

# 2021 年臺灣國際科學展覽會 優勝作品專輯

作品編號 160043

參展科別 物理與天文學

作品名稱 銅化合物細紋間距變化與散射光偏振態之關係  
與探討

就讀學校 臺北市立建國高級中學

指導教師 陳居仁、曾奕勳

作者姓名 陳烜佑

關鍵詞 銅化合物、偏振光、細紋間距

## 作者簡介



我是陳烜佑，就讀建國高中二年級，平時的活動為打籃球，嗜好是享受美食；8年級時，我架設了我第一組的光學實驗儀器，3年來逐步改進儀器結構過程中，得到許多技巧及知識。經過朱教授的指導及許多老師的支援與指正，讓我可以從所學的知識中得到驗證及樂趣。

感謝爸爸深夜中的陪伴，讓我在研究科展的過程中得到支持及動力。

## 摘要

45 度線偏振光入射銅化合物所得散射光為線偏振，銅片直立或橫置，在同一光源下，相對位置亮暗趨勢相似，故銅片上顏色變化非薄膜干涉。圓偏振光入射晶體，不同照相角度所得散射光強度、偏光軸偏轉及偏極化等變化，可推知為雙折射晶體。控溫定量供氧的均質銅化合物晶體，其散射光偏振態偏向圓偏振，因細紋、粒徑等因素，造成偏極化變化。

溫度梯度變化造成銅化合物晶體折射率及介電係數改變，為散射光強度、偏光軸偏轉及偏極化變化的主要因素，經由理論模擬更可得知散射光偏振態的細微變化；不同波長入射相同銅化合物晶體，所得偏光軸偏轉有極大差異，且變化不同波長的光強度所造成偏極化現象及晶體吸收率各有不同。

故不同波長的光進入銅化合物雙折射晶體時，因散射光強度變化、偏光軸偏轉差異、偏極化、取值角度及吸收率不同，晶體會產生顏色差異及色彩變化。

## Abstract

The 45-degree linearly polarized light incident on the copper compound is linearly polarized. Under the same light source, whether the copper plate is placed upright or horizontally, the relative position of the bright and dark trend is similar. Thus, the color change on the copper sheet is not caused by film interference. When circularly polarized light enters the crystal, the changes in the intensity of the scattered light obtained from different camera angles, the deflection of the polarization axis and the polarization, can be deduced as a birefringent crystal. For homogeneous copper compound crystals with controlled temperature and quantitative oxygen supply, the polarization state of scattered light tends to be circularly polarized, and the polarization changes due to factors such as fine lines and particle size.

The temperature gradient changes the refractive index and dielectric coefficient of the copper compound crystal, which are the main factors for the changes in the scattered light intensity, the deflection of the polarization axis, and the polarization phenomenon. Through theoretical simulations, subtle changes in the polarization state of the scattered light can be learned; When the same wavelength is incident on the copper compound crystal, the **polarization** axis deflection of the scattered light is greatly different,

and the polarization phenomenon caused by the change of the light intensity of different wavelengths is also different.

It could be concluded that, when light of different wavelengths enters the copper compound birefringent crystal, the color of the crystal will vary due to the change in the intensity of the scattered light, the difference in the deflection of the polarization axis, the polarization and the angle of value.

## 壹、研究動機

8 年級時，老師做示範銅粉加熱實驗 (圖 1) 時，我發現在加熱過程中銅粉上會出現色彩。以本生燈加熱純銅片時發現，銅片上會有出現色彩變化且不同角度下色彩也有不同 (圖 2)。觀察銅片色彩上有不同結晶構造產生。以雷射光照射銅化合物晶體，反射的散射光會出現偏振態的變化，所以想了解銅化合物晶體參雜與散射光偏振態的關係，進而了解色彩變化的原因。

8 年級示範實驗

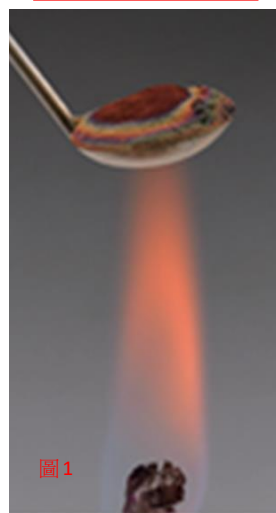


圖 1

銅化合物色彩變化

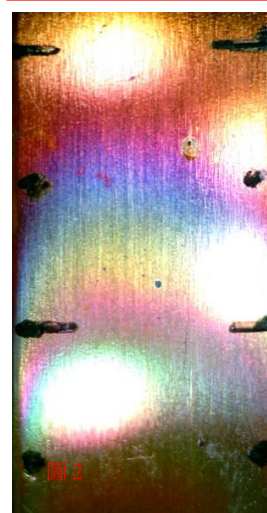


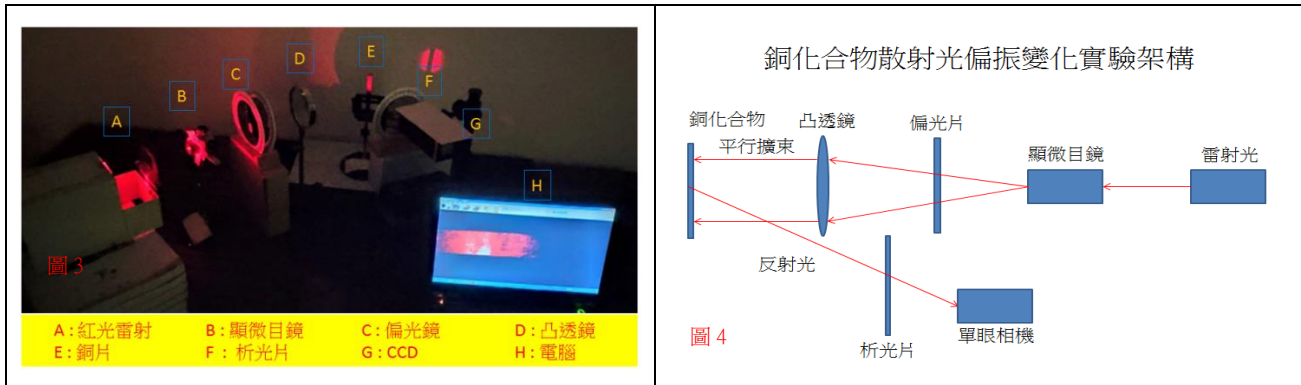
圖 2

## 貳、研究目的

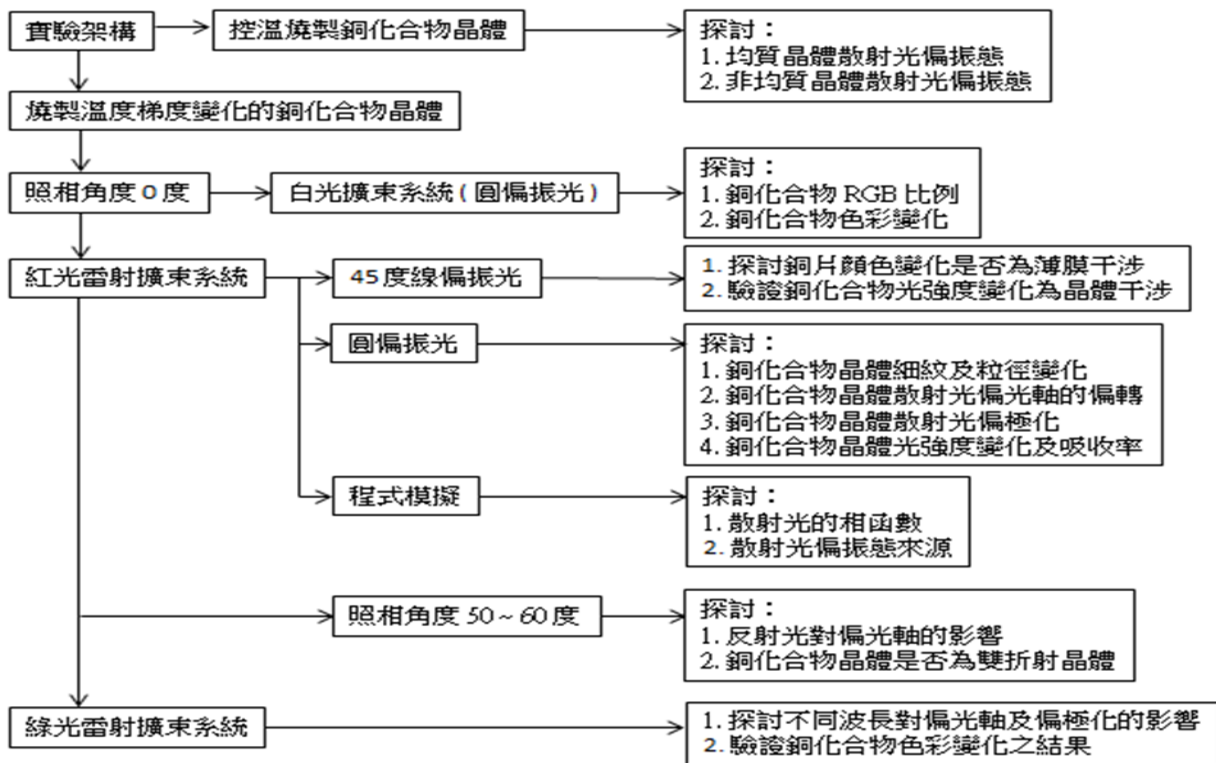
- 一、研究溫度梯度變化對銅化合物表面粒徑與晶體參雜之關係。
- 二、研究晶體散射光場變化與 RGB 偏振態之關係。
- 三、研究晶體散射光 RGB 偏振態變化與銅片色彩變化的關係。

## 參、實驗設備與架構

### 一、實驗設備與光路圖



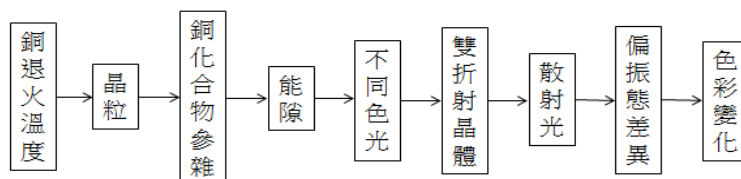
### 二、實驗架構



## 肆、研究原理與步驟

### 一、研究原理

#### (一) 理論流程



## (二) 研究原理

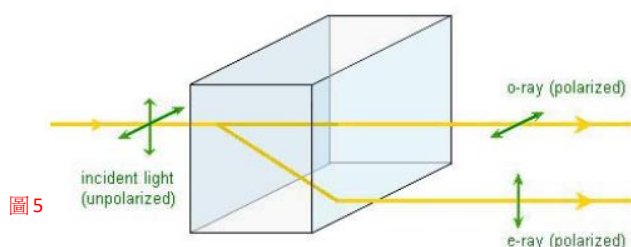
### 1. 銅化合物粒徑、晶格及能隙與退火溫度之關係

(1) 平均粒徑隨退火時間增加而增大，在低於 973 K 的溫度下，製備的奈米顆粒的結晶相分配給單斜氧化銅 CuO，當退火溫度高於 1173 K 時，該單相氧化銅轉化為立方氧化亞銅 Cu<sub>2</sub>O。這表明該結晶相很容易通過改變退火溫度來控制

(2) 發現結晶度和晶粒尺寸隨退火溫度提高。發現樣品的光學能隙在 1.93 和 2.08eV 之間。在沉積和 600°C 退火的薄膜表面觀察到氧化銅 CuO，氧化亞銅 Cu<sub>2</sub>O 和氫氧化銅 Cu(OH)<sub>2</sub>，發現這三個相的相對濃度分別為取決於退火溫度。

2. 銅氧化物光學能隙在 1.2 ~ 2.2 eV，在可見光波段有高吸收率，所以可見光入射後，當某波段被吸收，散射光就會出現互補色。

3. 雙折射現象：光在通過物質時，由於物質的晶格排列導致不同偏振方向的光會在晶體彼此正交的光軸上觀察到不同的折射率，進而產生不同的相速度 (phase velocity)。這彼此正交的光軸共分為二種：一是波的行進方向與其能量傳遞方向同向，我們稱之為尋常波 (ordinary wave)；反之我們稱之為異常波 (extraordinary wave)



若晶體厚度為  $d$ ，主折射率為  $n_o$  和  $n_e$ ；偏振光入射到晶體上，入射光的振動方向與晶體光軸的夾角為  $\theta$ 。入射光的振動可以按光軸方向分解成互相垂直的兩個分量。

平行光軸的振動進入波片成為 e-ray，通過晶體後的相位為

$$\varphi_y = \omega t - \frac{2\pi}{\lambda} n_e d$$

垂直光軸的振動進入波片成為 o-ray，通過晶體後的相位為

$$\varphi_x = \omega t - \frac{2\pi}{\lambda} n_o d$$

當它們穿出晶體之後造成  $(n_o - n_e) d$  的光程差，相應的相位差為

$$\Delta\varphi = \varphi_y - \varphi_x = \frac{2\pi}{\lambda}(n_o - n_e)d$$

於是我們得到兩個振動方向互相垂直的線偏振光

#### 4. 雷利散射與米氏散射隨尺度衰減曲線

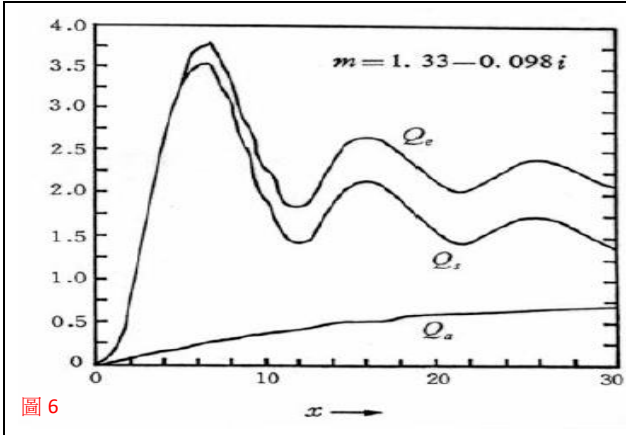


圖 6

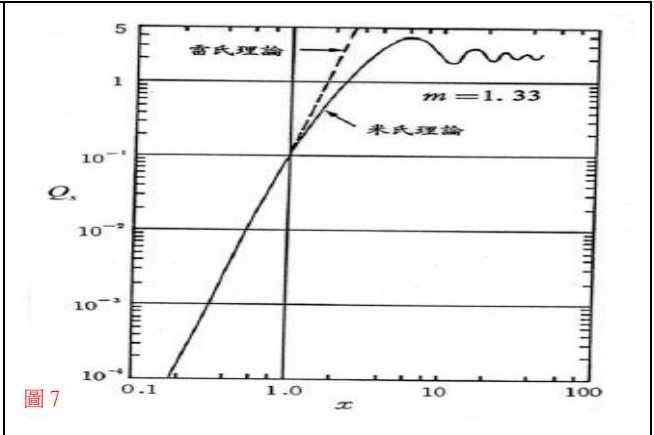


圖 7

$m$  = 折射率  $Q_e$  = 削弱因子  $Q_a$  = 吸收因子  $Q_s$  = 散射因子  $X$  = 粒徑/波長

(1) 散射光的電場可用下面的式子表示

$$E_l = S_2(\theta) \frac{e^{-ikr+ikz}}{ikr} E_{l0} \quad ; \quad E_r = S_1(\theta) \frac{e^{-ikr+ikz}}{ikr} E_{r0}$$

$E_l$  ,  $E_r$  分別為平行於和垂直於散射平面；  $S_1$  和  $S_2$  稱為振幅函數

(2)  $i(\theta)$  稱為光強度函數

$$i_1(\theta) = |S_1(\theta)|^2 \quad ; \quad i_2(\theta) = |S_2(\theta)|^2 \quad ; \quad i_3(\theta) = S_2 S_1^* \quad ; \quad i_4(\theta) = S_1 S_2^*$$

(3)  $P(\theta)$  是  $i(\theta)$  的相函數；相函數定義為各方向的實際散射能/各方向散射平均能






$$P_1(\theta) \propto i_1(\theta) \quad ; \quad P_2(\theta) \propto i_2(\theta) \quad ;$$

$$P_{33}(\theta) \propto (i_3(\theta) + i_4(\theta)) \quad ; \quad P_{34}(\theta) \propto (i_3(\theta) - i_4(\theta))$$

(4) 平行入射與垂直入射光強度交互作用之相函數  $P_{33} + P_{34} \propto$

$$S_1(\theta) S_2(\theta) e^{i(\alpha_2 - \alpha_1)}$$

#### 5. 銅化合物晶體顏色

銅化合物	顏色	銅化合物	顏色
Cu		Cu <sub>2</sub> O	
CuO		Cu(OH) <sub>2</sub>	
Cu(OH) <sub>2</sub> · CuCO <sub>3</sub>			



## 二、實驗步驟

### (一) 純銅片加熱

#### 1. 均勻加熱

- (1) 將純銅片(純度 99.9%)用銅油拋光後，用水洗淨後擦乾。
- (2) 純銅片放入烤爐中，設定加熱溫度為 400 度，加熱時間為 30 秒，供氧流量  
 $P = 1 \text{ torr}$   $V = 5L / \text{sec}$ 。
- (3) 依序將其他銅片加熱，加熱溫度為 500 度、600 度 ~ 1000 度。

2. 純銅片非均勻加熱：銅片拋光洗淨後置於隔熱墊上，以本生燈加熱銅片一端，至銅片 1/2 處有色彩變化出現，移開本生燈，將銅片靜置冷卻。


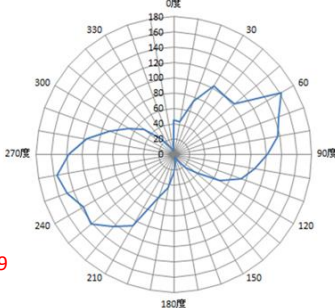
### (二) 不同照相角度拍照，量測散射光偏振態 (圖 3)

1. 紅光雷射透過平行擴束的方式，入射角設定為 55 度，投射至銅片上。
2. 將相機架設在法線上，設定此時的拍攝角度為 0 度。
3. 光源與銅片間放入圓偏振片，銅片與相機間放入線偏振片當作析光片，旋轉析光片由 0 度、10 度、……、360 度，拍照存檔處理及分析。
4. 設定拍攝角度為 10 度 ~ 60 度，重複步驟 1 ~ 3，將所得數據繪製成圖。
5. 將圓偏振片換成線偏振片，重複步驟 1 ~ 4。
6. 將紅光雷射(635nm)換成綠光雷射(532nm)及白熾燈，重複步驟 1 ~ 5。
7. 將入射角設定為 30 度，重複步驟 2 ~ 5。


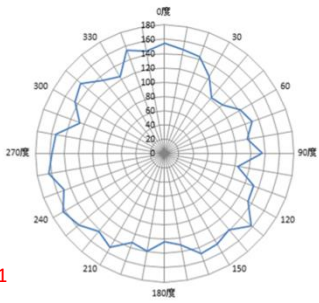
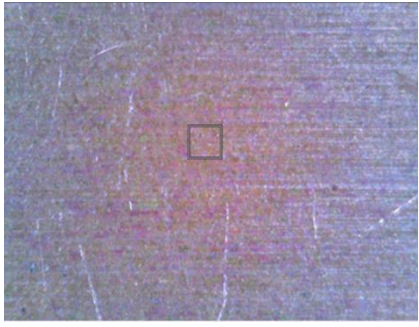
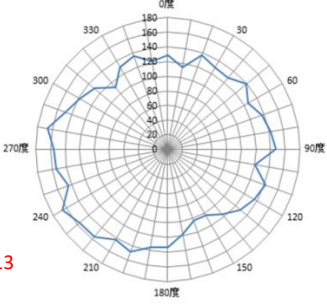
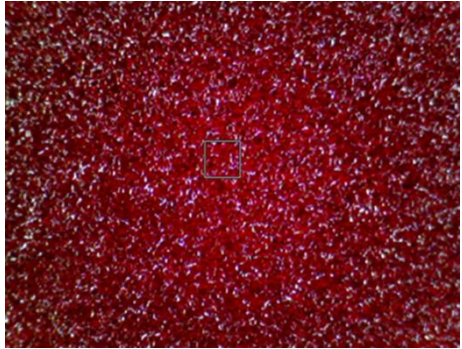
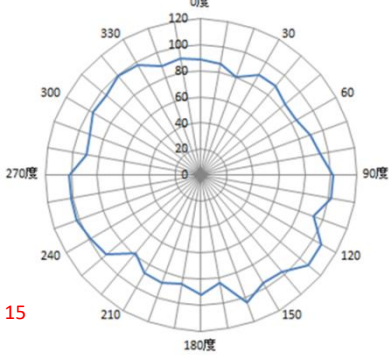
## 伍、研究結果

### 一、銅片控溫均勻加熱

#### (一) 均勻介質

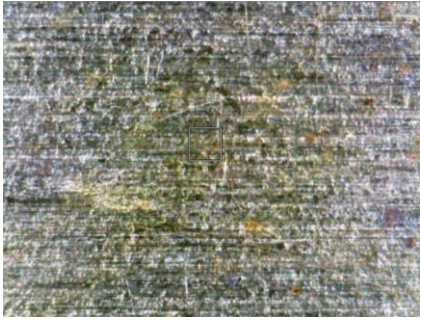
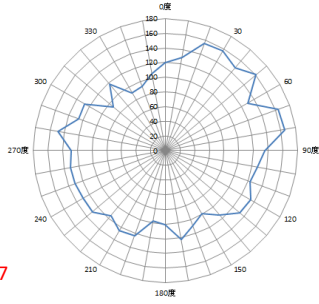
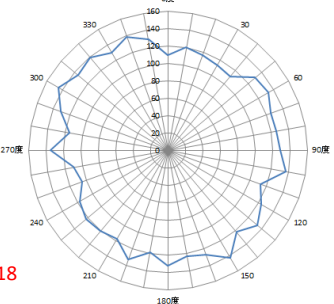
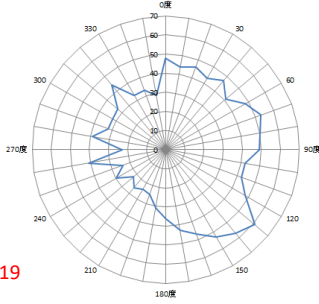
純銅片表面放大相片	照相 0 度，純銅片，偏振態
 <p data-bbox="178 2011 220 2040">圖 8</p>	 <p data-bbox="927 2000 968 2029">圖 9</p>



<p>1. 純銅片 (圖 8) 拋光後，仍可見表面有細紋及粒徑。遠觀銅片顏色為亮黃色，近觀顏色偏向暗紅色。</p> <p>2. 散射光偏振態 (圖 9) 為線偏振，偏光軸為 60 度。</p>	
銅片加熱溫度 400 度，加熱時間 30 秒	照相 0 度，400 度銅化合物晶體，偏振態
 <p>圖 10</p>	 <p>圖 11</p>
<p>1. (圖 10) 表面粗糙度明顯，因粒徑增生，細紋及間距大，遠觀銅化合物晶體偏銀白色，近觀有黃綠色均勻參雜在銀白色之間。</p> <p>2. 散射光為橢圓偏振 (圖 11)，但已接近圓偏振，在均勻介質區域，偏光軸偏向 40 度。</p>	
銅片加熱溫度 700 度，加熱時間 60 秒	照相 0 度，700 度銅化合物晶體，偏振態
 <p>圖 12</p>	 <p>圖 13</p>
<p>1. 表面粗糙度 (圖 12) 不明顯，細長細紋消失，增生的粒徑填滿細紋間距。遠觀銅氧化物晶體為粉紅色，近觀為黃綠、褐、粉銅色均勻相互參雜。</p> <p>2. 散射光偏振態 (圖 13) 為橢圓偏振光，偏光軸偏向 50 度。</p>	
銅片加熱溫度 1000 度，加熱時間 60 秒	照相 0 度，1000 度銅化合物晶體，偏振態
 <p>圖 14</p>	 <p>圖 15</p>

1. 表面呈現非常光滑，應該是銅因溫度高，動能大，原子晶格重組所呈現的狀況。遠觀為暗紅色，近觀為紫紅色。
2. 散射光偏振態 (圖 15) 偏向圓偏振。

(二) 非均勻介質

銅片加熱溫度 400 度，加熱時間 30 秒	400 度，前半部，偏振態
 <p>圖 16</p>	 <p>圖 17</p>
400 度，中半部，偏振態	400 度，後半部，偏振態
 <p>圖 18</p>	 <p>圖 19</p>


1. 放大表面結構 (圖 16) 有一區塊呈現黃綠色參雜，周遭為銀白細紋。
2. 偏振態 (圖 17 ~ 19) 在參雜處，呈現偏光軸偏轉變大及偏振態為不規則形狀。

二、銅片左端加熱，因溫度梯度變化產生漸層非均勻介質

(一) 結構表面影像與顏色變化

1. 銅片取值範圍

圖 20



第 1 格

第 1.5 格

第 2 格

第 2.5 格

第 3 格

第 3.5 格

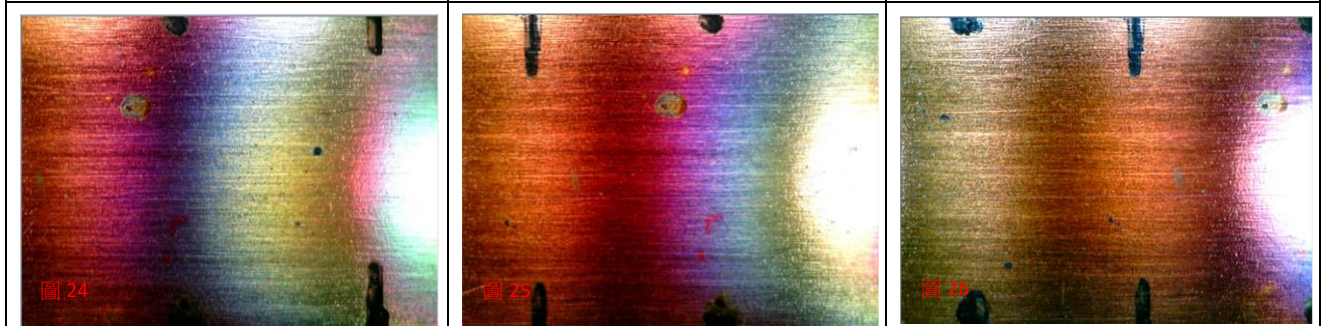
第 4 格

2. 影像 1 pixel =  $2 \times 10^5 A^0$

第 1 格	第 2 格	第 3 格
-------	-------	-------



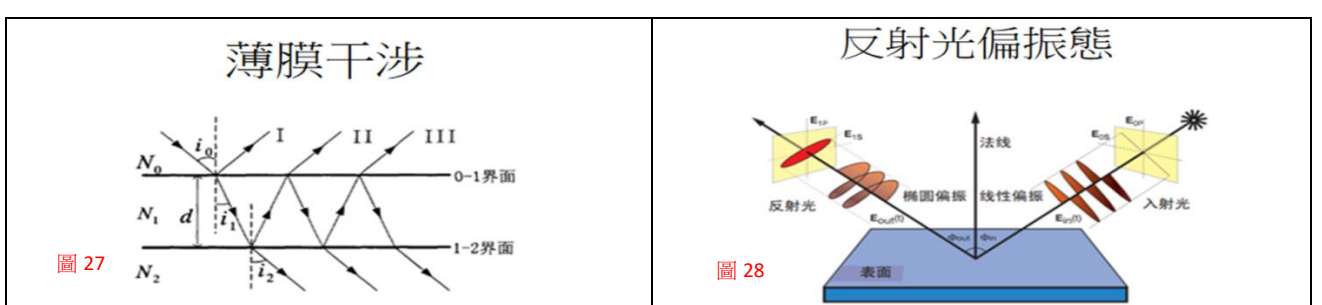
第 3.25 格                      第 3.5 格                      第 4 格



- (1) 溫度梯度變化實驗相片中，第 1 格 (圖 21) ~ 第 2 格 (圖 22) 銅化合物晶體為本生燈加熱區，受熱溫度變化小時間短暫，LED 燈照射下，當光強度有變化，顏色幾乎沒有變化。
- (2) 溫度梯度變化實驗相片中，第 3 格 (圖 23) ~ 第 3.5 格 (圖 25) 銅化合物晶體為移開本生燈後，餘溫所造成晶體，溫度梯度變化大，結晶時間長晶粒大，形成的晶體顏色為漸層規則變化。因為形成的晶體為雙折射晶體，當強光照射下形成色散的現象，造成更多的色彩變化。
- (4) 實驗相片中，第 4 格 (圖 26) 為純銅片區，所以當強光照射為亮橙色 ~ 棕色。

(二) 45 度線偏振光入射銅片

1. 薄膜干涉形成橢圓偏振光理論



- (1) 理論：第一道反射光和第二道反射光的相位差為  $2\gamma$ ，同理第  $n$  道反射光和第  $n+1$  道反射光的相位差都為  $2\gamma$ 。則反射係數為：



$$r_p = r_{01p} + t_{01p}t_{10p}r_{12p}e^{-i2\gamma} + t_{01p}t_{10p}r_{10p}r_{12p}^2e^{-i4\gamma} + t_{01p}t_{10p}r_{10p}^2r_{12p}^3e^{-i6\gamma} + \dots$$

( r : 反射係數 )

$$r_s = r_{01s} + t_{01s}t_{10s}r_{12s}e^{-i2\gamma} + t_{01s}t_{10s}r_{10s}r_{12s}^2e^{-i4\gamma} + t_{01s}t_{10s}r_{10s}^2r_{12s}^3e^{-i6\gamma} + \dots$$


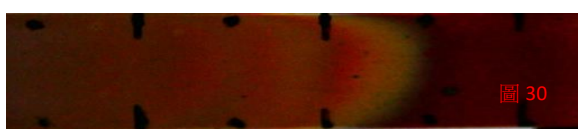
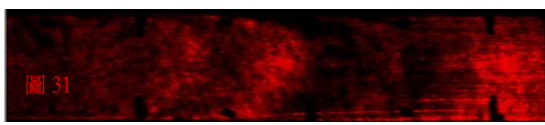
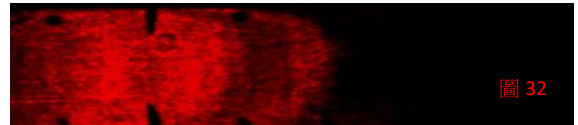
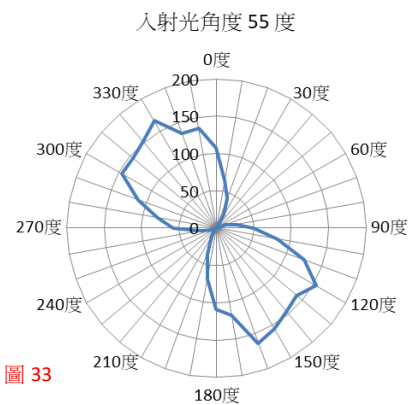
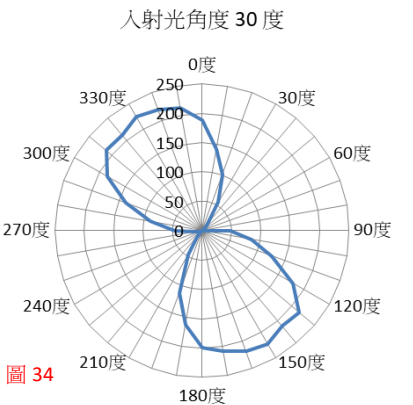
( t : 穿透係數 )

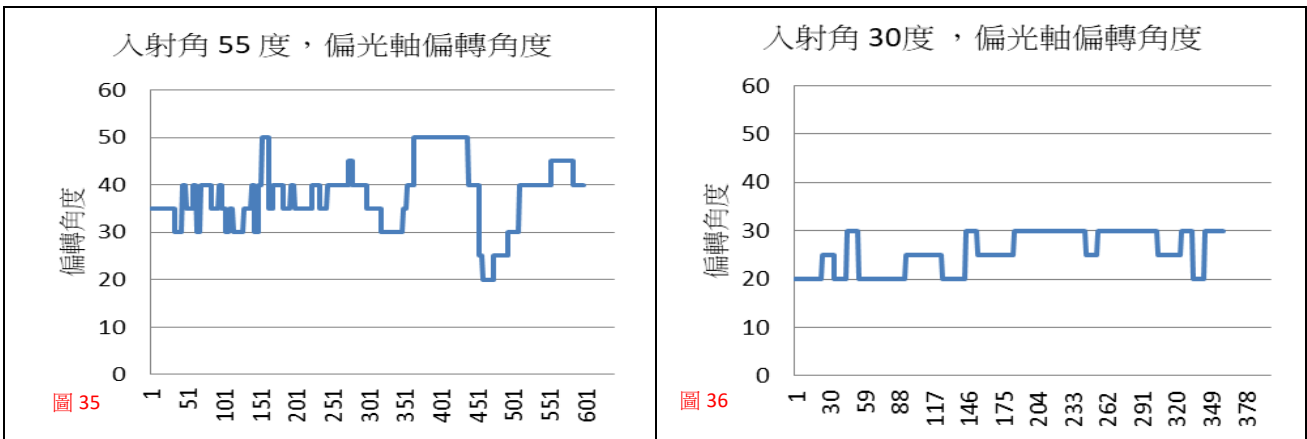
$$\tan \Psi e^{i\Delta} = \frac{r_p}{r_s} = \frac{r_{01p} + r_{12p}e^{-i2\gamma}}{1 + r_{01p}r_{12p}e^{-i2\gamma}} \frac{1 + r_{01s}r_{12s}e^{-i2\gamma}}{r_{01s} + r_{12s}e^{-i2\gamma}}$$

( 橢圓偏極參數之反射係數比 )

- (2) 45 度線偏振光入射薄膜，光在介質中有相位延遲，在多重反射下(圖 27)，出射光會出現橢圓偏振光(圖 28)，形成薄膜干涉。
- (3) 45 度線偏振光入射塊體或厚膜，則為單向反射，會形成反相位的線偏振光。
- (4) 直立銅片：雷射光水平入射，若銅片出現薄膜，應出現直條亮暗條紋，但實驗圖(圖 51)出現橫條紋。
- (5) 橫置銅片：雷射光水平入射，銅片上亮紋更長，並無出現不連續的亮暗條紋(圖 52)。

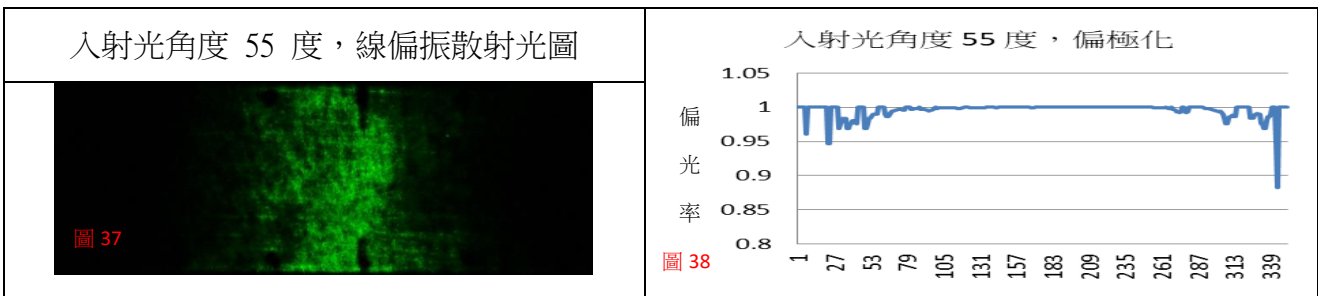
## 2. 紅光雷射，照相角度 0 度

入射光角度 55 度，原始相片	入射光角度 30 度，原始相片
 圖 29	 圖 30
入射光角度 55 度，線偏振散射光圖	入射光角度 30 度，線偏振散射光圖
 圖 31	 圖 32
<p>入射光角度 55 度</p>  <p>圖 33</p>	<p>入射光角度 30 度</p>  <p>圖 34</p>



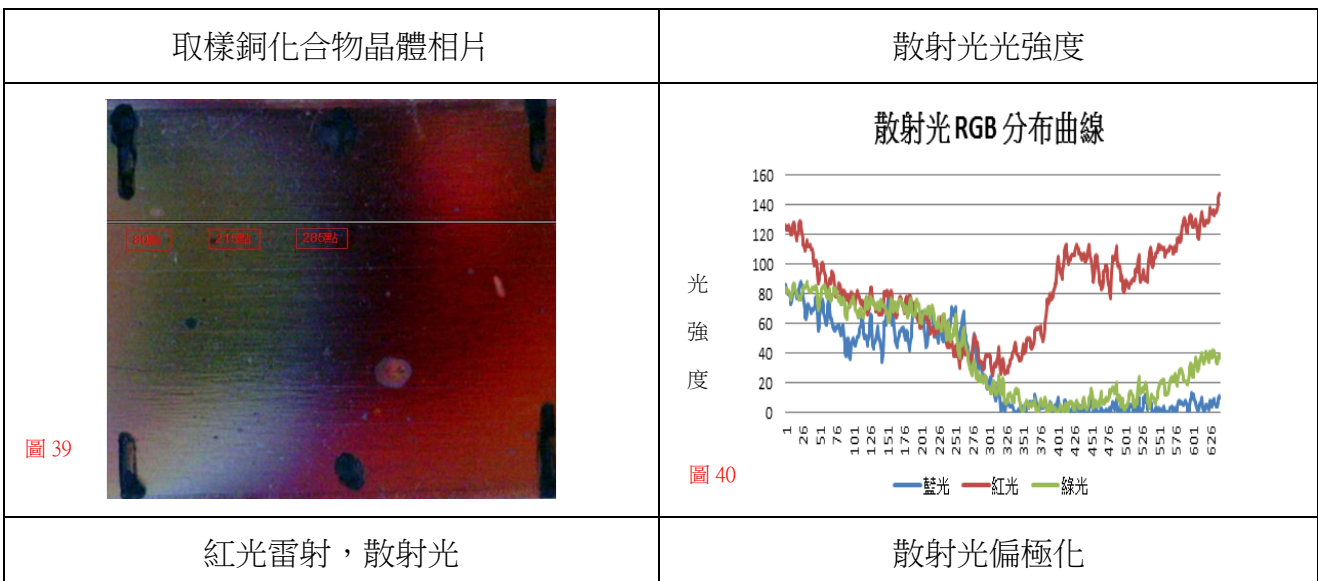
- (1) 45 線偏振光入射，散射光為線偏振光而非橢圓偏振光 (圖 33 ~ 34)；照相角度 55 度與 30 度所呈現的偏光軸偏轉角度趨勢並不相同 (圖 35 ~ 36)。
- (2) 銅片上的顏色變化 (圖 29 ~ 30) 為銅化合物晶體，雙折射晶體色散，非薄膜所產生的薄膜干涉。

### 3. 綠光雷射，照相角度 0 度



- (1) 45 線偏振光入射，散射光為線偏振光而非橢圓偏振光 (圖 37)。
- (2) 偏光軸均在 40 度，不會因為溫度梯度變化而有所變動。

### (三)圓偏振光強度變化與散射光偏極化



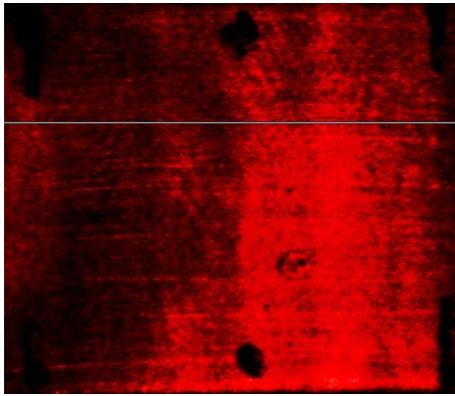


圖 41

紅光雷射，偏極化

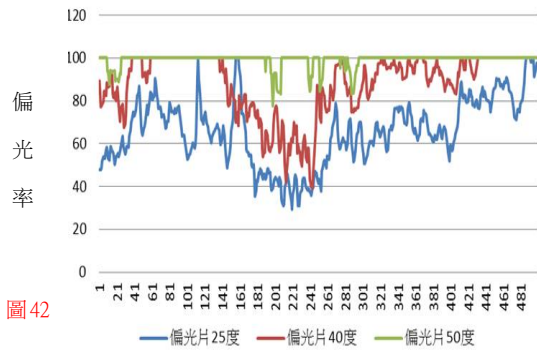


圖 42

綠光雷射，散射光

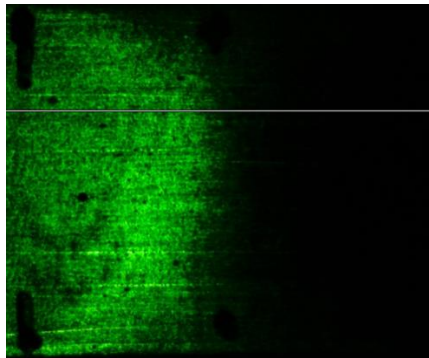


圖 43

散射光偏極化

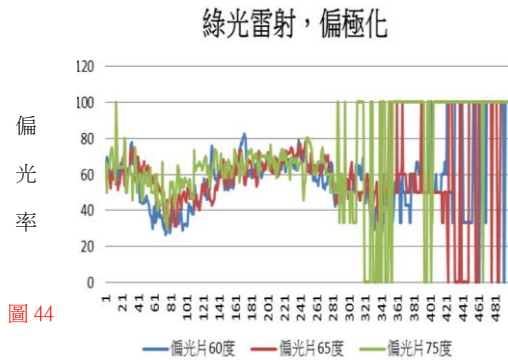


圖 44

紅光雷射，散射光偏振圖

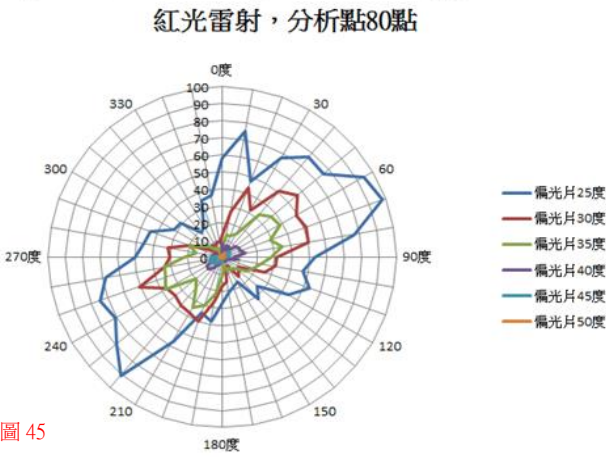


圖 45

綠光雷射，散射光偏振圖

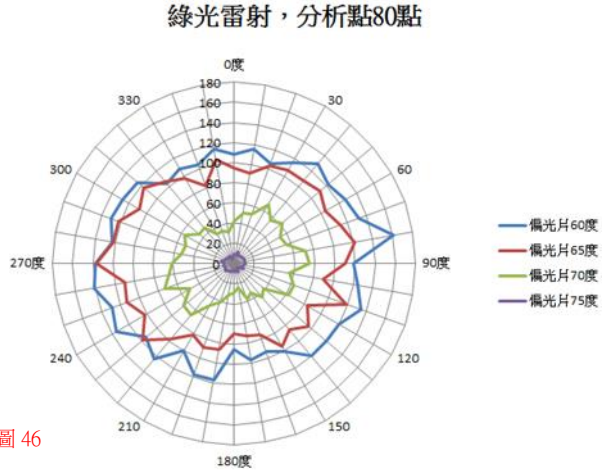


圖 46

紅光雷射，分析點215點

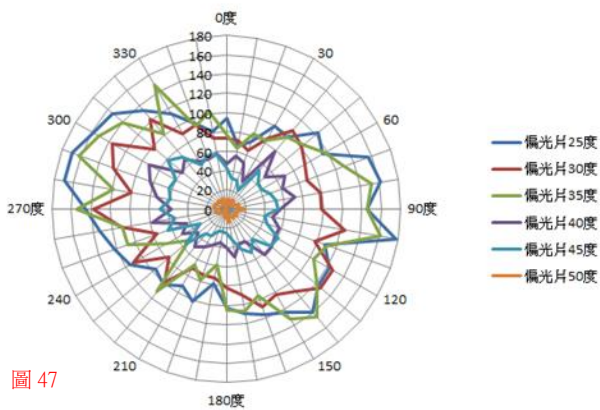


圖 47

綠光雷射，分析點215點

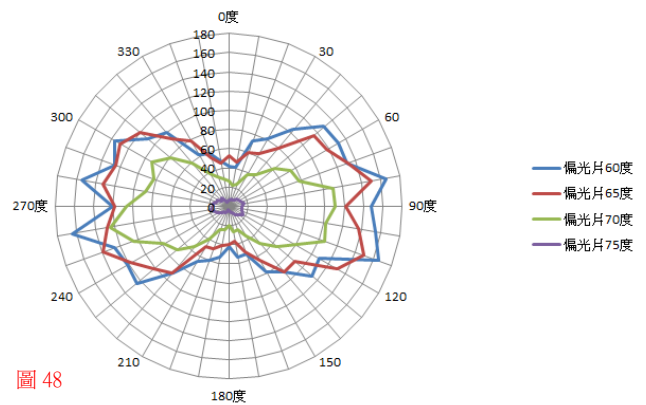


圖 48



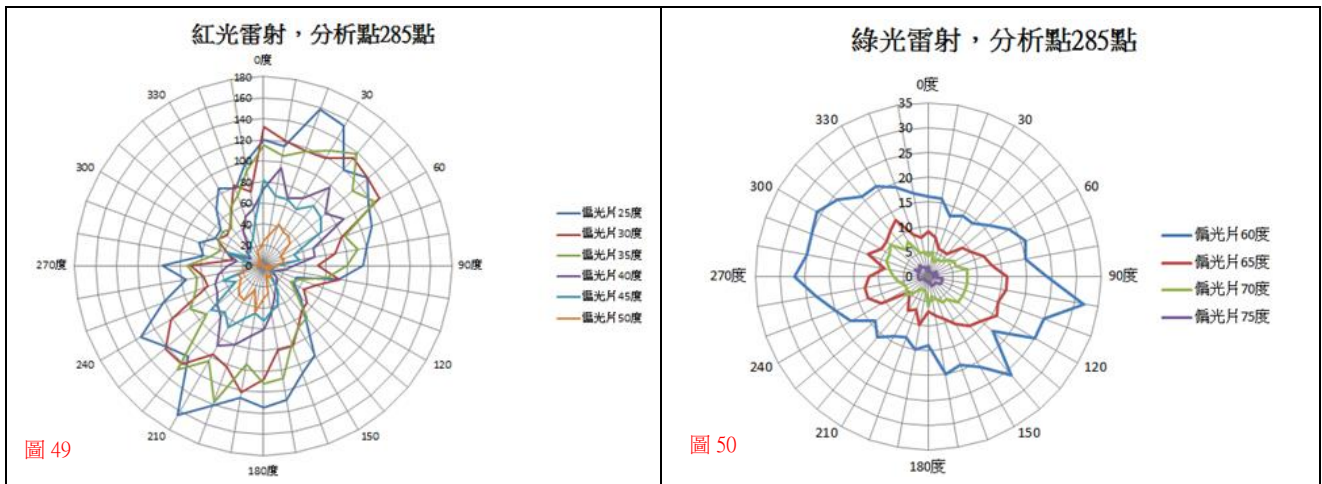


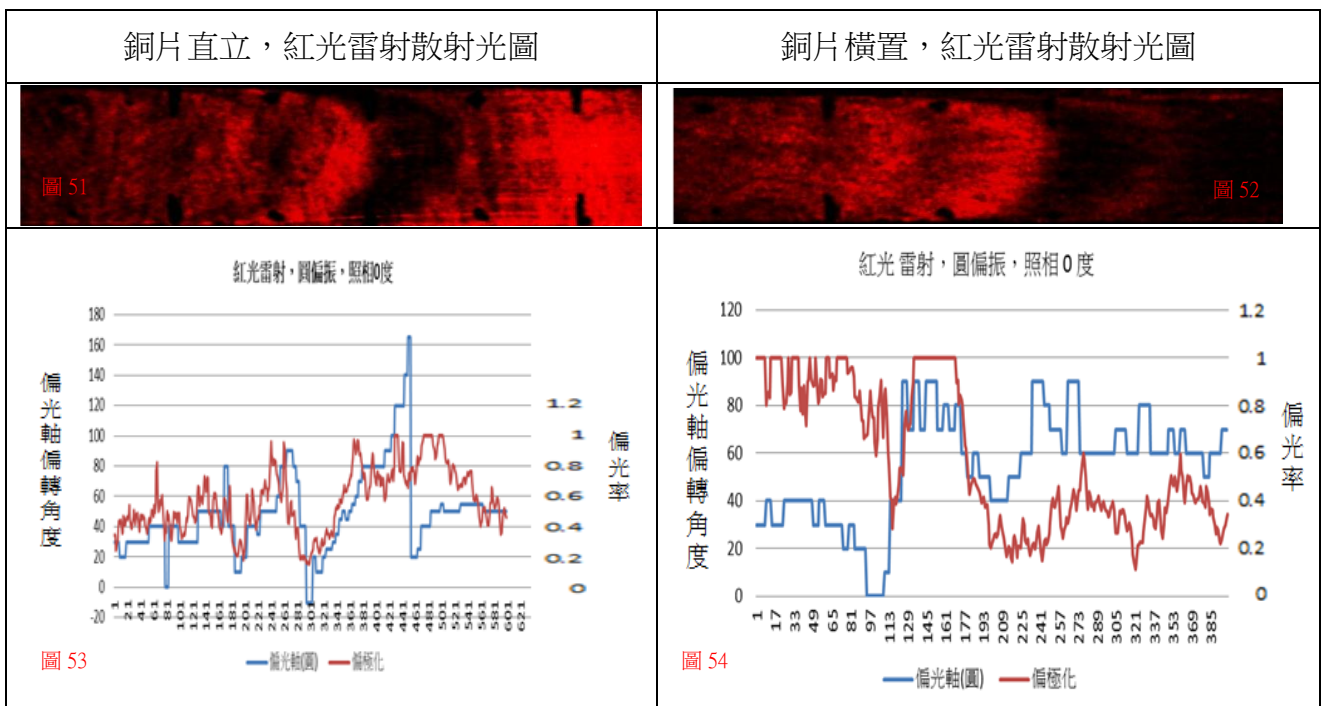
圖 49

圖 50

1. 銅化合物晶體 RGB 分布 (圖 39) 與紅光雷射 (圖 41)、綠光雷射 (圖 43) 分布有相關性。
2. 紅光雷射光強度漸弱，銅化合物晶體各點偏極化 (圖 42)有所變化，有些點會形成線偏振 (圖 81)。
3. 綠光雷射光強度漸弱，銅化合物晶體各點偏極化並無變動 (圖 44)，表示晶體散射光偏極化與特定波長有關。
4. 白光進入銅化合物晶體，當入射光強度發生變化，因紅光偏振態會改變，綠光沒影響，會形成色光比例不同而有色彩變化 (圖 23 ~ 25)。

(四)圓偏振光入射溫度梯度變化銅氧化物晶體

1. 紅光雷射入射不同細紋寬度散射光，照相 0 度

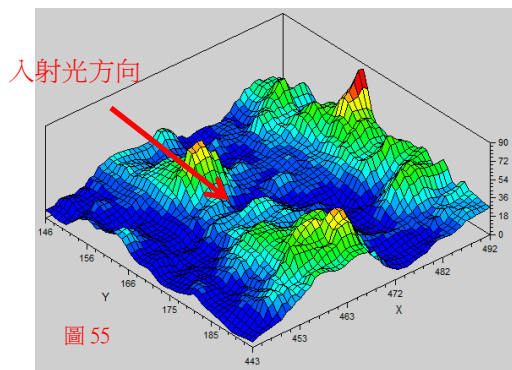


(1) 銅片直立 (圖 51) 及橫置 (圖 52)，圓偏振光入射細紋角度不同，所以造成兩者散射光分布

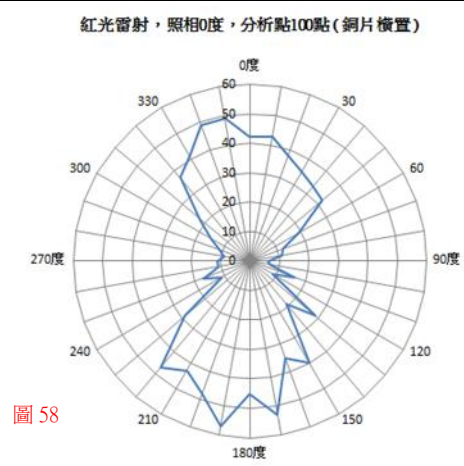
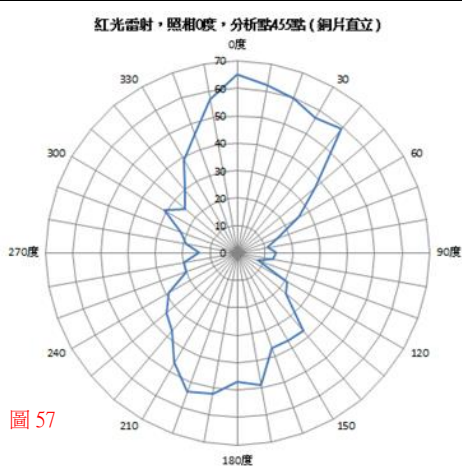
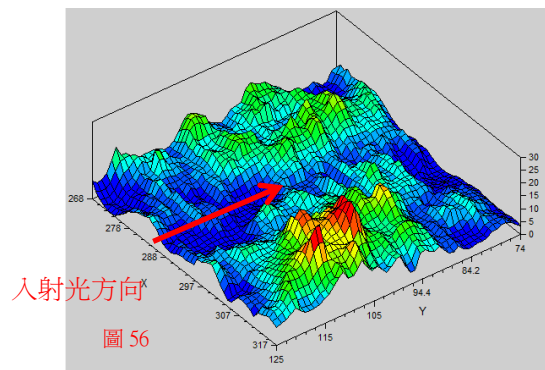
趨勢有差異。因而造成散射光偏極化趨勢變化不同。

- (2) 銅片直立時，入射光均勻入射銅片，在水平方向銅化合物晶體溫度梯度變化相同，散射光強弱與銅化合物晶體的吸收率有關，偏極化現象也與光強度有關。故銅化合物晶體所產生的偏光軸偏轉及偏極化有非常高的正相關性 (圖 53)。
- (3) 銅化合物晶體結構形成與溫度梯度變化有關，而偏光軸偏轉及偏極化也與銅化合物晶體參雜變化有關，所以控制溫度梯度變化即推知銅化合物晶體形成及參雜狀況。
- (4) 銅片橫置時，入射光為高斯分布，中央光強度較高且入射方向與銅化合物的溫度梯度平行，照相角度略有差異。所以偏光軸偏轉與偏極化曲線並不如銅片直立時有正相關性 (圖 54)。

紅光雷射，分析點 455 點 ( 銅片直立 )  
 散射光影像分析



紅光雷射，分析點 100 點 ( 銅片橫置 )  
 散射光影像分析



紅光雷射，分析點 420 點 ( 銅片直立 )  
 散射光影像分析

紅光雷射，分析點 135 點 ( 銅片橫置 )  
 散射光影像分析

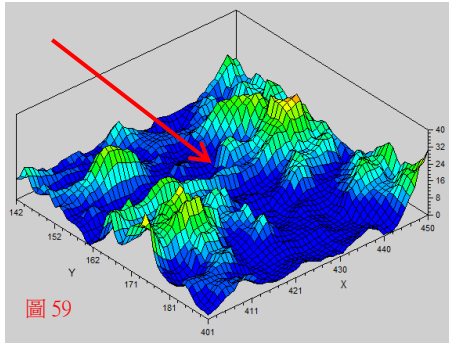


圖 59

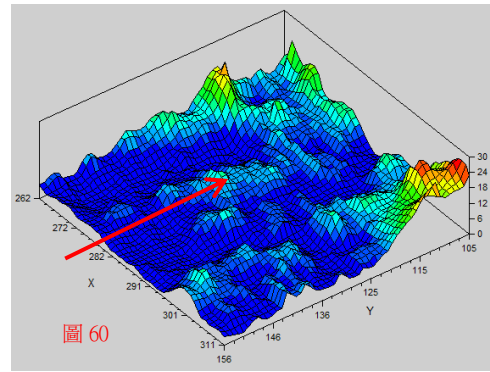


圖 60

紅光雷射，照相0度，分析點420

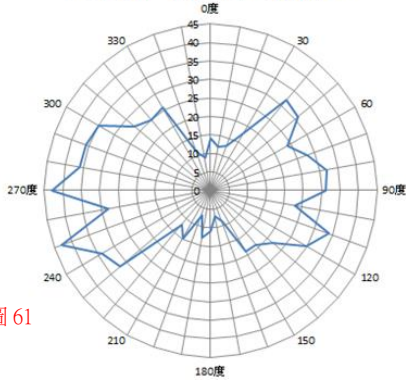


圖 61

紅光雷射，照相0度，分析點135點 (銅片橫置)

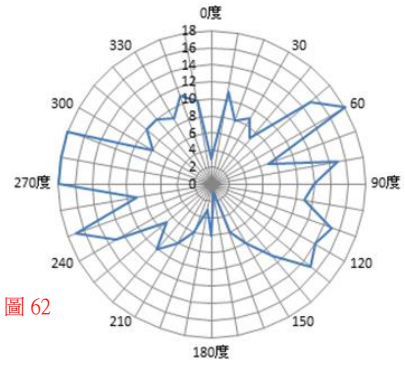


圖 62

紅光雷射，分析點 355 點 (銅片直立)  
 散射光影像分析

紅光雷射，分析點 180 點 (銅片橫置)  
 散射光影像分析

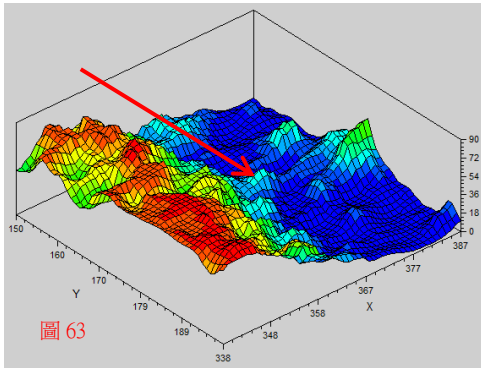


圖 63

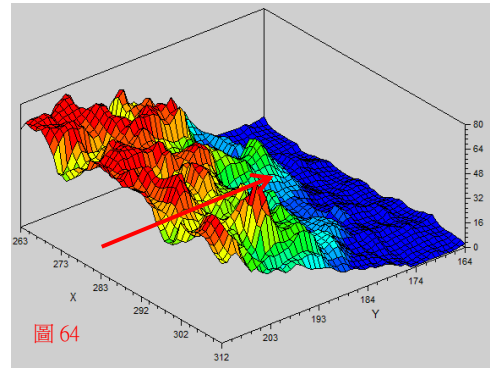


圖 64

紅光雷射，照相0度，分析點355點 (銅片直立)

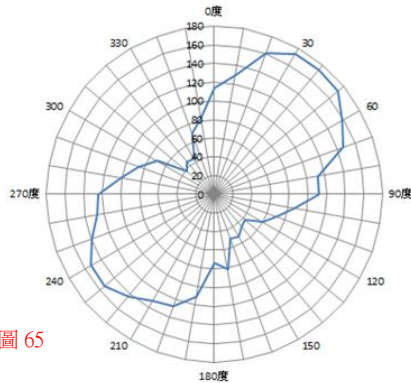


圖 65

紅光雷射，照相0度，分析點180點 (銅片橫置)

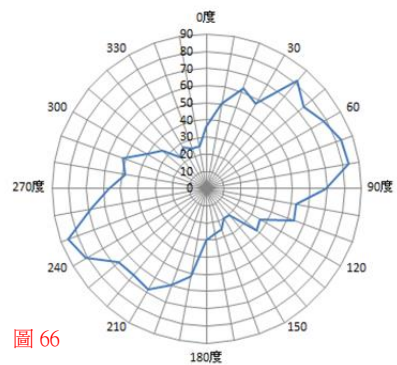


圖 66

紅光雷射，分析點 320 點 (銅片直立)  
 散射光影像分析

紅光雷射，分析點 210 點 (銅片橫置)  
 散射光影像分析



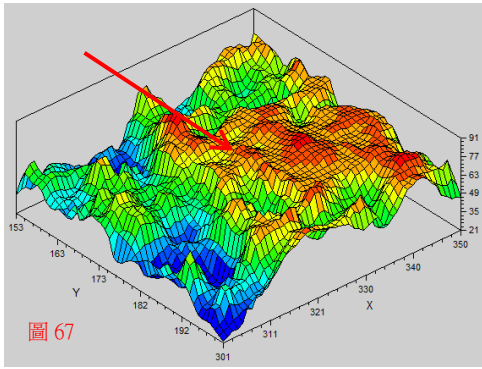


圖 67

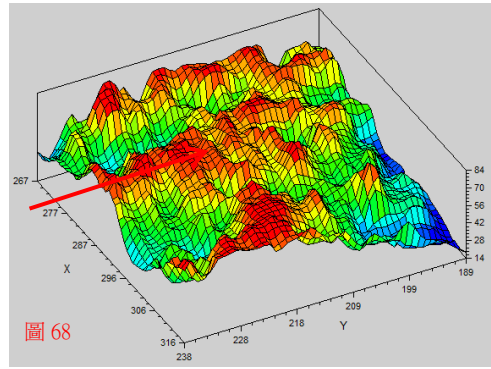


圖 68

紅光雷射，照相0度，分析點320點(銅片直立)

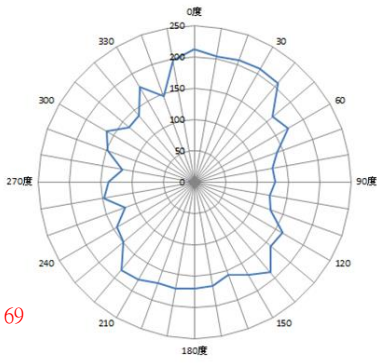


圖 69

紅光雷射，照相0度，分析點210點(銅片橫置)

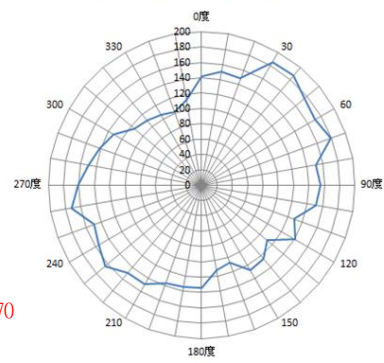


圖 70

紅光雷射，分析點 298 點 ( 銅片直立 )  
 散射光影像分析

紅光雷射，分析點 230 點 ( 銅片橫置 )  
 散射光影像分析

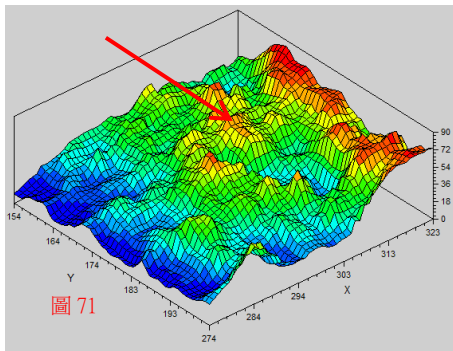


圖 71

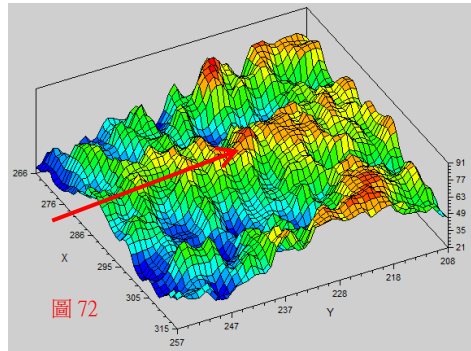


圖 72

紅光雷射，照相0度，分析點 298 點 ( 銅片直立 )

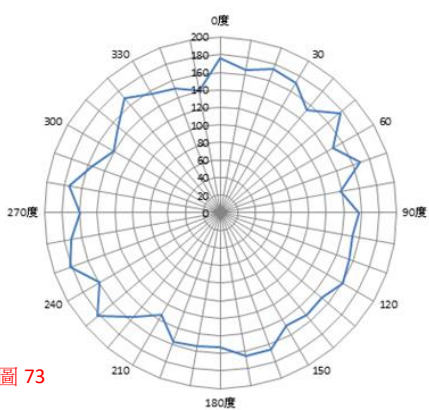


圖 73

紅光雷射，照相0度，分析點230點(銅片橫置)

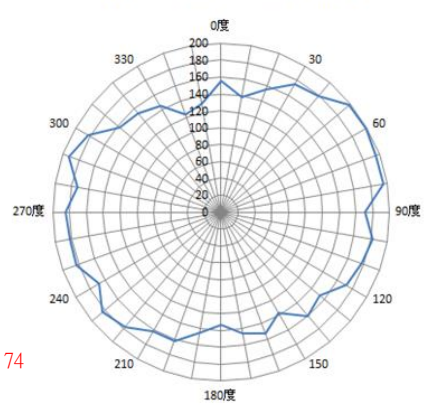


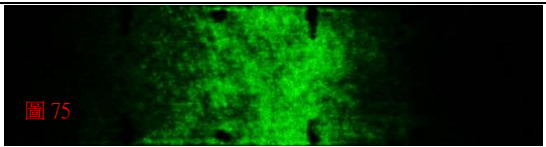
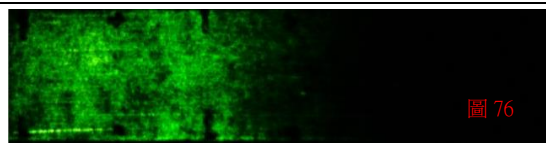
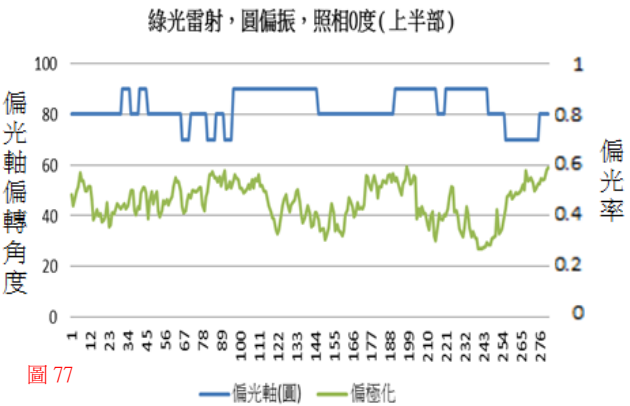
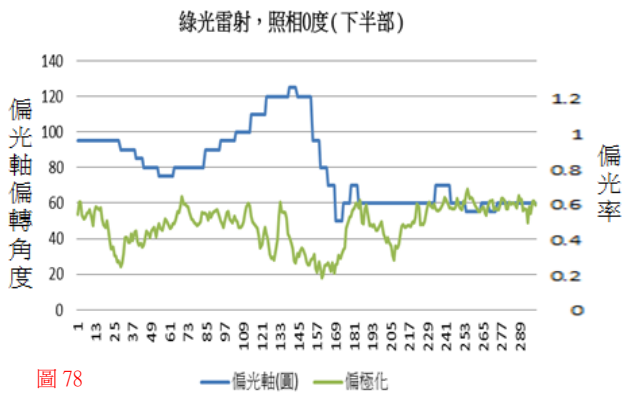
圖 74

(1) 當光入射晶體中，溫度梯度變化垂直方向吸收率高 (圖 55 ~ 56)，橢圓偏振光，偏光軸會

偏向 0 度 (圖 57 ~ 58)。

- (2) 當光入射晶體中，溫度梯度變化平行方向吸收率高 (圖 59 ~ 60)，橢圓偏振光，偏光軸會偏向 90 度 (圖 61 ~ 62)。
- (3) 當光入射晶體中，溫度梯度變化某方向吸收率高 (圖 63 ~ 64)，橢圓偏振光偏向線偏振且造成偏光軸的偏轉 (圖 65 ~ 66)。
- (4) 當光入射晶體中，溫度梯度變化某方向散射強度高但強度分布不均 (圖 67 ~ 68)，橢圓偏振光偏向圓偏振 (圖 69 ~ 70)。
- (5) 當散射光強度高且均勻 (圖 71 ~ 72)，則會出現圓偏振光 (圖 73 ~ 74)。

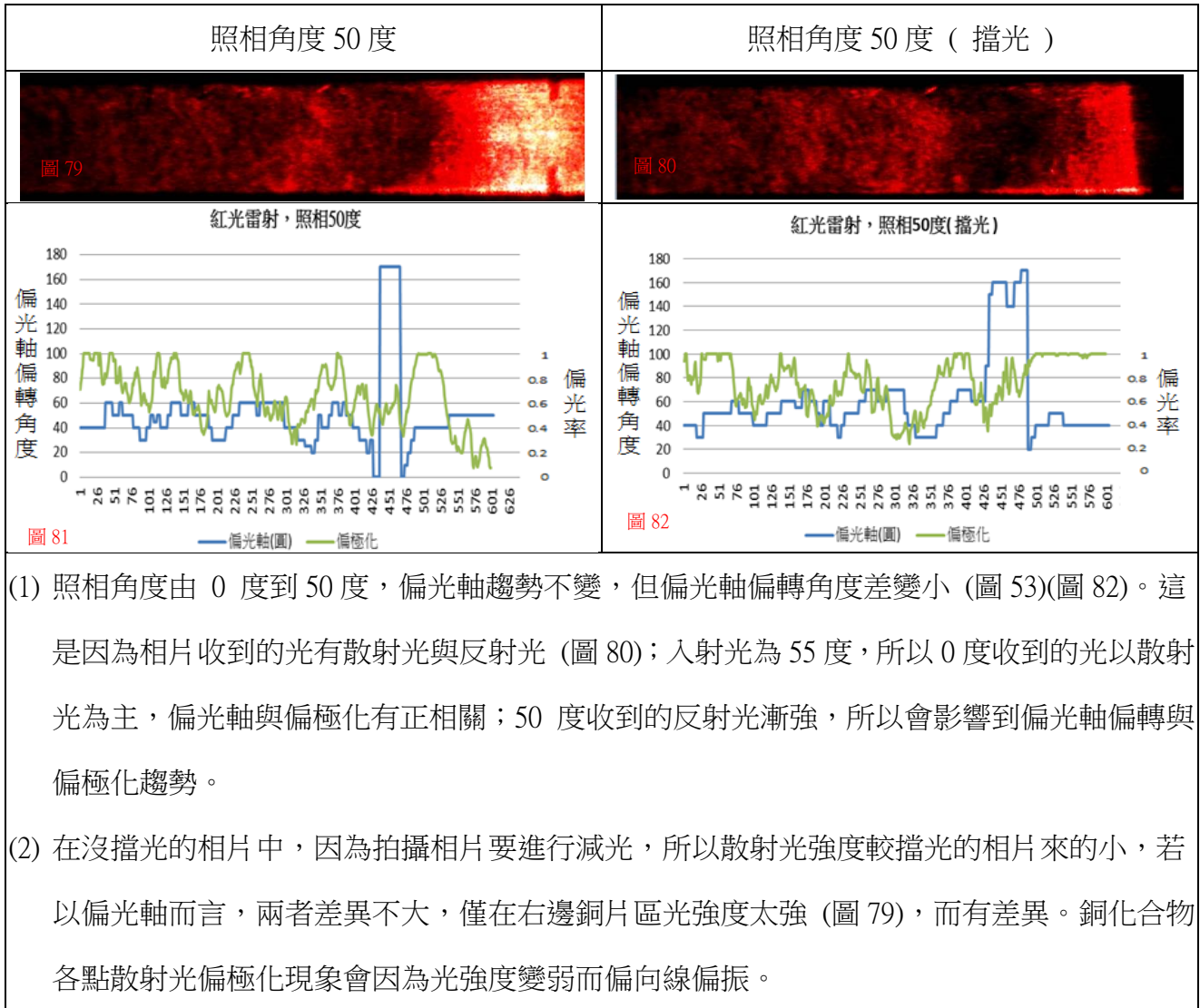
## 2. 綠光雷射入射銅化合物晶體，照相 0 度

銅片直立(上半部)，綠光雷射散射光圖	銅片直立(下半部)，綠光雷射散射光圖
 <p style="text-align: center;">圖 75</p>	 <p style="text-align: center;">圖 76</p>
<p style="text-align: center;">綠光雷射，圓偏振，照相0度(上半部)</p>  <p style="text-align: center;">圖 77</p>	<p style="text-align: center;">綠光雷射，照相0度(下半部)</p>  <p style="text-align: center;">圖 78</p>
<ol style="list-style-type: none"> <li>(1) 綠光雷射波長較短，所以在均勻的細紋寬度下，上半部 (圖 75) 的散射光強度集中；下半部 (圖 76) 因細紋寬度變化大，所以散射光分布較均勻。</li> <li>(2) 上半部因溫度梯度變化不大，銅化合物晶體散射光的偏光軸 (圖 77) 幾乎維持在 80 度 ~ 90 度之間；下半部偏光軸 (圖 78) 因晶體溫度梯度變化大，所以偏光軸有偏轉在 70 度 ~ 130 度。</li> <li>(3) 散射光所產生偏極化現象 (圖 77 ~ 78) 與偏光軸偏轉幾乎無相關性；與光強度相關性也不大。</li> </ol>	

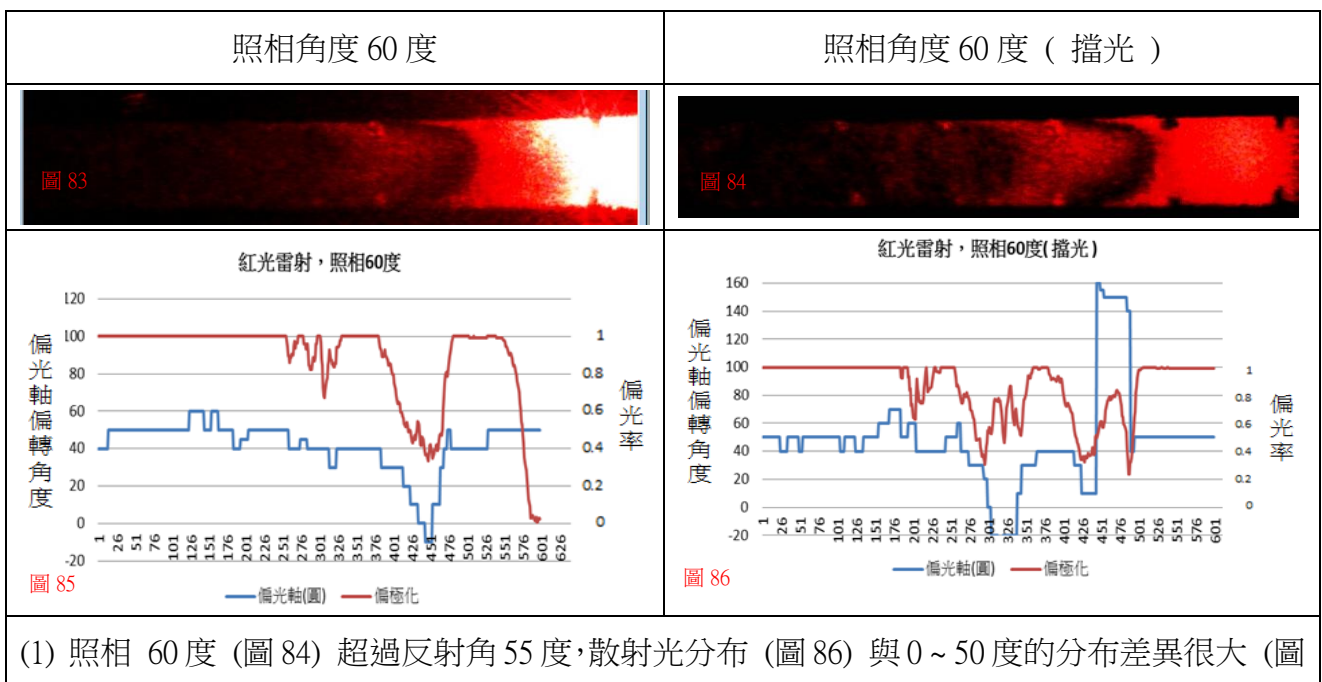
## 四、圓偏振光入射，不同取樣角度

### (一)紅光雷射

1. 照相角度 50 度



2. 照相角度 60 度



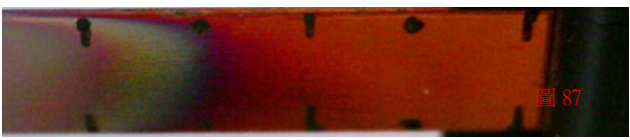



82)。偏光軸偏轉與偏極化同樣有很大的差異。這是因為銅化合物晶體為雙折射晶體所造成的差異。

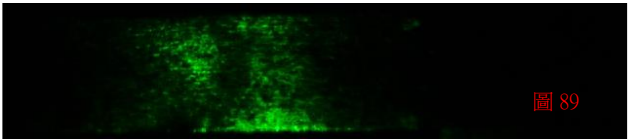
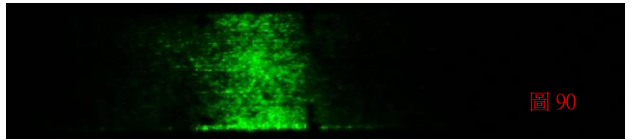
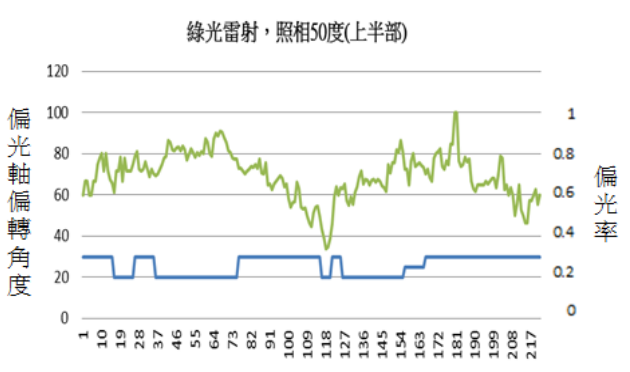
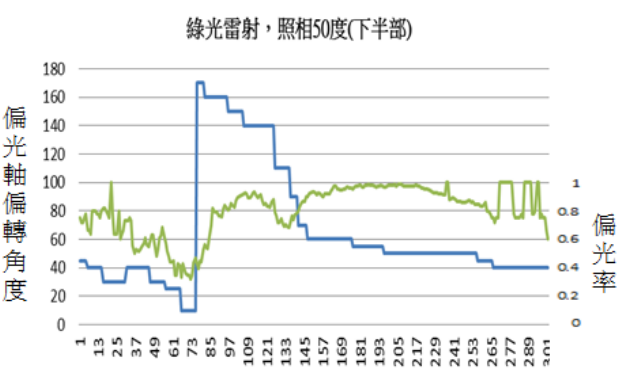
(2) 有擋光的相片還可見到偏光軸偏轉與偏極化，當反射光線沒擋住造成收光時反射光太強而呈現出反射光的偏振態 (圖 85 ~86)。所以收光的相片中若有其他光線的干擾，就會影響到散射光的偏振態。

## (二)綠光雷射

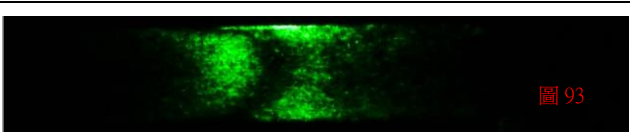
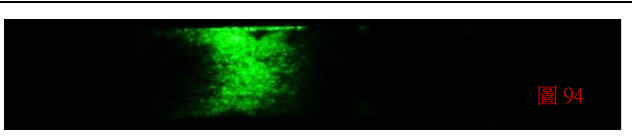
### 1.照相角度 50 度及 60 度相片

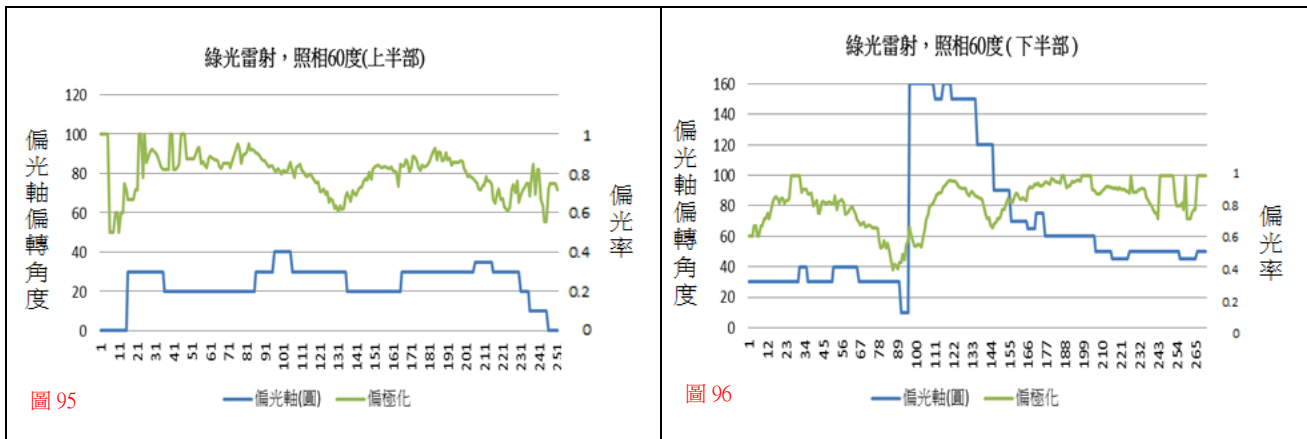
照相角度 50 度 ( 下半部 )	照相角度 60 度 ( 下半部 )
	

### 2.照相角度 50 度

析光片角度 0 度 ( 下半部 )	析光片角度 90 度 ( 下半部 )
	
<p>綠光雷射，照相50度(上半部)</p>  <p>圖 91</p>	<p>綠光雷射，照相50度(下半部)</p>  <p>圖 92</p>

### 3.照相角度 60 度

析光片角度 40 度 ( 下半部 )	析光片角度 130 度 ( 下半部 )
	



- (1) 上半部：照相角度 0 度時 (圖 75)，偏光軸角度為 80 ~ 90 度 (圖 77)，當照相角度變大，偏光軸偏轉角度下降偏轉至 20 ~ 40 度 (圖 91) 之間。
- (2) 下半部：照相角度 0 度 (圖 76)，偏光軸偏轉角度變化約 60 度 (圖 78)；照相角度變大，光強度分布及強度變化明顯 (圖 89 ~90)(圖 93~94)。銅化合物晶體與純銅片交界區，偏光軸會由 10 度快速偏轉至 160 度 (圖 92)(圖 96)，進入純銅片區後再緩慢的下降到 50 度。
- (3) 綠光雷射入射，銅化合物晶體在偏光軸的偏轉上與散射光照相的角度有極大的關係。表示照相角度越接近反射角，晶體所產生的雙折射效應越大。

五、程式模擬散射光偏振態

(一)入射光波函數

- 1. 平行入射面： $E_l \propto S_2(\theta)[\cos \alpha_2 - i \sin \alpha_2]$
- 2. 垂直入射面： $E_r \propto S_1(\theta)[\cos \alpha_1 - i \sin \alpha_1]$
- 3. 平行入射與垂直入射光強度交互作用之相函數

$$P_{33} + P_{34} \propto S_1(\theta)S_2(\theta)e^{i(\alpha_2 - \alpha_1)} \propto S_1(\theta)S_2(\theta)[(\cos \alpha_1 \cos \alpha_2 + \sin \alpha_1 \sin \alpha_2) + (\cos \alpha_2 \sin \alpha_1 - \sin \alpha_2 \cos \alpha_1)]$$

(二)散射光偏振態模擬

1. 模擬偏振圖

<p>入射光強度：兩偏光片夾角 25 度</p> <p>散射光強度最大值：164</p> <p>平行入射面：<math>E_l \propto 1.2[\cos 75^0 - i \sin 75^0]</math></p> <p>垂直入射面：<math>E_r \propto 1.2[\cos 45^0 - i \sin 45^0]</math></p>	<p>入射光強度：兩偏光片夾角 30 度</p> <p>散射光強度最大值：134</p> <p>平行入射面：<math>E_l \propto 1.2[\cos 75^0 - i \sin 75^0]</math></p> <p>垂直入射面：<math>E_r \propto 1.2[\cos 45^0 - i \sin 45^0]</math></p>
--	--

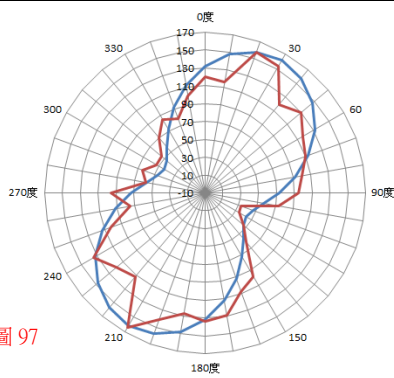


圖 97

入射光強度：兩偏光片夾角 35 度

散射光強度最大值：139

平行入射面： $E_l \propto 1.2[\cos 85^\circ - i \sin 85^\circ]$

垂直入射面： $E_r \propto 1.2[\cos 50^\circ - i \sin 50^\circ]$

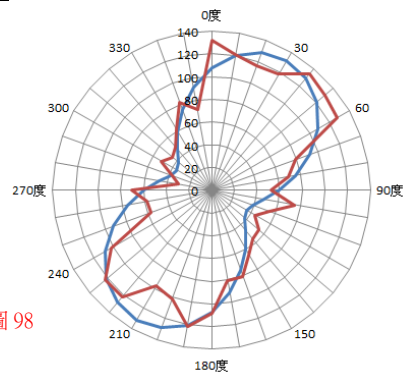


圖 98

入射光強度：兩偏光片夾角 40 度

散射光強度最大值：98

平行入射面： $E_l \propto 1.2[\cos 75^\circ - i \sin 75^\circ]$

垂直入射面： $E_r \propto 1.2[\cos 40^\circ - i \sin 40^\circ]$

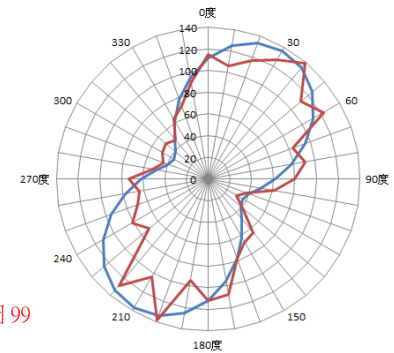


圖 99

入射光強度：兩偏光片夾角 45 度

散射光強度最大值：82

平行入射面： $E_l \propto 1[\cos 75^\circ - i \sin 75^\circ]$

垂直入射面： $E_r \propto 1.3[\cos 45^\circ - i \sin 45^\circ]$

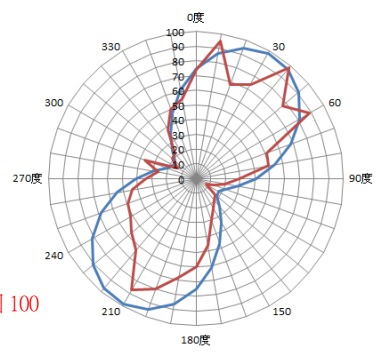


圖 100

入射光強度：兩偏光片夾角 50 度

散射光強度最大值：44

平行入射面： $E_l \propto 1.1[\cos 85^\circ - i \sin 85^\circ]$

垂直入射面： $E_r \propto 1.2[\cos 40^\circ - i \sin 40^\circ]$

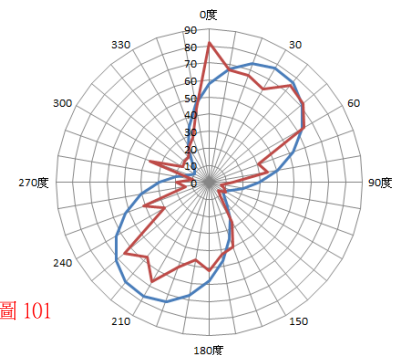


圖 101

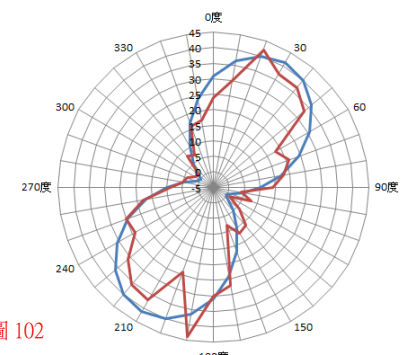


圖 102

(1) 入射光強度較強，散射光的偏振態沒改變，僅光強度有變弱 (圖 97~98)。

(2) 入射光變弱，由理論圖中可推知，散射光在水平及垂直入射面的光強度會有變化(圖 101 ~ 102)，在介電係數也有變化 (圖 99 ~100)，所以造成散射光偏振態的差異。

2. 散射偏振光強度  $I$  回推 入射光強度  $I_0 = I / (\cos \theta)^2$

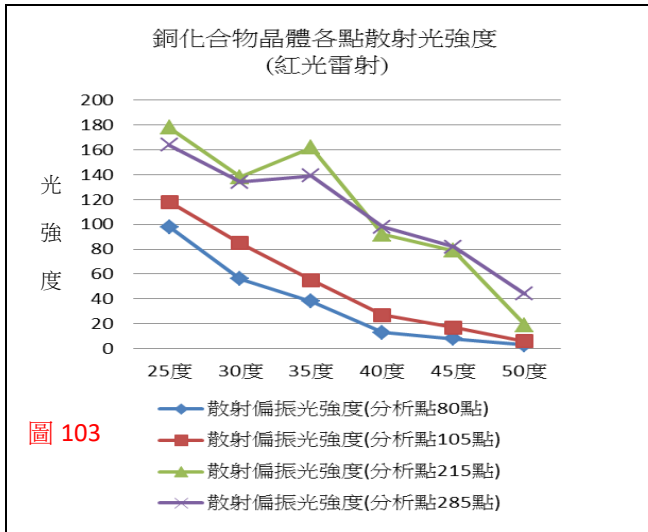


圖 103

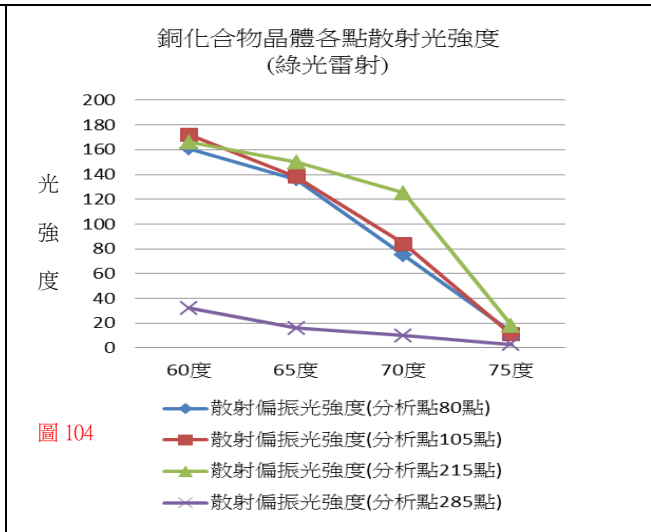


圖 104

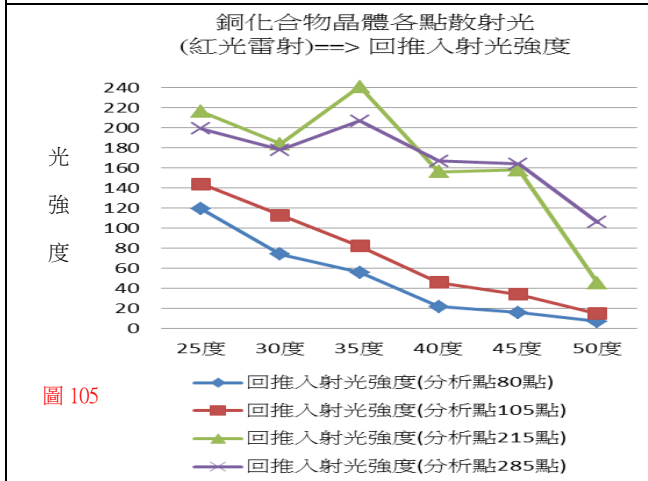


圖 105

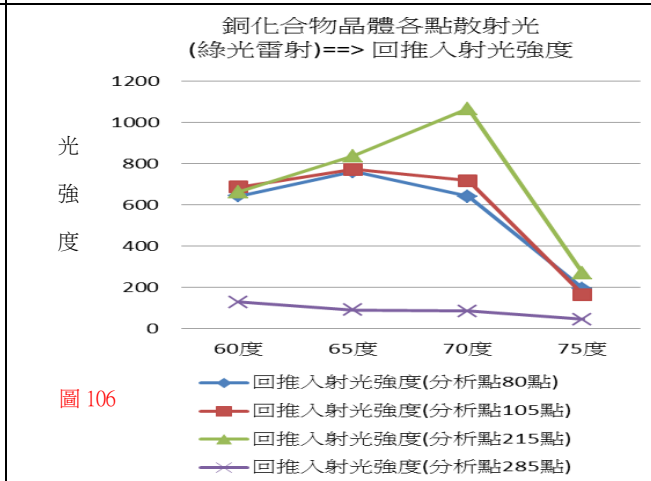


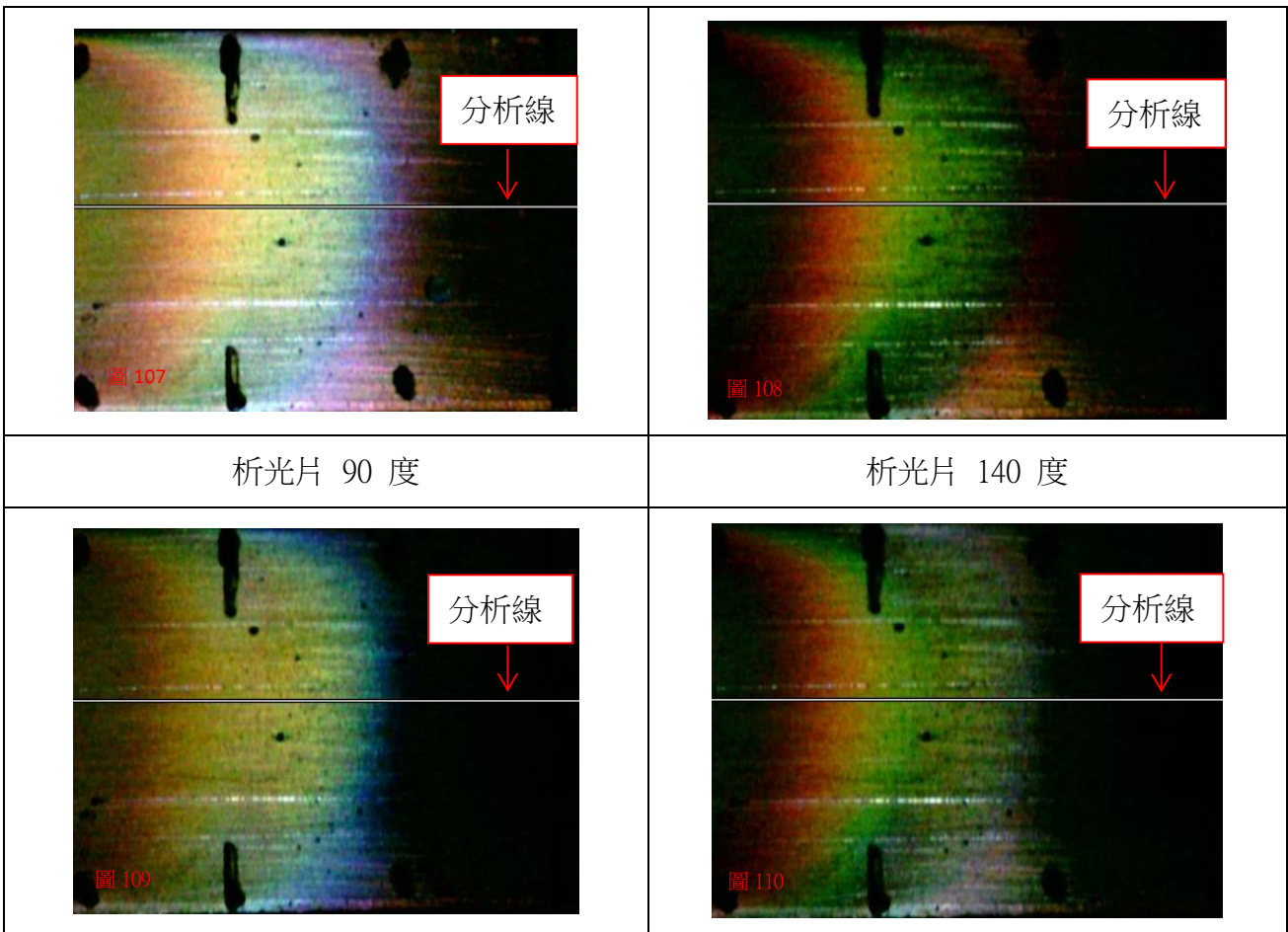
圖 106

- (1) 利用兩偏光片疊加，製作出減弱入射光強度構造，當兩偏光片交角變大，入射光必然變弱 (圖 103 ~ 104)，但各點銅化合物晶體散射光強度變化並不相同；以紅光與綠光雷射為光源，各點銅化合物晶體散射光強度變化也不一樣。
- (2) 散射光回推入射光光強度，可推論各點銅化合物晶體的吸收率；各點銅化合物晶體對於不同波長吸收率不同，但在不同光強度下，吸收率也有差異 (圖 105 ~ 106)。

六、白光擴束系統

1. 析光片角度變化 → 色彩變化

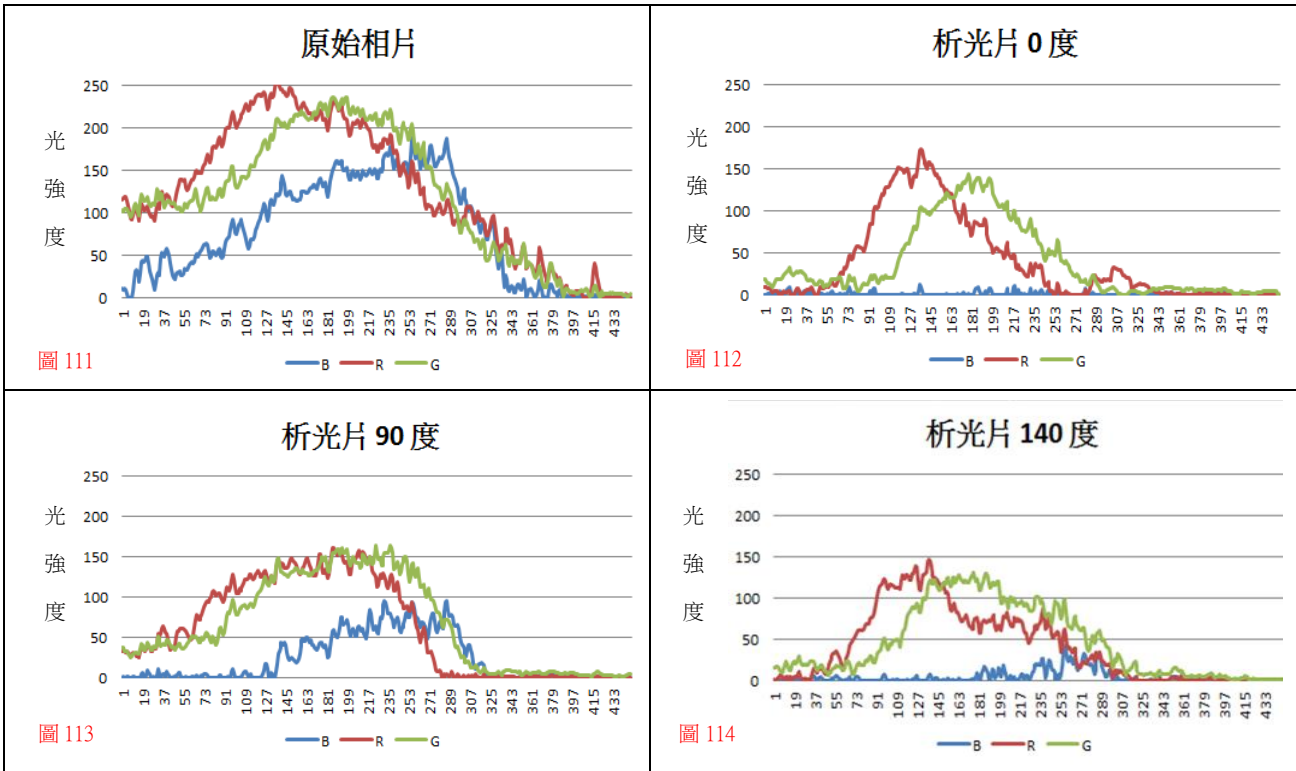
原始相片	析光片 0 度
------	---------



析光片 90 度

析光片 140 度

## 2. RGB 曲線分布

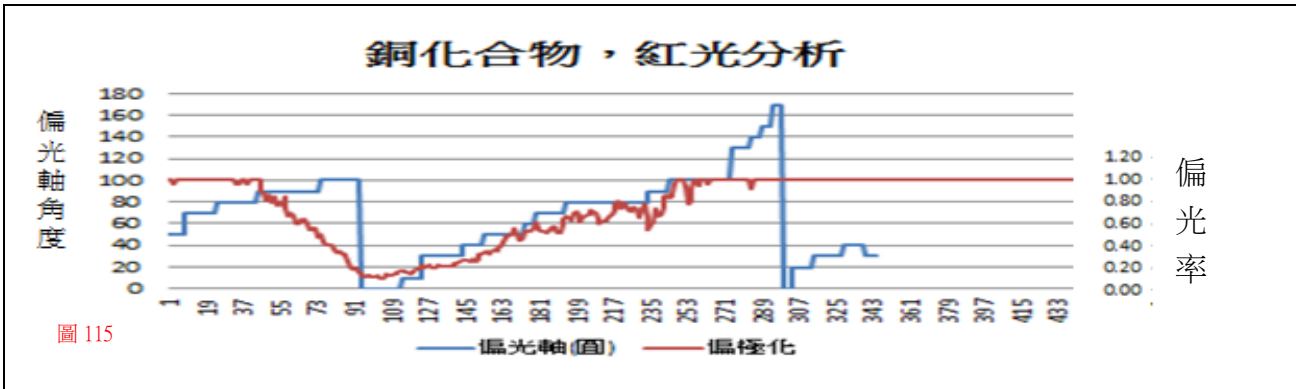


(1) 銅化合物各點顏色與 RGB 比例有關，旋轉析光片，因 RGB 偏光軸偏轉角度不同及偏極化變化，造成比例變化而有色彩變化。



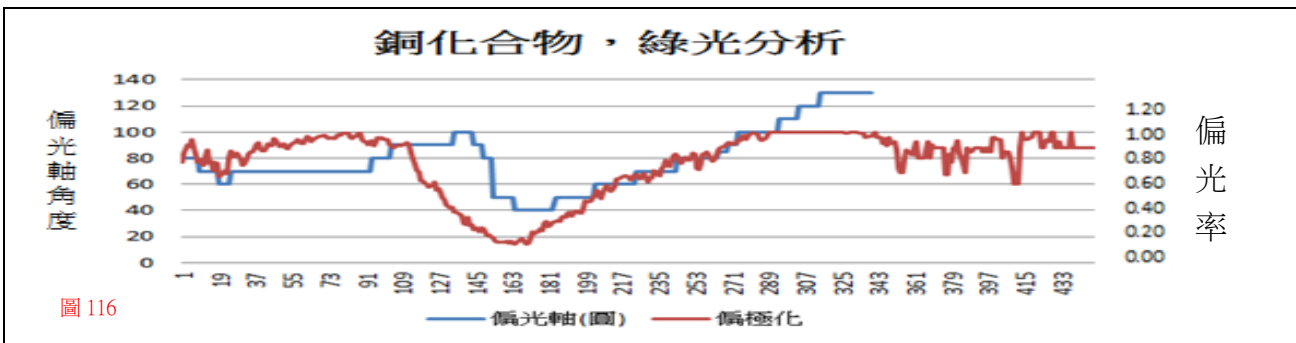
### 3. 紅光分析：偏光軸角度、偏極化曲線及各點偏振態

#### (1) 偏光軸角度及偏極化曲線



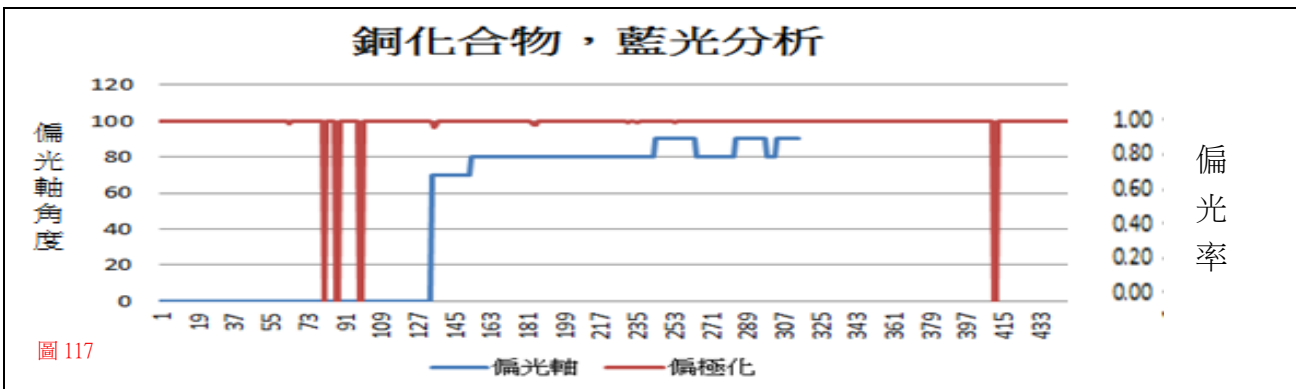
### 4. 綠光分析：偏光軸角度、偏極化曲線及各點偏振態

#### (1) 偏光軸角度及偏極化曲線



### 5. 藍光分析：偏光軸角度、偏極化曲線及各點偏振態

#### (1) 偏光軸角度及偏極化曲線



### 6. 各色光分析

- (1) 紅光分析：偏光軸角度偏轉變大且偏極化與偏光軸角度偏轉有正相關性。
- (2) 綠光分析：偏光軸偏轉角度變化小，與偏極化相關性降低。
- (3) 藍光分析：偏光軸偏轉角度幾乎無變化，且皆為線偏振光。

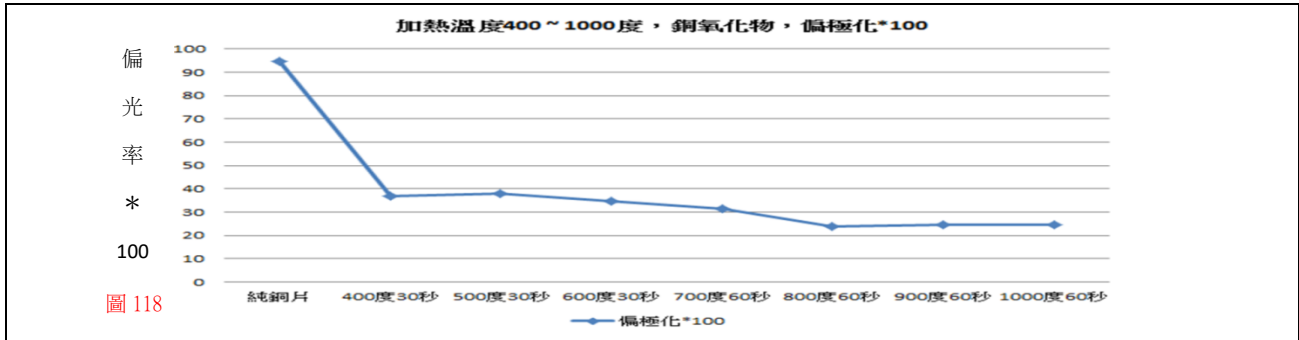


## 陸、討論

### 一、銅片控溫均勻加熱

#### (一) 均勻介質

##### 1. 偏極化曲線



2. 純銅為金屬單質，銅的顏色橙紅色是由於電子組態在  $3d^{10}4s^1$ ，電子在 3d 亞層和半填滿 4s 亞層之間的電子躍遷。銅片為金屬拉製而成，表面布滿細紋，圓偏振光入射金屬細紋類似進入金屬柵欄，因為純銅片傳導快，光進入表層淺即反射，所以散射光為線偏振光 (圖 9)。將純銅片放置於空氣中數日氧化而失去光澤變紅，發現散射光出現橢圓偏振光。
3. 圓偏振光進入銅化合物晶體中，晶體形成溫度較低受熱時間短，銅化合物為均勻參雜，晶體粒徑大，晶體形成永久電偶極，雙折射效應較明顯，所以散射光為橢圓偏振光(圖 11)(圖 13)。
4. 銅片受熱溫度高，加熱時間長，可使銅原子獲得更大的動能而重新排列，所以表面結構趨於平滑，銅化合物晶體更為均質，所以散射光偏向圓偏振 (圖 15)。
5. 銅片加熱過程，表面為粗糙結構，所以在表層與淺層及深層的銅原子，受熱供氧狀況並不相同，所以產生的銅化合物也有差異；參雜的銅化合物顏色有黃、綠、藍及粉紅，顏色多變 (圖 10)(圖 12)。

#### (二) 非均勻介質

1. 銅化合物晶體生成與局部受熱不均有關 (圖 16)，各種參雜狀況多變且細紋、粒徑不規則增生，所以散射光形成的偏振態多變，偏光軸方向無規則性 (圖 17 ~ 19)。

### 二、規則溫度梯度變化形成漸層非均勻介質

#### (一) 推論銅片受熱過程的溫度梯度

1. 從銅化合物晶體顏色變化與參雜狀況，比較細紋及粒徑，則可知第 1~2 格，受熱溫度約在 700 度 ~ 900 度之間，整體銅片細紋平滑，銅化合物晶體偏向粉銅色，底層為橙紅色 (圖 21 ~ 22)。
2. 第 3 ~ 3.5 格，此區為本生燈移開後，餘熱所形成的晶體，溫度梯度變化大結晶時間長，晶體粒徑大且顏色變化多；當強光入射，晶體會出現色散，當光以不同角度入射，因為為雙折射晶體，所以各色光會有干涉狀況，造成色彩變化更加明顯 (圖 23 ~ 25)。
3. 第 4 格，此區有本生燈的餘熱加熱，但尚未形成晶形為紅棕色 ~ 橙黃色 (圖 26)，與純銅片在細紋、粒徑上非常相似。

### 三、驗證色彩變化非薄膜干涉 (圖 27 ~ 28)

- (一) 45 度線偏振光入射銅化合物，若為薄膜干涉應出現橢圓偏振光，但以紅光雷射及綠光雷射測試均出現線偏振光，在溫度梯度變化不大的區域，入射角為 55 度，偏光軸的偏轉與入射光相同，皆為 40 ~ 50 度線偏振。入射角為 30 度，偏光軸角度為 20 ~ 30 度。(圖 35 ~ 36)
- (二) 在溫度梯度變化大的區域，紅光雷射入射，45 度線偏振光與圓偏振光在偏光軸的偏轉趨勢有相關性，但圓偏振光照射下偏光軸角度大很多；代表因溫度梯度變化而產生的晶體對於偏光軸的偏轉有絕對的關係。
- (三) 無論是銅片直立或橫置，在同一光源下，銅片相同位置上亮暗趨勢，大致相同。細部觀察銅片亮區，皆出現斑點顆粒狀的亮點。以上推論，銅片上出現亮暗區域，應為晶體所構成而非薄膜。

### 四、圓偏振光強度變化與銅化合物晶體偏極化

#### (一) 紅光雷射

1. 在同一均勻光強度入射，當散射光強度高，偏極化數值相對低；但光強度最強之處並非偏極化數值最低之處 (圖 42)，代表散射光偏極化與銅化合物晶體性質有關。
2. 入射光強度變化：光強時，銅化合物晶體偏極化數值有差異但均出現橢圓偏振光；光變弱時，某區的銅化合物晶體散射光會急速的變成線偏振光 (圖 45、47、49)。
3. 銅化合物晶體散射光因光強度變化而變成線偏振光的區域，為色彩變化最多之處。

偏極化數值最低的區域出現銀白色散射光 (圖 23 ~ 24)。

## (二) 綠光雷射

1. 同一均勻光強度入射，銅化合物晶體在某區偏極化數值會降低，此處為紅光雷射光熱時出現線偏振的區域，所以在銅片上容易出現綠光 (圖 23 ~ 24)。
2. 入射光強度出現變化，銅化合物晶體散射光的偏極化並無變化 (圖 44)。

(三) 紅光的強弱與銅化合物晶體散射光偏振態有關，綠光強弱與晶體散射光偏極化無關。

(四) 各點銅化合物晶體對於不同波長的吸收率各不相同，而且入射光的強弱也會造成吸收率的差異(圖 105 ~ 106)；所以當白光入射時，光的強弱各點銅化合物晶體吸收率的差異，造成光強弱之間會出現色彩的變化 (圖 24 ~ 26)。

## 五、細紋間距變化與圓偏振入射散射光偏振態

### (一) 銅化合物晶體溫度梯度變化與入射面垂直

1. 細紋與入射面呈垂直，散射光強度相對均勻，所以散射光的強弱與銅化合物的吸收率有關 (圖 51)。
2. 銅化合物晶體在水平方向為均質介電係數，垂直方向為溫度梯度變化所形成的漸層介電係數；銅化合物晶體產生的偏光軸變化與溫度梯度變化有關，晶體溫度梯度變化不大，偏光軸維持在 40 ~ 50 度；銅片遠離本生燈加熱區，溫度梯度有變化，偏光軸偏轉出現變化由 10 ~ 90 度；移開本生燈後，溫度梯度變化加劇，偏光軸偏轉由 0 ~ 170 度 (圖 53)。
3. 銅化合物晶體所產生的偏極化現象與晶體雙折射現象有關，銅化合物晶體因溫度梯度變化而產生的雙折射晶體也會有不同；在均勻光強度下，沒有光強度變化等變因，所以晶體所產生的散射光極化與偏光軸偏轉有正相關性 (圖 53)。

### (二) 銅化合物晶體溫度梯度變化與入射面平行

1. 細紋走向與入射面平行，散射光相對弱，光強度分布強弱變化大 (圖 52)。
2. 偏轉變小、偏極化現象與銅片直立時有差異 (圖 53 ~ 54)。

(三) 當測試點周遭細紋及粒徑分布相對平滑，則銅片直立與橫置，在偏光軸角度與偏極化差異不大；測試點周遭細紋與粒徑差異大時，因散射光出射的角度不同，所測得

的偏振光有差異，所以偏振態會有變化。

## 六、圓偏振光入射，變化取值角度

### (一) 紅光雷射

1. 取值角度逐漸變大，角度由 0 ~ 50 度過程中發現，偏光軸偏轉趨勢變的平緩 (圖紙 53)(圖 81 ~ 82)，在銅片橫置的實驗中也有相類似的結果，這是因為 CCD 收到的光，有散射光與反射光；散射光是經由銅化合物晶體雙折射效應所產生，反射光為單純的晶面反射；所以當反射光變強，CCD 為了符合灰階 0 ~ 255 收光範圍，要進行減光，以致收到的散射光強度變弱，所以偏光軸偏轉變的平緩，且偏極化偏向線偏振。在純銅片區會出現線偏振光，這為單純晶面反射所造成的現象。
2. 當 CCD 取值角度為 60 度時發現 (圖 85 ~ 86)，散射光強度變化、偏光軸偏轉與偏極化與 0 ~ 50 度 (圖 81 ~ 82) 有很大的差異；物質的布魯斯特角約為 50 ~ 60 度，因為入射角為 55 度，反射角也為 55 度，CCD 取值角度在 55 度兩側，所以進入晶體的角度不同，所以 o-ray 與 e-ray 所形成的散射出射光偏振態差異頗大，這可證明所形成的銅化合物晶體為雙折射晶體。

### (二) 綠光雷射

1. 銅片上半部：CCD 取值角度由 0 度變大到 60 度，銅化合物晶體所產生的偏光軸角度會由 80 度 (圖 77) 下降到 30 ~ 40 度 (圖 91)，但偏光軸偏轉隨溫度梯度變化並不明顯。
2. 銅片下半部：CCD 取值角度變大，銅化合物晶體散射光偏光軸偏轉角度變化也變大，散射光強度分布與強度變化明顯。晶體與純銅片交界區，偏光軸在會快速變化偏轉 (圖 92)(圖 96)。
3. 銅化合物晶體散射光在偏光軸偏轉與照相角度有極大關係；表示照相角度越接近晶體的布魯斯特角前後，晶體所產生的雙折射效應越明顯。

## 七、理論模擬散射光偏振態變化

- (一) 輸入入射光在水平及垂直入射面的電場係數，比較散射光偏振態；可推知銅化合物晶體散射光的偏振狀態的差異 (圖 97 ~ 102)。

## 柒、結論

銅化合物在高溫時銅原子會重整，表面趨於平滑，溫度略低時，晶面粒徑變化及銅化合物的參雜與溫度梯度變化有相關性。白光入射銅化合物，因雙折射晶體、散射光的效應及物質吸收率等差異，RGB 的偏振態不同造成 RGB 比例上的差異，所以會有色彩的變化。以紅光及綠光雷射不同波長及光強度變化，驗證銅化合物晶體所產生偏光軸偏轉、偏極化及吸收率，為銅化合物晶體色彩變化的主因而非出現薄膜干涉。變換取值角度，在布魯斯特角前後更可得到不同偏振態散射光。以程式理論模擬散射光偏振態，可得知光在各點銅化合物交互作用關聯性。

## 捌、參考資料

- 一、 任蕎東 (2017) 。 科學 Online 國立臺灣大學物理所 取自  
<https://highscope.ch.ntu.edu.tw/wordpress/?tag=雙折射>
- 二、 李康源 (2005) 。 偏光片-樣品-析光片之影像式橢圓偏光術(交通大學光電所)
- 三、 李怡嚴。 大學物理學(第四冊) 十二版 東華書局 第 1521 ~ 1526 頁  
中華民國 七十九年二月
- 四、 吾鈴木。(2012) 激光燒蝕合成尺寸選擇的氧化銅奈米粒子 奈米粒子研究雜誌 卷 14  
產品編號：863
- 五、 黃士豪。(2013) 氧化銅與氧化亞銅之特性探討與元件運用(中山光電所)
- 六、 中央研究院。米氏散射 取自 <http://idv.sinica.edu.tw/cytseng/lecture/Miescattering/Mie.pdf>
- 七、 拉曼散射原理 取自  
<http://www.ntu-ccms.ntu.edu.tw/lab/ultrafast/old2005/paper/PDF/1-5-2-4.pdf>

## 【評語】 160043

光偏振探討在同化合物溫度梯度，值得探討。探究在銅化合物晶體在不同製程與不同表面結構之下的光偏振性質，因散射光強度變化、偏光軸偏轉差異、偏極化、取值角度及吸收率不同，晶體會有色差及色彩變化，內容與變化多元，多屬觀測結果的紀錄。應有再深入的空間，再做邏輯歸納。