (b)。

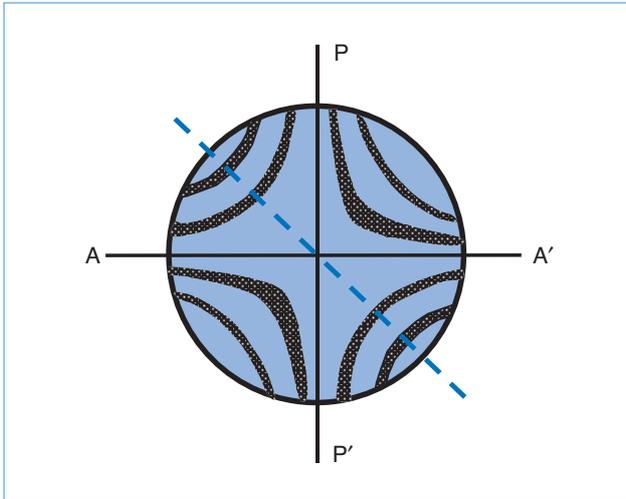


圖 11. y - z 面在 conoscopic 下最後的干涉圖樣。

isochromatic。Isogyres 指的是黑色或灰色的區域；isochromatic 指的是相同顏色的區域。

(4) 結合 (2) 和 (3) 的結果

x - y 面及 y - z 面的干涉圖樣分別包含同心圓和十字紋，以及拋物線和十字紋。圖 10 代表的即是 x - y 面在 conoscopic 下最後的干涉圖樣，其中 (a) 的光波長 λ 小於 (b)。圖 11 則是 y - z 面在 conoscopic 下最後的干涉圖樣。

六、結論

Goniometric 儀器是一種掃描式光學表現量測架構，此量測方法不適用於大型顯示器，且最大的缺點是量測費時相當久。Conoscopic 儀器把待測物量測點來的光，經特殊的轉換透鏡達二維的偵測陣列後，待測物表現之光延伸視角分布錐筒可同步立即分析出，其偵測到的是一個視角分布的一次傅利葉轉換結果，量測結果經過一次反傅利葉轉換的理論計算結果，可回推該待測物的發光視角分布，提

供最快速的視覺表現評估量測。

Conoscope 的另一重要應用為晶體光軸取向判斷，這對於畫素中液晶光軸排列是否如設計運作之判斷有極大幫助。置於正交偏光片間的晶體，經過 conoscopic 後 x - y 面及 y - z 面的干涉圖樣分別包含同心圓和十字紋，以及拋物線和十字紋。對於白光 (多波長)， λ 由 $0.45 \mu\text{m}$ 到 $0.75 \mu\text{m}$ ，更可看到彩色環，整個干涉圖樣變分成兩部分：isogyres 和 isochromatic。針對這些干涉圖案的條紋形狀、寬度、間距及顏色做分析，便可得到液晶光軸的取向分布，及晶體參數。這對於畫素中液晶光軸排列是否如設計運作之判斷有極大幫助。

參考文獻

1. M. Inoue *et al.*, *Proceeding of IMID'01*, 257 (2001).
2. Y. Zhou, Z. He, and S. Sato, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **36**, 2760 (1997).
3. Z. He, Y. Zhou, and S. Sato, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **37**, 1982 (1998).
4. Z. He, Y. Zhou, and S. Sato, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **37**, 2567 (1998).
5. M. Kawamura and S. Sato, *Proc. IDW'00*, LCTp2-3, 105 (2001).
6. N. Sasaki, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **37**, 6065 (1998).
7. M. Inoue *et al.*, *AM-LCD'97*, 151 (1997).
8. <http://www.autronic.melchers.de>
9. <http://www.eldim.fr>

- 陳伯綸先生為國立交通大學光電工程研究所博士，現任友達光電股份有限公司科技中心液晶技術部經理。
- Po-Lun Chen received his Ph.D. in Electro-Optical Engineering from National Chiao Tung University. He is currently the senior manager of Liquid Crystal Technology Department in the Technology Center, AU Optonics Corporation.