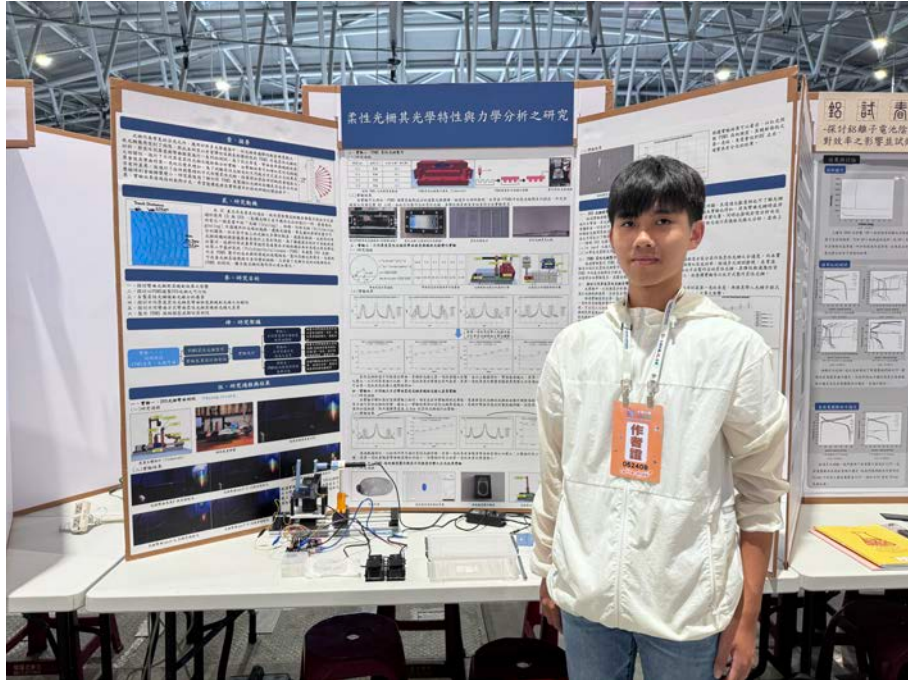


2025年臺灣國際科學展覽會 優勝作品專輯

作品編號	100009
參展科別	工程學
作品名稱	柔性光柵其光學特性與力學分析之研究 The Study of optical properties and stress analyzing of flexible diffraction grating
就讀學校	慈濟學校財團法人慈濟大學附屬高級中學
指導教師	江一珉
作者姓名	杜竑寬
關鍵詞	<u>繞射光柵(Diffraction grating)、 PDMS(Polydimethylsiloxane)、3D列印(3D printing)</u>

作者簡介



我是花蓮慈濟大學附中杜竣寬，原本想研究肥皂泡，但因延伸性不足而改變方向。查文獻時發現肥皂泡的虹彩的原理與光柵有所關聯。然而，市售光柵彈性差、不易拉伸，我希望改善這些問題，讓光柵應用更廣泛，因此展開了這項研究。

經過了一年半的努力，終於獲得了不錯的成果，感謝一路以來協助我的指導老師、教授與助教，沒有您們就沒有現在的我。

2025 年臺灣國際科學展覽會

研究報告

科別：工程學

作品名稱：柔性光柵其光學特性與力學分析之研究

The Study of optical properties and stress analyzing of flexible
diffraction grating

關鍵詞：繞射光柵(Diffraction grating)、

PDMS (Polydimethylsiloxane)、

3D 列印(3D printing)

Abstract

Diffraction gratings are commonly used in optical instruments as dispersive elements. However, their typically low elasticity and high hardness limit their versatility. This study explores using PDMS, a material known for its flexibility and malleability, to create flexible gratings. Tests were conducted on gratings of varying thicknesses and bending degrees. An experiment examining the diffraction points of flexible gratings with different thicknesses was conducted to assess the effects of thickness and bending on diffraction patterns. The results indicate that increasing the thickness of the flexible grating enhances the rate of change in the first bright fringe under bending while reducing the thickness decreases this rate. Advanced experiments investigated how various applied forces impact the diffraction properties of flexible gratings. The gratings were stretched and compressed, showing that stretching increased the grating pitch, whereas compression decreased it. The study aimed to determine if PDMS could replicate grating-like structures that produce diffraction effects. Results revealed that the replicated fingerprint model displayed similar characteristics, with potential for practical applications in the future.

摘要

光柵作為常見的分光元件，應用於許多光學儀器中。然而，傳統光柵彈性較差且硬度較高，限制了其應用範圍。本研究利用具有高彈性和易形變特性的 PDMS 作為柔性光柵的材料，對不同厚度和彎曲程度的光柵進行一系列測試。為了探討厚度和彎曲曲率對繞射效果的影響，進行了不同厚度柔性光柵的繞射點分析實驗。實驗結果顯示，增加柔性光柵的厚度會提升其彎曲時第一亮紋的變化率；相反，減少厚度則會降低該變化率。隨後的研究進一步探討不同施力方式是否會影響柔性光柵的分光效果。通過拉伸和壓縮光柵，發現拉伸會使光柵的軌距變大，而壓縮則會使軌距變小。此外，研究還探討了利用 PDMS 複製類似光柵的結構是否具有分光效果。實驗結果顯示，複製的指紋確實展現了類似特性，期望未來能夠將這些特性實際應用於相關領域。

壹、前言

一、研究動機

在 3C 產品尚未普及的過去，欲欣賞影集或聆聽音樂最方便的方式莫過於使用 CD 與 DVD。使得光碟片在手機尚未出現時風行一時，最重要的功臣之一就是其中的「光柵 (Grating)」結構。衍射光柵 (Diffraction grating) 不僅運用於光碟的燒錄，還與光譜儀、單色儀的原理有密不可分的關係。但目前市面上的光柵大多彈性較差、不易形變，這使得利用光柵結構的精密儀器會在設計上受到限制。為了讓儀器在設計上能夠更加靈活，我利用在業界常被用來複製奈米級結構並具有高透光與高彈性的聚二甲基矽氧烷 (Polydimethylsiloxane) 來複製 DVD 光柵，而且 PDMS 製作的成本與對環境的破壞極低，製作流程也很簡易。這樣即可改善光柵易損壞與不易型變的缺點，又保留了光柵分光的功能與結合 PDMS 的可變性，讓往日儀器的應用更加靈活。

二、研究目的

本研究欲利用 PDMS 複製 DVD 上的繞射光柵，以增強原先光柵的彈性，最後透過 3D 列印自製儀器來彎曲 (Bending) 柔性光柵，並分析其光學特性，研究目的如下：

- (一) 探討彎曲光柵對其繞射效果之影響
- (二) 探討以 PDMS 複製 DVD 光柵之可行性
- (三) 自製柔性光柵繞射光線分析儀器
- (四) 探討不同厚度柔性光柵其彎曲程度與繞射光線之相關性
- (五) 探討不同彎曲方式彎曲柔性光柵其繞射光線之差異
- (六) 探討 PDMS 指紋模型之結構與特性

三、文獻回顧

(一) 衍射光柵 (Diffraction Grating)

衍射光柵是一種將由許多不同波長組成的光按波長劃分成光成分的光學元件。最簡單的光柵是具有大量均勻間隔的平行狹縫的光柵。當白光進入光柵時，光成分以由各自波長確定的角度發生衍射。挑選出衍射光可以選擇所需的光成分。簡而言之，對於進入相鄰狹縫的平行光束，當光程差是波長的倍數時，光被增強。來自所有狹縫的光以相同的方式增強，產生「衍射光」。若 α 為入射角 β 為衍射角，則兩者之關係可將符合下列方程式：

$$d(\sin(\alpha) - \sin(\beta)) = m\lambda$$

d ：狹縫之間的間距 (光柵週期)

m ：衍射級數 ($m=0, \pm 1, \pm 2, \dots$) λ ：波長

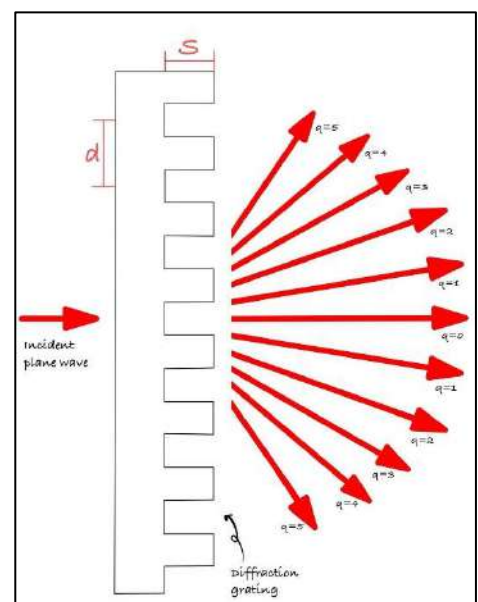


圖 1 光柵分光示意圖
(作者自繪)

(二) 數位多功能光碟(Digital Versatile Disc)

DVD 是一種用於資料儲存和多媒體平台的光碟類型，可以在電腦中存儲大量且多種類的數據。DVD 內部有許多等距、平行的鋸齒狀凹槽(繞射光柵)，因此 DVD 在日下會見到其繞射光線。本實驗使用的 DVD 直徑為 120mm，厚度為 1.2mm，軌跡間隙為 $0.74\ \mu\text{m}$ ，最小坑長為 $0.4\ \mu\text{m}$ 。會選擇 DVD 而不是 CD，是因為 DVD 之光柵寬度較小，使得其繞射光線較好觀察，便於後續的繞射光線分析。

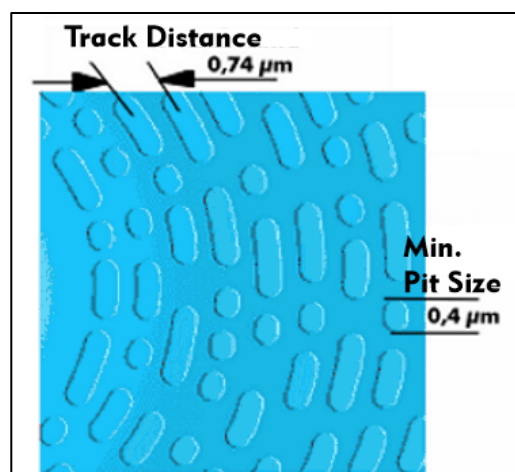


圖 2 DVD 光柵結構

(圖片來源：itwissen.info)

(三) 聚二甲基矽氧烷(Polydimethylsiloxane, PDMS)

聚二甲基矽氧烷是一種高分子有機矽化合物，在微機電製程中為重要材料，且其透光性良好及因為低楊氏模量而具有高度彈性，並可以進行奈米等級的「軟微影技術」，故選擇其材料進行光柵結構的轉寫。PDMS 又分成主劑與硬化劑，兩者的比例以質量比 10：1 作為混和，反應式如下：

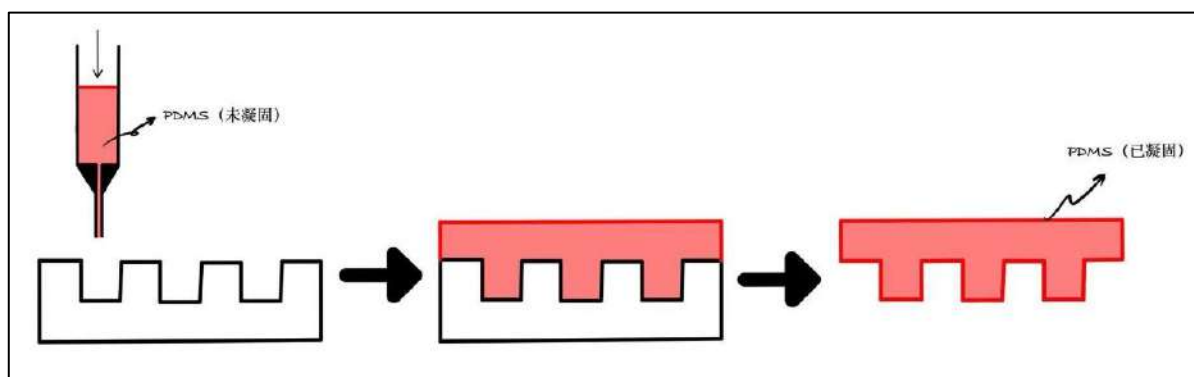
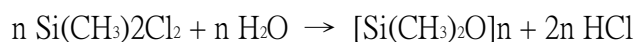


圖 3 柔性光柵複製奈米結構示意圖(作者自繪)

(四) 指紋

又稱指模，指紋皮膚組織分為表皮、真皮、皮下組織分層連接而的，廣義來說，指紋包含了手之指節紋、手掌紋及足紋(腳趾及腳掌紋)等，因這些紋線特徵分布，每個人都不相同，故形成個人獨特的生物特徵。本研究在評審老師指點下意外發現，人類的指紋也是一種類光柵的結構，因此將指紋製成柔性光柵並觀察其結構與測試光學特性。

貳、研究設備與器材

一、研究器材

六角板手 (M6,M5,M4,M3,M2)	螺絲 (M6,M5,M4,M3,M2)	DVD 光碟片 (直徑 120mm)	雷射筆 (660nm)
杜邦線	滑軌組	Arduino UNO 板	USB 連接線
電源供應器	LED 燈珠	步進馬達驅動版	電阻
感光元件	攝影機	限位開關	可變電阻
坩鍋	鋁箔貼紙	藥匙	雙凸透鏡
剪刀	鑷子	美工刀	絕緣膠帶
滴管	酒精	電子秤	鋁箔膠帶

表 1 本實驗研究器材

二、研究設備

名稱	圖 4 3D 列表機 (作者自攝)	圖 5 雷射切割機(作者自攝)
圖片		

表 2 本實驗研究設備

三、原料

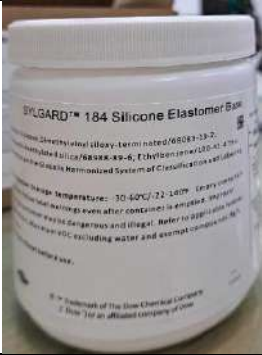
名稱	圖 6 PDMS 原料 a 劑(主劑) (作者自攝)	圖 7 PDMS 原料 b 劑(硬化劑) (作者自攝)
圖片		

表 3 本實驗研究原料

參、研究過程與結果

一、本實驗流程圖如下圖 8，研究過程與結果敘述如下：

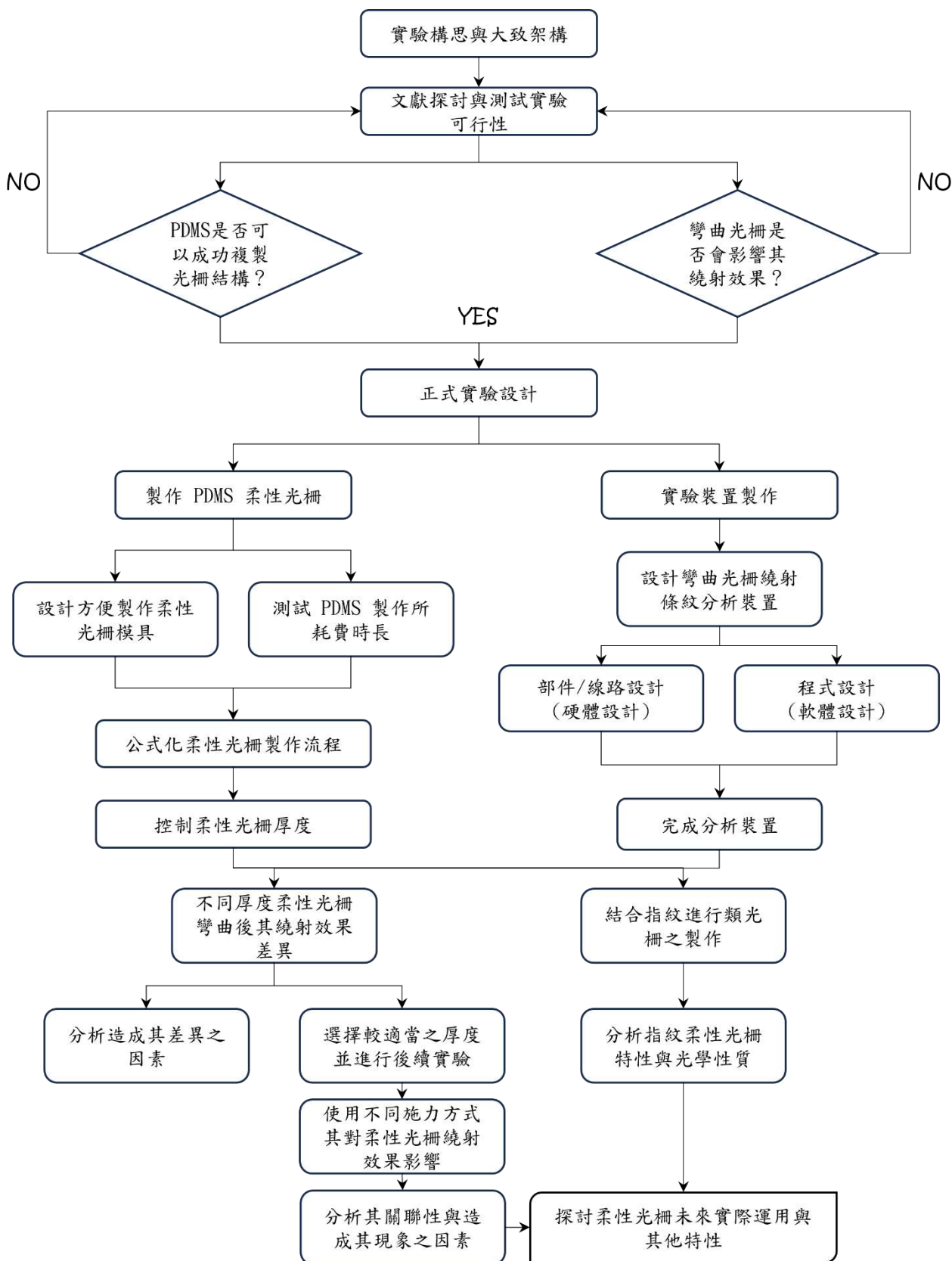


圖 8 實驗流程圖

二、實驗一：彎曲光柵對其繞射效果影響測試

光柵在受到外力彎曲時，表面之週期性凹槽會因外力而形變，使得週期會有增加或減少的情況，增加或減少取決於光柵受到壓應力或拉伸應力，進而造成其繞射光線發生變化：

(一) 光碟片樣品製作，如表 4：

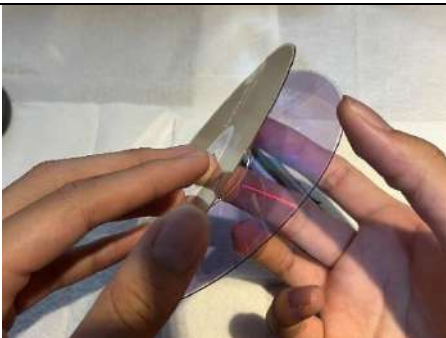
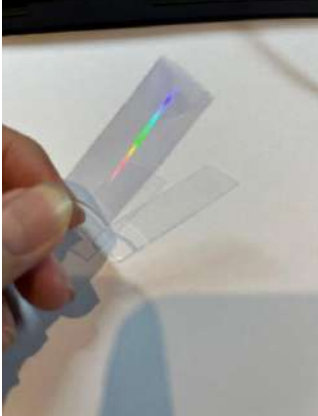
步驟	圖示	說明
1		將光碟片從邊緣用剪刀剪一小刀，以便分開上下層。
2		沿著切口以美工刀將上下兩層塑膠材質保護層分離。
3		以酒精和拭鏡紙擦拭其中間染料，而有染料那面即為光柵面。
4		剪下合適大小的光柵片做為實驗樣品。

表 4 光碟片樣品製作過程(圖片皆為作者自繪)

(二) 彎曲裝置設計

1. 裝置主體設計

- (1) 滑軌組：使裝置上的各個部件皆能夠因應不同情況而自由改變位置。
- (2) 聚光部件：以雙凸透鏡將LED燈光線聚焦，以控制光線入射方向。
- (3) 固定光柵部件：以螺絲將光柵材料固定於其部件。
- (4) 彎曲光柵部件：將釣魚線固定於光柵片上，釣魚線連接於螺絲，轉動螺絲釣魚線即可被拉伸，連帶光柵材料形變。
- (5) 攝影機：記錄光柵材料彎曲後的繞射光線與其彎曲角度，便後續分析。

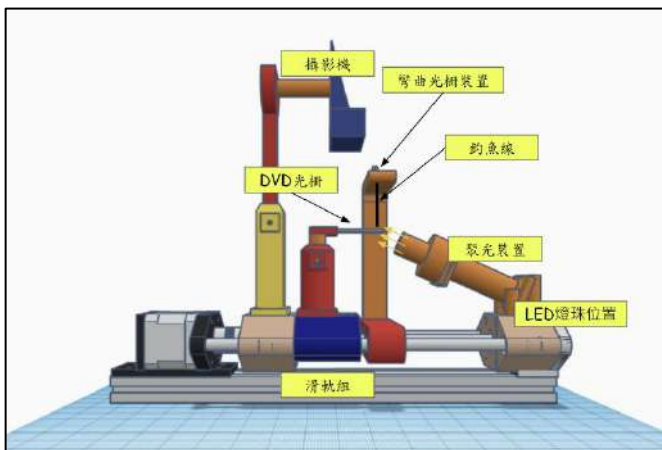


圖 9 Tinkercad 光柵彎曲裝置設計圖(作者自繪)

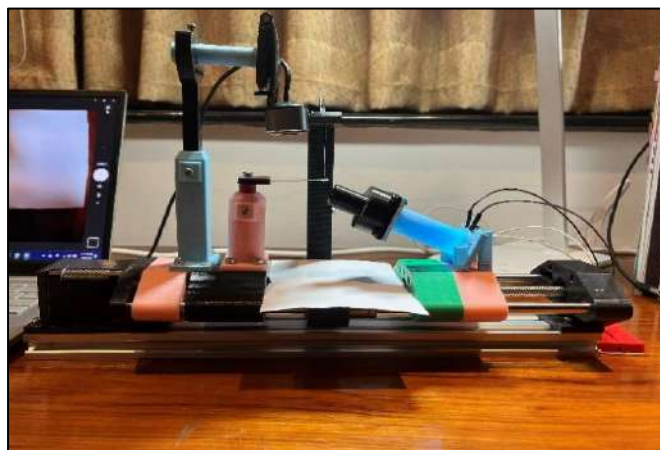


圖 10 光柵彎曲裝置(作者自攝)

2. 線路設計

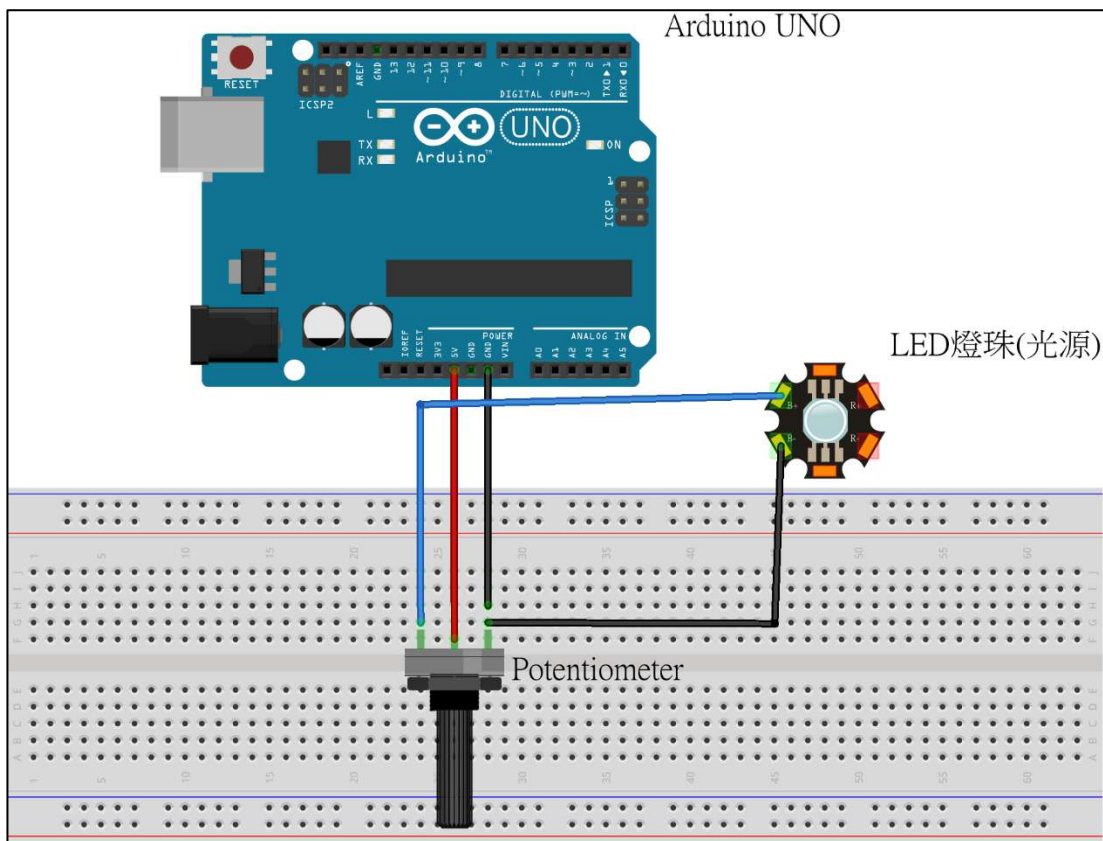


圖 11 Fritzing 光柵彎曲裝置線路設計圖(作者自繪)

(三) 實驗步驟

1. 彎曲光柵其繞射光線影像紀錄

- (1) 各線路接通後，將 LED 燈的亮度調整到繞射光線能夠清晰被拍攝的程度。
- (2) 以螺絲旋轉兩圈為一結點，並以攝像機紀錄其光柵彎曲情況與其繞射光線。
- (3) 重複步驟(2)至螺絲完全鎖緊。

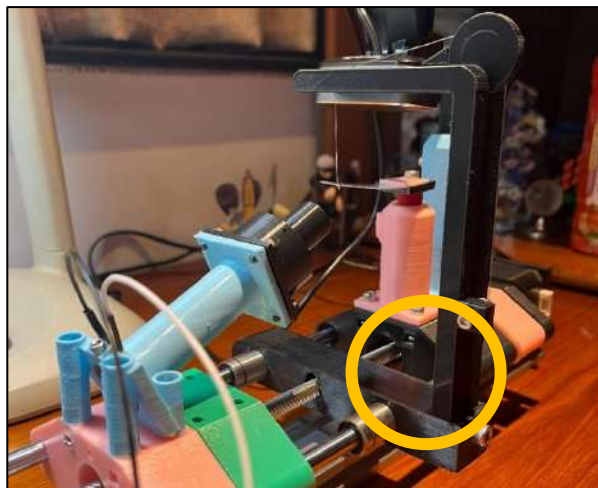


圖 12 實驗過程示意圖(橘圈即為鬆緊螺絲) (作者自攝)

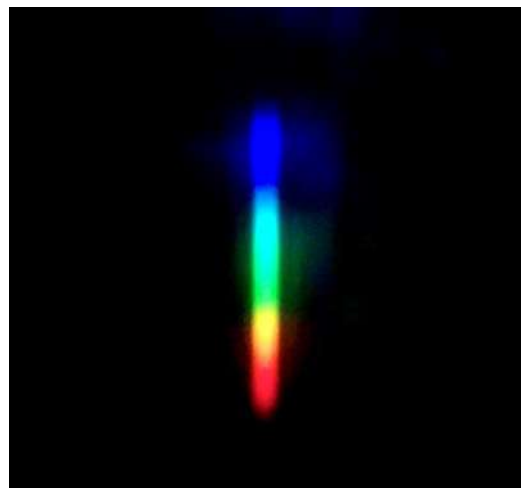


圖 13 繞射光線影像紀錄(作者自攝)

2. 影像分析方法，如表 5：

步驟	圖示	說明
1		將影像紀錄以 TRACKER 開啟
2		以未彎曲之光柵長度作校準(光柵原長為 3cm)

3

測量其拉伸之最高點至原水平線之距離。

4

螺絲轉動圈數	height	weight	$\tan \theta$
0	0	3	
2	0.46	2.821	0.163063
4	0.782	2.72	0.2875
6	0.985	2.919	0.337444
8	1.336	2.724	0.490455

計算其 $\tan$ 值作為角度變化之數值，最後觀察其繞射光線改變。

表 5 彎曲角度影像分析過程(圖片皆為作者自攝)

(四) 實驗結果：

本研究著重於探討柔性光柵其彎曲後之分光性質與效果，因此要先由一般的光柵片(DVD)進行測試並探討其可行性。

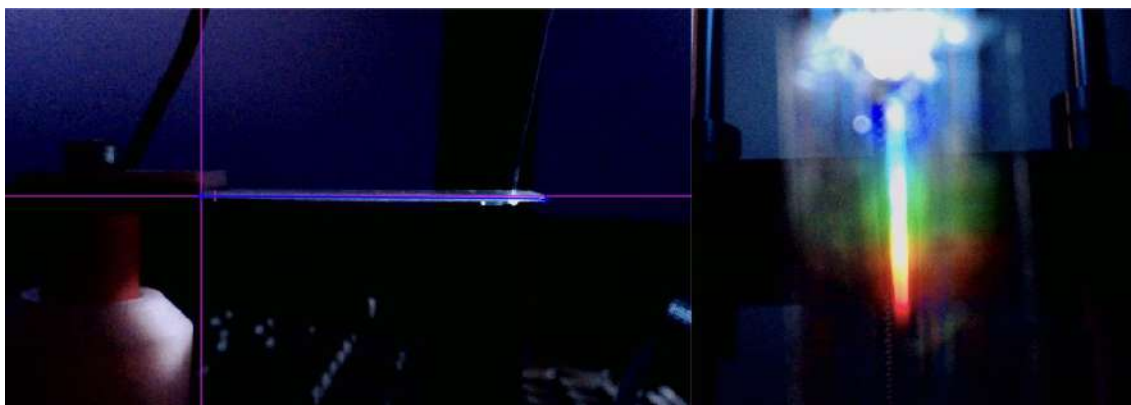


圖 14 光柵彎曲角度 0° 其分光效果(作者自攝)

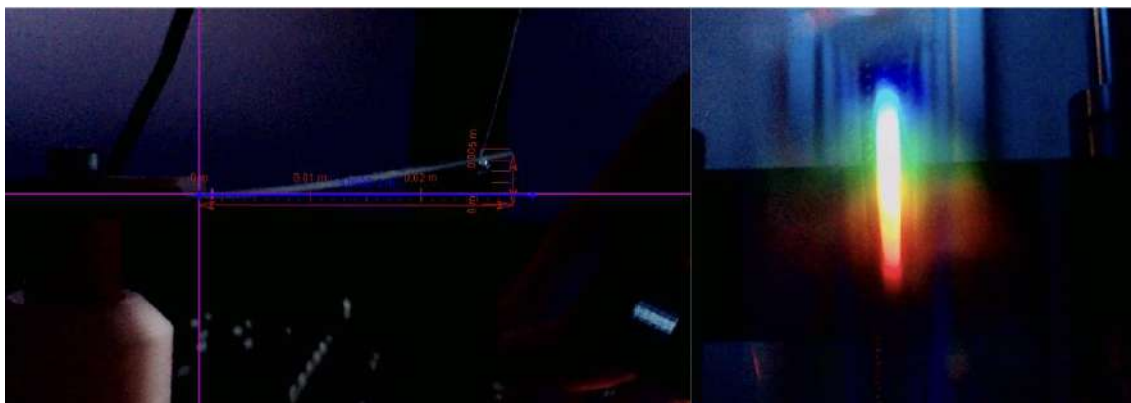


圖 15 光柵彎曲 $\tan \theta = 0.26$ 其分光效果(作者自攝)

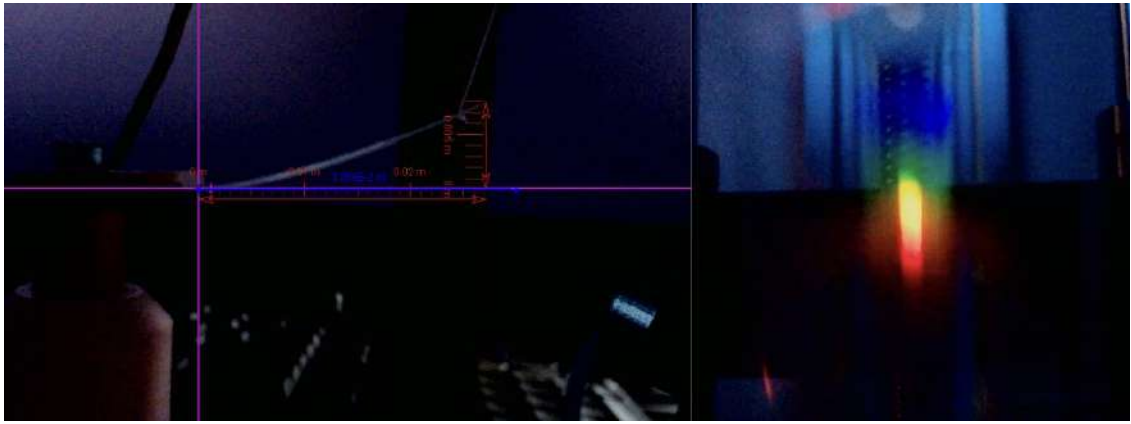


圖 16 光柵彎曲 $\tan \theta = 0.29$ 其分光效果(作者自攝)

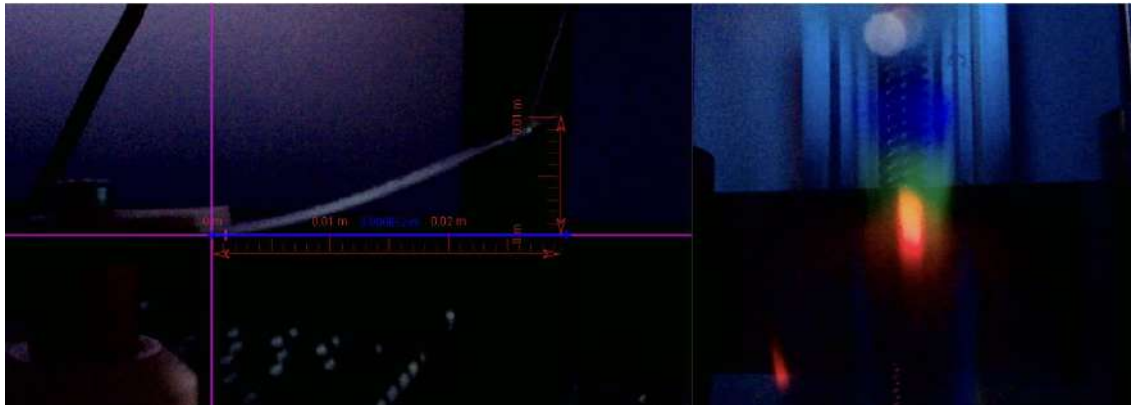


圖 17 光柵彎曲 $\tan \theta = 0.34$ 與其繞射光(作者自攝)

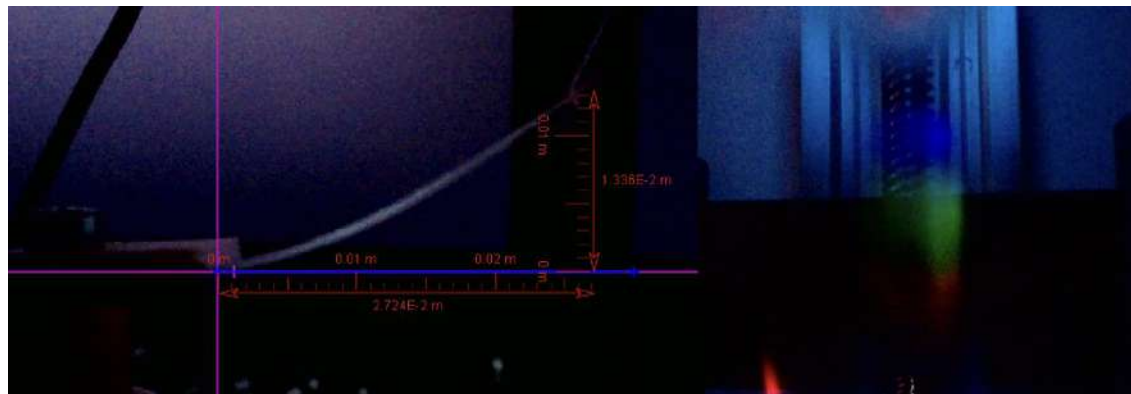


圖 18 光柵彎曲 $\tan \theta = 0.49$ 與其繞射光(作者自攝)

根據實驗結果可以看出，DVD 光柵經外力彎曲後，其繞射光線確實產生了變化，其隨著彎曲角度的增加，繞射光線逐漸消失於固定鏡頭中，若要更深入討論其現象需搭配光譜儀測量或以光強度分析儀進行單色光分析。

三、實驗二：製作 PDMS 柔性光柵

PDMS 通常被用於微小結構的轉寫上，因此想利用此材料進行 DVD 光柵的複製，製作出柔性光柵，為了降低 PDMS 的消耗量與增加製作成功率，故透過本實驗嘗試將其製作流程公式化，也以便後續變因的控制：

(一) 容器設計

1. 厚度控制：柔性光柵之厚度會影響其彎曲後的平均受力，造成同樣角度不同厚度的分光結果有所不同，因此利用螺絲與齒輪結合，每順時針轉動一圈齒輪，下壓板相對會上升 0.07cm。

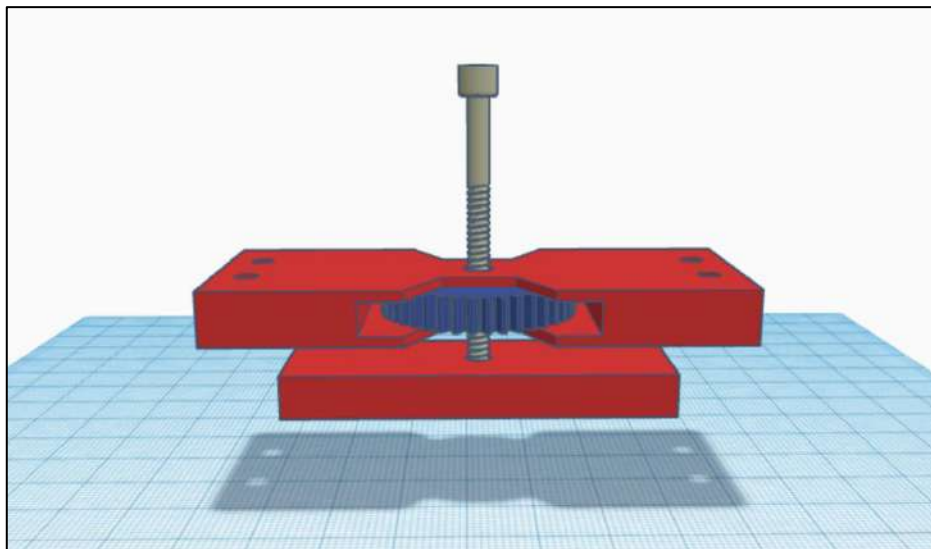


圖 19 Tinkercad 厚度控制部件設計(作者自繪)

2. 脫模便利性：PDMS 凝固後雖然具有彈性，但在脫模時還是有受損的風險，因此利用四面皆可拆解的容器內層接貼上鋁箔貼紙，將 PDMS 脫模之耗損率降低。

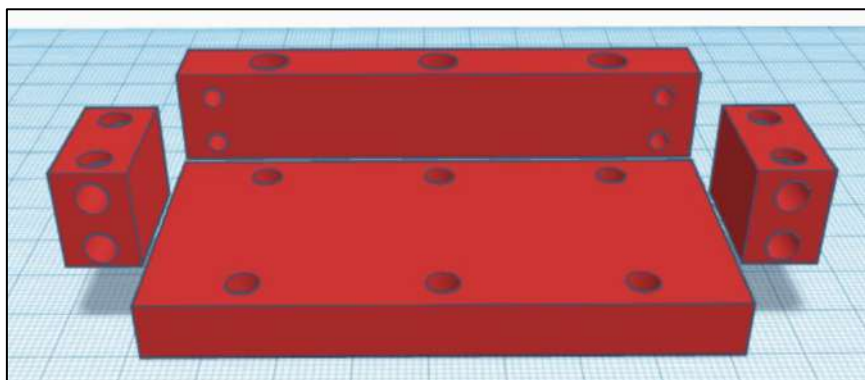


圖 20 Tinkercad 易脫模模具設計(作者自繪)

(二) 控制混和比例與凝固環境

由文獻可知 PDMS 會受到其製作混和比例與凝固環境而造成其硬度、彈性等性質有所不同，依據文獻(參考文獻八)也得知以主劑：凝固劑 = 10：1 的重量比混和而製作出的 PDMS 柔性光柵在性質方面最符合本實驗需求，故後續實驗皆以此比例進行柔性光柵的製作。凝固環境的部分本實驗選擇在常溫常壓下進行凝固，因常溫常壓環境不需借助精密儀器即可完成凝固。

厚度(cm)	溫度(°C)	比例(主劑：硬化劑)
0.2	常溫	10:1
0.4	常溫	10:1
0.6	常溫	10:1
0.8	常溫	10:1

表 6 控制比例與凝固環境數值

(三) 實驗步驟

1. PDMS 混和劑製作，如表 7：

步驟	圖示	說明
1		將坩堝放置電子秤上並歸零。
2		以藥匙將 PDMS 主劑倒至坩堝中並測量其質量。
3		以滴管吸入適量 PDMS 硬化劑，並滴入其符合比例(重量百分比)至坩堝。

4		以藥匙攪拌均勻。
---	---	-----------------

表 7 PDMS 混和液製作過程(圖片皆為作者自攝)

2. 厚度調整

- (1) 將裁切過的光柵片(DVD)放置容器中(光柵面朝上)。
- (2) 倒入 PDMS 混和劑均勻倒入模具中。
- (3) 在下壓板黏上玻璃片，並將其蓋至模具上。
- (4) 將下壓板轉至所需厚度。

3. 凝固混和液

- (1) 將模具放置常溫常壓環境下靜置，避免溫早晚溫差較大的地點。
- (2) 將利用計時器記錄其凝固所需總時長。

4. 凝固後脫模

- (1) 將模具四邊螺絲轉開，把其剝離使柔性光柵保持完整性。
- (2) 用美工刀將 DVD 光柵扳起，即可得到完整的柔性光柵。
- (3) 製作 PDMS 柔性光柵

(四) 實驗結果

由實驗可以得知，PDMS 確實是能夠成功的複製光柵溝槽，經過多次測試發現，在常溫下 PDMS 中的氣泡能夠自行排出，而完全凝固大約需要 60 小時，由此方法製作出的柔性光柵，其彈性與適應性皆相當符合本實驗需求，故後續實驗皆以此方法進行柔性光柵之製作。

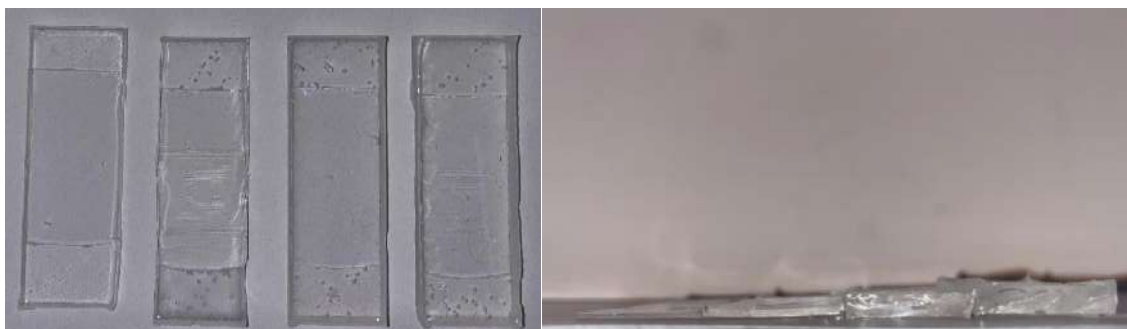


圖 21、22 柔性光柵成品(左圖)/柔性光柵厚度比較(右圖) (作者自攝)

四、實驗三：不同厚度柔性光柵其彎曲程度與繞射光線變化實驗

光柵在單色雷射光照射下會產生繞射條紋，而可藉由此條紋去第一亮紋角度帶入光柵方程式計算其雷射光波長，也可推算此光柵軌距的變化大小，以推測出光柵在不同彎曲程度下的改變。此研究以雷射光繞射不同厚度的柔性光柵，並將其彎曲曲率以模具固定，觀察第一亮紋的長度改變，分析後選出適當之厚度的柔性光柵，進行柔性光柵壓縮與拉伸之實驗，最後對研究結果進行分析：

(一) 裝置設計

1. 彎曲數值定義：以模型內層圓弧最低點至向上延伸 10cm 作為高，而延伸點至兩側圓弧距離為底，側面距離計算方式為 $\tan \theta = \frac{10}{\sqrt{20R-100}}$ ，推算過程如圖。此實驗分成 6 種曲率，分別為無彎曲、 $\tan \theta = 0.2$ 、 $\tan \theta = 0.4$ 、 $\tan \theta = 0.6$ 、 $\tan \theta = 0.8$ 、 $\tan \theta = 1.0$ ，各 $\tan \theta$ 值與其對應之曲率半徑如表 6。

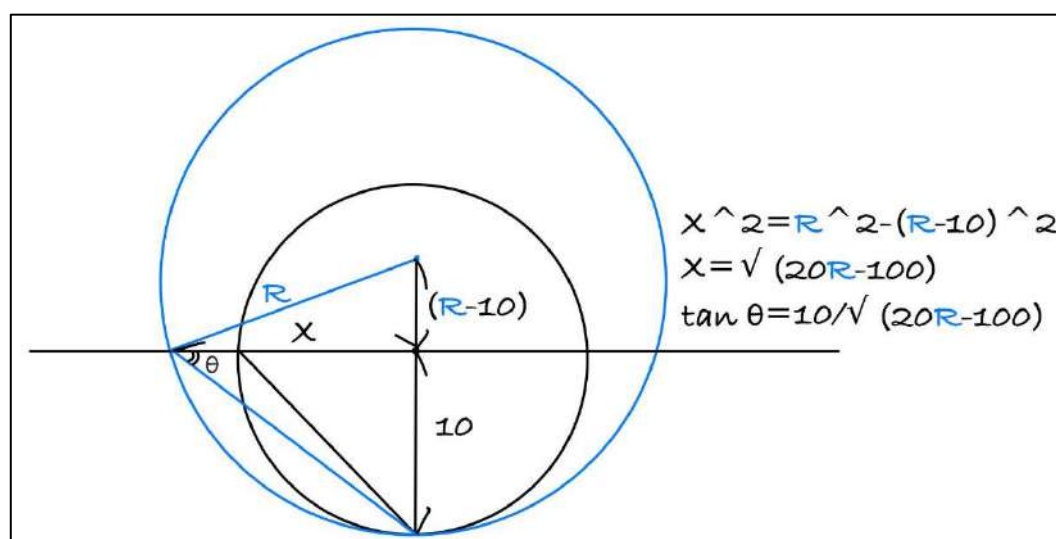


圖 23 彎曲角度曲率半徑推算過程(radius of black circle:10 ; radius of blue circle:R) (作者自繪)

$\tan \theta$	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0
r(mm)	130.00	36.25	18.89	12.81	10.00

表 8 彎曲角度其對應曲率半徑量值

2. 設備架設

- (1) 滑軌組：固定光源與光強度分析儀之相對位置。
- (2) 彎曲模型：固定柔性光柵其彎曲曲率及其位置。
- (3) 雷射筆：作為本實驗光源，波長為 660nm。
- (4) 雷射筆固定架：控制雷射筆高度，上方螺絲可控制雷射筆開關。
- (5) 步進馬達：控制光敏電阻偵測角度。

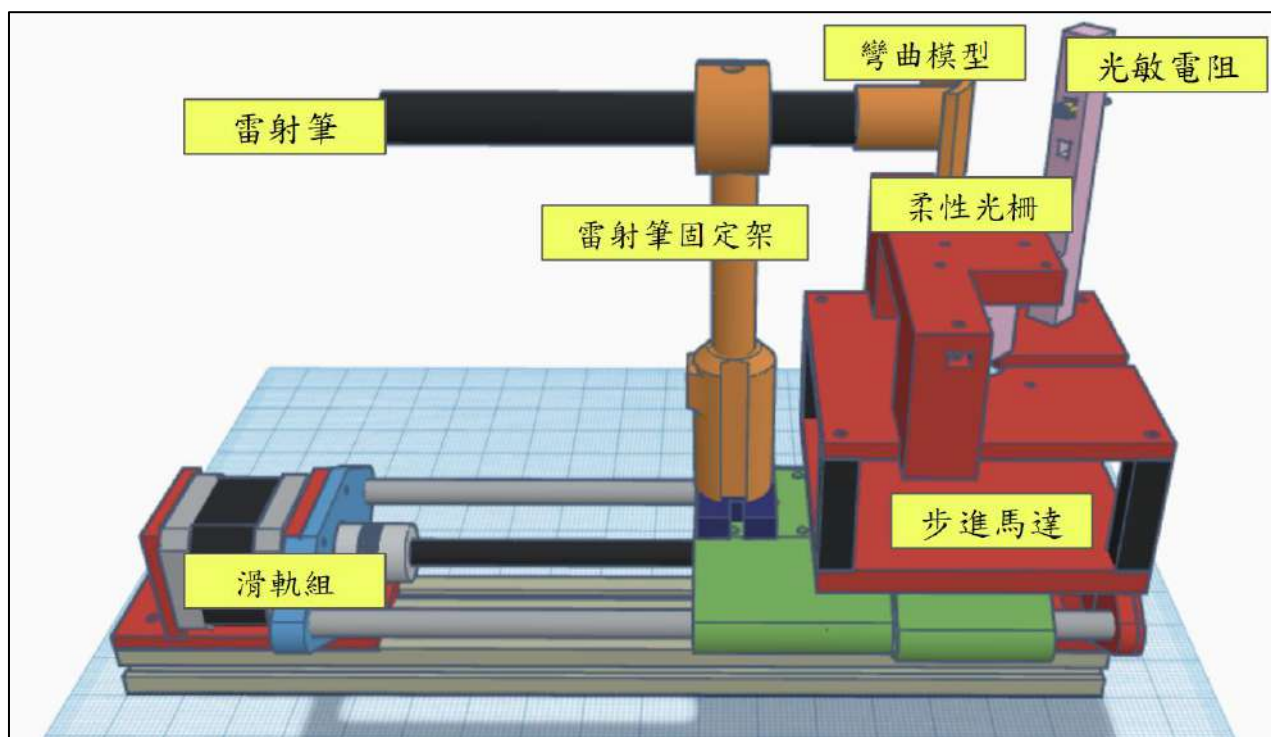


圖 24 Tinkercad 光柵繞射光線分析儀設計圖(作者自繪)

3. 線路設計：

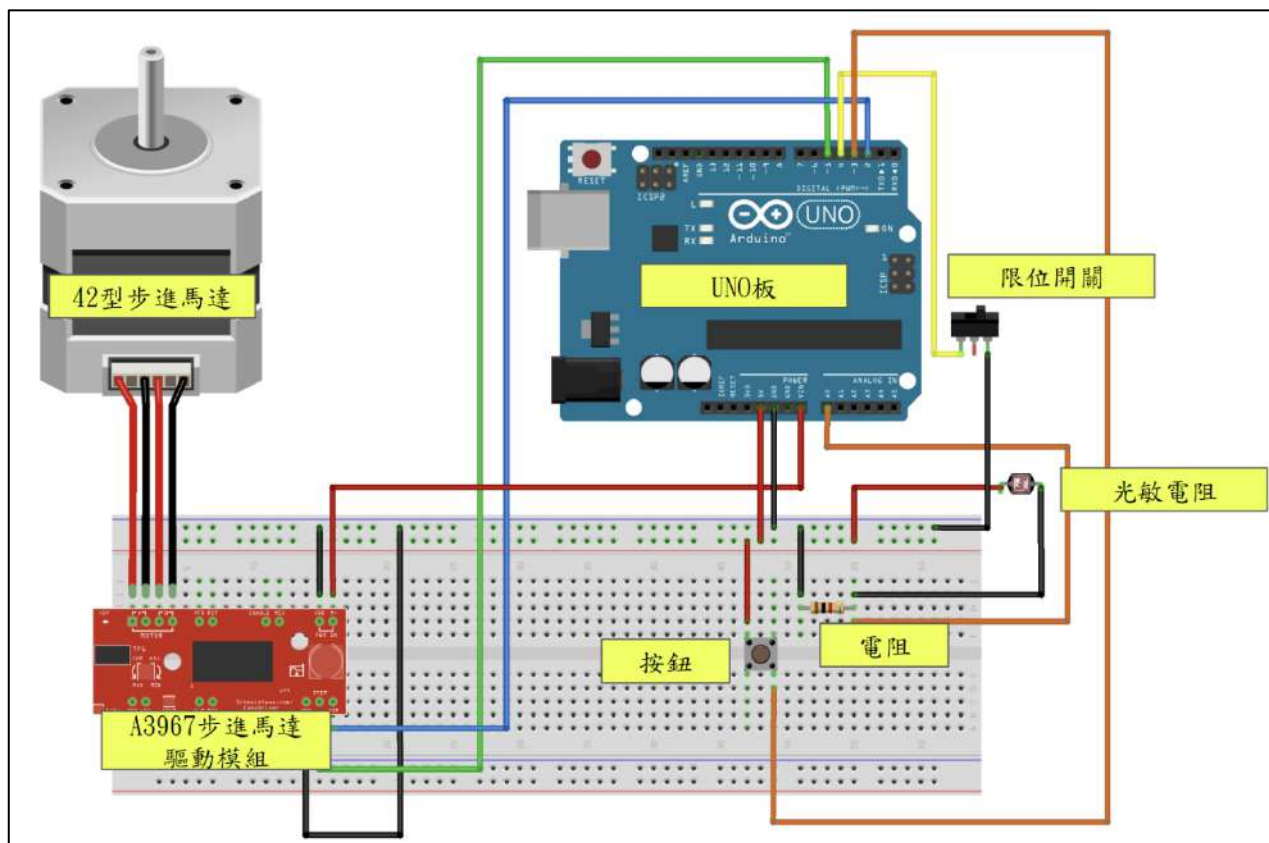


圖 25 光強度分析儀線路設計圖(作者自繪)

4. 光譜儀程式碼：

```
//光強度分析儀程式碼 掃描90度 取平均 校正
int dirpin = 2;
int stepin = 5;
int i;
const int sw = 4; //microswitch D4
float sensorValue; //讀取信號
float A;
int t;

float theta1;
float theta2;
int gate_P = A1; //感測器
int correction = false;
int button;
int button_P = 3;
int gate;

void setup() {
  //Serial.begin(9600);
  Serial.begin(9600);
  pinMode(A0, INPUT);
  pinMode(button_P, INPUT_PULLUP);
  pinMode(gate_P, INPUT);
  pinMode(sw, INPUT_PULLUP); // 限位開關上拉
  pinMode(dirpin, OUTPUT);
  pinMode(stepin, OUTPUT);
}

//[a][i][j]

void loop() {

  button = digitalRead(button_P);

  if (button == LOW && correction == false) {

    gate = digitalRead(sw);

    while (gate == 0) {

      stepForward();
      gate = digitalRead(sw);
      //Serial.println(gate);
      delay(500);
    }

    stepBack();
    delay(500);
    stepBack();
    delay(500);
    stepBack();
    delay(500);
    stepBack();

    correction = !correction;
  }

  delay(3000);

  if (correction == true) {

    for (float i = 0; i < 200; i = i + 1) { // -90到0掃描

      sensorValue = 0;

      for (t = 0; t < 50; t = t + 1) {
        A = analogRead(A0);
        sensorValue = sensorValue + A;
        t = t + 1;
        delay(20);
      }

      Serial.println(sensorValue / 5);
      delay(500);
      stepBack();
    }

    delay(500);
```

圖 26 光強度分析儀程式碼-1

```
for (float i1 = 0; i1 < 200; i1 = i1 + 1) { // 0到90掃描

  sensorValue = 0;
  //delay(500);
  for (t = 0; t < 50; t = t + 1) {
    A = analogRead(A0);
    sensorValue = sensorValue + A;
    t = t + 1;
    //delayMicroseconds(1000);
    delay(20);
  }

  Serial.println(sensorValue / 5);
  delay(500);
  stepForward();
}

delay(500);

sensorValue = analogRead(A0);
Serial.println(sensorValue); // 量測最後一個角度
delay(1000);

stepBack();
delay(500);
stepBack();
delay(500);
stepBack();
delay(500);
stepBack();
correction = !correction;
}

}

void stepForward() {
  digitalWrite(dirpin, LOW); // 控制方向
  delay(100);

  for (i = 0; i < 2; i = i + 1) {
    digitalWrite(stepin, LOW);
    delayMicroseconds(1000);
    digitalWrite(stepin, HIGH);
    delayMicroseconds(1000);
  }
}

void stepBack() {
  digitalWrite(dirpin, HIGH); // 控制方向
  delay(100);

  for (i = 0; i < 2; i = i + 1) {
    digitalWrite(stepin, LOW);
    delayMicroseconds(1000);
    digitalWrite(stepin, HIGH);
    delayMicroseconds(1000);
  }
}

void stepout() {
  digitalWrite(dirpin, LOW); // 控制方向
  delay(100);

  for (int k = 0; k < 7; k = k + 1) {

    for (int ii = 0; ii < 100; ii = ii + 1) {
      digitalWrite(stepin, LOW);
      delayMicroseconds(1000);
      digitalWrite(stepin, HIGH);
      delayMicroseconds(1000);
    }

    delay(1000);
  }
}

}
```

圖 27 光強度分析儀程式碼-2

(二) 實驗步驟

1. 儀器校正

- (1) 將柔性光柵固定於無彎曲角度彎曲模型，並將雷射光固定。
- (2) 利用光強度分析儀測量其繞射亮紋分布。
- (3) 將第一亮紋角度代入光柵方程式，計算出其相對應波長量值並與實際波長比對。
- (4) 若計算後與實際有異，則將柔性光柵位置進行微調並重複步驟(3)直到數據吻合，校正即完成。

2. 正式實驗

- (1) 按重置按鈕使光敏電阻角度位置調至 0° (即觸發限位開關)。
- (2) 開始進行 0° 至 90° 的光強度分析(因光柵第一亮紋位置為左右對稱所以分析一半的角度即可)。
- (3) 擷取在 Arduino 應用程式上光敏電阻回傳之數據，並將其作折線圖，即可得第一亮紋距離。
- (4) 得到數據後將彎曲模型替換並重複以上步驟。
- (5) 以第一亮紋距離與光柵方程式計算其軌距變化量，並分析不同厚度與彎曲角度對其分光效果之影響。

(三) 實驗結果

探討不同厚度之柔性光柵以相同彎曲程度下繞射條紋之變化，同一厚度、不同彎曲程度進行一次光強度分析，為了確保環境亮度相同，在裝置上蓋上暗箱隔絕其他光源，之後透過回傳數據做成折線圖，觀察其繞射光線改變趨勢並進行分析。

1. 厚度 0.2 cm 柔性光柵不同彎曲角度繞射光線變化

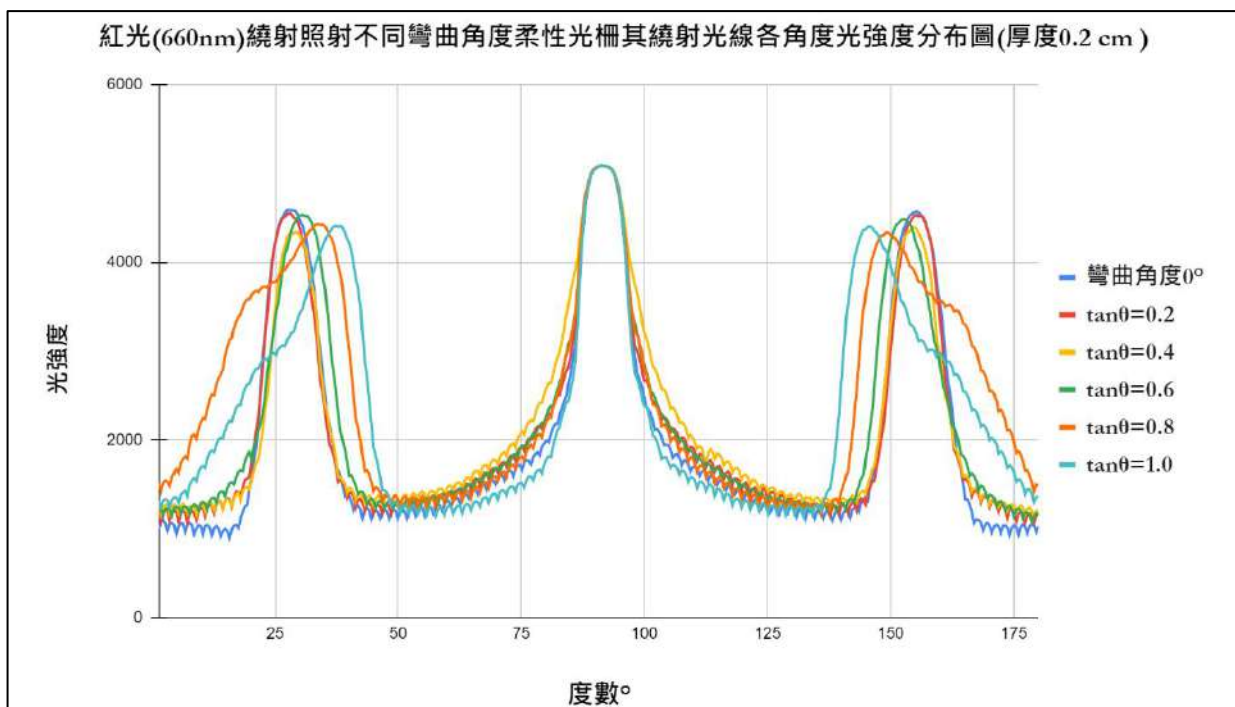


圖 28 紅光(660nm)繞射點之各角度光強度分布圖(厚度 0.2 cm 、彎曲角度 $0^\circ \sim \tan\theta=1.0$)

2. 厚度 0.4 cm 柔性光柵不同彎曲角度繞射光線變化

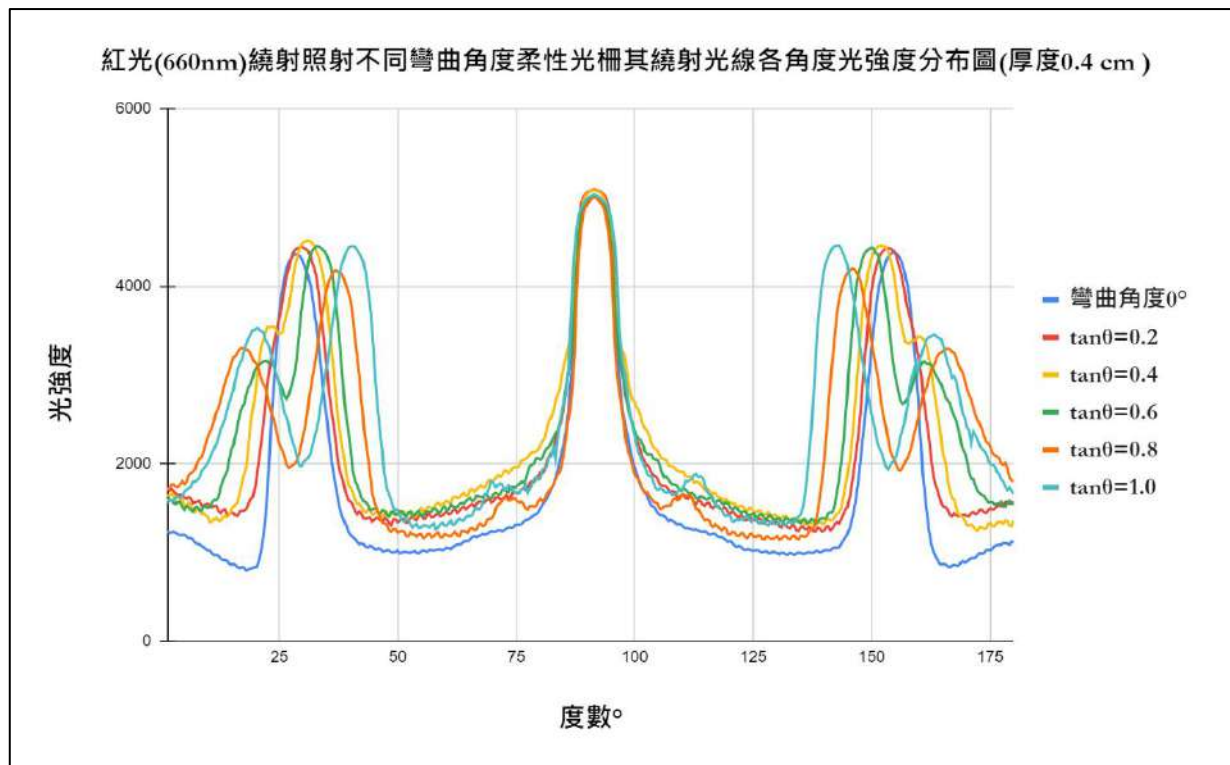


圖 29 紅光(660nm)繞射點之各角度光強度分布圖(厚度 0.4 cm 、彎曲角度 $0^\circ \sim \tan \theta=1.0$)

3. 厚度 0.6 cm 柔性光柵不同彎曲角度繞射光線變化

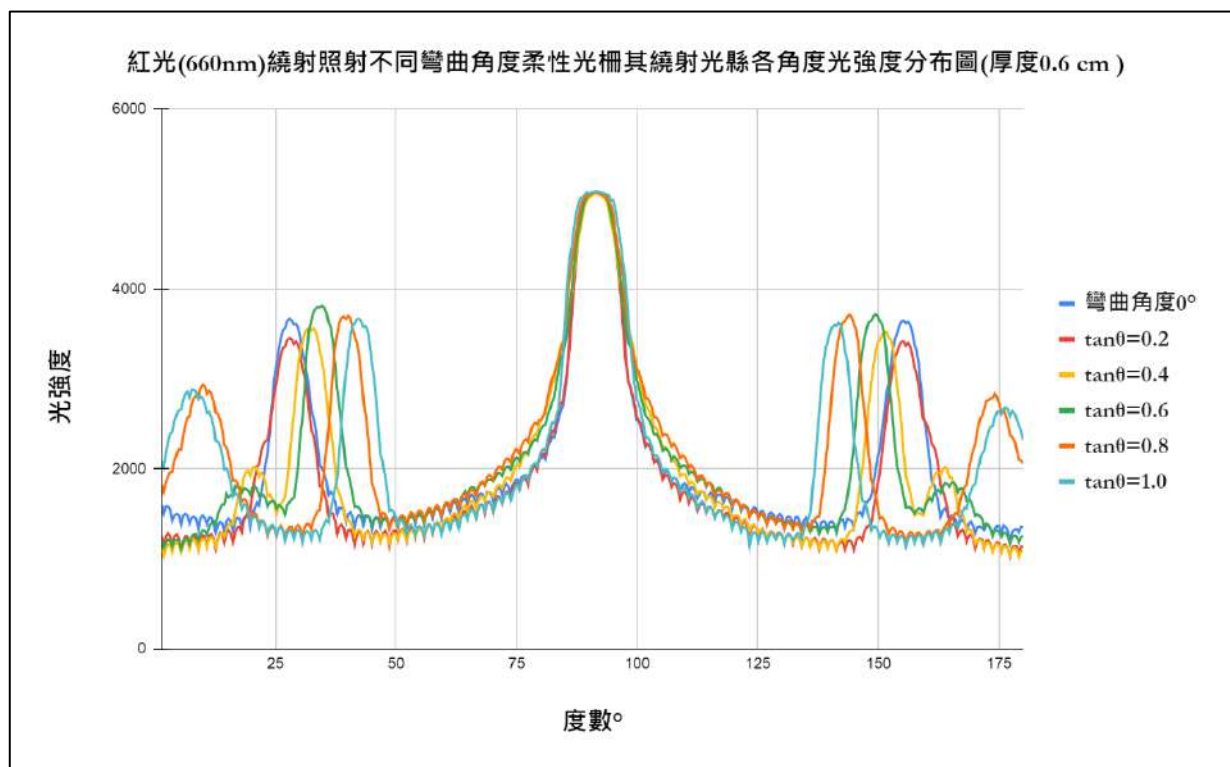


圖 30 紅光(660nm)繞射點之各角度光強度分布圖(厚度 0.6 cm 、彎曲角度 $0^\circ \sim \tan \theta=1.0$)

4. 厚度 0.8 cm 柔性光柵不同彎曲角度繞射光線變化

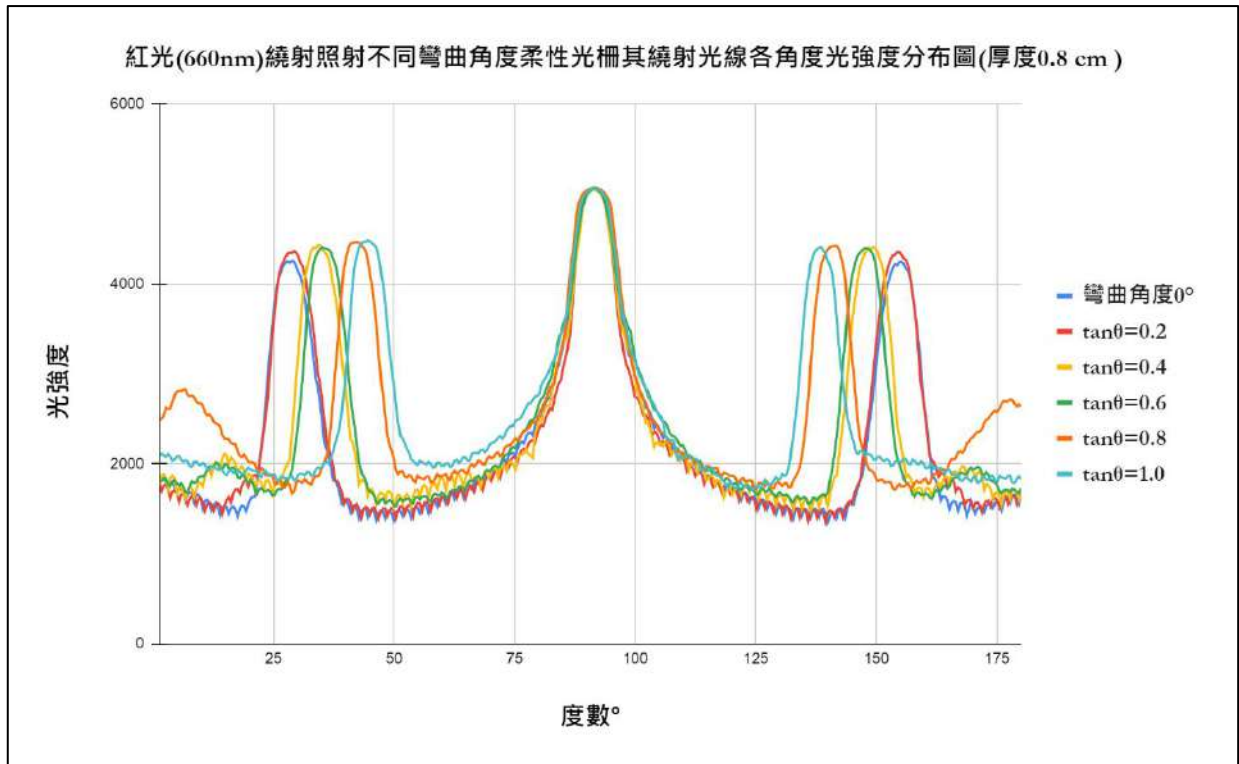


圖 31 紅光(660nm)繞射點之各角度光強度分布圖(厚度 0.8 cm 、彎曲角度 $0^\circ \sim \tan\theta=1.0$)

5. 第一亮紋與其對應光柵軌距變化趨勢

(1) 厚度 0.2 cm 柔性光柵

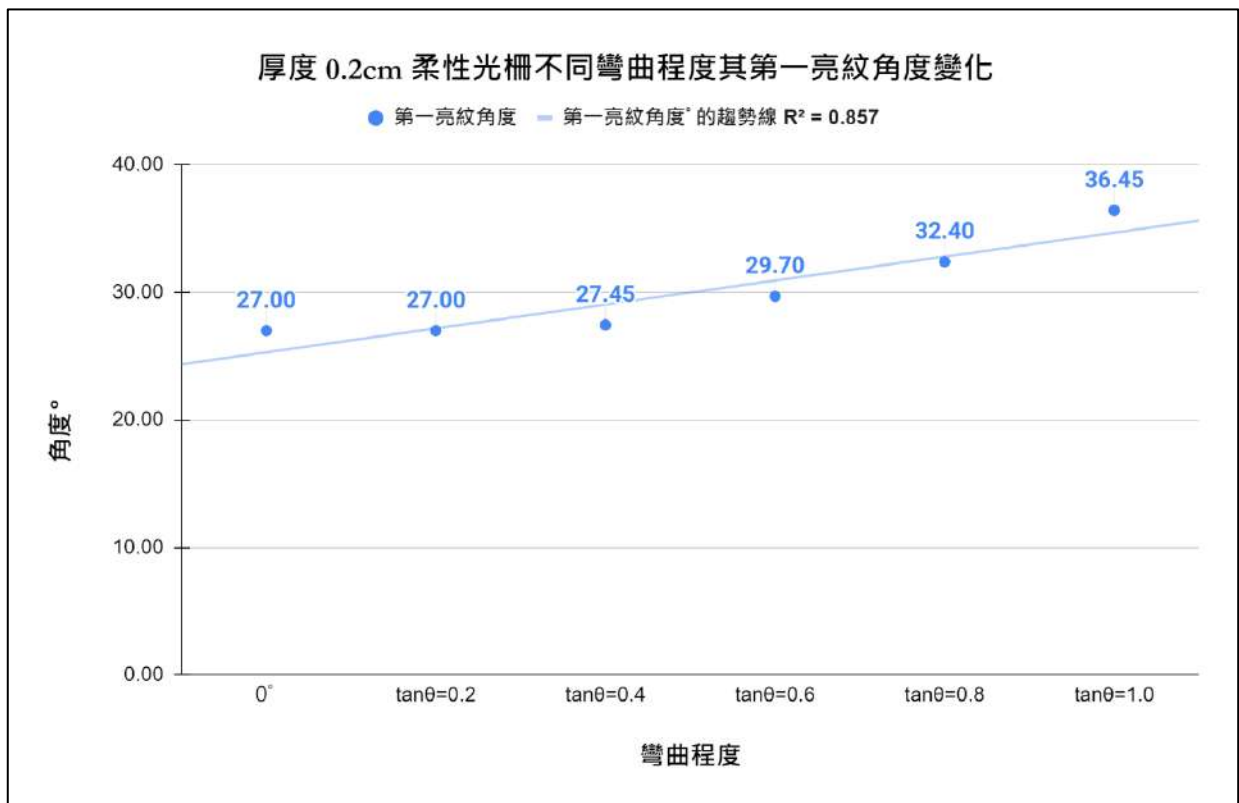


圖 32 柔性光柵不同彎曲程度其第一亮紋角度變化(厚度 0.2 cm 、彎曲角度 $0^\circ \sim \tan\theta=1.0$)

(2) 厚度 0.4cm 柔性光柵



圖 33 柔性光柵不同彎曲程度其第一亮紋角度變化(厚度 0.4 cm 、彎曲角度 $0^\circ \sim \tan\theta=1.0$)

(3) 厚度 0.6cm 柔性光柵

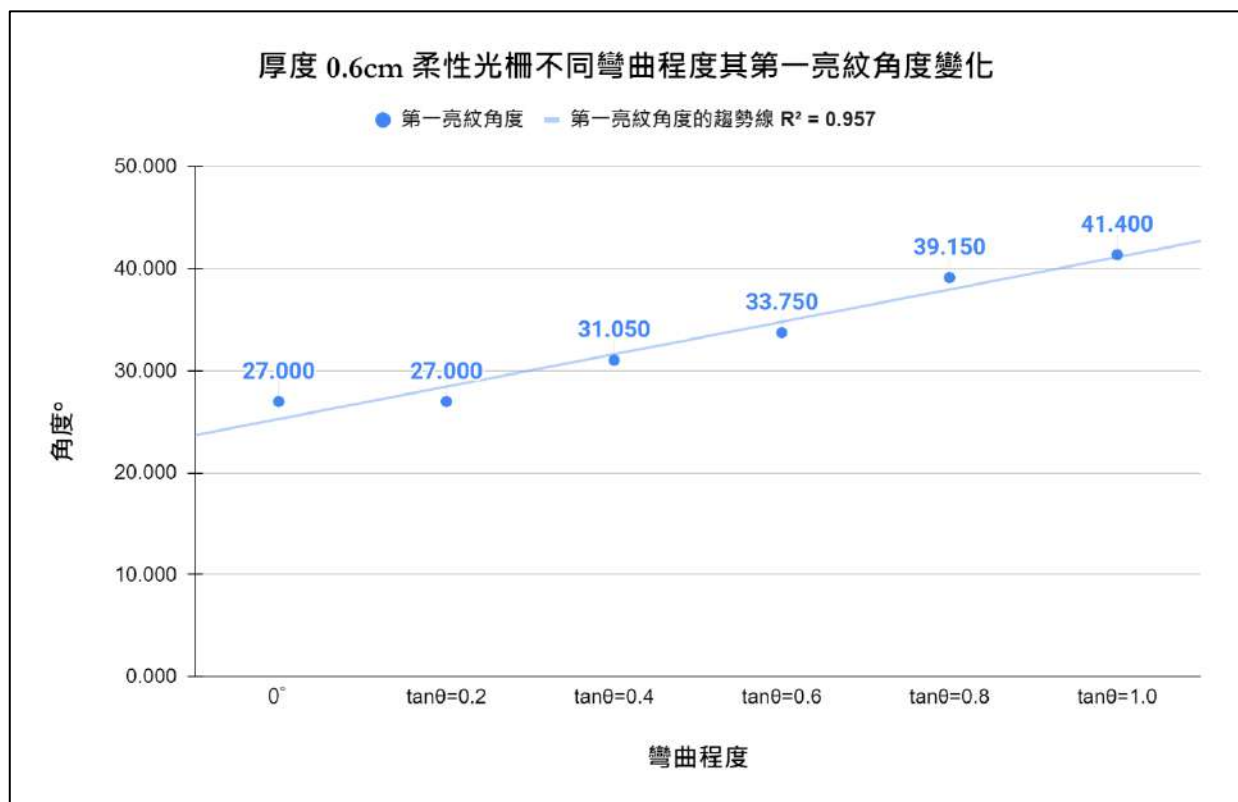


圖 34 柔性光柵不同彎曲程度其第一亮紋角度變化(厚度 0.6 cm 、彎曲角度 $0^\circ \sim \tan\theta=1.0$)

(4) 厚度 0.8cm 柔性光柵

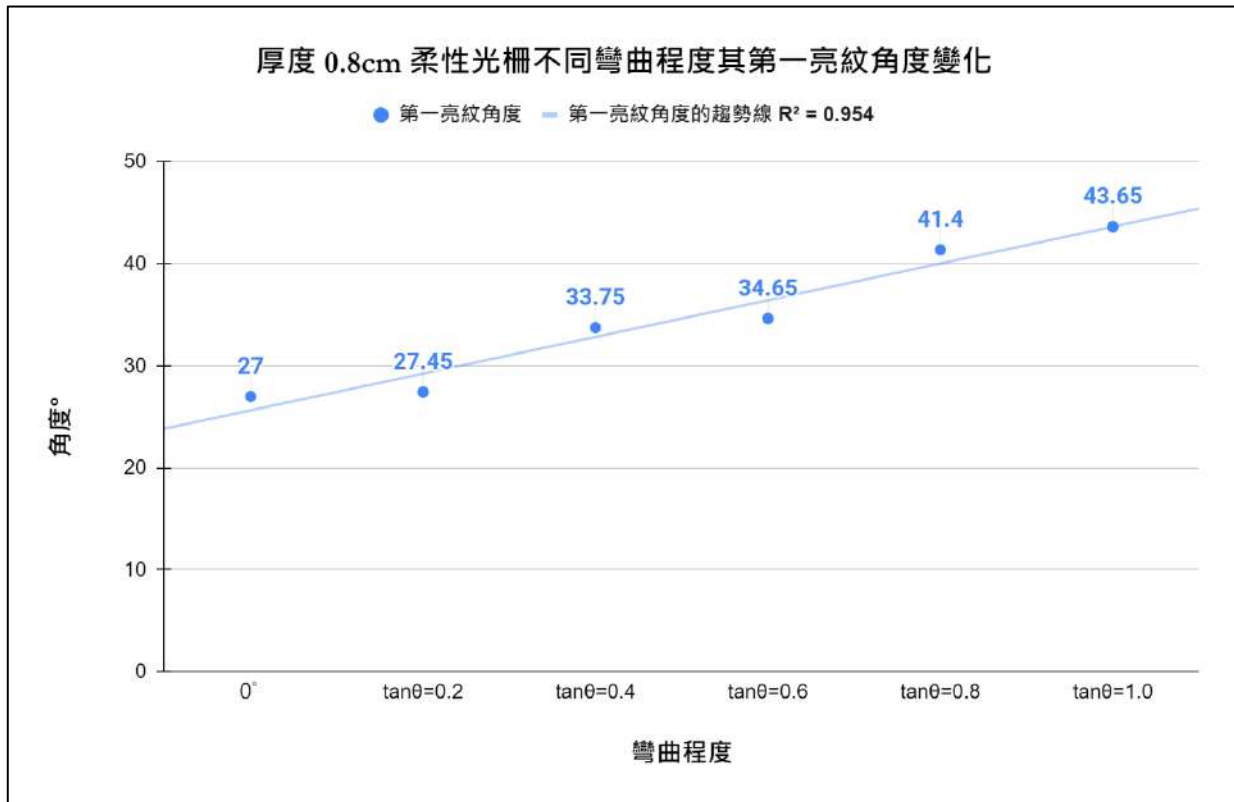


圖 35 柔性光柵不同彎曲程度其第一亮紋角度變化(厚度 0.8 cm 、彎曲角度 $0^\circ \sim \tan\theta=1.0$)

柔性光柵經過不同程度的彎曲其繞射光線之第一亮紋會隨之改變，由以上數據得知，彎曲程度越大，其第一亮紋角度也會隨之變大。以不同厚度進行比較，第一亮紋角度改變量也有所差異，其第一亮紋角度改變量會隨著厚度變大而有增加的趨勢，此現象可由第一亮紋角度改變之趨勢線得知。

五、實驗四：不同施力方式彎曲柔性光柵其繞射光線之差異實驗

由 PDMS 製作出之柔性光柵，分成兩面，一面為光柵面，另一面則為單純的 PDMS 材質，若是將其進行不同方向的彎曲，兩面受到之作用力也會有所不同，將光柵面朝外(對於彎曲模具)光柵會受到拉伸之作用力，反之則會受到壓縮之作用力，因此本實驗將探討以不同方式形變柔性光柵，其繞射光線會有何種差異。藉由上一實驗結果得知柔性光柵厚度越大其對於彎曲角度的改變就越明顯，但因厚度過大會造成實驗進行較不方便，因而選擇厚度為 0.6cm 的柔性光柵進行此實驗。

(一) 實驗步驟

本實驗步驟和器材皆與實驗三相同，唯有在拉伸實驗測試完畢後，需要將柔性光柵光柵面由朝外調整成朝內，變成以壓縮作用力進行柔性光柵的形變。

(二) 實驗結果

1. 拉伸作用力彎曲柔性光柵其繞射光變化

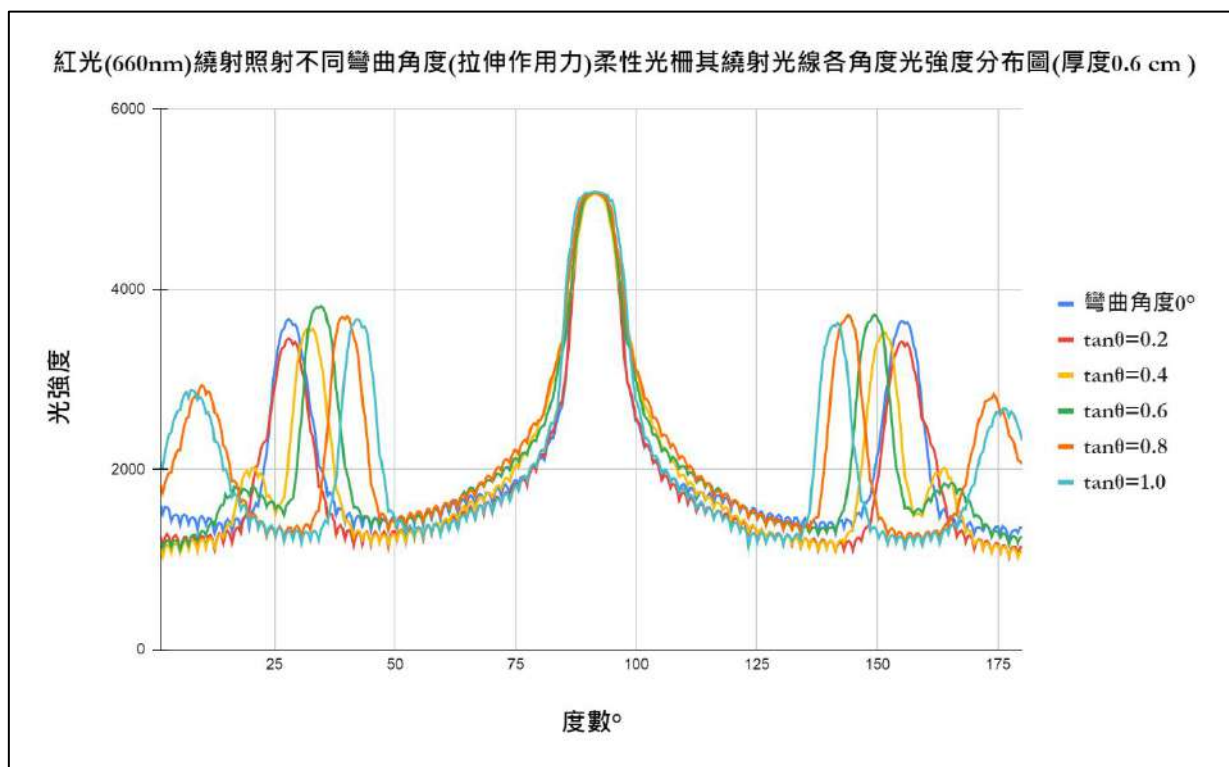


圖 36 紅光(660nm)繞射點之各角度光強度分布圖(拉伸作用力、厚度 0.6 cm 、彎曲角度 $0^\circ \sim \tan\theta=1.0$)

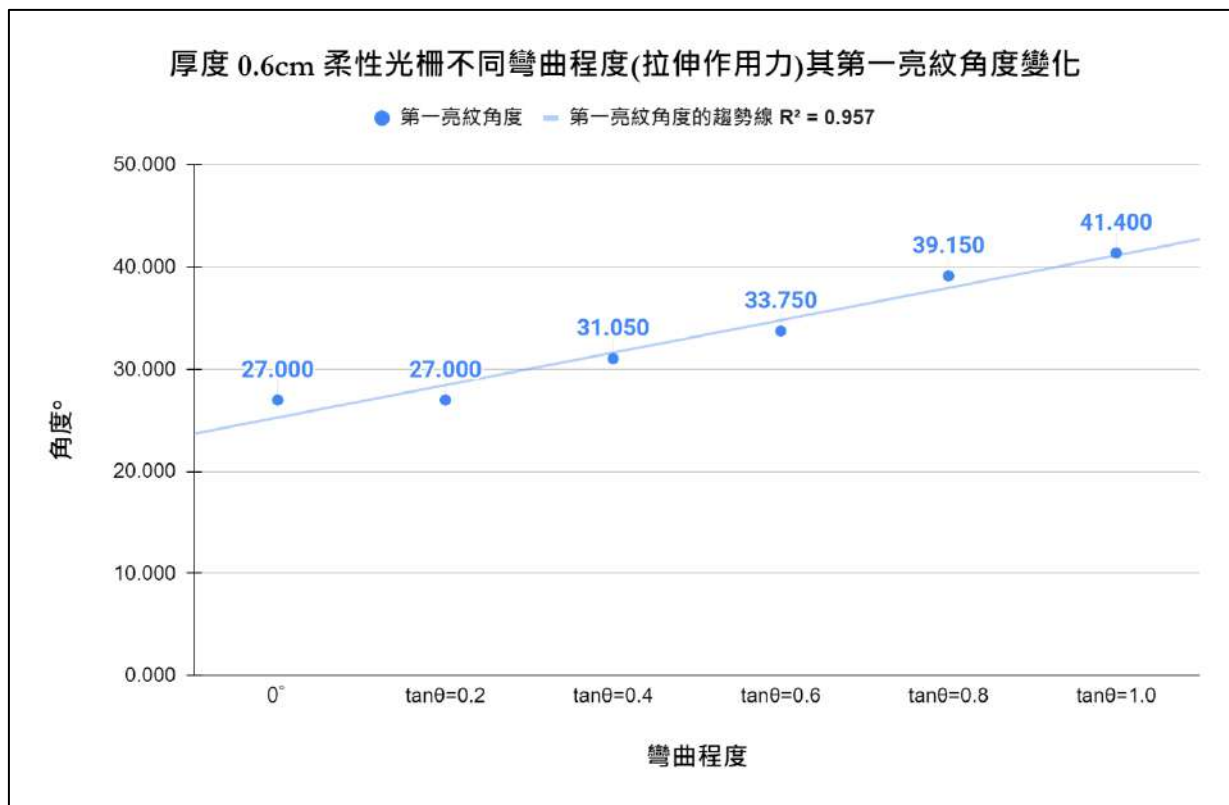


圖 37 柔性光柵不同彎曲程度其第一亮紋角度變化(拉伸作用力、厚度 0.6 cm 、彎曲角度 $0^\circ \sim \tan\theta=1.0$)

2. 壓縮作用力彎曲柔性光柵其繞射光變化

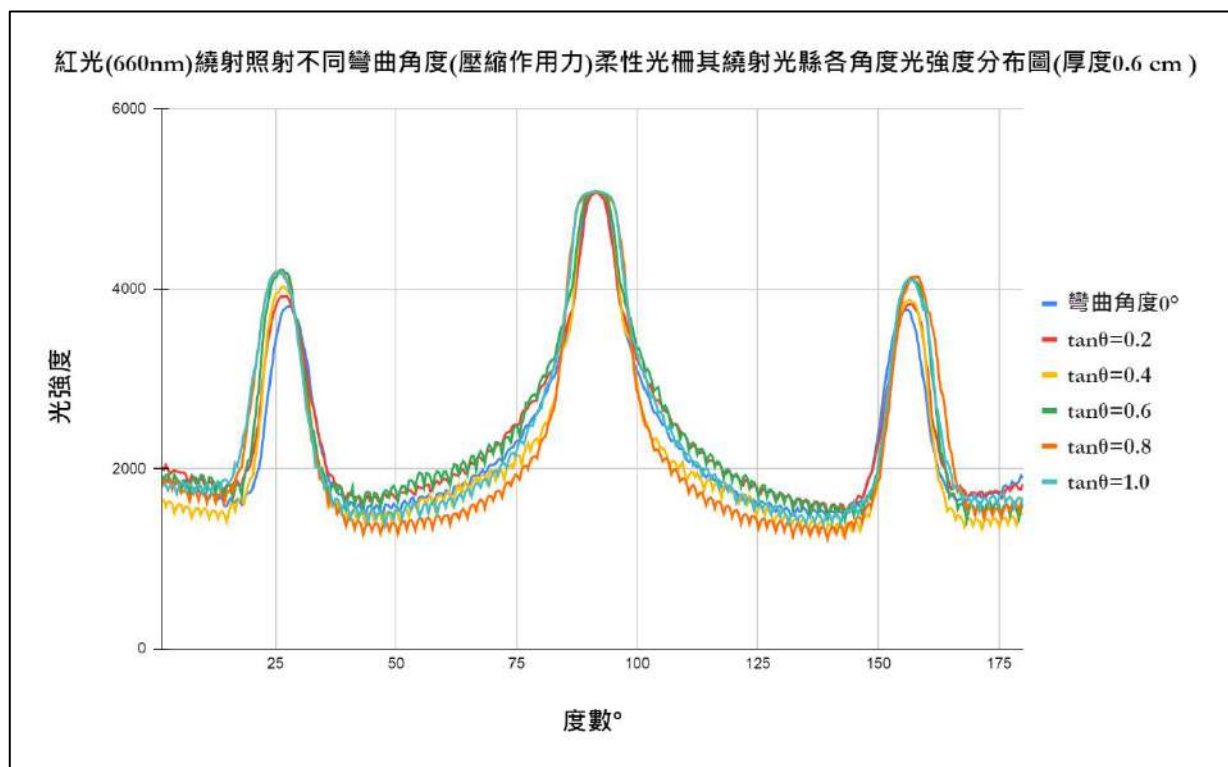


圖 38 紅光(660nm)繞射點之各角度光強度分布圖(壓縮作用力、厚度 0.6 cm、彎曲角度 $0^\circ \sim \tan\theta=1.0$)

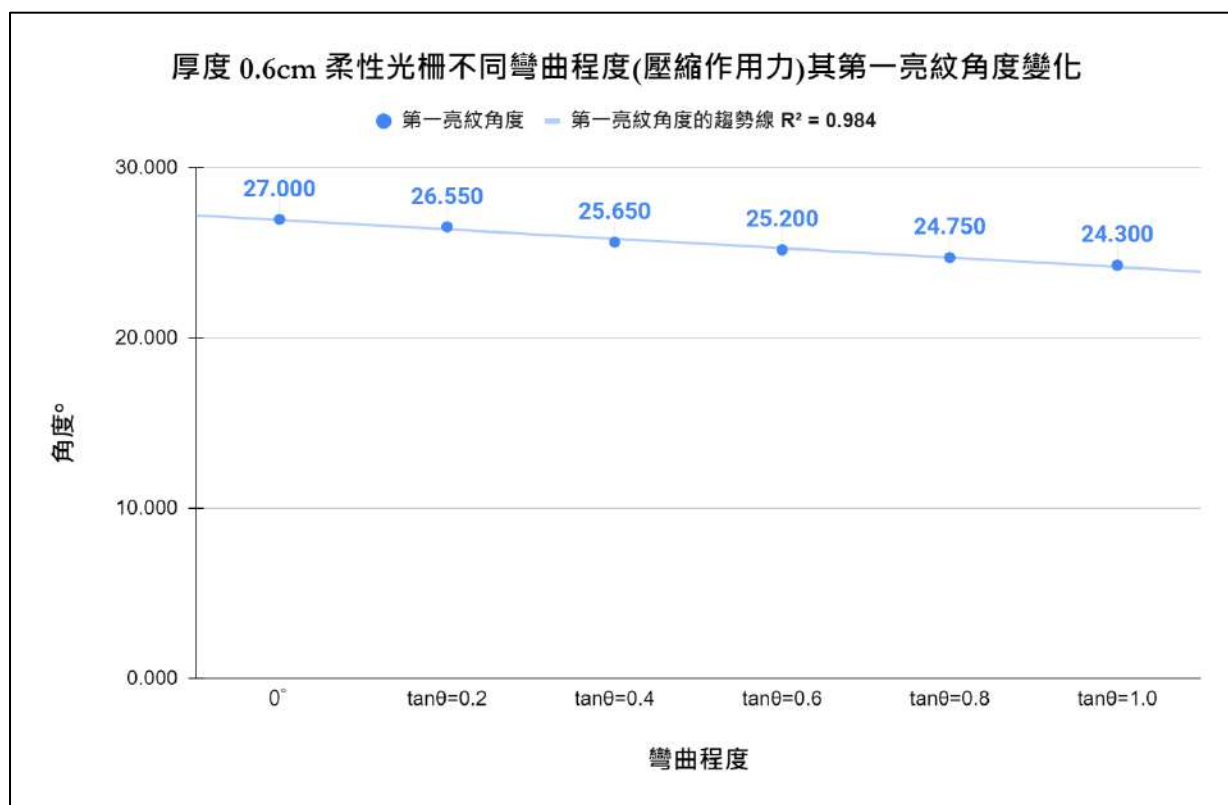


圖 39 柔性光柵不同彎曲程度其第一亮紋角度變化(壓縮作用力、厚度 0.6 cm、彎曲角度 $0^\circ \sim \tan\theta=1.0$)

透過數據得知以拉伸作用力進行柔性光柵形變，其第一亮紋角度會隨著彎曲程度增加而變大(由 27° 變為 41.4°)；以壓縮作用力進行柔性光柵形變，其第一亮紋會隨著彎曲程度增加(由 27° 變為 24.3°)而減小，但壓縮作用力的第一亮紋角度改變量較小。

六、實驗五：指紋 PDMS 分光效果分析實驗

本實驗想測試像指紋這種類光柵結構，以 PDMS 複製是否也能夠達到光柵分光之效果，並且利用光強度分析儀分析其繞射光線，加強我對於柔性光柵性質的了解，增加柔性光柵應用的多樣性，使其在往日應用有更多的可能性。因指紋與 DVD 光柵在結構上有所許不同，所以須重新設計其複製方法，而比例與凝固環境皆比照柔性光柵的製作方式。

(一) PDMS 指紋製作

1. 指紋模板製作，過程如表 9：

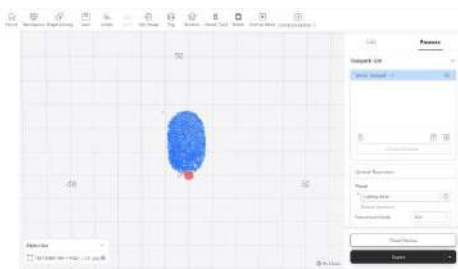
步驟	圖示	說明
1		進行指紋採樣拍攝。
2		把採樣圖片輸入至 Snapmaker 應用程式中，將圖片進行去背並調整其大小。
3		將 Snapmaker 中參數進行修正(如圖)，並將其匯出至雷射雕刻機中。
4		以鈦鋼作為模板材料並進行雷射雕刻，及可得到指紋模板。

表 9 指紋模板製作過程(圖片皆為作者自攝)

2. PDMS 指紋複製

- (1) 將指紋模具放至製作容器內。
- (2) 將 PDMS 混和液(製作方法與柔性光柵相同)平均倒入容器中，並靜置。
- (3) 待 PDMS 完全凝固後用美工刀將其取下即完成指紋複製。

(二) 實驗步驟

- (1) 校正光強度分析儀，方法同柔性光柵校正。
- (2) 進行 PDMS 指紋分光效果分析，而因其繞射光線較密集，所以須將光敏電阻距離拉遠(至少 45 cm，以增加偵測精準度)。
- (3) 擷取在 Arduino 應用程式上光敏電阻回傳數據，並將其作折線圖，分析其分光效果。

(三) 實驗結果

由結果可以看出其有一亮紋十分靠近中央亮紋，其位於角度 88.65° ，而且其亮紋十分不明顯，此亮紋是否為第一亮紋還需要進一步探討。

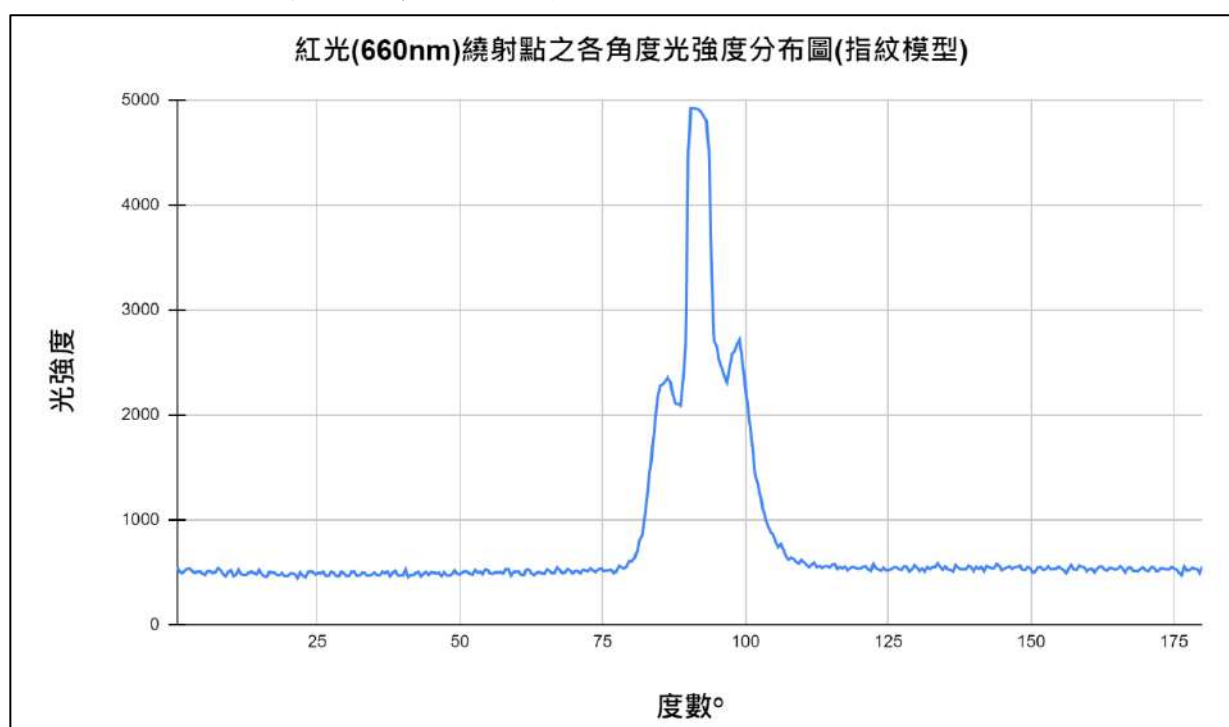


圖 40 紅光(660nm)繞射點之各角度光強度分布圖(指紋模型)

肆、討論

一、DVD 光柵經彎曲是否會影響其繞射光線？

經過實驗與觀察，發現繞其繞射光線確實有隨其彎曲而發生變化，其繞射光線會逐漸變暗與不明顯，而透過文獻查詢也可了解光柵經外力彎曲，其光柵溝槽會造成形變，進而使得其繞射光線發生變化。經過本實驗也得知，因為彎曲光柵時並非整體都會一同受到外力，所以彎曲程度須以 $\tan \theta$ 量值進行定義才可統一其變化量，同時也發現若想分析以白光分光後之繞射光線須借助光譜儀，為了降低實驗複雜性，所以後續將採用單色雷射光進行其繞射光線之分析。並由以上幾點得出下列研究方向：

1. 發現 DVD 光碟不易形變，故以想以 PDMS 進行光柵複製與應用。
2. 以 $\tan \theta$ 之值定義其彎曲變化量。
3. 以單色雷射光來進行其彎曲後之繞射點變化實驗。

二、PDMS 柔性光柵製作

經過實際製作 PDMS 柔性光柵，能夠直接透過其彈性與易受損程度去區分其作為柔性光柵之合適度。而本實驗自行設計出柔性光柵製作模具，以便柔性光柵統一製作格式與增加其成功率。經過多次測試發現，在常溫下 PDMS 中的氣泡能夠自行排出，而完全凝固大約要花費 60 小時，由此方法製作出的柔性光柵，其彈性與適應性皆相當符合本實驗需求，並藉由脫模容器也大大增加其製作的便利性，故後續實驗皆以此方式製作柔性光柵。

三、探討不同厚度柔性光柵其彎曲程度與繞射光線變化關聯性

此實驗中，以光強度分析儀進行柔性光柵繞射光線測量，並進而得到其第一亮紋角度，再將其帶入光柵方程式進行其光柵軌距推算，分析其在彎曲時內部結構發生之變化與其連帶的分光效果之影響，第一亮紋換算光柵軌距過程如下：

$$d(\sin(\alpha - \beta)) = m\lambda \text{ (光柵方程式)}$$

$$\alpha = 90^\circ, \beta = \text{實驗求得之第一亮紋角度}, m=1, \lambda = 660\text{nm}$$

$$d(\text{光柵軌距}) = 660 \times 10^3 / \sin(90^\circ - \beta) (\mu\text{m})$$

經過實驗後得出第一亮紋數據並經過換算，得知其光柵軌距大小與第一亮紋角度接隨著彎曲程度的增加而變大，而以不同厚度進行比較後發現，其厚度越大光柵軌距在角度增加的同時，其變化量也較大，會有此現象推測是其厚度增加的同時，形變所需要的作用力也會增加，這造成其表面的光柵結構受到更大的拉力，進而使其結構改變較大，最後影響到其分光效果。從數據也可得知，若光柵軌距持續增加，其第一亮紋角度位置為越來越接近中央亮紋，由此可推斷，若光柵軌距受到過大之拉力，使其表面光柵軌距變大，其分光能力會逐漸減弱。

彎曲程度 厚度	0°	$\tan \theta = 0.2$	$\tan \theta = 0.4$	$\tan \theta = 0.6$	$\tan \theta = 0.8$	$\tan \theta = 1.0$
厚度 0.2cm	0.741	0.741	0.744	0.760	0.782	0.821
厚度 0.4cm	0.741	0.753	0.763	0.778	0.816	0.857
厚度 0.6cm	0.741	0.741	0.770	0.794	0.851	0.880
厚度 0.8cm	0.741	0.744	0.794	0.802	0.880	0.912

表 10 柔性光柵不同彎曲程度其光柵軌距變化數據(軌距單位： μm)

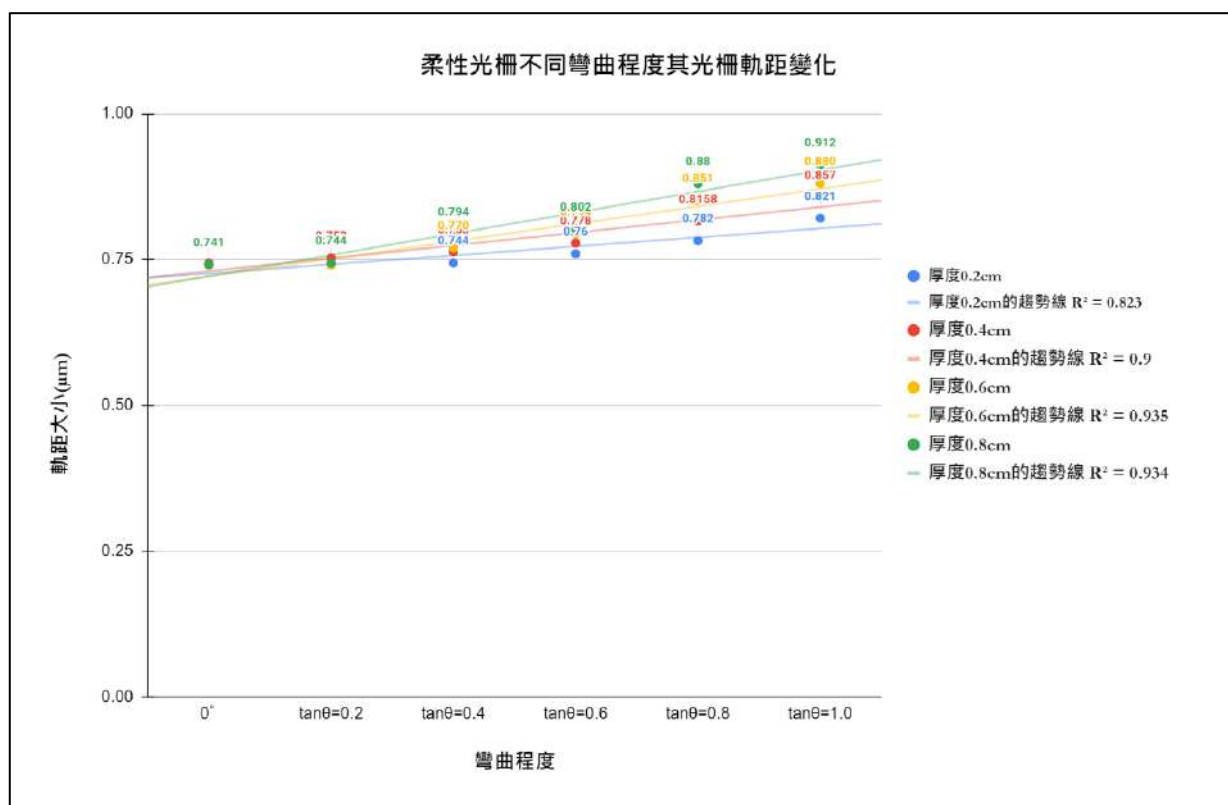


圖 41 柔性光柵不同彎曲程度其光柵軌距變化趨勢圖(軌距單位：μm)

探討不同施力方式對柔性光柵其繞射光線影響

從上個實驗中發現，厚度太小其繞射改變較小，而其彎曲後折射雜光也較靠近第一亮紋，厚度越大其彎曲後對繞射效果影響越顯著，但厚度過大其拉伸性也就越弱，使其可能無法完全貼合彎曲模型，可能會造成其實驗結果有誤差，所以最後選擇厚度適中的0.6cm 進行此實驗。由實驗數據與計算後分析，將光柵面朝外進行彎曲會使得其第一亮紋角度隨著彎曲程度增加而變大，而將光柵面朝內進行彎曲會使其第一亮紋角度逐漸減小。此現象可以說明當柔性光柵受到拉伸作用力時，其光柵軌距經過計算後是成現被拉大的情況(由原本 $0.741 \mu\text{m}$ 變為 $0.880 \mu\text{m}$)，其分光效果隨之減弱，進而使其第一亮紋靠近中央亮紋；當柔性光柵受到壓縮作用力時，其光柵軌距經過計算成逐漸縮小趨勢(由原本 $0.741 \mu\text{m}$ 變為 $0.724 \mu\text{m}$)，其分光效果增加，使其第一亮紋遠離中央亮紋，但因不易施力故其變化量並不大。

彎曲程度 作用力	0°	$\tan \theta = 0.2$	$\tan \theta = 0.4$	$\tan \theta = 0.6$	$\tan \theta = 0.8$	$\tan \theta = 1.0$
拉伸作用力	0.741	0.741	0.770	0.794	0.851	0.880
壓縮作用力	0.741	0.738	0.732	0.729	0.727	0.724

表 11 柔性光柵不同彎曲程度與不同作用力其光柵軌距變化趨勢圖(軌距單位：μm)

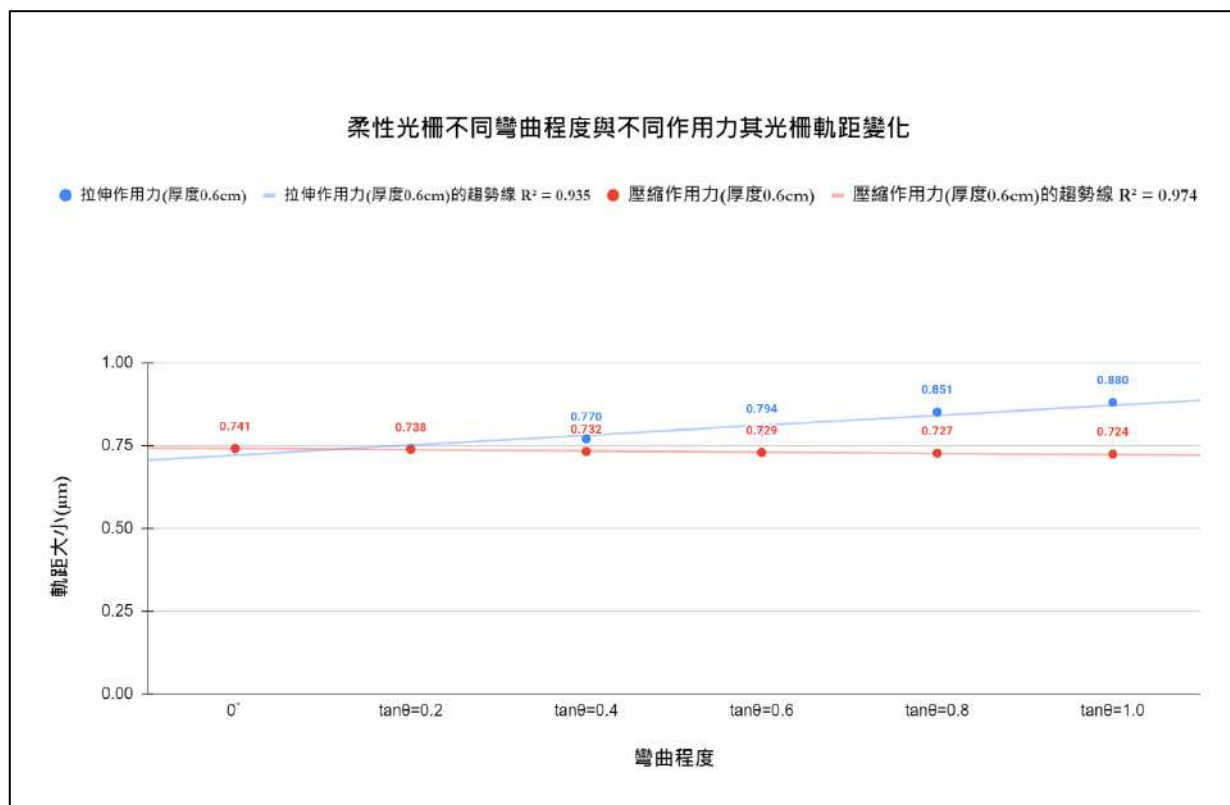


圖 42 柔性光柵不同彎曲程度與不同作用力其光柵軌距變化趨勢圖(軌距單位：μm)

四、PDMS 指紋模型特性

本實驗得知指紋模形其具有一定的分光效果，但指紋間紋理間距較大，故其分光效果較不明顯，透過實驗數據可看到其有一亮紋位於中央亮紋附近但無法確定其為第一亮紋，因為指紋模形分光效果較差，使儀器會將中央亮紋與第一亮紋一同偵測到，而解決此問題的方法即是將光敏電阻的距離再拉遠，讓第一亮紋與中央亮紋分開即可較準確的偵測第一亮紋角度，故希望後續可以完成相關設計與實驗。

五、未來展望

1. 根據文獻得知 PDMS 其製作過程若以不同比例調製 PDMS 混和液或利用不同溫度進行加速凝固會造成其彈性與延展性有所改變，目前本實驗僅以常溫進行凝固，未來可以對這方面多去進行測試。
2. 將白光以光柵進行分光，會產生其光譜，此光譜需透過校正或是搭配光譜儀進行分析，之後會希望往這一部份多去做結合，增加實驗之多樣性。
3. 本實驗採用指紋進行類光柵的 PDMS 模型製作，目前只有測試其分光效果，而在指紋當中還有許多能夠探討的部分，如不同種類的指紋分光效果、指紋中不同部分的分光效果等，相關研究期許在往後能夠持續研究。
4. 光柵本身應用於許多分光儀器中，為了改善傳統光柵缺點開始此研究，因此希望能夠實際將此柔性光柵結合實際儀器中，並結合目前研究結果，進行儀器的設計，發揮柔性光柵價值。

伍、結論

- 一、透過測試彎曲光柵其繞射光之變化之實驗，觀察到其繞射光線確實會因光柵彎曲而產生變化，目前觀察到的情形為繞射光線逐漸變暗，若要進一步分析白光分光結果需要搭配光譜儀進行實驗，故後續實驗採用雷射筆搭配光強度分析儀進行單色光繞射條紋分析。
- 二、透過實際製作 PDMS 柔性光柵後發現，其僅需放置於常溫下 60 小時即會自行凝固，而自行設計之柔性光柵製作模具將可以增加其製作上之方便性，也可控制其厚度。
- 三、不同彎曲程度會使柔形光柵軌距大小發生變化，彎曲程度越大光柵軌距會隨之增加，進而影響雷射光繞射條紋之第一亮紋逐漸靠近中央亮紋，表示其分光效果逐漸減弱。
- 四、不同厚度會影響彎曲對光柵之作用力，厚度越小作用力越小，彎曲對其光柵結構作用力較小，其第一亮紋改變率也較小；厚度越大作用力越大，彎曲對其光柵結構作用力較大，其第一亮紋改變率也較大，因此若柔性光柵進行應用，越薄的柔性光柵受到外力越能保持其分光能力，但其受到折射的干擾較大；較厚的柔性光柵雖然受折射干擾較少，但其受外力時分光能力會減弱，因此選擇中間值厚度的柔性光柵較佳。
- 五、將其以壓縮方式形變，第一亮紋之角度會隨著形變程度加大而越小，經過計算推出期軌距有逐漸變小的趨勢。而將其以拉伸方式形變，其第一亮紋之角度會隨著形變程度加大而變大，此實驗由文獻中直接向左右拉伸的測試實驗，可以得到驗證。

陸、參考文獻

- 一、Meng-Jing Xu, Yuan-Shen Huang, Zheng-Ji Ni, Bang-Lian Xu, Yu-Hang Shen, Mo-Qiang Guo, and Da-Wei Zhang. (2020). Two-dimensional stretchable blazed wavelength-tunable grating based on PDMS. Optica Publishing Group Applied Optics Vol. 59, pp. 9614-9620.
Shimadzu excellence in science. Introduction to Diffraction Gratings.
<https://www.shimadzu.com/opt/guide/diffraction/02.html>
- 二、Datta, Shubhashish & Li, Chunqiang & Forrest, Stephen & Volodin, B. & Dolgy, Sergei & Melnik, Elena & Ban, Vladimir. (2004). Modeling of nonideal volume Bragg reflection gratings in photosensitive glass using a perturbed transmission matrix approach. Quantum Electronics, IEEE Journal of. 40. 580 - 590. 10.2109/JQE.2004.826442.
- 三、DJ Campbell, KJ BeckmanCE, Calderon, PW Doolan, RH Moore, AB Ellis, GC Lisensky. (1999) .Replication and Compression of Bulk Surface Structures with Polydimethylsiloxane Elastomer. J. Chem. Educ. Vol. 76 , 537.
- 四、MoneyDJ 理財網(2000 年 10 月)。光碟片製程/讀取/寫錄原理(一)。取自：
<https://www.moneydj.com/kmdj/report/reportviewer.aspx?a=0ceeaddf-aed4-11d4-a1a7-00e018b00aed>
- 五、沈世家。精確量測均質與非均質黏彈性薄膜在微奈米尺度下之力學性質(2019)。材料科學及工程學系。國立成功大學。
- 六、國立台中教育大學。NTCU 科學遊戲 Lab：蝶影之舞。取自：
<https://www.ntcu.edu.tw/scigame/light/light-027.html>
- 七、凌韻堯(2018)。聚二甲基矽氧烷於半導體構裝選擇性封膠之應用。國立高雄科技大學化學工程與材料工程系碩士班碩士論文。
- 八、劉高瑋(2009)。聚二甲基矽氧烷(PDMS)薄膜形變行為之研究。私立義守大學機械與自動化工程學系碩士論文。

【評語】100009

1. 光柵作為常見的分光元件，應用於許多光學儀器中。本研究利用具有高彈性和易形變特性的 PDMS 作為柔性光柵的材料，對不同厚度和彎曲程度的光柵進行一系列測試。值得鼓勵！
2. 建議應先定義柔性光柵的應用場景與需求。
3. 建議針對 2. 的需求, 探討柔性光柵因本身或外力參數變化的影響。
4. 建議進一步探討柔性光柵因本身或外力參數變化的影響之原理與因應之道。
5. 建議可以由厚度、曲率等結構參數，估算光柵軌距的變化，並與實驗結果對照。
6. 彎曲程度和厚度的影響，似乎可以用物理概念來解釋，感覺實驗之目的在提供驗證，而非新概念的測試。