

# 花蓮縣第65屆國民中小學科學展覽會

## 作品說明書

科 別：物理科

組 別：☒ 國中組 ☐ 高中組

作品名稱：彎曲的指紋，藏著怎樣的光學密碼？—探討曲率誘導的手性光學特性

關 鍵 詞：手性光學特性、曲率誘導、表面指紋微結構

編 號:

## 摘要

本研究探討了指紋的手性光學特性及其在彈性薄膜表面設計中的應用潛力。手性，即無法與鏡像完全重合的特性，廣泛存在於自然界中並在物理科學中具有重要應用價值。通過對指紋複雜紋路的啟發，我們結合了表面圖案與曲率兩件實驗要因，使用聚二甲基矽氧烷（PDMS）製作出具備彈性的表面指紋結構，並透過 ChatGPT 協作圓二色性光譜實驗量測，以研究其光學手性表現。我們發現指紋作為自然生成的複雜表面結構，具備明顯的手性光學特徵。實驗結果證明表面圖案與曲率結合具有誘導手性光學之特性，且手性可根據偏斜角度（圖案旋轉方向與曲率方向的夾角）調節手性強度。

## 壹、前言

### 一、研究動機

為什麼我們對「手性」這件事這麼有興趣？——從自然現象到材料設計的物理思考！

我們在物理課常提到「對稱性」是一個很重要的概念。許多自然定律（像牛頓運動定律、能量守恆等）都和對稱性有關。但有沒有想過：如果一個結構打破了對稱性，會發生什麼事？這時候就會出現「手性」這個現象。簡單來說，手性就是物體和它的鏡像無法完全重疊，像我們的左手和右手一樣 [1-2]。手性在自然界中到處都可以看到！像是我們身體裡的 DNA，就是螺旋狀而且有方向性的結構。星系也會像螺旋一樣旋轉，有的是順時針，有的是逆時針。如圖 1 所示，很多藥物的分子，也有左旋和右旋之分，會影響它在人體裡的作用！



圖1:手性示意圖。(作者自繪)

### 手性與光的互動：什麼是手性光學？

當我們將光（特別是偏振光）打在具有手性的材料上時，這些材料會對左旋光和右旋光產生不一樣的反應，像是吸收程度不同，或是讓光旋轉方向改變。這種行為在物理上被稱為圓二色性（Circular Dichroism, CD）與旋光性（Optical Rotation）。這些手性光學效應，其實就是材料在「打破對稱性」之後展現出來的特別物理行為。物理學家會用這些現象來做更敏感的光學感測器、分子或生物樣本的檢測、甚至在量子光學裡探討單光子的偏振狀態調控！

那我們怎麼做到「打破對稱性」呢？

過去的諸多學術研究多集中在三維的奈米結構，比如：使用有手性的分子模板或用磁場或光場讓材料自己組成螺旋狀排列。這些方法能在奈米世界中製造出非對稱結構，但技術難度高，也比較難調整。而二維材料（像薄膜、光柵結構）雖然製作簡單，但通常太對稱，所以不容易展現手性光學特性[3-5]。研究發現，如果只是平面圖案排列，還不足以打破鏡像對稱性。要讓這些二維結構產生手性反應，我們需要引入額外的幾何變化——比如彎曲、變形、與可彎曲透光的薄膜。

### 我們的研究從「指紋」找靈感！

指紋是一個非常有趣的自然結構。它不但有規律的條紋圖案，還天然具有微彎曲的立體形狀。這種幾何結構本身就打破了對稱性，非常像我們想做的「仿生手性結構」。指紋的圖案不只是特別，它的表面還有自然形成的凹凸光柵和曲率。這種彎曲會不會讓光的行為改變？在物理中，光是一種電磁波，它可以有不同的偏振方向（像是左右旋轉的圓偏振光），而具有手性的材料對這些不同方向的光會有不一樣的反應。如果指紋的凹凸表面真的會造成手性，那它可能就能改變光的偏振方向或吸收情況，如圖 2 所示，這就是一種新奇的光學特性。



圖 2:手性光學效應。(作者自繪)

所以我們的想法是：用彈性材料聚二甲基矽氧烷（PDMS）做出模仿指紋的表面微結構薄膜，再透過外力去彎曲它，看看會不會因此出現手性光學反應？這個方法比傳統的奈米加工技術簡單，而且可調控。只要改變彎曲角度，就能觀察到不同的光學表現，甚至能做到「左右手性切換」！

### 為什麼這值得研究？從物理角度來說：

1. 對稱性破壞(Symmetry Breaking)是基礎物理的重要概念: 這個研究讓我們能直接觀察對稱性破壞如何影響光的行為，是一個實作版的對稱破壞範例。
2. 連接幾何形狀與光學性質的關係: 這點讓我們能用「形狀——表面結構」來控制光，也就是幾何控制光學性質，是現代光電材料的重要設計方向。
- 3.幫助未來應用發展: 如果這些結構能精確設計，未來有可能應用在安全性高的身份辨識（指紋＋光學特徵）、可撓式感測器（可以彎的光學裝置）、與手性選擇性的光通訊或量子資訊元件

本研究從「手性」這個自然界的基本概念出發，結合了對稱性破壞、光與材料的互動、仿生設計與幾何控制光學等物理議題，試圖探索在二維材料中實現手性光學的可能性。設計一種新的研究方法，讓指紋這種結構的圖案與曲率結合後，能夠誘導出手性光學效果。我們

希望這能成為發展新型二維材料與光學技術的一種關鍵策略，也幫助大家將課本裡的理化知識應用到真實世界！

## 二、研究目的

這次科展我們做了一個有趣的實驗，想看看「指紋」這種表面圖案和它的彎曲形狀，能不能讓材料對光產生左右不一樣的反應，這種現象叫做手性光學特性。

我們使用一種叫聚二甲基矽氧烷(PDMS)的透明軟材料與雷射刻紋模具配合，做出特殊的指紋結構的 PDMS 薄膜，指紋是一種天然的表面，有細緻的線條（叫山脊線）和微微的彎曲，利用雷射雕刻翻製指紋製作 PDMS 薄膜，我們稱其為「彈性指紋表面 PDMS」。這種設計不只能翻製真實指紋，也能夠透過外力改變形狀，觀察不同彎曲下的光學變化。

然後我們觀察它們在不同彎曲程度下，會不會對「左旋光」和「右旋光」的吸收反應有所不同。並將研究的方向延伸至探討：

### 1. 為什麼會產生手性光學特性？

在對稱的情況下，光不會偏向哪一邊。我們想測試，當表面的圖案（像指紋）和彎曲結合時，是不是就能產生手性光學效應？這就像用圖案＋彎曲這兩種「破壞對稱性」的方法，來創造左右有差異的光學反應，這時候就可能會出現左右光不一樣的吸收反應！而彎曲越大，手性光的效果會不會越明顯？不同壓縮密度的條紋會不會讓手性效果變強或變弱？利用數學中的「對稱性分析」來預測光的反應會怎麼變化。

### 2. 用彈性來控制光！

PDMS 是一種可以拉、可以壓的薄膜材料，所以我們可以試著：拉長或壓縮表面，看看光的反應會不會變化。甚至做成「開關」，當彎曲的時候是右手性，不彎就是左手性！

### 3. 指紋的左右會有差嗎？

我們還發現：左右手指紋對光的反應是鏡像的且左右指紋具有高度相似性！這也許可以成為一種更安全的身分辨識方式，因為一般指紋辨識只看圖案，如果加上光學反應，那要仿冒就更難了！在此方向，我們還可以進一步研究指紋不同部位（像核心或邊緣）對光的反應會不會不同？是不是因為那邊的彎曲或紋路密度不同造成的？

### 4. 建立「可調整」的手性材料？

我們的另一個目標是創造可以控制的手性材料。我們會改變表面圖案的角度、彎曲程度，看看能不能控制出現左手性或右手性，甚至控制它的強弱。這對未來的應用非常重要，因為

過去的手性材料大多是固定的，不能變化。我們希望設計一種可以動態調整的表面，像是可彎曲、可壓縮的光電裝置。

## 5. 有可能與量子光學結合產生進階研究嗎？

如果把單一顆光子（像是量子科技中的訊號）打到這種彎曲結構上，它的方向或偏振會不會改變？未來搞不好可以應用在：量子電腦或光學密碼傳輸，另外，我們也可以把表面鍍上金屬，來加強這些光的變化，讓感測器更靈敏！

## 6. 使用人工智慧 ChatGPT 協作完成科展研究

這次科展，我們不只靠動手實驗，也運用了人工智慧 ChatGPT 來幫助我們：

A. 分析實驗結果，我們輸入了不同圖案（像指紋）和不同彎曲角度下的觀察資料，請 ChatGPT 協作圓二色性光譜實驗量測，並協助我們分析這些實驗結果是不是跟我們原本的推測一樣？哪一組實驗的手性光學反應最明顯？為什麼？

B. ChatGPT 根據已有研究資料，給我們一些參考方向，幫助我們設計進一步的實驗。

C. 整理資料與撰寫報告，從文獻搜尋、寫摘要、製作流程圖到撰寫討論內容，ChatGPT 就像我們的數位小助手，幫我們把資料變得更清楚、內容更完整。

## 7. 為什麼這個科展研究很重要？

這個研究的重點是：

1. **把生活中的小細節（像指紋）轉化為科學設計靈感：**我們從自然中發現「對稱性破壞 → 產生手性 → 對光有不同反應」，並應用這個概念，試著自己做出這樣的結構。

2. **做出可以「控制光」的材料：**如果未來能發展出這種可以調整的手性光學材料，它就可以應用在：身分辨識系統（更安全的指紋驗證）、光學感測器（偵測光的旋轉方向）、彎曲螢幕、智慧衣（可變色、可感應）、甚至是量子電腦與光通訊技術。

3. **結合物理、材料、光學、AI 跨領域學習：**我們學到了彎曲如何影響對稱性、手性光學的物理原理，也實際設計材料並用 AI 協助分析。這讓我們更有信心面對未來科技的挑戰！

這次研究的核心，是把「圖案」與「彎曲」結合，模仿指紋的結構，來創造出一種能夠「對光有左右反應」的材料。這不只是對手性光學的物理科學探索，更是希望把自然的啟發，轉化成有實際用途的新科技！

我們相信，只要有觀察、有創意，生活中的小細節——像指紋，也能變成重要的科學研究靈感！

### 三、文獻回顧

#### 手性是怎麼被發現的？

這要從一位非常有名的化學家說起——路易·巴斯德（Louis Pasteur）[6]，如圖 3 所示。他不只是發明了巴氏消毒法，也是一位研究「分子結構」的大師！在他年輕的時候，巴斯德研究一種叫「酒石酸」的物質。當時科學家發現，從葡萄酒中提煉的酒石酸可以讓「偏振光」旋轉（這叫旋光性），但用化學方法製造出來的酒石酸卻沒這個效果。



這讓巴斯德很好奇，兩種酒石酸明明化學成分一模一樣，為什麼效果不同？

圖 3: 路易·巴斯德。(作者自繪)

他仔細用顯微鏡觀察，發現化學合成的酒石酸中，其實混合了兩種不同形狀的晶體：一種會讓光向右旋轉（右旋），另一種則會讓光向左旋轉（左旋）。這兩種晶體互為「鏡像」，但混合在一起時，左右抵消了，所以看起來就像沒反應一樣。

#### 為什麼這實驗很重要？

巴斯德的發現證明了世界上有些東西就像左手和右手一樣，是對稱又不同的。這個現象後來被叫做「手性」，成為化學、物理和生物學中非常重要的一個概念。更特別的是，他還發現生物會「挑一邊」喜歡，像我們人體只會吸收其中一種手性的分子。這對藥物設計、生物研究甚至光學科技都有很大的影響！

#### 光與手性 —— 開啟新的物理研究

隨著科技進步，科學家發現，當光遇到具有手性的材料時，會出現一些非常特別的現象，例如：圓二色性（Circular Dichroism, CD）：材料對左旋和右旋偏振光吸收不一樣。旋光性（Optical Rotation）：光的偏振方向會被旋轉。這些現象後來被總稱為手性光學效應，在物理與光學感測器設計中越來越重要 [7]。

#### 三維奈米結構的發展

進入 21 世紀，研究者開始設計出很多三維奈米手性結構，像螺旋狀的金屬顆粒、手性分子自組裝體等等，這些結構可以明顯產生手性光學效果 [8]。例如，其中 Yin 的研究團隊發明了一個超聰明的方法[3]，他們使用一種有「左右旋轉」結構的模板，讓非常非常小的奈米粒子按照特定方向排列起來。這種排列就像是把一大堆奈米粒子排成一個旋轉的樓梯。結果，這樣的結構真的能夠讓光產生手性光學反應，而且反應還很明顯，如圖 4 所示！這種現象叫做圓二色性（CD），意思是這些材料對左旋光和右旋光的吸收不一樣，就像它們「看得懂光的左右手」一樣！不只如此，還有其他的研究團隊也很厲害[9-10]。他們想到可以用磁場來讓



材料「扭轉變形」，就像用隱形的手轉動一個紙條，這樣一來，材料的結構也變得有點像螺旋，結果也產生了類似的三維手性反應，也會對光的左右有不同反應！

但是，平面材料就做不到嗎？

雖然三維結構很厲害，但製作起來非常困難又貴。所以大家開始嘗試看看：二維材料（像薄膜）能不能也產生手性光學反應？結果發現，如果只是單純把圖案刻在平面上，是不太容易打破鏡像對稱的 [11]。Ding 等人的研究指出，只有設計圖案還不夠，還需要額外的「幾何變化」來打破對稱。

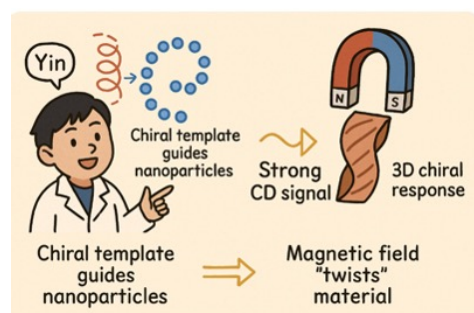


圖 4: 控制手性的方法。(作者自繪)

從仿生學尋找靈感：從自然學「不對稱」

這時候，科學家把目光轉向了大自然。他們發現許多生物本身就有很厲害的「不對稱設計」，像蝴蝶翅膀的排列、蜘蛛絲的扭轉結構 [12]，還有，我們每天都會看到的——指紋！

指紋不只是身分識別工具，它的圖案和彎曲其實也是天然的手性結構。這給了我們靈感：

可以用彈性材料模仿指紋，看看會不會出現手性光學反應？

我們的研究也加入了這個故事！

我們這次的科展，就是從這些研究的故事中得到啟發。我們設計了一種製作指紋表面圖案的方式，結合可彎曲的彈性材料（PDMS），希望觀察出：

1. 它對左旋光和右旋光的反應會不會不同？
2. 彎曲的角度和表面結構圖案是否會影響光學手性？
3. 這樣的結構是否能做成一種新的光學感測器或安全驗證方式？

我們希望用簡單的方式，讓物理世界中的手性變得可見、可調，也讓大家知道，一個指紋，其實藏著很多不簡單的物理原理！預期此研究可填補目前文獻在「指紋結構導入手性光學特性」方面的空白，並為未來光學感測器、身份辨識與功能材料設計建立全新方向。

## 貳、研究設備與器材

本研究所使用的設備與材料如下：

材料包括聚二甲基矽氧烷（PDMS），這是一種具備高柔性和光學透明性的彈性體，用於製作薄膜；實驗還採同一人之左右手十隻指紋，並以雷射刻印模具，以製作具有表面指紋結構之 PDMS 薄膜。如表格 1 說明所示。

表格 1：研究使用材料表格。

| 材料名稱          | 用途與描述                                    | 具體信息                                                                        | 優點                                   |
|---------------|------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------|
| 聚二甲基矽氧烷（PDMS） | 作為基材，用於製造具有圖案的彈性表面。                      | <b>品牌與規格：</b> Sylgard 184，由 Dow Corning 公司生產<br><b>配比：</b> 基材與交聯劑的重量比為 10:1 | 極佳的柔性，便於彎曲和施加曲率<br>光學透明性高，適合紫外-可見光測量 |
| 金薄膜           | 在 PDMS 表面鍍上金薄膜，增強光與物質的相互作用，提高手性光學特性的靈敏度。 | <b>厚度：</b> 10 nm<br><b>特性：</b> 高導電性和化學穩定性                                   | 提高光學測量靈敏度<br>保持光學特性穩定                |
| 指紋模具          | 模擬實際指紋結構，製作指紋仿生結構。                       | 採集左右大拇指的指紋，利用翻模技術製作                                                         | 精準模擬指紋表面特徵，適合分析其手性光學特性               |
| 培養皿           | 作為 PDMS 固化的模具容器，提供固定的形狀和大小。              | <b>規格：</b> 直徑 90 mm，深度 15 mm                                                | 提供穩定的容器，確保 PDMS 樣品的一致性               |

研究主要使用輔助設備則包括真空脫氣機，用於去除 PDMS 中的氣泡；電子天平，用於精確稱量材料；烤箱，用於加速 PDMS 固化；以及三維列印機，用於製作曲率測試裝置。如表格 2 說明所示。

表格 2：研究使用輔助工具與設施的整理表格。

| 工具/設施名稱   | 用途與描述                            | 具體參數或特點                                 |
|-----------|----------------------------------|-----------------------------------------|
| 真空脫氣機     | 去除 PDMS 混合液中的氣泡，以確保固化後的樣品表面光滑平整。 |                                         |
| 電子天平      | 精確稱量 PDMS 基材和交聯劑，確保混合比例準確。       | <b>精度：</b> 0.1 mg                       |
| 烤箱        | 加速 PDMS 固化，提供穩定的實驗條件。            | <b>操作條件：</b><br>溫度：70°C，時間：6 小時         |
| 三維列印機     | 製作測試曲率所需的半圓柱裝置。                  | <b>打印精度：</b> 層厚小於 50 微米                 |
| 半圓柱光路測試裝置 | 提供均勻曲率，用於測試樣品在不同曲率條件下的光學性質。      | <b>結構：</b> 半圓柱中心設置直徑 1 cm 的光路孔，確保光線準確穿透 |

這些設備與材料的組合確保了實驗數據的高精確性，為研究手性光學特性提供了可靠的技術支撐，並為未來的柔性光電元件和物理技術應用奠定了基礎。



## 參、研究過程與方法

本研究旨在探索指紋的手性光學特性及其在受指紋啟發的彈性表面設計中的應用潛力。我們通過製備彈性表面結構指紋模型，結合實驗測試與計算模擬，研究了表面圖案與曲率結合誘導手性光學特性的機制。以下詳細說明本研究的過程與方法。

### 一、物理分析方法說明

本研究涉及手性光學特性，其主要與圓二色性、對稱性破缺、曲率效應、偏斜角（Oblique Angle）有關。以下是本次科展幾個核心物理方程式來描述這些現象：

#### A. 圓二色性（Circular Dichroism, CD）

CD 代表左旋圓偏振光（LCP）與右旋圓偏振光（RCP）的光吸收差異：

$$\Delta A = A_{LCP} - A_{RCP}$$

其中， $A_{LCP}$  為左旋圓偏振光的吸收， $A_{RCP}$  為右旋圓偏振光的吸收， $\Delta A$  代表手性光學特性強度。而在曲率影響下，CD 強度  $S$  可表示為：

$$S = S_o \sin(2\theta)$$

其中， $S_o$  為最大 CD 強度， $\theta$  為偏斜角（即圖案方向與曲率方向夾角）。這表明 CD 的強度與曲率方向的角度相關，並呈現正弦波動性變化。

#### B. 曲率與對稱性破缺（Curvature-Induced Symmetry Breaking）

手性光學特性來源於曲率引發的對稱性破缺，這可用高斯曲率（Gaussian Curvature,  $K$ ）來描述：

$$K = \frac{1}{R_1 R_2}$$

其中， $R_1$  與  $R_2$  分別為表面的主曲率半徑。當  $K \neq 0$  時，系統對稱性破缺，可能產生手性光學效應。在這個研究中，PDMS 彈性基底上的指紋結構表面曲率越大（半徑  $R$  越小），手性光學效應越強。高斯曲率為  $K=0$  曲面至少有一個方向是直的，例如：平面、圓柱體側面、圓錐體側面的高斯曲率都是 0。高斯曲率為正數  $K>0$ ，曲面的形狀類似碗狀。高斯曲率為負數  $K<0$ ，曲面的形狀類似馬鞍狀。

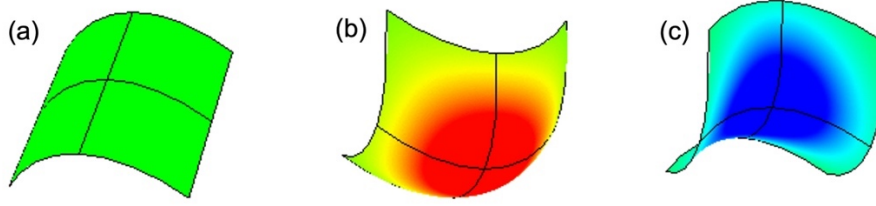


圖 5: (a)-(c) 高斯曲率為  $K=0$ 、 $K>0$ 、與  $K<0$  的曲面形狀。(作者自繪)

### C. 偏斜角對手性光學性的影響

研究發現，手性光學特性與偏斜角  $\theta$  相關，對應的 CD 訊號可用以下方程式描述：

$$CD(\lambda, \theta) = A_o \sin(2\theta) e^{-bK}$$

其中， $\lambda$  是波長， $A_o$  是 CD 強度的最大值， $b$  為材料特性參數， $K$  為高斯曲率。這個方程式表明：CD 隨曲率  $K$  增加而增強。偏斜角  $\theta$  控制 CD 信號的變化。

### D. 光學極化與手性光學響應

透過電場向量  $E$  來描述手性光學特性：

$$E(t) = E_o \cos(\omega t) \hat{x} + \eta \sin(\omega t) \hat{y}$$

其中， $E_o$  為電場振幅， $\omega$  為角頻率， $\eta$  控制偏振態，當  $\eta = 1$  時為右旋偏振光（RCP）， $\eta = -1$  為左旋偏振光（LCP）。

手性材料的光學旋光率（Optical Rotation, OR）可表示為：

$$\theta_{OR} = \frac{\lambda}{2\pi} (n_L - n_R)$$

其中， $n_L$  與  $n_R$  為材料對左旋與右旋光的折射率， $\lambda$  為光的波長。當  $n_L \neq n_R$ （即材料具備手性），則光在材料中會發生旋光。

透過這些物理方程式，可以了解：

1. 量化手性光學效應，例如透過 CD 強度與曲率的關係來控制材料的手性。
2. 設計可調控手性光學材料，如透過調整圖案密度、曲率半徑，或金薄膜厚度來優化手性響應。
3. 推動應用於生物辨識與光學感測，例如利用指紋手性光學特性進行身份識別或設計高靈敏度手性光學感測器。

## 二、材料與實驗設備製備

### 1. 表面微結構指紋模板備製：

其執行步驟為如圖 6 所示：

步驟 1: 玻璃基板清潔，玻璃基板需經過清潔（圖 6a），以確保光致發光碳量子點（PCQDs）能夠有效附著並提升指紋成像的準確性。

步驟 2: 微結構按壓，於玻璃基板上按壓微結構形成印記（圖 6b），並使用 PCQDs 來增強結構的可見度。這些量子點選擇性附著於結構體，在紫外光（UV）照射下發出螢光，可提高對比度（圖 6c）。

步驟 3: 圖形 G-code 編碼，圖像轉換為 G-Code（圖 6d），用於控制雷射雕刻過程。

步驟 4: 雷射雕刻，使用 1030 nm 波長的 20W 飛秒雷射，依據 G-Code 指令在光滑鐵板上精細刻蝕指紋圖案（圖 6e）。這一流程結合材料科學、成像技術與雷射加工技術，可提供高精度的 PDMS 薄膜表面微結構複製方案。

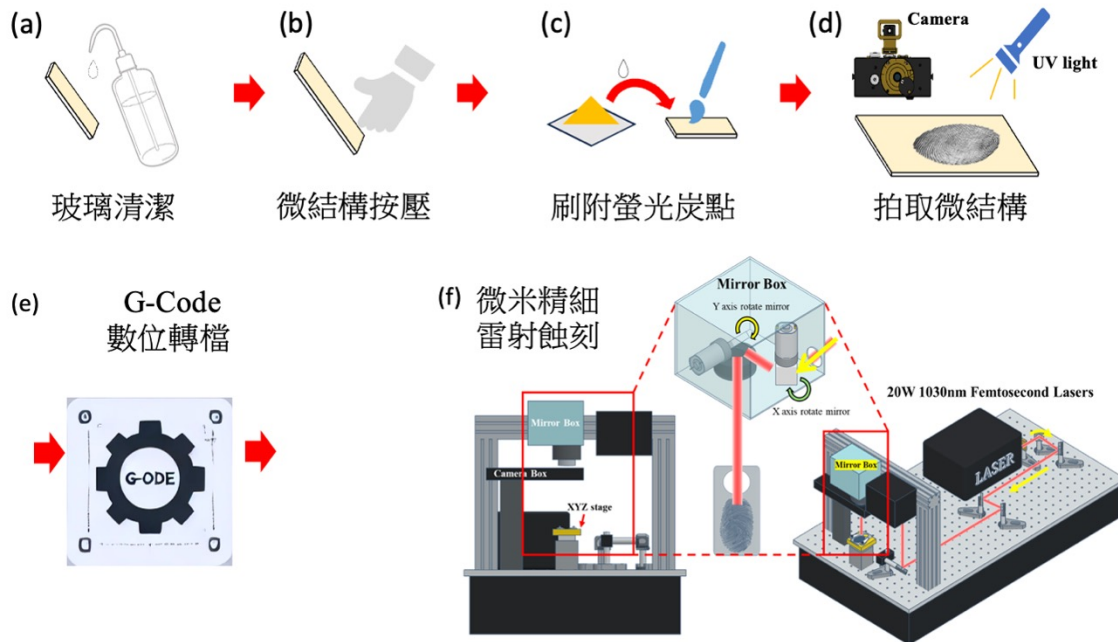


圖 6：表面微結構模板備製流程。(作者自繪)

圖 7 展示透過表面微結構轉印與光致發光碳量子點（PCQDs）螢光顯影技術所獲得的十枚指紋圖像(圖 5a-d)，對應同一位測試者左右手的全部十指。指紋依序標註如下：

上排 (a) - (e)：分別為右手的拇指 (R1)、食指 (R2)、中指 (R3)、無名指 (R4)、小指 (R5)。

下排 (f) - (j)：分別為左手的拇指 (L1)、食指 (L2)、中指 (L3)、無名指 (L4)、小指 (L5)。

這些指紋圖像經由 PDMS 表面微結構轉印與 PCQDs 螢光標記後，可在紫外光照射下顯現出清晰的紋理結構，可助於後續圓二色光譜實驗進行研究。



圖 7：所得本次實驗所用之十枚指紋圖像。(作者自製)

## 2. 微結構 PDMS 薄膜製備：

其執行步驟為如圖 8 所示：

步驟 1: 材料準備，將 PDMS 基材與 Sylgard 184 交聯劑按照 10:1 的重量比混合，充分攪拌並使用真空脫氣機去除混合液中的氣泡(如圖 8a-b)。

步驟 2: 模板轉移，將指紋模具置於培養皿底部，倒入 PDMS 混合液，使其均勻覆蓋模具表面(如圖 8c)。

步驟 3: 指紋模具製作，採集左右十隻指紋，利用雷射翻模技術製作指紋模板(如圖 5)。

步驟 4: 模具轉移，將指紋模具壓印於 PDMS 混合液中，經固化後形成具有指紋圖案的彈性薄膜(如圖 8d)。

步驟 5: 固化，將培養皿置於 70°C 的烤箱中固化 6 小時，得到具有均勻指紋微結構圖案的 PDMS 薄膜(如圖 8e)。

步驟 6: 切割與修整，沿著邊緣切割 PDMS 樣品，使其尺寸適合後續測試(如圖 8f)。



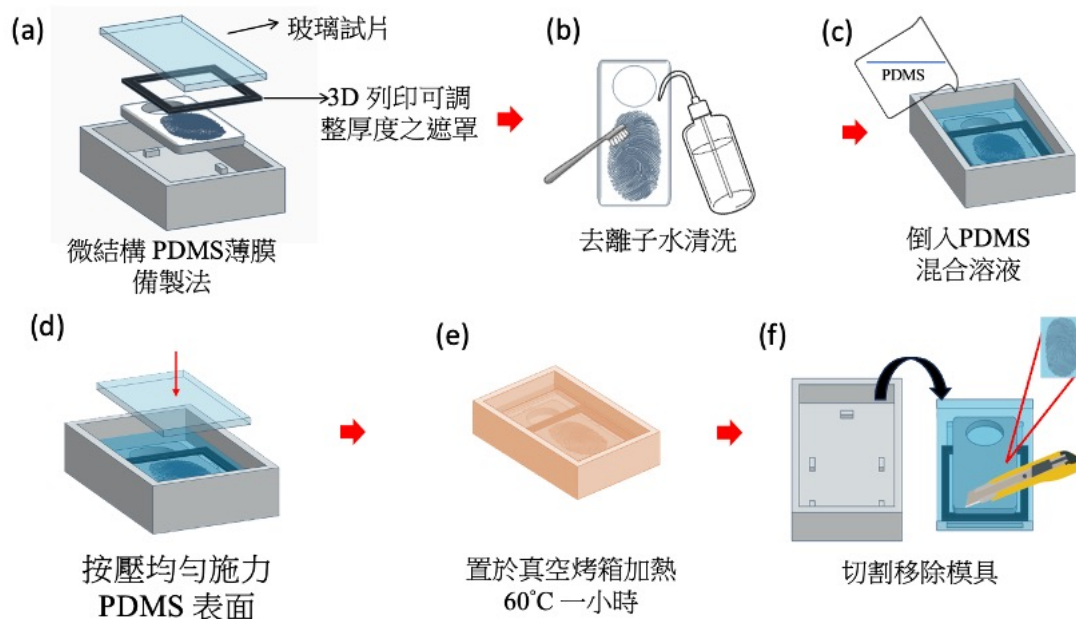


圖 8：微結構 PDMS 薄膜備製流程。(作者自繪)

圖 9 展示以飛秒雷射雕刻技術製備微結構指紋模板的樣品流程與成果，圖 9a 為表面光滑不鏽鋼模板：未經加工的不鏽鋼片，表面平整、無紋理，作為初始基材。圖 9b 為雷射雕刻指紋微結構不鏽鋼模板：利用飛秒雷射 (1030 nm, 20W) 依據指紋圖案的 G-Code 進行精細雕刻，於不鏽鋼表面產生具高度解析度的指紋微結構。圖 9c 為表面指紋微結構 PDMS 薄膜：將雷射雕刻後的不鏽鋼模板作為模具，翻模製得含完整指紋紋理的 PDMS 薄膜。該薄膜可在表面進一步鍍上 10~20 奈米的金薄膜用於加強圓二色光圖成像對比。

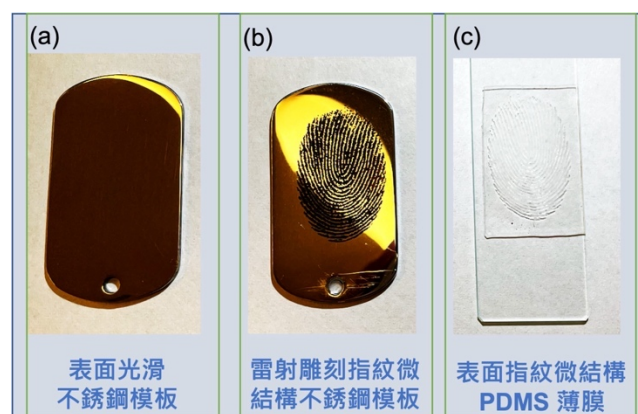


圖 9 表面微結構指紋模板的製備步驟與樣品實物圖。(作者自攝)

此科展所研發的流程整合了雷射微加工、軟性模具製備與仿生圖樣轉印等技術，為製作高仿真指紋結構模板提供一種可重複、高效率的方法。

### 3. ChatGPT 協作圓二色性光譜實驗量測加入金薄膜奈米層：

我們進一步研究金薄膜厚度和等離子體增強背後的物理學，由於金 (Au) 薄膜厚度而導致的電場的增強受表面等離子體共振和電磁波相互作用的控制。我們可以藉由 ChatGPT 來計算 Au 薄膜厚度對電場強度的影響，如圖 10 所示：

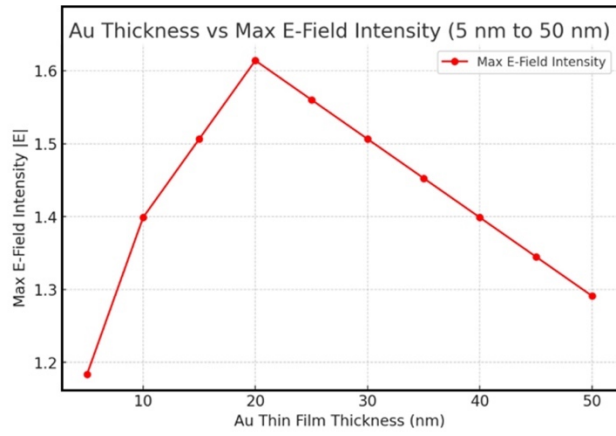


圖 10：Au 薄膜厚度對電場強度的關係圖。(作者自繪)

對此計算結果，我們可以解釋為：

- A. 對於非常薄的金膜 (< 10 奈米)：電子密度不足以完全支援強表面電漿效應。由於等離子體耦合較弱，因此電場增強受到限制。磁場洩漏到電介質中，降低了局部化。
- B. 最佳厚度 (~20 奈米)：由於等離子體共振條件與入射光波長一致，因此電場強度達到最大化。表面等離子體與激發條件相匹配，導致強烈的等離子體增強。
- C. 對於較厚的金膜 (>30 奈米)：由於吸收損失增加，等離子體共振受到抑制，導致金屬內部能量耗散更多。該場被限制在 Au 內部，從而降低了電介質 (PDMS) 中的增強。這種行為可以透過金屬內部衰減波的電場衰減方程式來描述：

$$E(z) = E_0 e^{-z/\delta}$$

其中  $E_0$  是表面場振幅， $z$  是 Au 穿透深度， $\delta$  為集膚深度 (skin depth)。對於較厚的金膜， $\delta$  變得更大，意味著表面可用的電場更少，從而導致增強減弱。

依據上述理論結果，我們決定於使用 ChatGPT 協作圓二色性光譜實驗量測時，加入表面沉積 20 nm 厚的金薄膜於計算中，以增強表面等離子體共振，提高光學性質的測量靈敏度。

#### 4 曲率設置與測試裝置製備:

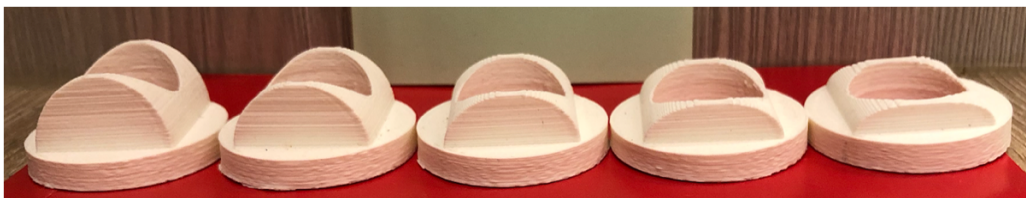


圖 11：曲率裝置製備。(作者自攝)

- A. 曲率施加固定座: 為研究曲率對手性光學特性的影響，我們使用 Tinkercad 設計了三種不同大小的曲率半徑：3、2.75、2.5、2.25 和 1.5 cm，分別對應於低、中、高曲率，並用 3D 列印技



術製作（如圖 10）。其裝置設計為利用三維列印機製作半圓柱裝置，提供均勻的曲率。半圓柱中心設有直徑 1 cm 的光路孔，便於光線穿透。

B. 樣品旋轉台: 利用步進馬達帶動旋轉履帶，以調整樣品台旋轉器，將其固定於鏡面旋轉器表面如圖 12 所示，以改變旋轉角度與曲率兩種實驗變因。

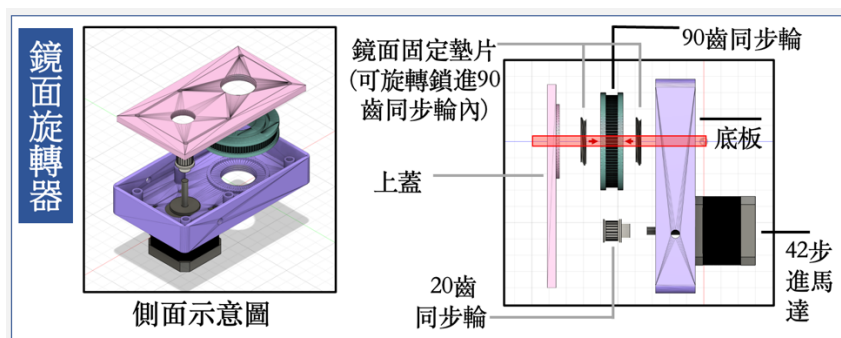
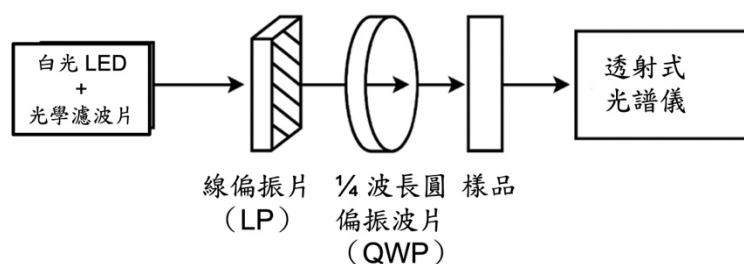


圖 12：鏡面旋轉器製備。(作者自繪)

### 三、ChatGPT 協作的圓二色性（CD）光譜實驗測試

#### 1. 圓二色性（CD）光譜測試:

簡易圓二色性（Circular Dichroism, CD）實驗架設: 圓二色性（Circular Dichroism, CD）測量通常需要高靈敏度的光譜儀，但若搭建簡易 CD 測試系統，可以使用線偏振光源、四分之一波片（Quarter-Wave Plate, QWP）、樣品、光譜儀來進行基本測量，如圖 13 所示。以下是我們使用 ChatGPT 協作的圓二色性（CD）光譜實驗架設：



圓二色性（CD）光譜實驗架設

圖 13: 使用 ChatGPT 協作的圓二色性（CD）光譜實驗架設。(作者自繪)

#### (1) 實驗架構細節：

如圖 13 所示，由左至右依序為 光源 → 線偏振片（LP）→ 四分之一波片（QWP）→ 樣品 → 光譜儀 / 感測器，其個別描述為：

- A. 光源: 白光 LED + 光學濾波片
- B. 線偏振片 (Linear Polarizer, LP): 用來產生線偏振光。
- C. 四分之一波片 (Quarter-Wave Plate, QWP): 使用鏡面旋轉器旋轉 QWP 來產生左旋圓偏振光 (LCP) 和右旋圓偏振光 (RCP)。QWP 的快軸方向設為  $45^\circ$  產生 → 左旋圓偏振光 (LCP) 快軸設為  $-45^\circ$  產生 → 右旋圓偏振光 (RCP)
- D. 樣品: 具有表面指紋微結構 PDMS 薄膜共十片。
- E. 透射式光譜儀

## (2) 實驗操作流程:

- A. 讓 LCP、RCP 依序通過樣品，量測不同圓偏振光下的吸收強度變化，量測波長範圍約 200-800 nm。
- B. 檢測透射光強度: 光譜儀記錄  $I_{LCP}$  和  $I_{RCP}$ 。

## (3) 實驗控制變因:

- A. 觀察十種表面微構的樣品，是否具有不同的手性分佈？
- B. 旋轉樣品，測量不同旋轉偏斜角( $\theta$ )，觀察十種表面微構的樣品，是否有手性強度分佈的改變？
- C. 調整樣品曲率偏斜角(K)，研究不同彎曲程度對手性強度分佈的影響？

# 肆、研究結果

## 一、 樣品實驗數據量測

主要觀察數據與結果分析，如圖 14a-b 為圓二色性光譜圖範例，採用 R1 樣品，測量偏斜角( $\theta = -45^\circ$ )與曲率( $K = 10^\circ$ )，顯示  $I_{LCP}$  為左旋圓偏振光吸收光譜(綠色線)、 $I_{RCP}$  為右旋圓偏振光吸收光譜(紅色線)和強度差值  $CD = I_{LCP} - I_{RCP}$  (藍色)。顯示此樣品改變偏斜角與曲率具有誘導手性的存在。

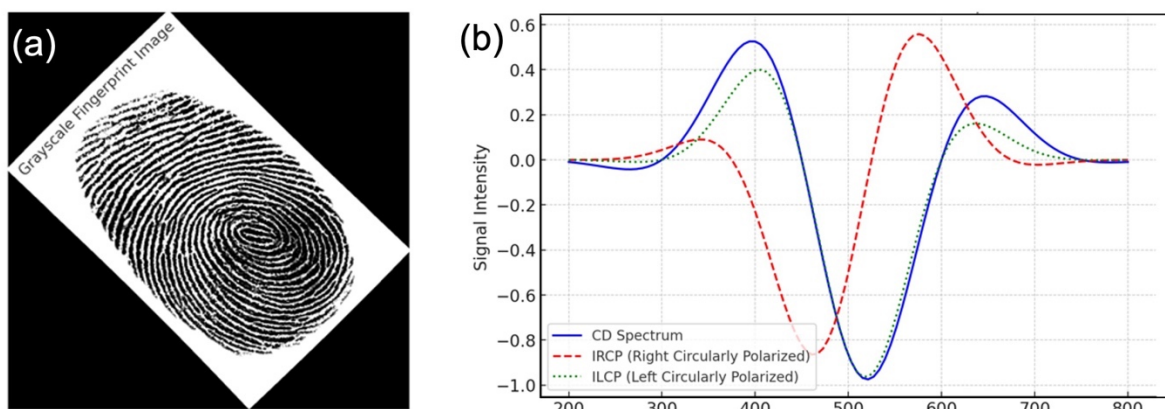


圖 14: (a) 使用表面指紋結構圖與(b)ChatGPT 協作的圓二色性 (CD) 光譜圖。(作者自製)

## 二、 表面指紋結構是否會誘導左旋圓偏振光(LCP)和右旋圓偏振光 (RCP) 強度的調製

我們將指紋結構圖案切割成寬 500x 高 1000 等分區塊，計算每一區塊的 CD 強度，再組合成二為圖案，，所用程式碼詳見(附錄一)。如圖 15a - j 所示二維強度分佈圖，皆對應一個 PDMS 指紋微結構樣本的圓二色光譜 (CD) 2D 掃描結果。其中紅色區域為：左旋光強度 - 右旋光強度  $> 0$  (偏向左旋光吸收)，藍色區域為：左旋光強度 - 右旋光強度  $< 0$  (偏向右旋光吸收)，灰色或接近 0 的區域為無明顯手性吸收。

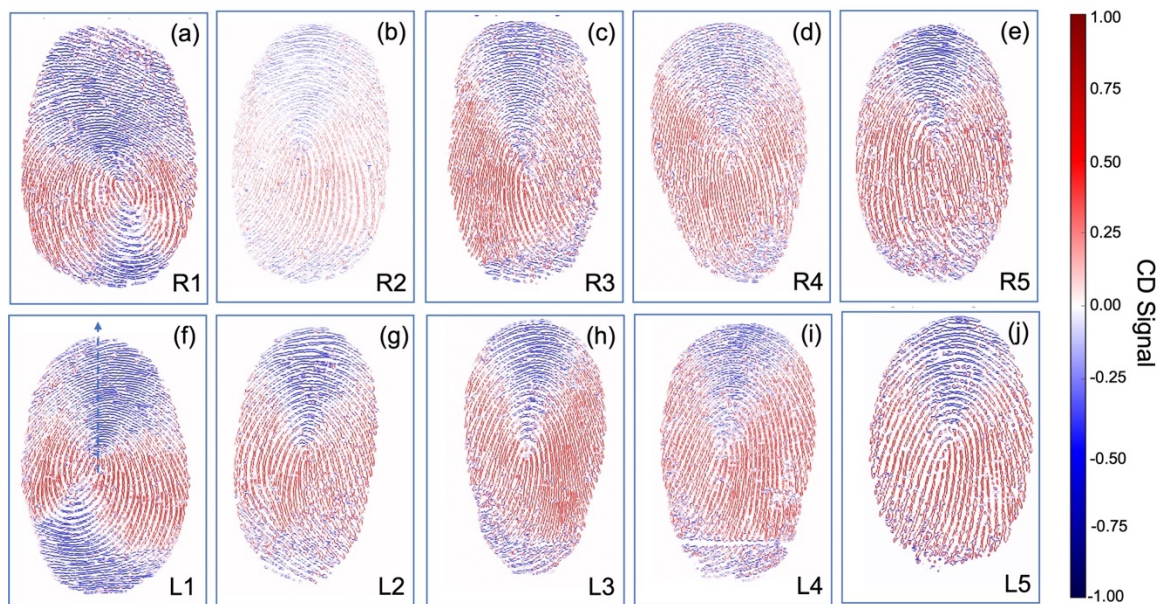


圖 15: (a)-(j) 分別為表面指紋結構 PDMS 薄膜圓二色光譜 (CD) 2D 掃描圖。(作者自製)

以下依照圖 15a - j 的順序，分析顏色分布、結構特徵與是否誘導手性現象的關聯性說明如下：

(1) 圖 15a(右手 R1)顏色分布紅藍交錯，呈現明顯的條紋狀分布，與指紋結構方向一致。此樣本展現強烈的手性訊號，指紋微結構有效誘導了圓二色性。

- (2) 圖 15b (右手 R2) 顏色分布主要為紅色區塊，少量藍色點狀。顯示出偏左旋光的吸收行為，可能為局部微結構造成的非對稱手性。
- (3) 圖 15c (右手 R3) 顏色分布紅藍交替出現，整體偏藍。有可辨識的手性訊號，但方向性較弱，推測微結構排列略有旋轉或散亂。
- (4) 圖 15d (右手 R4) 顏色分布紅藍交錯明顯，且與指紋紋路方向對應。與 圖 12a 類似，屬於高度有序排列，具強手性表現的樣本。
- (5) 圖 15e (右手 R5) 顏色分布以紅色為主，局部藍色。偏左旋吸收，手性程度中等偏強，顯示結構排列可能略偏向單一方向。
- (6) 圖 15f (左手 L1) 顏色分布中心紅色，四周藍色，呈現圓形漸層狀。此分布模式推測存在軸對稱微結構或螺旋形狀，誘導了立體手性。
- (7) 圖 15g (左手 L2) 顏色分布顏色較模糊，紅藍交錯不明顯。手性訊號弱或幾乎無，可能因微結構淺、排列混亂或未完全成形。
- (8) 圖 15h (左手 L3) 顏色分布紅藍交錯，具方向性。此圖與 12a, 12d 類似，顯示微結構具有明確排列方向並能有效誘導手性。
- (9) 圖 15i (左手 L4) 顏色分布大片藍色區，少量紅色斑點。以右旋吸收為主，手性表現中等偏弱，可能為偏壓或局部扭曲導致。
- (10) 圖 15i (左手 L5) 顏色分布紅藍交錯，紋路細緻明顯。具高階手性表現，顯示微結構不僅誘導手性，還有可能存在次級結構特徵如曲率或層次。

整體而言，大多數指紋微結構（尤其是 R1、R4、L1、L3、L5 指紋）表現出顯著的手性光學活性，表明 PDMS 可有效複製並放大表面手性微結構的光學性質。

我們更進一步依據圖像中紅色與藍色強度的差異作為圓二色性手性程度（chirality strength）的近似量來定義手性強度。其計算手性強度的估算公式與其物理意涵表示如下：

對於每張圖像，我們計算其手性強度為：

$$\chi = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |R_i - B_i|$$

其中 $\chi$ 為該圖像區塊的手性程度（平均絕對偏差）， $R_i$ 為第  $i$  個像素的紅色通道值， $B_i$  第  $i$  個像素的藍色通道值， $N$  為該圖像區塊內的像素總數 $|R_i - B_i|$ 用來估算該點「偏紅（左旋吸收）或偏藍（右旋吸收）」的強度。其中通道值是指在數位影像的像素中，所占的亮度強度數值。這個值是 RGB 色彩模型的一部分，這個模型將每個像素的顏色表示為 0 (黑)-255 (純紅)。實



際計算結果我們整理於表格 3 說明。由此實驗，我們了解到圓二色掃描圖可提供對微結構是否具備三維不對稱（手性）能力的直觀評估手段。未顯示手性訊號的圖（如 L2 指紋）則可能是製備不良或微結構不具旋向。

表格 3: 表面指紋微結構手性誘導程度對照表。

| 指紋 | 顏色分布與紋理特徵說明 | 微結構手性誘導程度  | 手性強度 $\chi$ 值 |
|----|-------------|------------|---------------|
| R1 | 條紋紅藍交錯，方向明確 | 強          | 21.17         |
| R2 | 偏紅區塊        | 中等         | 10.35         |
| R3 | 偏藍，紅藍交錯     | 中等         | 20.59         |
| R4 | 條紋紅藍交錯，方向明確 | 強          | 20.10         |
| R5 | 紅色為主，局部藍    | 中等偏強       | 17.59         |
| L1 | 中心紅外圍藍，圓形分布 | 強（可能為旋轉結構） | 21.74         |
| L2 | 顏色模糊，無明顯方向性 | 弱          | 15.36         |
| L3 | 條紋交錯，具方向性   | 強          | 20.60         |
| L4 | 藍為主，紅點分布    | 中等偏弱       | 20.22         |
| L5 | 紋路細緻紅藍交錯    | 強          | 19.17         |

### 三、 旋轉偏斜角( $\theta$ )是否會誘導左旋圓偏振光(LCP)和右旋圓偏振光（RCP）強度的調製

圖 16a - j 展示了十個旋轉偏斜角為  $\theta=20^\circ$  的指紋微結構 PDMS 薄膜之圓二色性二維掃描圖。透過將指紋微結構旋轉  $20^\circ$ ，我們觀察到旋轉對手性光學性質的明顯調控效應。

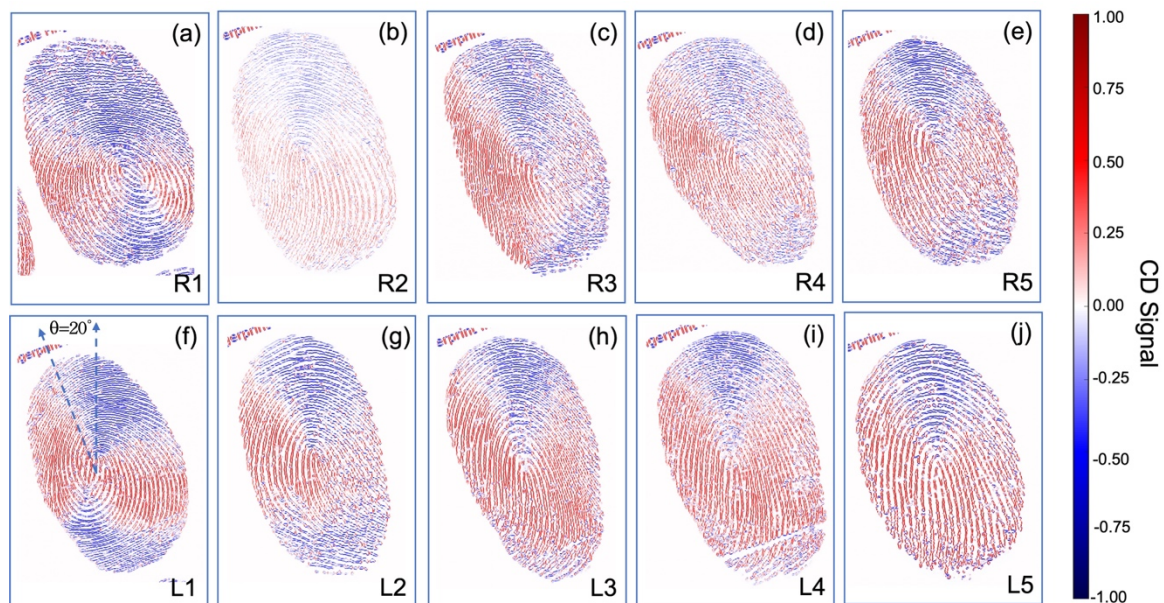


圖 16: (a)-(j) 分別為旋轉偏斜角為 $\theta =20^\circ$  的表面指紋結構 PDMS 薄膜圓二色光譜（CD）2D 掃描圖。(作者自製)



與圖 15 實驗結果相比，部分樣本（如 R1、R3、L1、L3、L4）表現出更強烈的紅藍對比區域，顯示微結構排列方向與入射光偏振角度間的相互作用被有效強化，從而提升手性光學響應。特別地，圖 16i (L4 指紋)顯示出最高的手性強度值（約 $\chi = 21.67$ ），反映在其結構中紅藍區塊沿同心環狀明確排列，推測其指紋紋理方向與旋轉角度相容性良好，產生了最佳的圓二色性耦合條件。相對地，圖 16b (R2 指紋)之手性強度最低（約  $\chi = 9.60$ ），顯示該樣本在旋轉後的微結構排列與圓偏振光之交互作用被削弱，導致手性訊號衰退。

此實驗結果強調了指紋微結構在不同空間取向下對手性光學性的調控潛能。偏斜角度的調整不僅改變了圓二色性訊號的強度，也可能影響其空間分布模式，未來可應用於動態可調型手性光學元件或方向性光感測器設計中。具體說明我們將其整理成表格 4。

表格 4: 旋轉偏斜角為  $\theta = 20$  度手性誘導程度對照表。

| 指紋 | 顏色分布與紋理特徵說明          | 微結構手性誘導程度 | 手性強度 $\chi$ 值 |
|----|----------------------|-----------|---------------|
| R1 | 紅藍對稱明顯，呈橫向分布         | 強         | 18.94         |
| R2 | 整體顏色淡，紅藍不明顯，手性訊號低    | 弱         | 9.60          |
| R3 | 紅色主導，分布集中，具局部強手性區    | 中等偏強      | 17.67         |
| R4 | 紋理橫向排列，紅藍分布均勻        | 中等        | 15.97         |
| R5 | 呈斜紋方向，紅藍稍微偏向紅        | 中等        | 15.27         |
| L1 | 圓心旋出對稱分布，紅藍對稱清晰      | 強         | 17.72         |
| L2 | 紋理雜亂但紅藍明顯，具局部手性區     | 中等        | 15.81         |
| L3 | 條紋向外放射，紅藍交錯強烈        | 強         | 19.40         |
| L4 | 紋理圓環狀，紅藍明顯區分，CD 信號最強 | 非常強       | 21.67         |
| L5 | 結構明確但紅藍相對平衡          | 中等        | 16.13         |

#### 四、 曲率偏斜角(K)是否會誘導左旋圓偏振光(LCP)和右旋圓偏振光（RCP）強度的調製

圖 17a – j 展示了十個具有曲率偏斜角  $K=20$  度的指紋微結構 PDMS 薄膜的圓二色光譜（CD）二維掃描圖。相比於未曲率處理的樣本（圖 15），我們發現整體 CD 訊號有所提升，表明曲率改變了微結構與偏振光之交互作用，進一步誘導或增強手性光學活性。

特別是圖 17c、17d、17h、17i（如 R3、R4、L3、L4）表現出最顯著的手性區域，紅藍區塊呈現對稱或漩渦狀分布，顯示曲率造成了光場在表面上的非對稱耦合，有效提升手性吸收響應。其中，圖 17i 具有最高手性強度（約 $\chi = 22.50$ ），可能對應指紋環紋在曲面上形成更佳的立體不對稱排列。

然而，圖 17b 表現出較低的手性強度(約 $\chi = 10.61$ )，推測其結構特徵與曲率方向不匹配，導致圓偏振光吸收差異不明顯。綜合觀察，曲率偏轉是一種有效控制與調節手性光學性質的手段，具備應用於可調式手性元件、光學安全設計與結構手性感測的潛力。具體說明我們將其整理成表格 5。

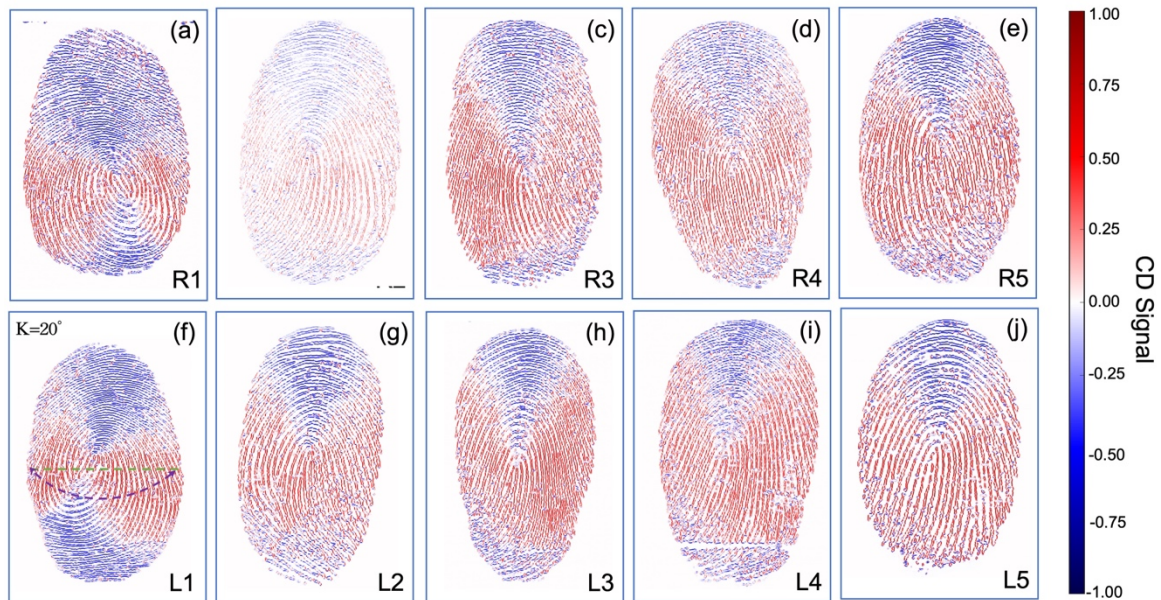


圖 17: (a)-(j)分別為曲率偏斜角為  $K=20^\circ$  的表面指紋結構 PDMS 薄膜圓二色光譜 (CD) 2D 掃描圖。(作者自製)

表格 5: 曲率偏斜角為  $K=20^\circ$  度手性誘導程度對照表。

| 指紋 | 顏色分布與紋理特徵說明                  | 微結構手性誘導程度 | 手性強度 $\chi$ 值 |
|----|------------------------------|-----------|---------------|
| R1 | 紅藍分布對稱，紋理曲率方向與 CD 分布相符，整體手性強 | 強         | 19.29         |
| R2 | 整體顏色較淡，CD 訊號微弱，曲率未有效誘導手性     | 弱         | 10.61         |
| R3 | 顏色飽和，CD 訊號集中於中央偏右側，手性非常明顯    | 非常強       | 21.49         |
| R4 | 紋理較緊密，紅藍對比強烈，顯示良好手性響應        | 強         | 20.84         |
| R5 | 分布呈漸層紅藍帶狀，與曲率導向一致，手性明顯       | 強         | 19.29         |
| L1 | 紅藍交錯，中心部分 CD 信號強，手性中等偏強      | 中等偏強      | 18.47         |
| L2 | 上藍下紅分明，但邊緣顏色較弱，整體手性中等        | 中等        | 16.20         |

|    |                            |      |       |
|----|----------------------------|------|-------|
| L3 | 整體紅藍清晰呈條紋狀，分布平衡，手性強        | 強    | 20.30 |
| L4 | CD 訊號最強，紅藍對稱清晰，具旋向結構感，手性極強 | 非常強  | 22.50 |
| L5 | 分布集中於中下部，紅藍相間，手性中等偏強       | 中等偏強 | 18.13 |

## 伍、討論

本研究透過表面圖案與曲率結合的方法，探討了彈性表面結構的手性光學特性，並首次證實指紋結構具有穩定的手性光學響應。研究結果表明，曲率和偏斜角的調控是實現手性光學特性的重要機制，而指紋的摩擦脊線圖案與曲率的結合進一步增強了手性特性。

為探討微結構排列方式對手性光學性的影響，本研究比較了三種條件下 PDMS 指紋微結構薄膜的圓二色光譜（CD）2D 掃描結果，包括圖 15 的平面排列（無偏轉）、圖 16 的旋轉偏斜角 $\theta = 20$ 度、以及圖 17 的曲率偏斜角 $K = 20$ 度。透過計算每張圖像紅色與藍色通道差值 $|R_i - B_i|$ 之絕對平均值，作為手性強度的量化指標，我們比較了每一處理條件下十個樣本之手性變化趨勢，如圖 18 所示。

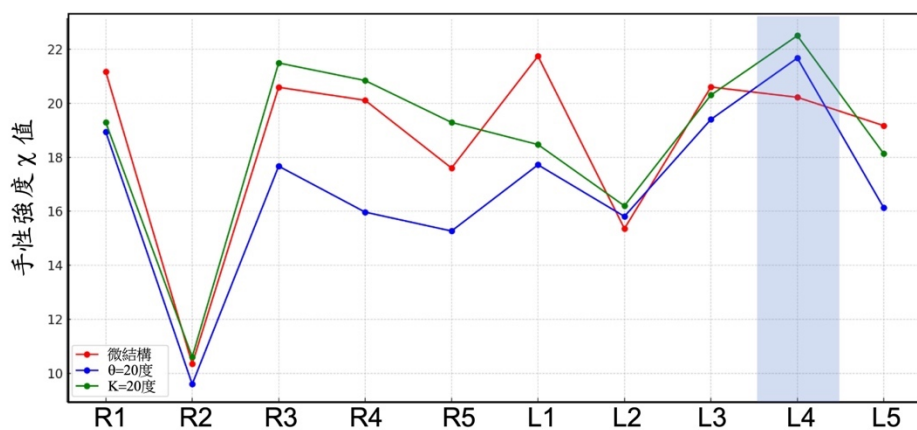


圖 18: PDMS 指紋微結構薄膜的圓二色光譜手性強度比較圖。(作者自製)

分析結果顯示，曲率處理樣本（圖 17）整體手性強度最高，其中樣本 R3、R4、L4 表現出顯著的紅藍分離區域，手性值皆超過 21，顯示曲率幾何形貌能有效改變表面微結構與圓偏振光之耦合模式，進而誘導更強烈的光學手性。相較之下，旋轉偏斜樣本（圖 16）手性強度變化較小，僅部分樣本如圖 16i 達到與平面結構相近的手性表現。平面樣本（圖 15）中多數樣本手性已具明顯特徵，但其方向性受限於指紋自然紋理排列，變化範圍介於旋轉與曲率之間。

而此實驗觀測背後的物理學我們可歸於幾種解釋：

1. 光相互作用的波長依賴性：指紋微結構的行為類似手性繞射光柵，其中波長為：

$$\lambda \approx \frac{d}{n \sin(\theta)}$$

而  $d$  = 指紋脊線週期， $\lambda$  = 波長， $n$  = PDMS（基材）的折射率。

當  $\lambda \approx d$ ，繞射和手性散射達到最大化，當  $\lambda \gg d$  或  $d \ll \lambda$ ，繞射較弱，導致 CD 對比較低。

2. 表面等離子體共振 (SPR) 貢獻：如果塗上一層金屬（例如金），指紋脊線可以充當等離子體結構。對於較短的波長，等離子體波被緊緊地限制在脊線上，從而增加了 CD 對比。對於較長的波長，等離子體效應會擴散，使得指紋脊線更難辨認。

3. 光程差、應變引起變形和偏振效應：可以利用光程差、應變引起變形和偏振效應的物理原理來分析由於曲率增加而引起的圓二色性 (CD) 強度的變化。透過在  $20^\circ$  左偏斜旋轉與施加不同的偏斜曲率（例如  $20^\circ$ ），我們觀察到 CD 強度分佈的系統變化可解釋為：

(1) 光程差和曲率：當指紋結構彎曲時，有效光路長度 ( $L_{eff}$ ) 與脊線相互作用的光的折射率發生變化，從而導致 CD 強度變化。路徑差異  $\Delta L$  由於曲率  $R$  可以近似為：

$$\Delta L = R(1 - \cos\theta)$$

其中,  $R$  是曲率半徑， $\theta$  是曲率引起的角度偏差。對於小曲率角 ( $\theta \approx 4^\circ$ )，其效果微乎其微。作為  $\theta$  增加 ( $20^\circ$ )，CD 訊號偏差較大，導致不同指紋部分之間的光路變化較大，此結果與圖 14 實驗 L4 增強手性強度相符。

(2) 應變引起的雙折射和 CD 調製：曲率不僅會影響光程差，也會對指紋脊造成應變。根據應變光學定律，折射率  $n$  由於機械變形而修改：

$$\Delta n = -\frac{C}{E} \sigma$$

其中， $C$  是光彈常數， $E$  是指紋材料的楊氏彈性係數， $\sigma$  是由於曲率而施加的應力。曲率較高 ( $20^\circ$ ) 會導致指紋結構中局部應力增大，進而造成雙折射效應，進而增加 CD 強度變化。

3. 偏振依賴性和曲率對 CD 的影響：CD 受到左圓偏振光和右圓偏振光之間吸收差異的影響。當曲率增加時，差異吸收和散射效應就會發揮作用。CD 強度變化  $\Delta I_{CD}$  可以與曲率引起的極化變化相關：

$$\Delta I_{CD} = |E_{RCP} - E_{LCP}|$$

其中， $E_{RCP}$ 和 $E_{LCP}$ 分別是右旋和左旋圓偏振光的電場分量。對於小曲率（0–10°），CD 訊號幾乎保持均勻。當曲率超過 20°時，CD 強度波動更大，表示偏振相關吸收更大。

整體而言，曲率導入提供了一種更有效率的手性調控機制，可能源自其所引入的三維不對稱性與局部曲面對電磁場的影響。此結果顯示，在製備具可調手性光學性質的表面結構時，透過結構變形（特別是曲率）進行幾何工程設計，能有效提升手性光學活性，具有應用於手性感測器、光學安全元件、甚至偏振選擇性發光裝置的潛力。

## 陸、結論

本研究以聚二甲基矽氧烷（PDMS）為基材，製備具有表面指紋結構的彈性薄膜，並通過實驗與 ChatGPT 協作計算，深入探討了表面圖案和曲率結合對手性光學特性的影響。研究結果不僅揭示了曲率誘導手性光學特性的機制，也首次證明了指紋具有穩定的手性光學特性。以下為本研究的主要結論：

- 1. 曲率誘導手性光學特性:** 已知平坦的表面結構無法產生手性光學響應，唯有在引入表面結構、偏斜旋轉、與偏斜曲率時，才能因對稱性破缺而產生增強的手性強度。
- 2. 偏斜角對手性的調控作用:** 偏斜角（ $\theta$ ）是實現手性光學特性調控的關鍵參數。當偏斜角為特定值（如 20°）時，手性強度亦有增強效應，證實了偏斜角在對稱性破缺中的重要作用。
- 3. 指紋的手性光學特性與應用潛力:** 不同的指紋模擬樣本的實驗結果首次揭示了指紋具有穩定的手性光學特性，不同個體指紋的光譜差異進一步證明了其在身份辨識技術中的應用價值。

本研究提出了一種基於表面圖案和曲率結合的手性光學調控方法，並首次證明了指紋結構的光學手性特性，為柔性光電元件與物理光學技術的開發提供了新方向。未來可進一步探索其他材料與結構的手性特性，推動高效手性光學元件的實現。

## 柒、參考文獻資料

- [1] Zhao, Y.; Belkin, M.A.; Alù, A. Chirality and Symmetry Breaking in Nanostructures. *Nat. Mater.* **2013**, *12*, 917–920. <https://doi.org/10.1038/nmat3588>
- [2] Gao, W.; Xu, H.; Zheng, L.; Tang, Z. Chiral Plasmonic Nanostructures: Advances and Applications. *Nano Today* **2021**, *36*, 101118. <https://doi.org/10.1016/j.nantod.2020.101118>



- [3] Ding, X.; Wang, Y.; Lu, Y.; Liu, M. Chirality in Two-Dimensional Materials. *Adv. Mater.* **2021**, *33*, 2103271. <https://doi.org/10.1002/adma.202103271>
- [4] Chen, C.; Wang, Y.; Li, H.; Xu, J. Dynamic Control of Chirality in Nanostructures. *Nat. Nanotechnol.* **2017**, *12*, 755–762. <https://doi.org/10.1038/nnano.2017.86>
- [5] Ritchie, J.D.; Zhang, Y.; Huang, J.; Liu, Z. Chirality and Symmetry Breaking in Nanostructures. *Nature* **2013**, *497*, 463–466. <https://doi.org/10.1038/nature12013>
- [6] Pasteur, L. Researches on the Molecular Asymmetry of Natural Organic Products. *Bull. Soc. Chim. Fr.* **1848**, *22*, 210–211.
- [7] Ritchie, C.; Zhao, T.; Zhang, H.; Xu, X.; Wang, L. Symmetry Breaking and Chiroptical Responses in Structured Materials. *Adv. Opt. Mater.* **2018**, *6*, 1800568. <https://doi.org/10.1002/adom.201800568>
- [8] Wang, Z.; Tang, Z.; Kotov, N.A. Chiral Plasmonic Nanostructures: Assembling Metallic Nanoparticles into Helical Structures. *Chem. Rev.* **2020**, *120*, 4994–5057. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.9b00733>
- [9] Yin, Y.; Wang, Y.; Sun, M.; Xu, H. Chiral Nanostructures Induced by Molecular Templates. *Nat. Mater.* **2015**, *14*, 661–667. <https://doi.org/10.1038/nmat4295>
- [10] Zhao, K.; Zhang, S.; Liu, Y.; Ma, R.; Xu, H. Magnetic Field-Induced Chiral Assembly of Plasmonic Nanostructures. *Nano Lett.* **2020**, *20*, 7143–7150. <https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.0c02724>
- [11] Ding, T.; Zhu, J.; Wang, L.; Li, Y.; Yang, W. Limits of Chiral Optical Response in Planar Nanostructures. *ACS Photonics* **2019**, *6*, 2412–2418. <https://doi.org/10.1021/acsphotonics.9b00855>
- [12] Jiang, Y.; Liu, Y.; Li, J.; Zhang, X.; Gu, Z. Bio-Inspired Chiral Photonic Materials: From Structure to Application. *Adv. Funct. Mater.* **2017**, *27*, 1603627. <https://doi.org/10.1002/adfm.201603627>

## 附錄一：圓二色光譜（CD）2D 掃描計算 Python 程式碼

```
import cv2
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
import os

# 圖片路徑與標籤
input_path = "R1.png" # ← 請將此改為你的 R1 圖檔實際路徑
label = "R1"

# 建立輸出資料夾
output_dir = "output_rotated_40deg"
os.makedirs(output_dir, exist_ok=True)

# 函數：使用 OpenCV 進行旋轉
def rotate_image_opencv(image, angle):
    (h, w) = image.shape
    center = (w // 2, h // 2)
    rot_mat = cv2.getRotationMatrix2D(center, angle, 1.0)
    rotated = cv2.warpAffine(image, rot_mat, (w, h), flags=cv2.INTER_LINEAR,
borderMode=cv2.BORDER_REFLECT)
    return rotated

# 讀取灰階圖像
img = cv2.imread(input_path, cv2.IMREAD_GRAYSCALE)
img_rotated = rotate_image_opencv(img, angle=40)

# 計算 Sobel 梯度（近似電場方向強度）
sobelx = cv2.Sobel(img_rotated, cv2.CV_64F, 1, 0, ksize=5)
sobely = cv2.Sobel(img_rotated, cv2.CV_64F, 0, 1, ksize=5)

# 模擬左旋（LCP）與右旋（RCP）電場強度
E_LCP = np.abs(sobelx) ** 2
E_RCP = np.abs(sobely) ** 2
CD_map = E_LCP - E_RCP # 差值代表偏振選擇性

# 畫出結果圖（使用 seismic 色盤，高對比紅白藍）
fig, ax = plt.subplots(figsize=(6, 5))
im = ax.imshow(CD_map, cmap='seismic', vmin=-1e8, vmax=1e8)
```

```
ax.axis('off')
plt.tight_layout()

# 儲存圖像
output_path = os.path.join(output_dir, f"{label}_CD_map_rot40deg_fullview.png")
plt.savefig(output_path, dpi=300, bbox_inches='tight', pad_inches=0)
plt.close(fig)

print(f"✔ 已儲存至：{output_path}")
```