

# 中華民國第 65 屆中小學科學展覽會

## 作品說明書

高級中等學校組 工程學科(二)

052417

大氣電漿成長的氧化鋅結晶材料製作寬頻光感  
測器結合人工智慧辨識感測光之種類

學校名稱： 國立暨南國際大學附屬高級中學

作者：	指導老師：
高二 陳真	駱奕帆
高二 鄭宇喬	劉明湟

關鍵詞： 大氣電漿沉積氧化鋅、退火溫度、多波段光  
識別光感測器

## 摘要

本研究以大氣電漿技術在矽晶片上沉積氧化鋅薄膜，並透過不同溫度退火來最佳化材料特性，以製備高靈敏度的金氧半（MOS）光感測器，能偵測紫外光、藍光、綠光、紅光及紅外光等多種波段光源。大氣電漿技術具備操作簡便、無需昂貴真空設備、製程環保等優勢，並可有效提升材料性能。透過光學顯微鏡及掃描式電子顯微鏡分析顯示，退火溫度影響氧化鋅結晶品質，400 °C與 600 °C條件下結晶較為明顯，且可由穿透式電子顯微鏡清楚地觀察到高溫退火會導致孔洞形成。此外，本研究利用半導體參數分析儀量測光響應特性，透過 AI 技術分析光響應波形以進行光源識別，有助於提升光偵測效率與準確性，為智慧光感測應用提供嶄新的技術方案。

## 壹、前言

### 一、研究動機

近年來，半導體產業的快速發展對台灣和全球產生了深遠影響，例如全球晶片短缺造成大量產業無法正常供貨、台積電晶片製造技術的領先突破吸引全球科技公司（如蘋果、輝達）合作代工等。這不僅改變了科技領域的格局，還涉及到國際政治、經濟與產業的發展，並成為日常生活中經常討論的熱門話題。因此，我們不禁開始好奇半導體的運作原理並其應用。其中我們發現到許多結合光感測的應用，比如疫情期間廣泛使用的紅外線熱像儀便是基於紅外光偵測技術；紅光感測可以用於血氧濃度的測量；綠光感測則可用於評估植物的健康狀態及生長情況，並協助環境監測；藍光感測則被應用於防藍光產品的對比測試；而紫外光感測則廣泛應用於氣象站及環境監測等領域。因此，不同波段的光偵測是現今科技高度發展的社會中日益重要的議題。

然而，在現有的光感測技術中，不同波段的光感測通常是由多個獨立的感測器來完成，這樣不僅增加了系統的複雜度，還提高了成本。這也激發了我們的構想：開發一種單一感測器，能夠同時偵測紫外光到紅外光範圍內不同波段的光源。

使用半導體晶片光感測器具有多項優勢，其體積小符合現代電子設備對輕便與高效能的需求，能在有限空間內運作。其耗能低且反應速度快，能精確測量快速變化的光，適用於光通信與影像處理。此外，其高靈敏度使其在弱光環境中仍能準確檢測，並能與其他半導體元件高度整合，降低系統複雜度與成本。利用大氣電漿技術在矽晶片上生長氧化鋅，並經不同

溫度退火以最佳化材料特性，可製成高靈敏度光感測器，偵測多種波長的光。大氣電漿技術操作簡便，無需昂貴真空設備，製程簡化且節能環保，使用空氣作為電漿源，其無毒性質可降低對環境與人的影響。結合人工智慧（AI）的光感測器能即時分析光響應波形，自動辨識信號並進行快速分類，且透過演算法持續學習，展現高適應性與精準度，在複雜環境中實現高效監測與防護功能。

## 二、研究目的

- (一) 偵測日常生活中各種波段的光線：對皮膚有害的紫外線在環境中的監測、對電腦螢幕及手機顯示器中藍光強度測量與評估、評估植物健康和生長狀態的綠光感測、可應用於血氧濃度檢測的紅光監測及可應用於虹膜辨識的近紅外光感測。
- (二) 利用大氣電漿技術在矽晶片上生長氧化鋅以及退火技術，實現高靈敏度的光波感測。
- (三) 透過人工智慧（AI）辨識不同波段的光之光響應電流-時間曲線（I-t 圖）中的波形特性，提升光源識別精度和效率。
- (四) 設計輕便的設備，方便隨身攜帶並使用。

## 三、文獻回顧

### (一) 半導體與感測器

從 2010 年以來，以電漿成長氧化鋅材料的技術逐漸廣泛應用於半導體元件 [1, 2]，2014 年 Ramos 等人將電漿成長氧化鋅材料應用於太陽能電池光電效應相關的領域 [3]，2015 年左右 Ma 等學者使用氫氣電漿從溶液中產生氧化鋅 [4]。而自 2020 年以來，關於使用濺鍍或水熱法成長的多波段氧化鋅光感測器有很密集的研究 [5, 6]。與前人不同的是我們是用大氣電漿沉積氧化鋅並成長在晶片上，形成金氧半（MOS）光偵測器 [7]，來偵測寬頻多波段的光源，同時也藉著退火來改質大氣電漿所成長之氧化鋅材料 [8, 9]。Tonezzer 等人於 2018 年開始用人工智慧辨識多重氣體感測器所感測的不同氣體 [10]，而 2024 年 Lin 等人開始使用人工智慧來辨識不同波長的光 [11]，與之前學者不同的是我們使用波形來辨識不同波段的光。

### (二) 晶片製程與光感測器機制

#### 1. 大氣電漿沉積氧化鋅之技術

電漿為物質的第四態，為氣體在高溫或強電場下得到足夠能量解離成帶正電的離子和自由電子。離子化是因氣體原子的電子吸收能量後脫離原子核束縛的過程。經由外加能量後，

氣體中的自由電子加速撞擊，使原子內的電子脫離原子核的束縛成為自由電子，而失去電子的原子則成為離子。由於電漿含有大量的自由電子，所以極易產生電流而具有高的導電率。

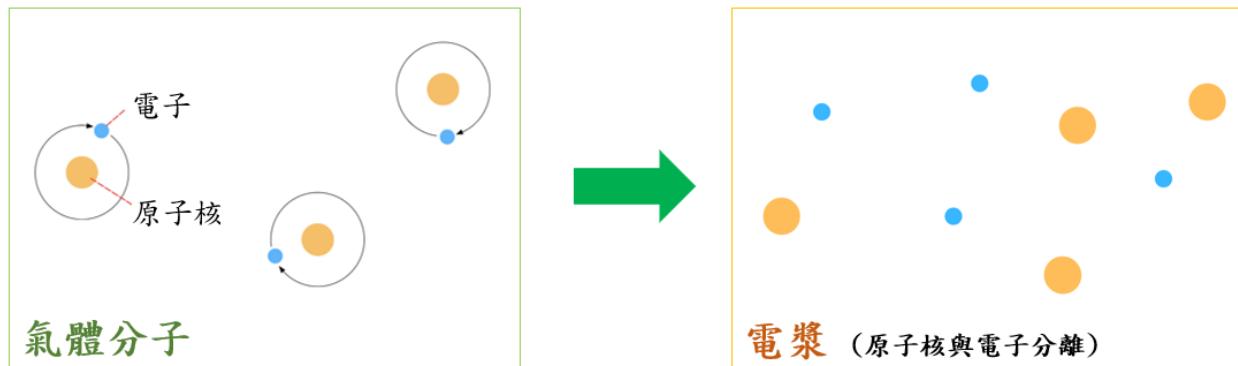


圖 1-1 氣體分子和電漿中原子核與電子相對位置示意圖。(作者自行繪製)

大氣電漿沉積技術以空氣透過電漿解離與前驅物反應，形成薄膜而沉積在材料上，藉由電漿中離子的高活性、電性與化學性，實現對材料表面的改質與覆蓋。電漿沉積技術能有效提升材料的性能，適用於多種材質，並廣泛應用於電子、醫療、能源及工業領域。

氧化鋅 (ZnO) 為光電子領域中熱門的 II-IV 族 N 型半導體材料，其具有無毒性、易於合成、成本低、具生物相容性 (Biocompatibility) 及高的化學穩定度等優點。在本研究中，將硝酸鋅粉末溶於水和乙醇，以大氣電漿沉積在具備電極的基板上，可製程出光感測器。

## 2. 退火改質

將大氣電漿處理後的樣品以不同溫度退火。退火是一種能改變強度、硬度以及改變材料結構等機械性質的熱處理。其原因為退火會使原子再次流動來改變排列且產生結晶，以填補缺陷。

## 3. 金氧半 (MOS)光感測器

金氧半 (MOS)光感測器為三種材料的組合：金屬 (Metal, M)、作為絕緣體的氧化層 (Oxide, O)和半導體 (Semiconductor, S)。氧化層為絕緣體，比如二氧化矽 ( $\text{SiO}_2$ )；半導體的材料，比如氧化鋅 (ZnO)。本研究作為光感測器的晶片，基板是矽 (Si)，其上氧化層為二氧化

矽 ( $\text{SiO}_2$ )。二氧化矽之上為以黃金製成的指叉電極，最後使用大氣電將半導體氧化鋅沉積於金電極上。

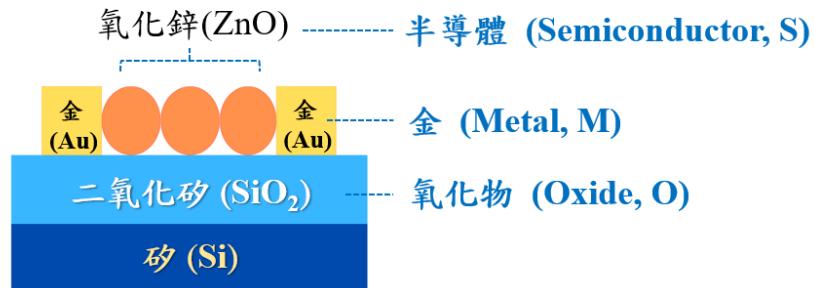


圖 1-2 金氧半(MOS)光感測器示意圖。(作者自行繪製)

#### 4. 氧化鋅光感測原理

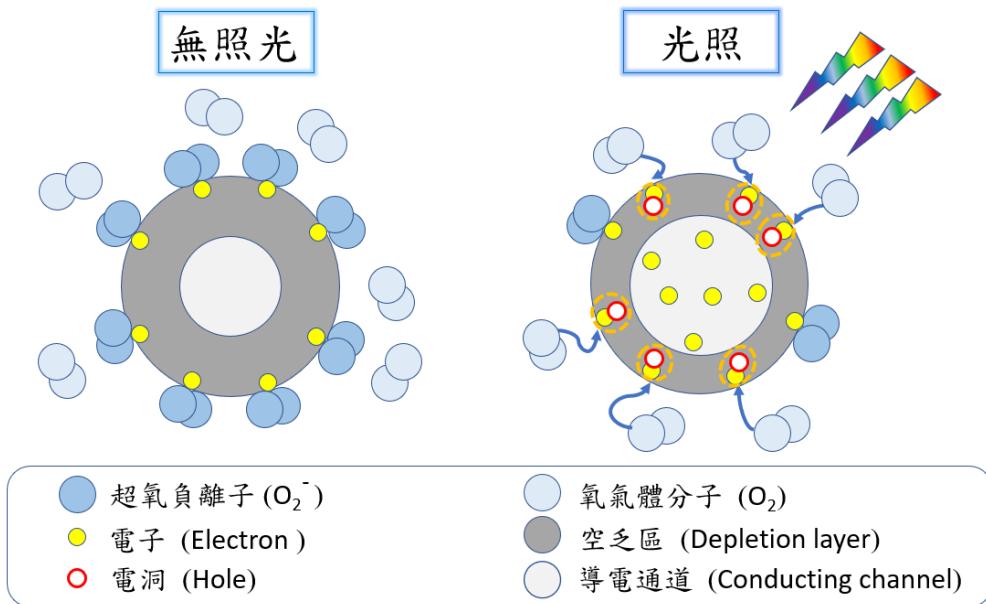
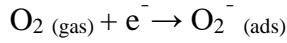
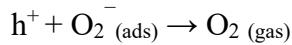


圖 1-3 光感測機制示意圖。(作者自行繪製)

本研究使用氧化鋅奈米材料作為光感測元件。在黑暗環境下，由於氧化鋅表面會吸附空氣中的氧氣，這些氧分子 ( $\text{O}_2$ ) 會與氧化鋅的自由電子結合，形成超氧陰離子 ( $\text{O}_2^-$ )，排斥氧化鋅內自由電子，導致空乏區變大，使導電通道區域變小，進而使電阻上升。該反應可表示為：



當氧化鋅受到光照時，光的能量會使價帶中的電子獲得能量並躍遷到導帶，成為可自由移動的電子，進而產生電流。同時，電子離開後，價帶會留下電洞 (hole)，形成電子-電洞對 (electron-hole pair)。在氧化鋅內部的電場作用下，電洞會移動到表面，與超氧陰離子上的電子結合，使氧分子重新釋放回空氣中。反應式如下：



這使得空乏區縮小，導電通道變大，導致電阻下降、電流上升。上述為氧化鋅光感測器的基本運作原理。

## 5. 不同種類之光與波形辨識

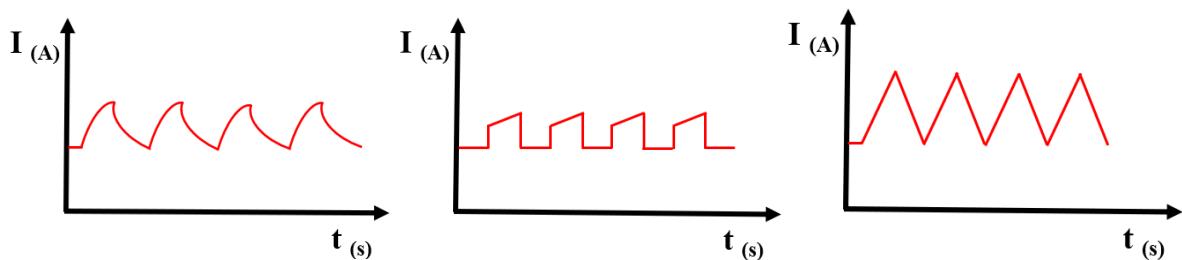


圖 1-4 不同種類的光感測波型。(作者自行繪製)

作為光感測器，不同的感測晶片條件以及不同的光，會造成不同的電流-時間之光響應 (I-t 圖) 波形，有可能是弧形、梯形或鋸齒狀的波，如圖 1-4 所示。這些波形一面顯示出不同的感測器對不同的光有不同的感測響應波形，但另外一面也可以利用波形的差異來辨識光的種類。辨識波形的技術有許多的應用，比如心電圖以及雷達回波的辨識等，而我們此研究要應用於光感測中之不同光波段的辨識。

## 貳、研究設備及器材

### 一、實驗器材與藥品

實驗器材	實驗藥品
針筒	硝酸鋅 ( $Zn(NO_3)_2$ ) 粉末
燒杯	乙醇 ( $C_2H_5OH$ )
量筒	

### 二、實驗儀器

名稱	功能
大氣電漿系統	進行大氣電漿沉積
注射幫浦	控制溶液的流量
攪拌器	協助藥品的溶解加速並均勻
指叉電極晶片	光感測元件
對流烘箱	退火
半導體參數分析儀 (Agilent 4155c)	測量光感測器的各項電性參數
暗箱	光感測器置放及量測光感之處
光源時脈控制器	控制光源開關
光源 (紫外光、藍光、綠光、紅光、白光、紅外光)	發射目標波段的光以進行光感測
電腦	處理實驗數據

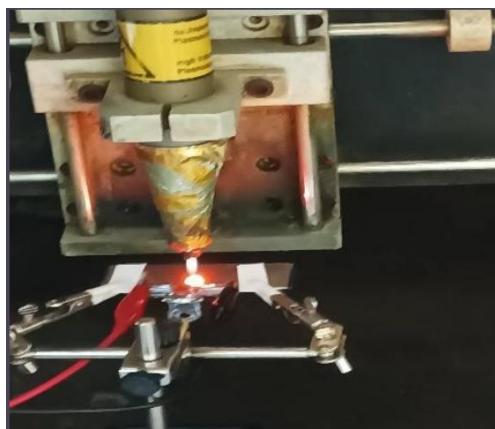


圖 2-1 大氣電漿系統。(作者自行拍攝)



圖 2-2 光感測系統。(作者自行拍攝)

### 三、材料分析設備

名稱	用途
光學顯微鏡 (OM)	利用可見光觀察樣品表面結構
掃描式電子顯微鏡 (SEM)	使用電子束獲取樣品表面高解析影像
穿透式電子顯微鏡 (TEM)	透過電子束穿透分析樣品內部細微結構
X 光能量散佈光譜儀面分析 (EDX Mapping)	了解元素分佈與成分分析
X 光繞射儀 (XRD)	分析材料結晶結構與組成
掠角入射 X 光廣角散射 (GIWAXS)	研究薄膜和表面的結構與分子堆疊方向
光致發光光譜儀 (PL)	分析材料的光學與能帶結構
紫外-可見光分光光譜儀 (UV-Vis)	研究物質對光吸收的相對強度



圖 2-3 掃描式電子顯微鏡。(作者自行拍攝)



圖 2-4. 穿透式電子顯微鏡。  
(作者自行拍攝)

## 叁、研究過程與方法

### 一、研究流程圖

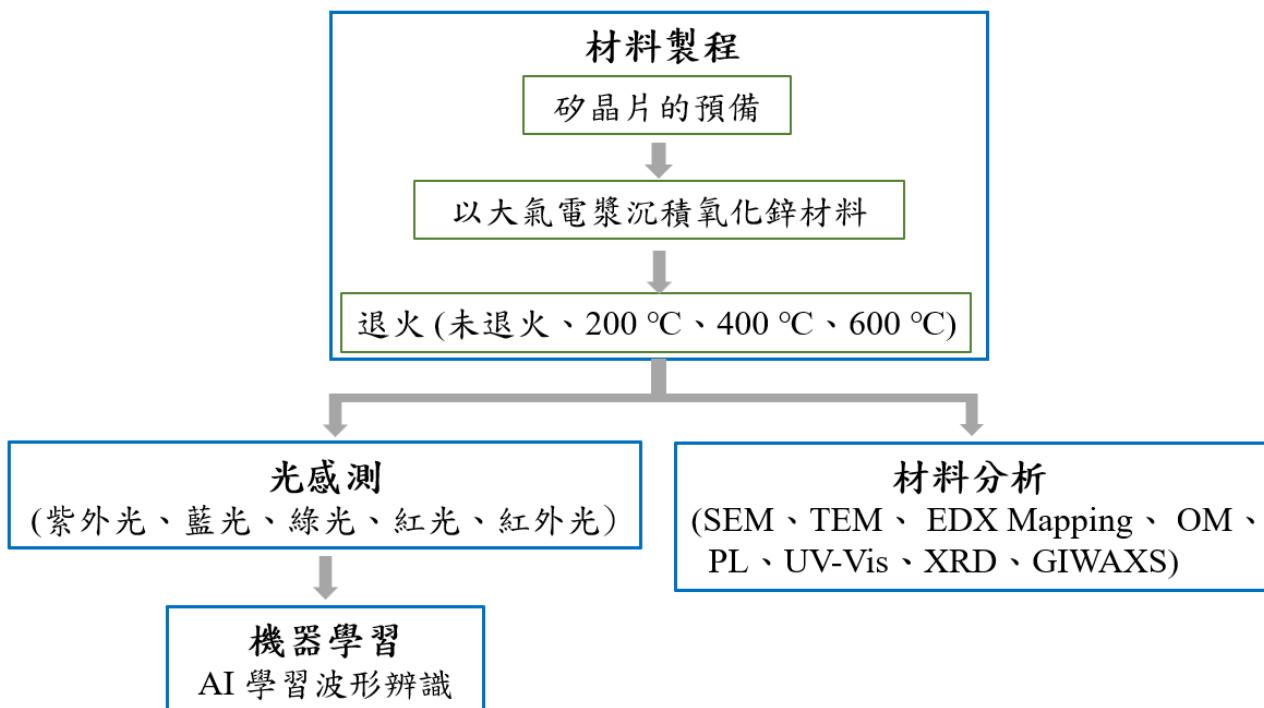


圖 3-1 研究流程圖。(作者自行製作)

### 二、研究方法

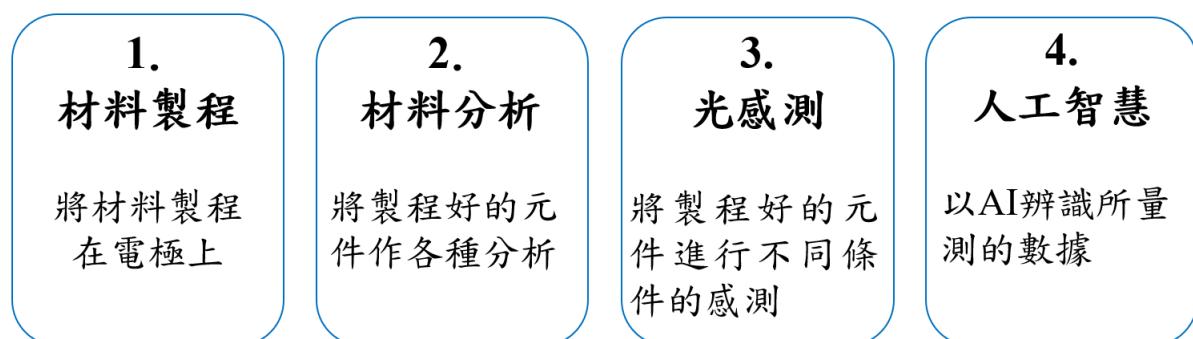


圖 3-2 研究方法概念圖。(作者自行製作)

### 三、實驗步驟

#### (一) 光感測材料製備

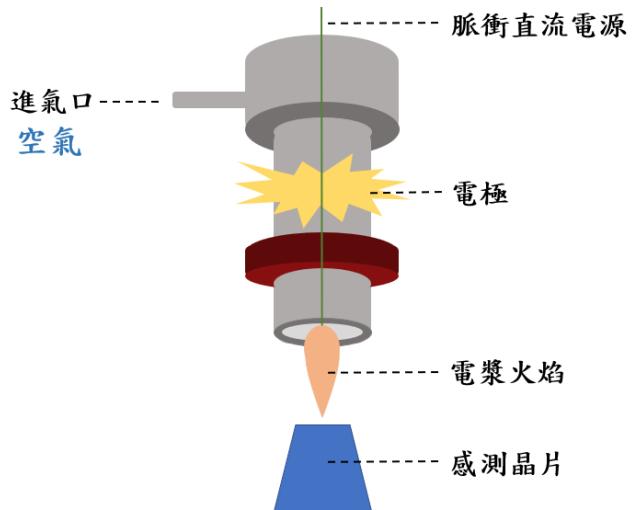


圖 3-3 大氣電漿系統。(作者自行繪製)

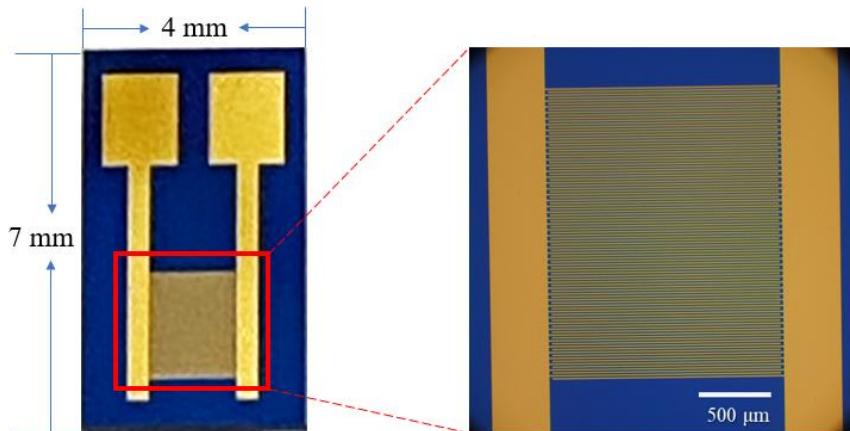
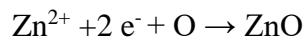
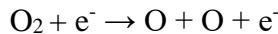


圖 3-4 以金作為指叉電極的感測晶片。(作者自行拍攝與繪製)

1. 設置大氣電漿系統。
2. 使用 2 g 硝酸鋅 ( $Zn(NO_3)_2$ ) 粉末、10 ml 乙醇 ( $C_2H_5OH$ ) 配置成溶液作為前驅物。
3. 藉由攪拌器加速硝酸鋅的溶解，直至溶解均勻。
4. 將上述溶液注入針筒，將針筒安置在注射幫浦內。
5. 射幫浦以每分鐘 0.3 ml 的速度帶出溶液，通過霧化噴嘴管線被霧化成為微小液滴。射幫浦於每一回合運行 5 秒再停止 5 秒，共 50 回合，時長為 500 秒。
6. 被霧化的微小液滴被引至大氣電漿系統噴嘴的電漿火焰處。電漿會將液滴中的氧化鋅前驅物分解並沉積至晶片形成氧化鋅薄膜。

7. 將已沉積氧化鋅薄膜的感測晶片放置於對流烘箱，分別以 200 °C、400 °C 和 600 °C 進行退火 30 分鐘。
8. 電漿從溶液中成長氧化鋅的化學式[4]:



## (二)、光響應的量測

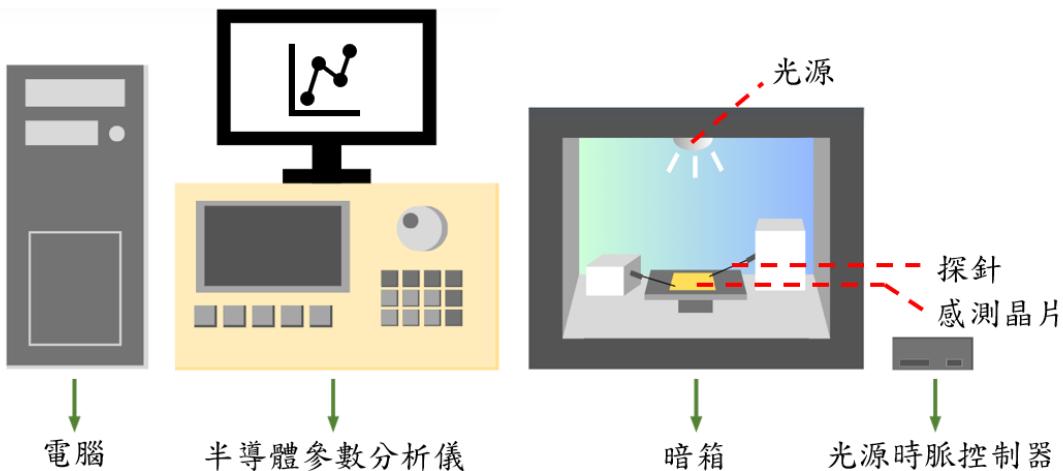


圖 3-5 光感測系統。(作者自行繪製)

1. 置放已沉積氧化鋅薄膜的感測晶片於暗箱的載台上，探針接觸感測晶片的兩側電極。
2. 點選電腦的光源控制軟體，連上光源時脈控制器。
3. 安置目標光源於暗箱上蓋內側，蓋上暗箱。
3. 點選「電流-電壓 (I-V) 量測模式」，未照光下使用半導體參數分析儀，以 -5V 至 +5V 電壓量測感測晶片的暗電流。
4. 切換至「電流-時間 (I-t) 量測模式」，對感測晶片施以 5V 的電壓，設定光源 (On-Off) 間隔時間為 30 秒並量測。
5. 切回至「電流-電壓 (I-V) 量測模式」，在照光下使用半導體參數分析儀，以 -5V 至 +5V 電壓量測感測晶片的光電流。

6. 處理光感測資料。

(1).進行光靈敏度 (photosensitivity)之計算，其公式如下：

$$\text{光靈敏度 } (\%) = \frac{I_{ph} - I_d}{I_d} \times 100 \text{ \%}$$

( $I_{ph}$ : 光電流， $I_d$ : 暗電流)

(2).進行光響應度 (photoresponsivity)之計算，其公式如以下：

$$\text{光響應度 } (\text{mA/W}) = \frac{I_{ph} - I_d}{W}$$

( $I_{ph}$ : 光電流， $I_d$ : 暗電流， $W$ : 光功率)

(3).進行響應時間 (response time) 和回復時間 (recovery time) 之計算

電流從最大值之 10 % 增加至 90 % 的上升時間為響應時間；電流從最大值之 90 % 減少至 10 % 的下降時間為回復時間。

## 肆、研究結果與討論

### 一、光學顯微鏡 (OM) 之分析

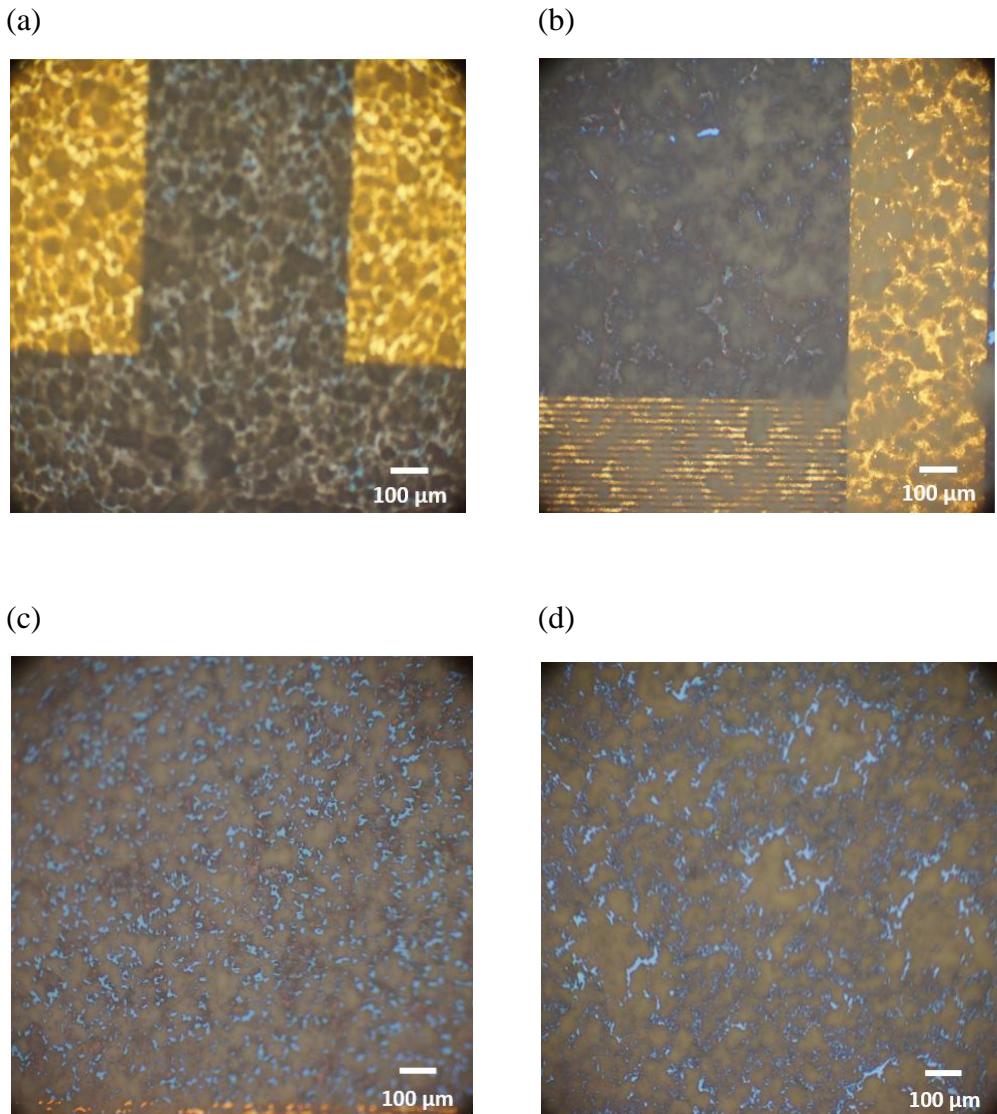


圖 4-1 以大氣電漿所成長的氧化鋅之光學顯微鏡影像 (a) 未退火 (b) 200 °C退火 (c) 400 °C 退火 (d) 600 °C退火。(作者自行拍攝)

光學顯微鏡下可觀察到不同退火條件下，氧化鋅薄膜在晶片上的分佈狀況。圖 4-1 (a) 中顯示在未退火時，氧化鋅尚未明顯聚集成島狀構造。退火溫度 200 °C 時，可以開始看見些微的島狀聚集，如圖 4-1 (b) 所示。但當退火溫度增加到 400 °C 時，在顯微鏡下可以觀測到許多較清楚的暗色島狀聚集，其淺色的島狀邊界亦較清楚，如圖 4-1 (c)。而在圖 4-1(d) 中，退火溫度達 600 °C 時，暗色島狀聚集面積變大，其島狀邊界相當清楚。

## 二、掃描式電子顯微鏡 (SEM) 之分析

### 1. SEM 俯視圖

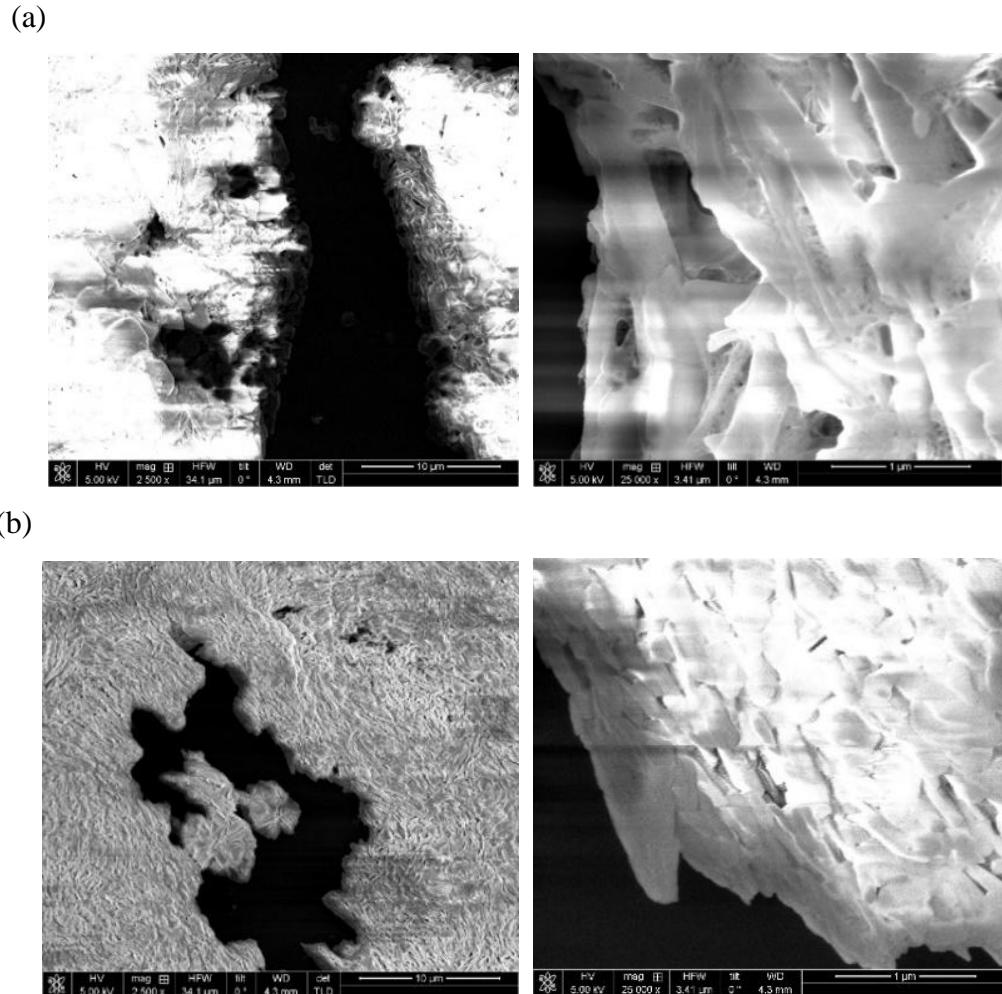
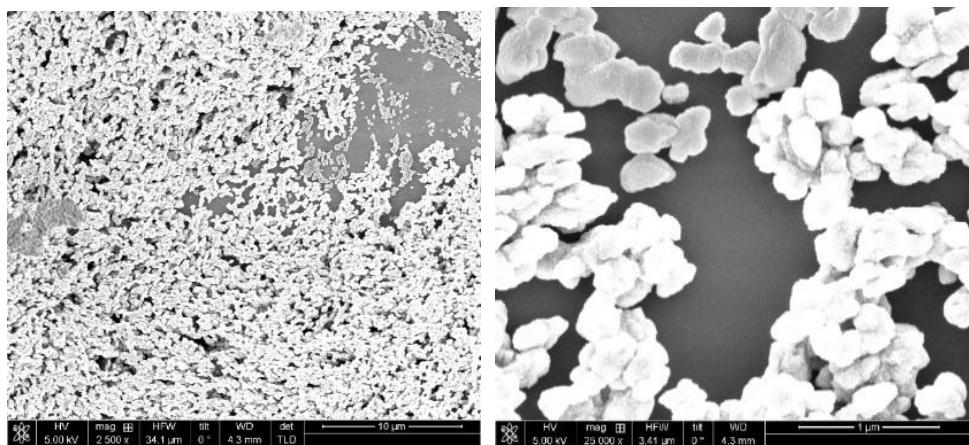


圖 4-2 以大氣電漿所成長的氧化鋅之 SEM 俯視圖 (a) 未退火 (b) 200 °C退火。(委託○○大學\*\*系拍攝)

從較小及較大倍率的 SEM 俯視圖可以看到樣品未退火的結晶狀況不明顯，因為其製作過程只用了大氣電漿、硝酸鋅粉末與乙醇直接完成。雖然因為未經過退火，結晶狀況不明顯，但有類似層狀結構，如圖 4-2 (a)所示。樣品經過 200 °C的退火後，可以看到從片狀結構上，逐漸開始有些許沒有很明顯的結晶，如圖 4-2 (b)所示。

(a)



(b)

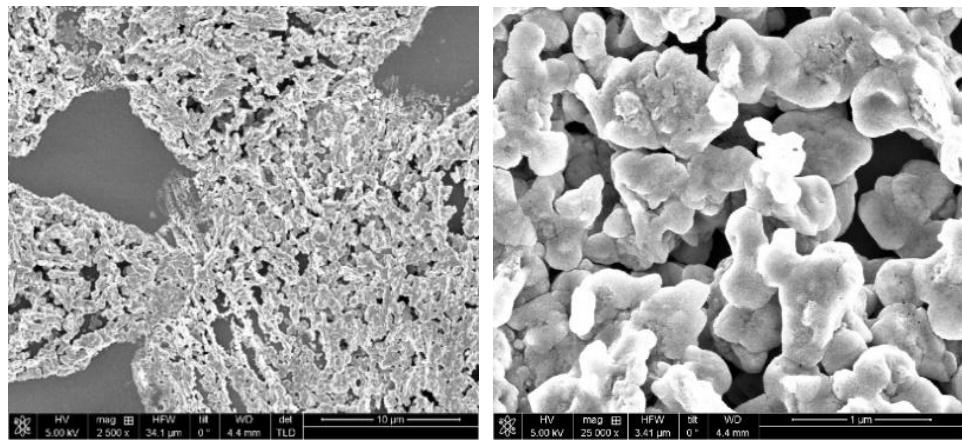


圖 4-3 以大氣電漿所成長的氧化鋅之 SEM 俯視圖 (a) 400 °C退火 (b) 600 °C退火。(委託○○大學\*\*系拍攝)

使用 400 °C退火後的樣品，其結晶變得很明顯，可以看到有明顯顆粒，如圖 4-3 (a)所示。當退火溫度增加到 600 °C時，除了會有明顯的結晶之外，亦開始出現小孔洞，從較大倍率的 SEM 影像可以觀察到，如圖 4-3(b)所示。

## 2. 剖面 SEM 側視圖

除了使用 SEM 得到不同退火條件之氧化鋅的俯視圖，我們也可以使用聚焦離子束把氧化鋅的晶片切開，觀察氧化鋅的剖面形貌，並且以 X 光能量散佈光譜儀 (EDX) 進行元素分析。

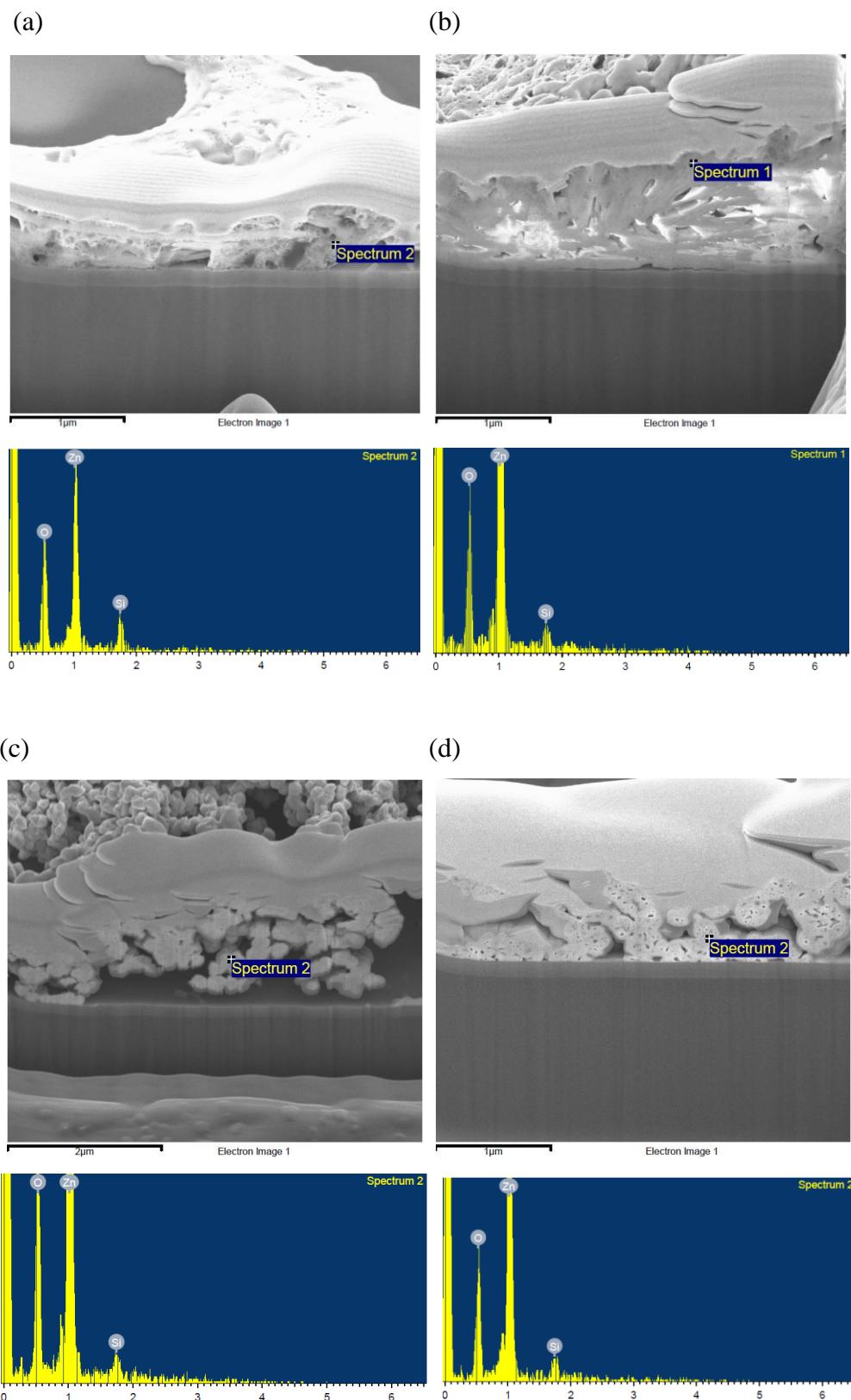


圖 4-4 以聚焦離子束切開大氣電漿所成長的氧化鋅之 SEM 剖面側視圖以及 EDX 元素分析  
 (a) 未退火 (b) 200 °C退火 (c) 400 °C退火 (d) 600 °C退火。(委託○○大學\*\*系拍攝)

在 SEM 影像下觀察大氣電漿所成長氧化鋅的剖面側視圖形貌，發現與俯視圖的形貌類似。如圖 4-4(a)，沒有觀察到未退火之氧化鋅側面的形貌有結晶，但是有類似大尺度層狀的結構。在 200 °C退火後，則可以看出不明顯的氧化鋅結晶如圖 4-4(b)所示。當氧化鋅置於 400 °C 退火處理後，可以觀察到有較大且明顯的氧化鋅結晶顆粒，如圖 4-4(c)所示。在 600 °C退火後，除了有較大氧化鋅顆粒外，也開始出現明顯孔洞，如圖 4-4(d)所示。此外，從 EDX 的元素分析結果發現退火前和以不同溫度退火後的氧化鋅中，元素主要都是氧和鋅的成分，如圖 4-4(a)、(b)、(c)和(d) 所示。

### 三、X 光繞射儀 (XRD)和 掠角入射 X 光廣角散射 (GIWAXS)之分析

使用光學顯微鏡及 SEM 觀察形貌之外，我們也使用 X 光繞射儀來觀察大氣電漿氧化鋅結晶的情形跟晶向，掠角入射 X 光廣角散射可以觀察到材料表面結構以及分子堆疊方向與基板的角度。

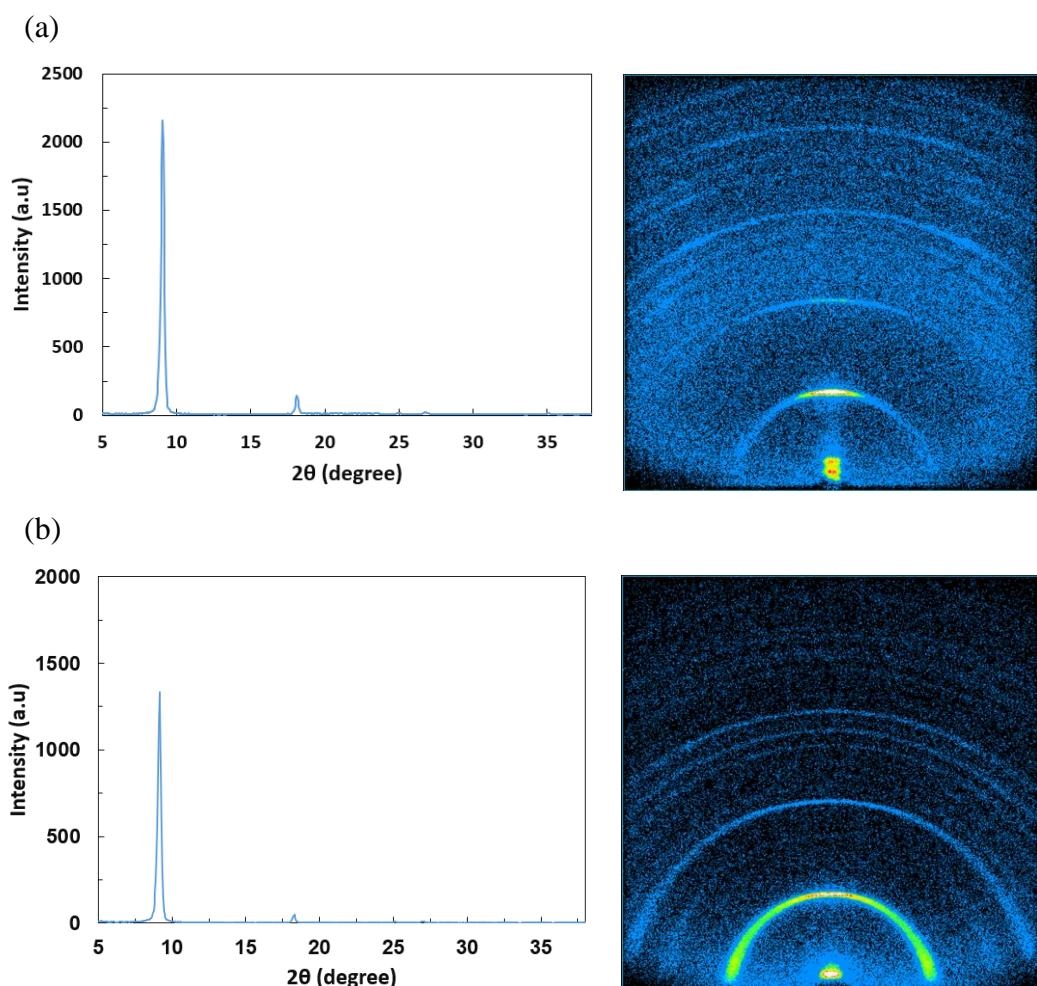


圖 4-5 大氣電漿所成長的氧化鋅之 X 光繞射儀 (XRD) 圖譜和掠角入射 X 光廣角散射 (GIWAXS) 影像 (a) 未退火 (b) 200 °C退火。(作者自行繪製及委託○○大學\*\*系拍攝)

關於大氣電漿成長之氧化鋅經過不同溫度退火後所產生結晶情形、結晶方向以及分子堆積或堆疊的方向，我們使用 X 光繞射分析 (XRD) 及掠角入射 X 光廣角散射 (GIWAXS) 來觀察。從圖 4-5(a)和(b)可以觀察到未退火及經過退火 200 °C 處理的氧化鋅，並未在  $2\theta$  為  $30^\circ$ ~ $35^\circ$  附近發現一般常見的氧化鋅峰值。反之，在  $2\theta$  為  $10^\circ$  左右可以觀察到一個 XRD 峰，而這種低角度的峰在石墨烯及鈣鈦礦的層狀結構也可觀察到，所以推測可能是層狀結構，正如在 SEM 俯視圖及剖面圖 4-2(a)及 4-4(a)所示。此外根據圖 4-5(a)的 GIWAXS 影像也可以推斷，未退火的氧化鋅堆疊方向是與基板平行。

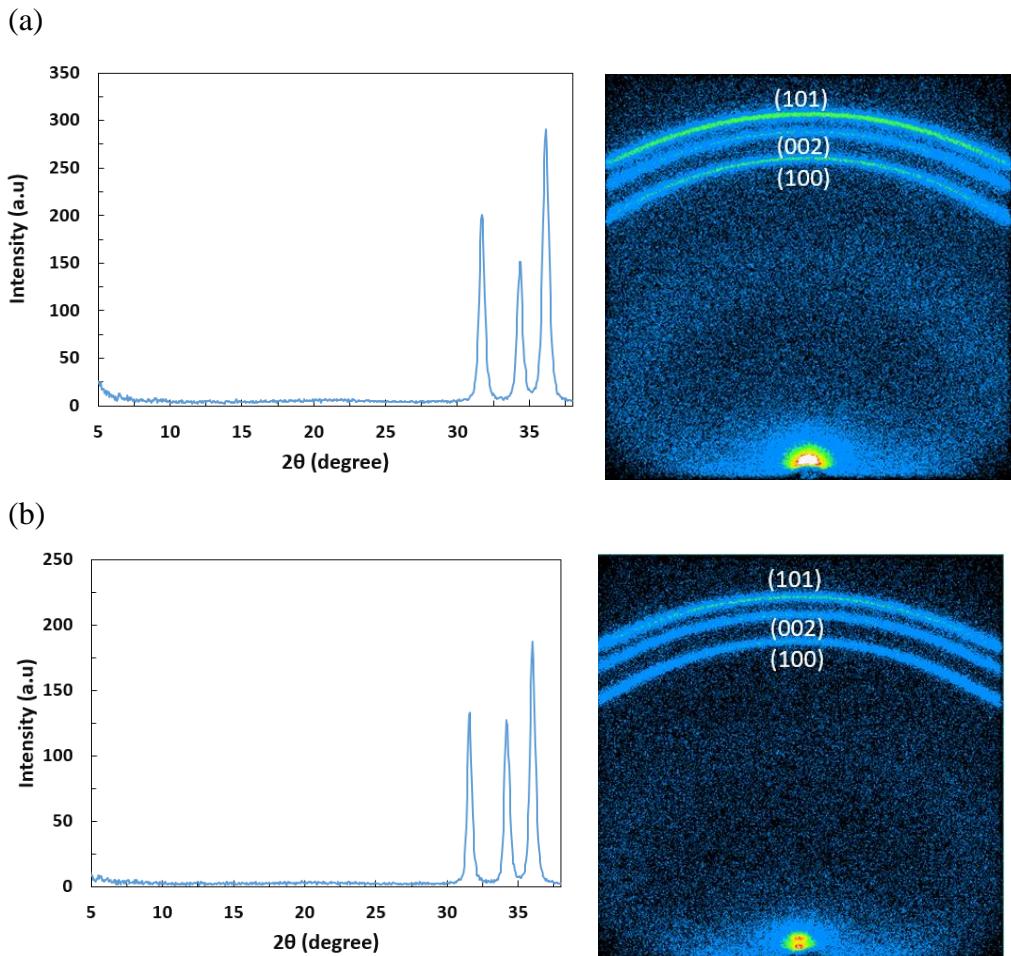


圖 4-6 大氣電漿所成長的氧化鋅 X 光繞射儀 (XRD) 圖譜和掠角入射 X 光廣角散射 (GIWAXS) 之影像 (a) 400 °C退火 (b) 600 °C退火。(作者自行繪製及委託○○大學\*\*系拍攝)

但當退火溫度增加到 400 °C 及 600 °C，如圖 4-6 (a)和(b)，很明顯可以觀察到一般氧化鋅常見的  $2\theta$  為  $30^\circ$ ~ $35^\circ$  附近的特徵峰，晶面方向分別為 (100)、(002) 及 (101)。並且根據 GIWAXS 的影像，氧化鋅以上三種晶向往各方向強度都類似，並非層狀堆疊。不僅如此，XRD 峰最高峰為 (101)，而非垂直於基板的 (002) c-軸方同，符合 SEM 所觀察的為顆粒狀結構，而非一般六方晶 (002) 方向的奈米柱結構。

#### 四、穿透式電子顯微鏡 (TEM)和 X 光能量散佈光譜儀面分析 (EDX Mapping)

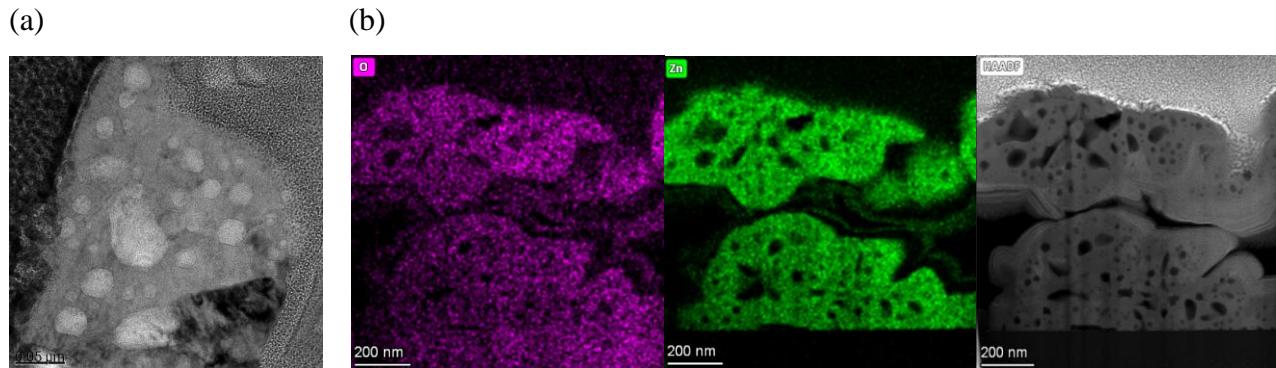


圖 4-7 以大氣電漿所成長的氧化鋅退火  $600\text{ }^{\circ}\text{C}$  之穿透式電子顯微鏡影像 (a) 明場之影像 (b) 經過 X 光能量散佈光譜儀面分析 (EDX mapping) 之鋅元素、氧元素和暗場影像。(委託○○大學\*\*系拍攝)

為更進一步觀察氧化鋅以  $600\text{ }^{\circ}\text{C}$  退火的情形，我們使用穿透式電子顯微鏡 (TEM) 及 X 光能量散佈光譜儀面分析 (EDX mapping) 來進行元素分析。之前的掃描式電子顯微鏡 (SEM) 影像中可看到結晶顆粒上有小孔洞出現，如圖 4-3 (b) 與 4-4 (d) 所示。因此，使用穿透式電子顯微鏡可以更清楚觀察到在明場的影像中，有許多數十奈米大小且接近圓形的孔洞 (明場的亮點影像是孔洞)，其中最小的尺寸接近  $10\text{ nm}$ ，如圖 4-7 (a) 所示。此外，使用 EDX mapping 進行元素分析來看結晶，發現成長的結晶位置正是氧和鋅的位置，如圖 4-7 (b) 左邊兩圖所示。圖 4-7 (b) 最右邊的圖為氧化鋅的暗場影像，為對應的氧化鋅結晶及孔洞剖面的高解析影像。

#### 五、光致發光光譜 (Photoluminescence spectra, PL) 與紫外-可見光分光光譜 (UV-Vis) 之分析

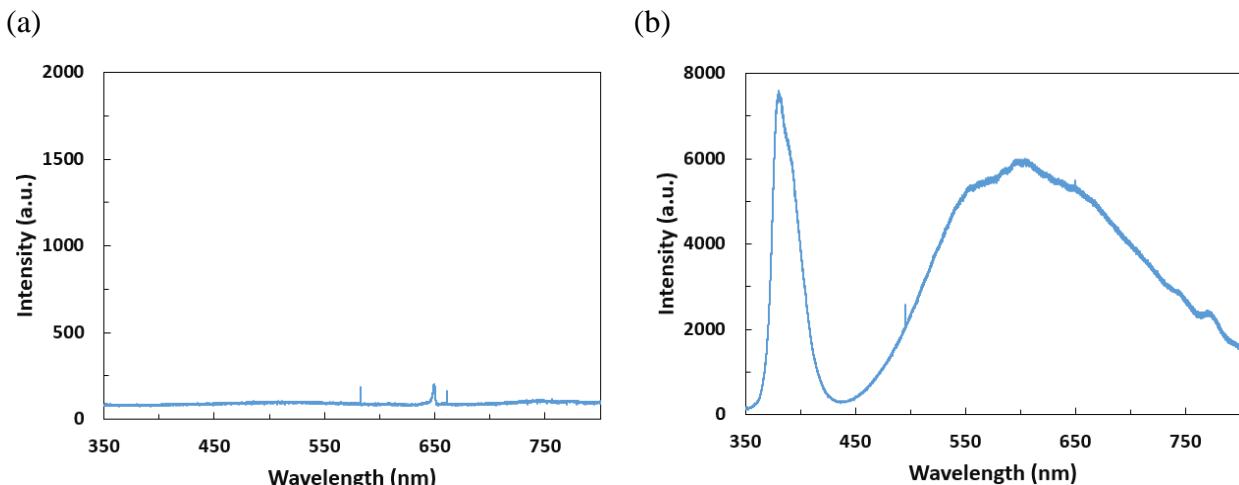


圖 4-8 以大氣電漿所成長的氧化鋅之光致發光光譜 (a) 未退火 (b)  $600\text{ }^{\circ}\text{C}$  退火。(作者自行繪製)

光致發光光譜 (Photoluminescence, PL) 可作關於材料光學上的特性分析。未退火及退火  $600^{\circ}\text{C}$  之氧化鋅的光致發光光譜，如圖 4-8(a) 和 (b) 所示。未退火的氧化鋅的 PL 光譜中，只有很小的雜訊。如圖 4-8(a) 所示。但  $600^{\circ}\text{C}$  退火的氧化鋅可以觀察到峰值波長  $375\text{ nm}$  帶至帶 (band-to-band) 躍遷，是屬於氧化鋅 (能隙  $3.4\text{ eV}$ ) 的正常載子躍遷，如圖 4-8(b) 所示。波長峰值  $600\text{ nm}$  左右的極寬頻 ( $500\text{-}800\text{ nm}$ ) 光致發光光譜範圍，可能是孔洞及缺陷造成的載子躍遷。這種極寬頻的載子躍遷光譜對多波段寬頻光感測器的感測有助益。

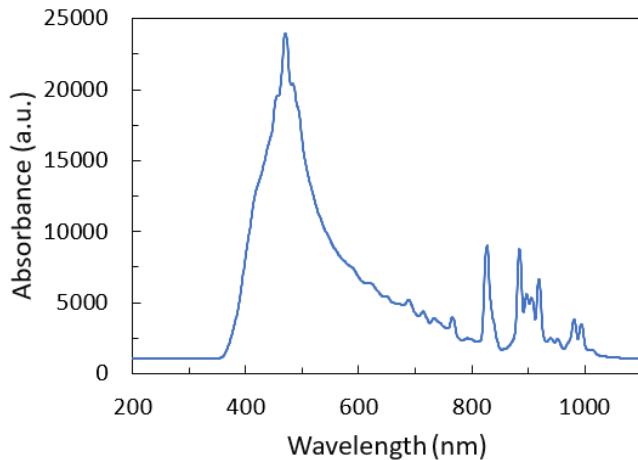


圖 4-9  $600^{\circ}\text{C}$  退火的氧化鋅之紫外-可見光分光吸收光譜。(作者自行繪製)

根據  $600^{\circ}\text{C}$  退火氧化鋅的紫外-可見光分光吸收光譜如圖 4-9，發現吸收波長最大峰值在  $470\text{ nm}$  附近。這些光吸收有可能將光子轉成電子電洞對，也有可能將光子轉成熱能。如果所吸收的光子大部分轉換成電子電洞對，進而提升光電流，有可能在波長接近  $470\text{ nm}$  附近時有最大的光響應。

## 六、X 射線光電子能譜儀 (X-ray photoelectron spectroscopy, XPS) 之分析

X 射線光電子能譜儀可針對材料表面，進行化學鍵結和電子狀態的分析。在 O1s 的能譜中，未退火的氧化鋅前驅物具有較高的光電子束縛能，峰值為  $532\text{ eV}$ ，如圖 4-10(a) 所示。在退火前，大氣電漿所合成的氧化鋅前驅物，是處於  $\text{ZnO}_x$  的形態，其中氧缺陷會使 O1s 束縛能增強至  $532\text{ eV}$ 。有大量缺陷的  $\text{ZnO}_x$  會產生電子電洞對復合中心，造成大量電子和電洞在向外傳輸形成光電流前已經互相結合，無法向外傳輸產生光電流。但  $\text{ZnO}_x$  經過  $600^{\circ}\text{C}$  退火以後，氧化鋅 ( $\text{ZnO}$ ) 的結晶生成，此時氧為負二價，束縛能峰值為  $529.6\text{ eV}$ 。氧化鋅結晶因著缺陷產生的復合中心減少，電子和電洞能夠向外傳輸形成光電流。但是在氧 O1s 的能譜中，仍然能觀察到  $532\text{ eV}$  附近有一個位於側邊的微弱小峰，代表能帶中間的缺陷仍然存在，適量

的缺陷能幫助氧化鋅結晶吸收長波長的光，甚至紅外光，產生電子電洞對。而氧化鋅結晶進一步幫助電子和電洞向外傳輸形成光電流，因此  $600\text{ }^{\circ}\text{C}$  退火對長波長的光響應有幫助。

從 Zn2p 電子能譜可觀察到氧化鋅的雙特徵峰，如圖 4-10(b)所示。退火之前的氧化鋅前驅物，因為有許多的缺陷，造成電子雲密度較低，內層電子需要更高能量激發，使得束縛能提升。而以  $600\text{ }^{\circ}\text{C}$  退火後，氧化鋅結晶的產生造成電子雲密度較高，內層電子在較低能量就能被激發，雙特徵峰往束縛能低的地方移動。因此，以  $600\text{ }^{\circ}\text{C}$  退火所造成之 O1s 及 Zn2p 鋒值的偏移趨勢相同，皆是往束縛能低之處偏移。

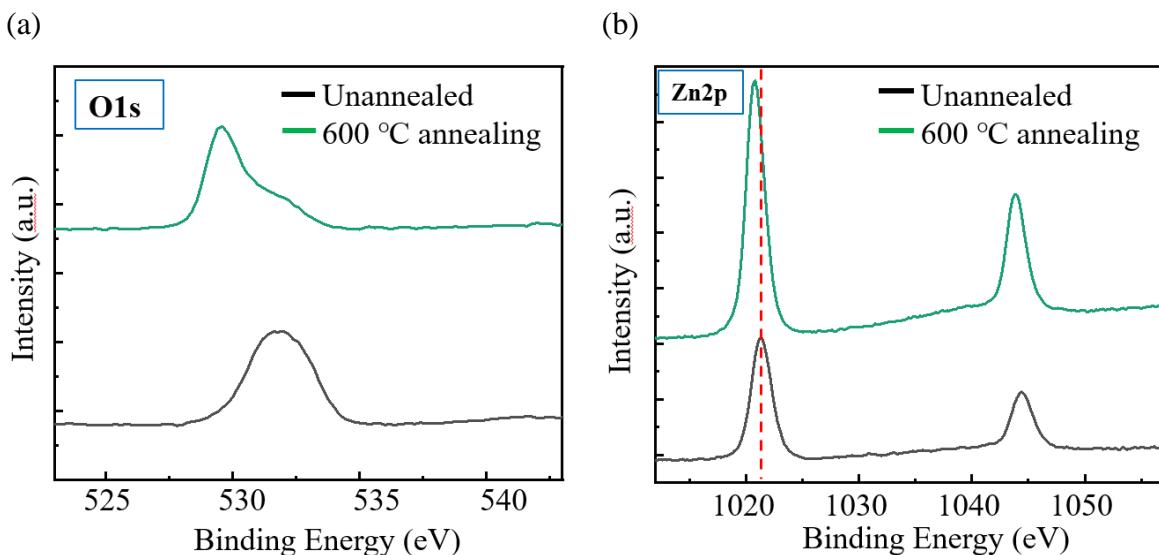


圖 4-10 未退火及  $600\text{ }^{\circ}\text{C}$  退火氧化鋅之 (a) O1s 及 (b) Zn2p XPS 能譜。(作者自行繪製)

## 七、光感測分析

光感測分析是將光感測器系統內兩個探針與氧化鋅光感測元件連接。一個循環為光源打開 30 秒，再關閉 30 秒，總共進行八個循環。若元件能感應到光則產生電流，無法感應到光則不產生電流，而感測到的反應會傳送至半導體參數分析儀並從電腦上顯示波形和數據。

## (一) 未退火元件之光感量測

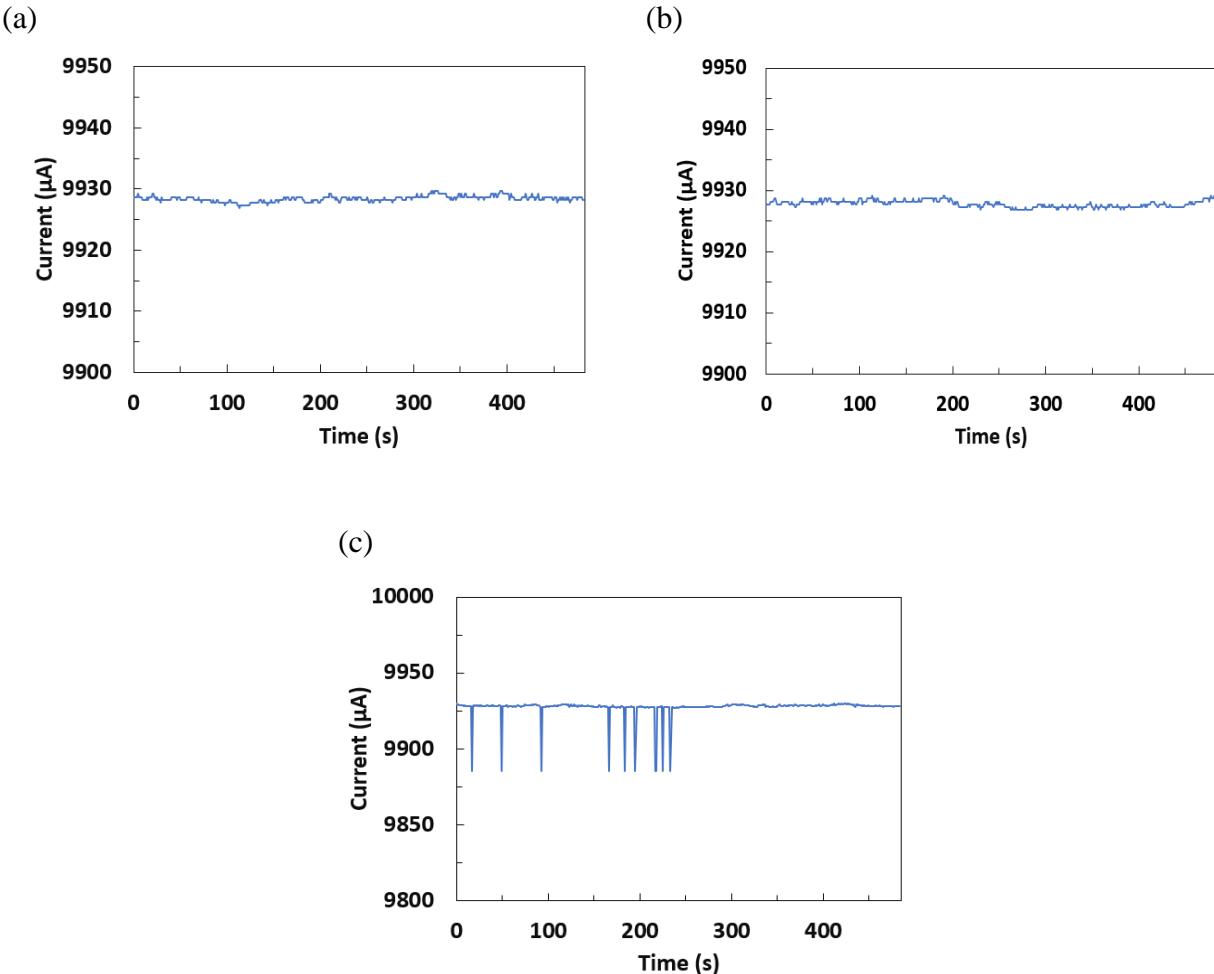


圖 4-11 未退火元件之光感量測 I-t 圖 (a) 紫外光 (波長 367 nm) (b) 白光 (波長 400 ~ 750 nm) (c) 紅外光 (波長 848 nm)。(作者自行繪製)

由於未退火的元件並無產生結晶，因此無論在何種光源中，感測到的波形僅有無效的雜訊。光感測器的材料需要具備良好的光響應能力，即能有效吸收光子，產生電子-電洞對並能被收集形成電子信號。在退火前，材料通常具有較多的晶格缺陷與應力，例如錯位、空位或界面缺陷。這些缺陷會成為電子與電洞的復合中心，使光生電子-電洞對迅速消失，導致光響應效率降低。退火處理能顯著改善這些材料特性，是一個能夠提升材料結晶性、最佳化界面以及降低缺陷的過程，從而使材料具備作為高效光感測器的必要條件。未經退火的元件由於缺陷過多、導電性質不佳，難以達到有效的光電轉換，因此無法作為良好的光感測器。

## (二) 200 °C退火元件之光感量測

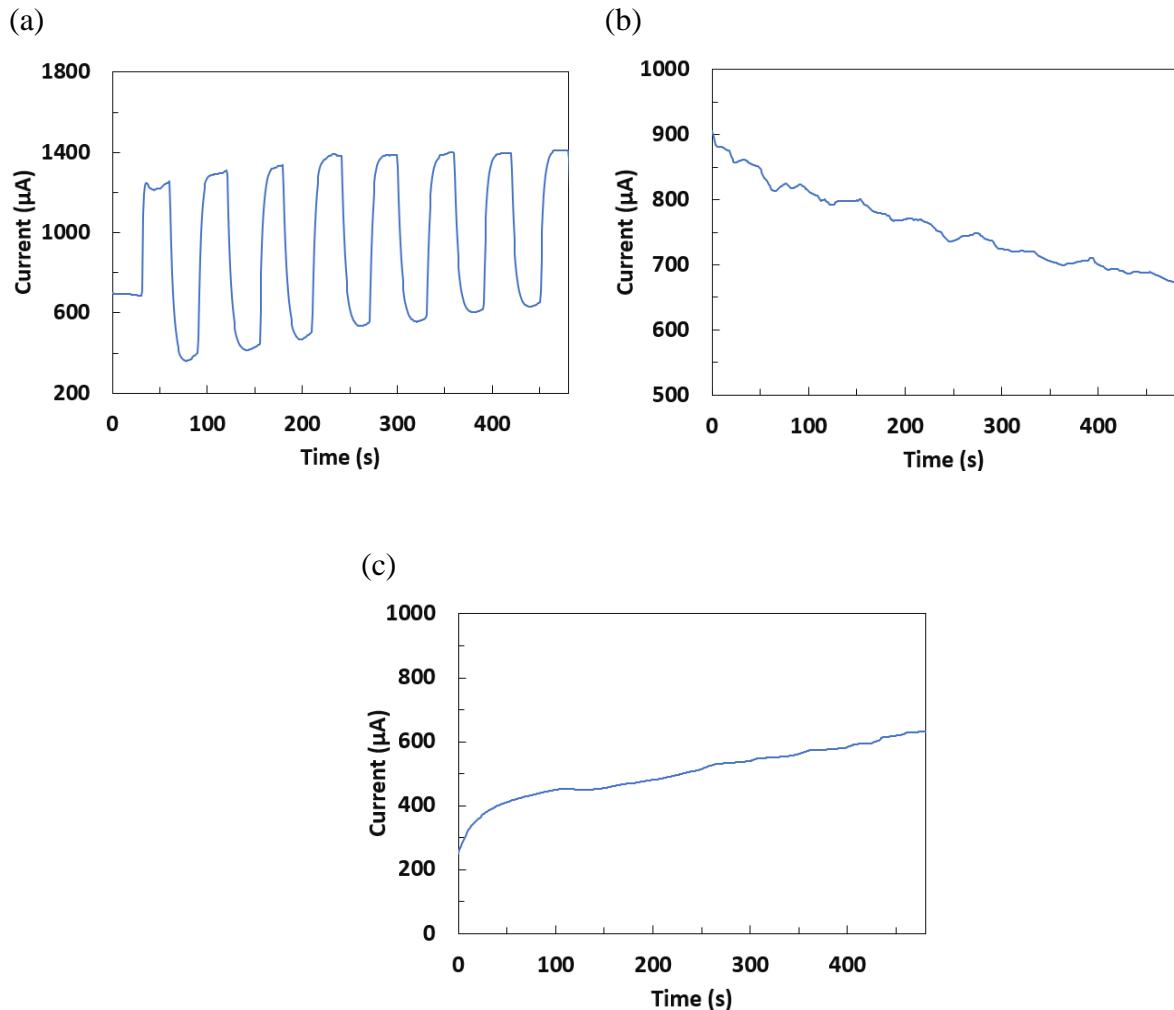


圖 4-12 200 °C退火元件之光感量測 I-t 圖 (a) 紫外光 (波長 367 nm) (b) 白光 (波長 400 ~ 750 nm) (c) 紅外光 (波長 848 nm)。(作者自行繪製)

當 200 °C退火的材料使用紫外光進行光感測時，開始出現初步的感測效果。照射白光時有微弱的光響應，但使用紅外光則無效果。低溫的退火處理不足以提供足夠的能量使材料內部的原子重新排列或移動到更穩定的位置，因此晶格缺陷（例如錯位、空位）和界面缺陷依然存在。此外，低溫退火僅能部分減少非晶相或微晶結構以稍微改善光感測效果，主要與退火溫度對材料內部結構和性質的影響有限有關，部分材料可能需要更高溫度才能有效轉變成結晶態。

(三) 400 °C退火元件之光感量測

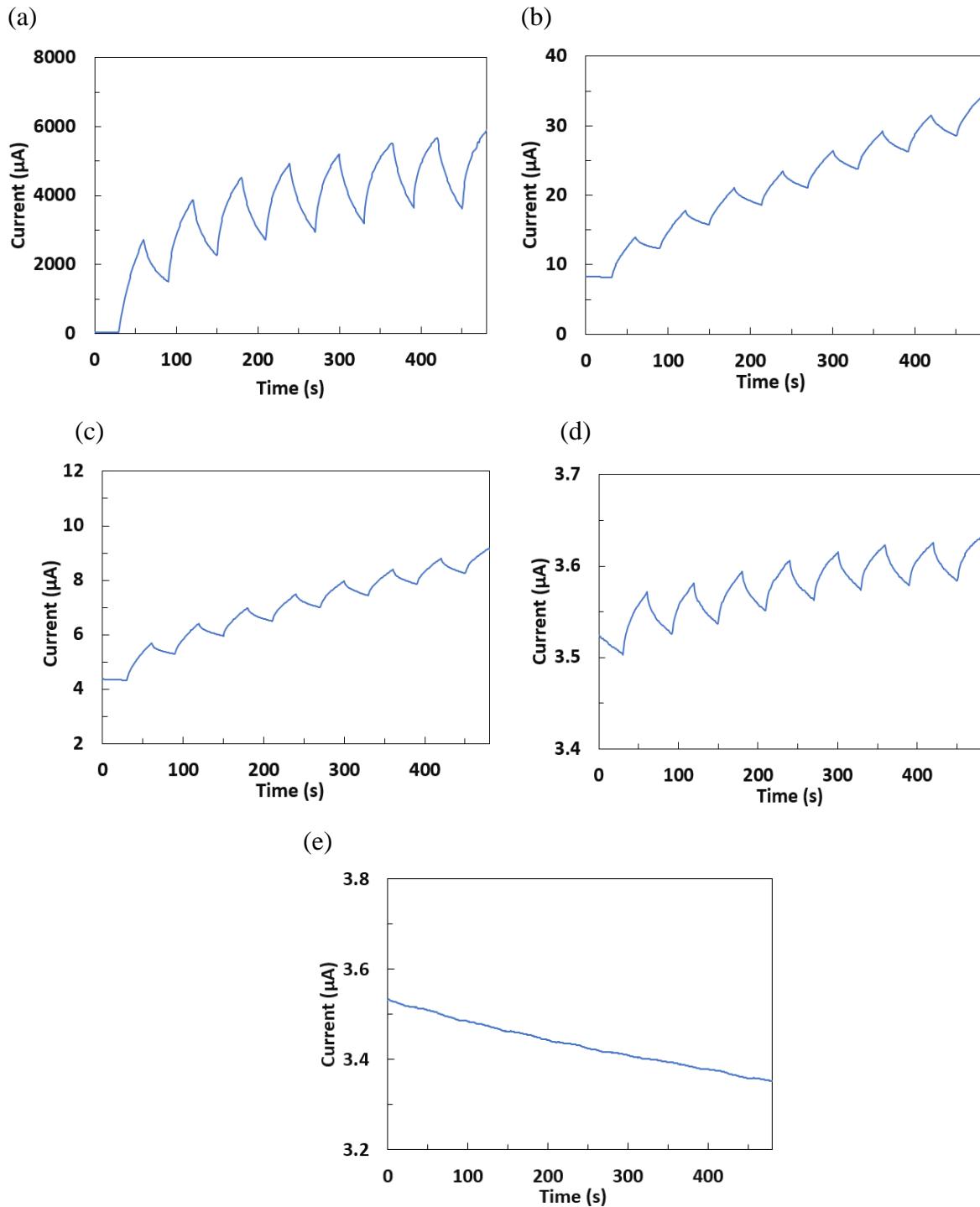


圖 4-13 400 °C退火元件之光感量測 I-t 圖 (a) 紫外光 (波長 367 nm) (b) 藍光 (波長 467 nm) (c) 綠光 (波長 522 nm) (d) 紅光 (波長 630 nm) (e) 紅外光 (波長 848 nm)。(作者自行繪製)

高溫退火能顯著改善材料的結晶性與光感測性能，主要是因為高溫提供足夠能量讓原子重新排列，消除晶格缺陷、降低缺陷密度，並促使非晶相轉變為結晶相，從而提升光吸收能

力與載子遷移率。此外，高溫退火還能最佳化材料表面與界面的品質，有助於光生載子的有效收集。因此元件經過 400 °C 退火後，紫外光、藍光、綠光及紅光都有光響應。

#### (四) 600 °C 退火元件之光感量測

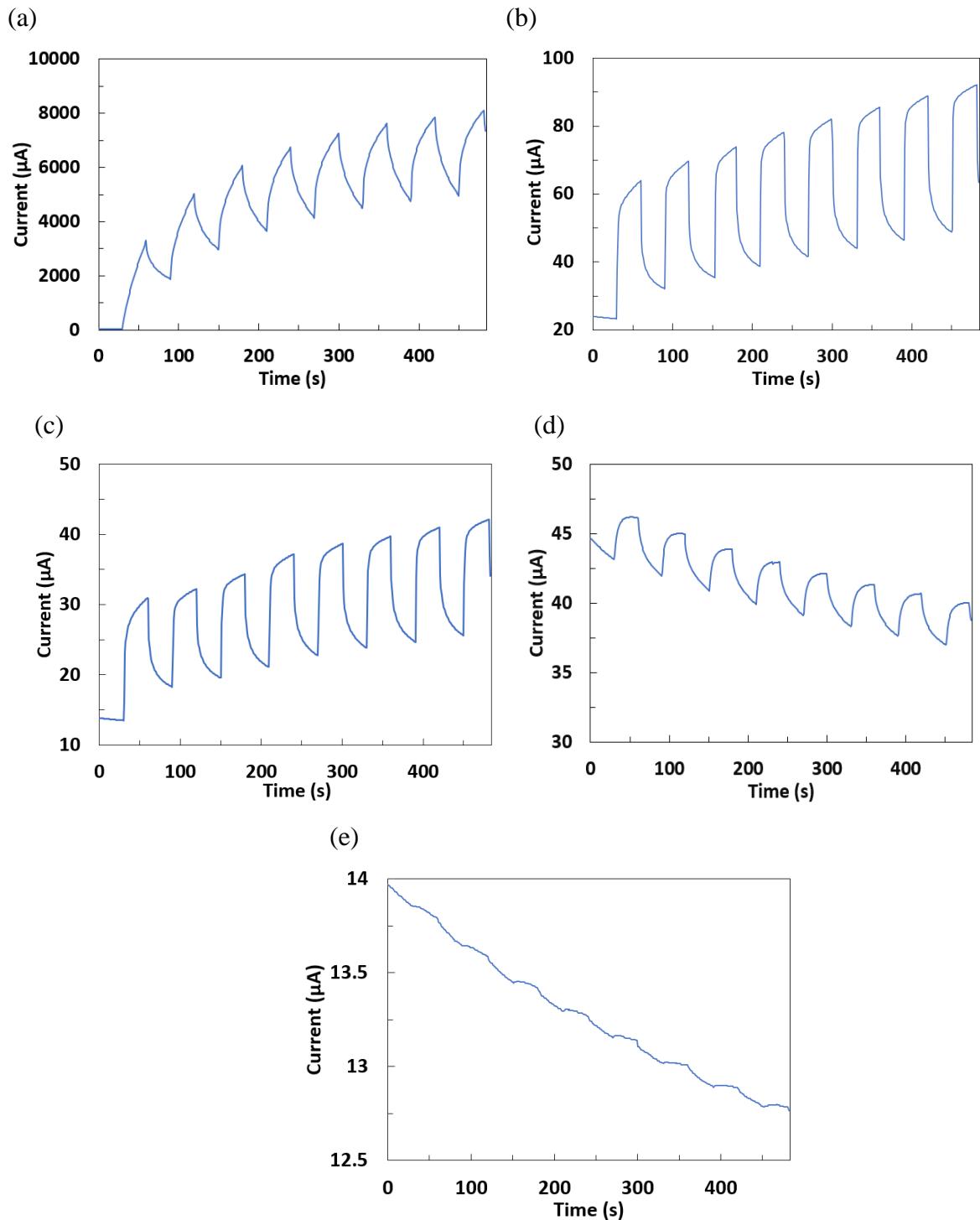


圖 4-14 600 °C退火元件之光感量測 I-t 圖 (a) 紫外光 (波長 367 nm) (b) 藍光 (波長 467 nm) (c) 綠光 (波長 522 nm) (d) 紅光 (波長 630 nm) (e) 紅外光 (波長 848 nm)。(作者自行繪製)

更高溫退火能進一步改善材料的光響應，主要是因為高溫為原子提供更大動能，使材料內部結晶結構更加完整，深層缺陷得以有效修復，從而降低電子-電洞對的復合率，使光生載子的生成、分離與傳輸效率大幅提高，最終增強光響應能力。除了能偵測到紫外光、藍光、綠光及紅光，以 600 °C 退火之元件還能偵測到紅外光，其原因可能是如 SEM 及 TEM 所觀察到孔洞結構的產生所致。不僅如此，感測速度及光靈敏度最大的光是藍光及綠光，與之前紫外-可見光分光吸收光譜之量測結果相對應。

#### (五) 光感測器之光靈敏度、光響應度以及響應時間和回復時間之比較

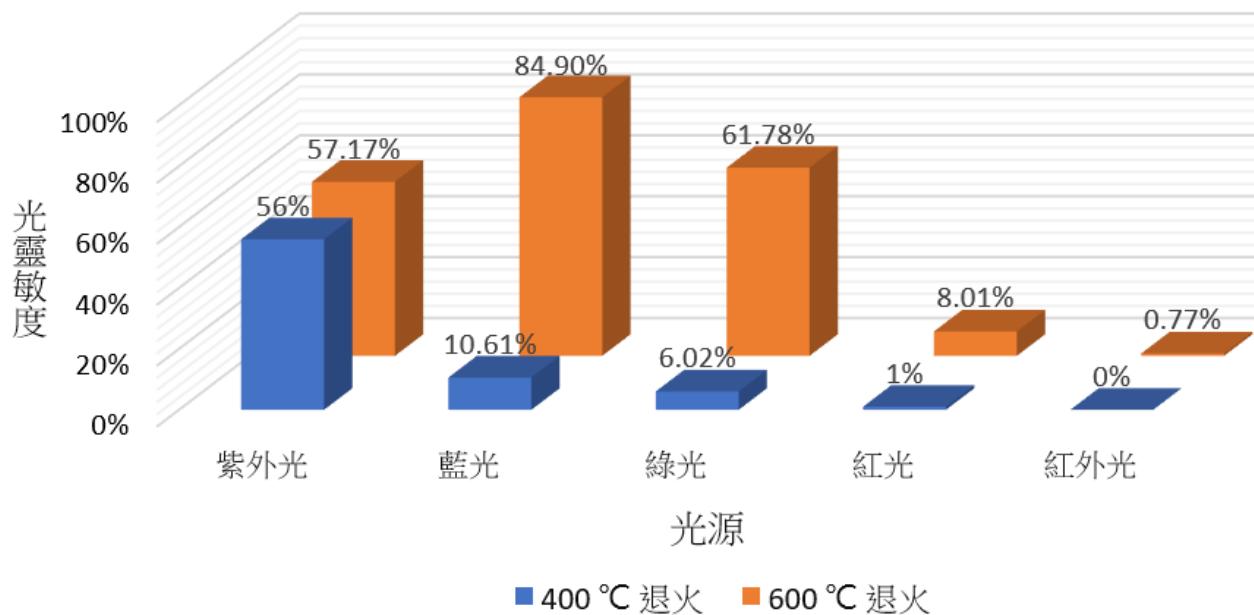


圖 4-15 400 °C 退火和 600 °C 退火之光感測器的光靈敏度。(作者自行繪製)

表 4-1 各種退火條件之光感測器的光靈敏度。

光源	光感測器			
	未退火	200 °C 退火	400 °C 退火	600 °C 退火
紫外光	--	138.95 %	56.00 %	57.17 %
白光	--	3.76 %	--	--
藍光	--	--	10.61 %	84.90 %
綠光	--	--	6.02 %	61.78 %
紅光	--	--	1.00 %	8.01 %
紅外光	--	--	--	0.77 %

表 4-2 各種退火條件之光感測器的光響應度 (mA/W)。

光源	光感測器			
	未退火	200 °C 退火	400 °C 退火	600 °C 退火
紫外光	--	7858.60	18463.70	25815.22
白光	--	256.53	--	--
藍光	--	--	30.00	434.78
綠光	--	--	6.89	224.07
紅光	--	--	0.44	37.09
紅外光	--	--	--	0.19

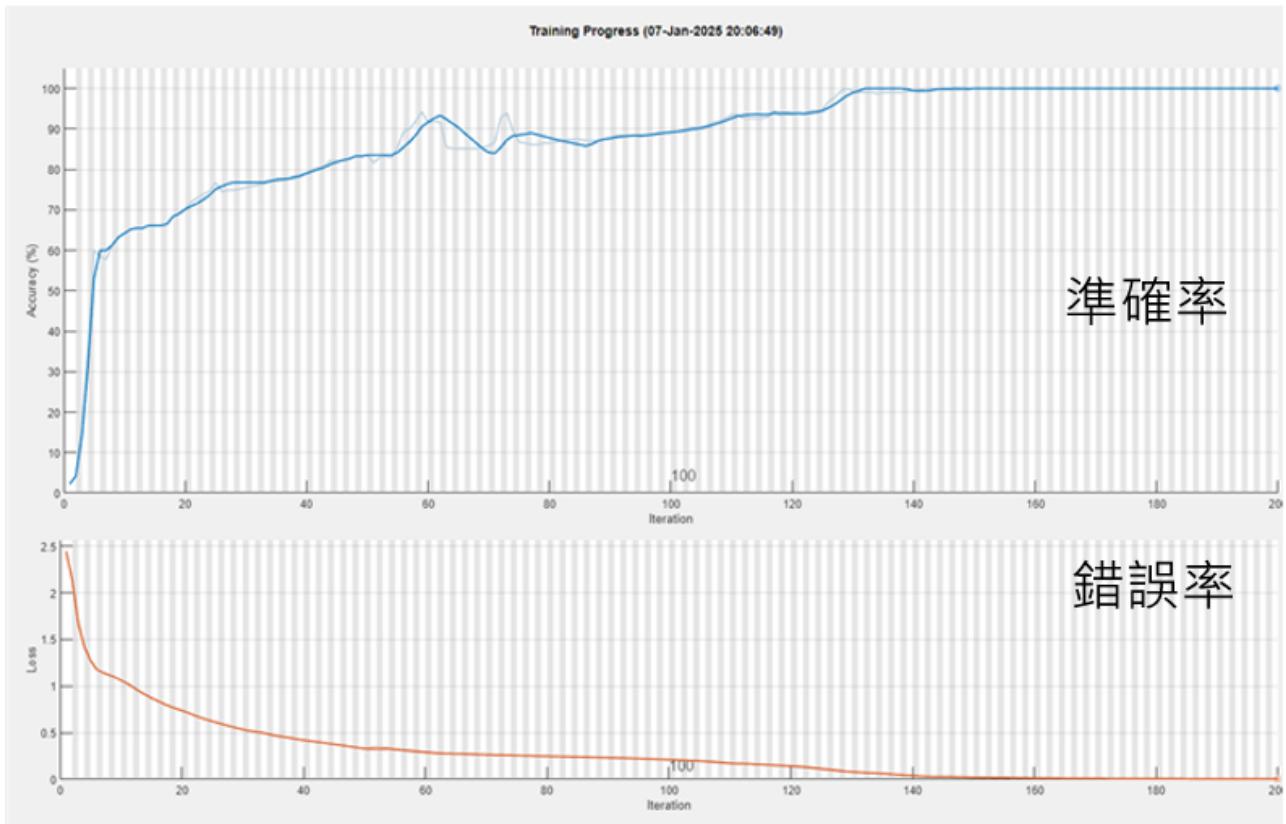
表 4-3 各種退火條件之光感測器的響應時間和回復時間。

光源	光感測器							
	未退火		200 °C 退火		400 °C 退火		600 °C 退火	
	響應 時間	回復 時間	響應 時間	回復 時間	響應 時間	回復 時間	響應 時間	回復 時間
紫外光	--	--	6 秒	8 秒	21 秒	27 秒	21 秒	26 秒
白光	--	--	16 秒	22 秒	--	--	--	--
藍光	--	--	--	--	24 秒	22 秒	6 秒	17 秒
綠光	--	--	--	--	26 秒	24 秒	9 秒	16 秒
紅光	--	--	--	--	20 秒	15 秒	9 秒	18 秒
紅外光	--	--	--	--	--	--	N/A	N/A

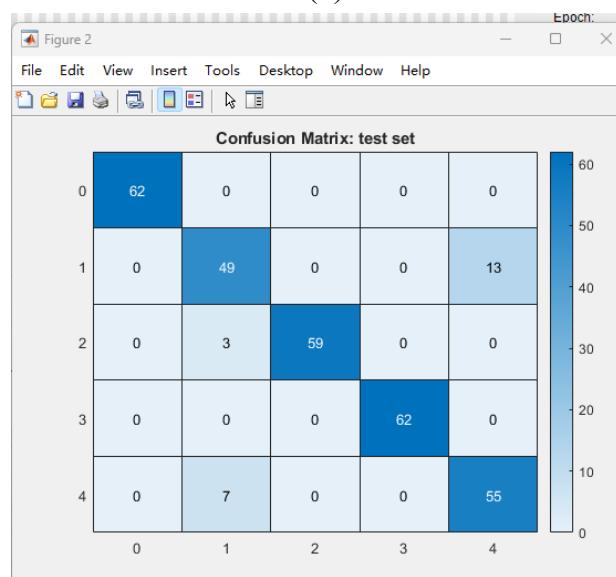
從圖 4-15 可看出經過 600 °C 退火的氧化鋅無論是對紫外光、藍光、綠光和紅光的光靈敏度都有較好的表現。若觀察光感測特性更細節的部分，從表 4-1、4-2 和 4-3 中的光靈敏度、光響應度以及響應和回復時間的數值來做分析，發現 200 °C 退火的氧化鋅具有對紫外光最好的光靈敏度及反應速度。至於其他光，如藍光、綠光、紅光和紅外光的部分，則 600 °C 退火的氧化鋅具有最好的光靈敏度、光響應度及反應速度。因為退火爐最高的溫度只有到 600 °C，所以是本研究使用退火溫度的極限值。

## 八、AI 辨識波型

(a)



(b)



Light type: 0 (UV), 1(Blue), 2(Green), 3(Red), 4(IR)

圖 4-16 (a) 機器學習過程 (b) 光辨識表：橫軸代表實際偵測的光源，縱軸代表機器學習波形時辨識出的光源種類。(作者自行繪製和委託○○大學\*\*系製作)

因為 600 °C 退火後之氧化鋅，具有從紫外光至紅外光各波段的光感測能力，因此我們可以利用光感測的不同波形對各種光做辨識。對於此種寬頻的多波段感測器，可以根據需要針對特定波長的光來做偵測。本研究利用 MATLAB 程式來辨識五種光源的波形，圖 4-16(a) 是 MATLAB 的訓練和辨識的過程，經過約 200 次機器學習的訓練，辨識率能夠接近 100%。辨識結果如圖 4-16(b)，橫軸的部分是原本所感測的光，如紫外光 (UV, 0)、藍光 (Blue, 1)、綠光 (Green, 2)、紅光 (Red, 3) 及紅外光 (IR, 4)，由數字 0 到 4 所代表；縱軸的部分是機器學習之後，利用波形辨識出光源種類的結果。因為紅外光波形較不明顯，因此失誤率較高。目前辨識已經有不錯的初步結果，可以對各種光作辨識，但是在辨識過程中仍有少量辨識誤差情形，之後會改善程式的演算法來提高辨識的準確性。

## 伍、結論

本研究透過大氣電漿沉積技術及以不同溫度退火之方法，成功在矽晶片上成長出氧化鋅薄膜，進一步製作出具有高靈敏度的光感測器。研究結果證實，隨著退火溫度的提升，氧化鋅結晶逐漸明顯，並在 600 °C 時達到最佳結晶形態，但也伴隨孔洞生成。實驗中光響應測試結果顯示，不同波長的光會產生獨特的電流-時間波形，透過 AI 技術可準確識別光源種類，展現了感測系統的高準確性與應用潛力。

本研究具有多項創新與實用價值。首先，大氣電漿沉積技術操作簡單、成本低廉且環保，不需要昂貴的真空設備，展現了良好的工業應用前景。其次，氧化鋅材料具有優異的化學穩定性、生物相容性及高靈敏度，使其在光感測領域具備競爭優勢。透過退火技術的最佳化處理，本研究成功提高了材料的結晶品質，進一步增強了感測器性能。

未來研究可考慮最佳化退火參數，同時針對不同光源進行更大範圍的測試。此外，結合 AI 進一步提升多波段辨識精度，並探索應用於環境監測、智慧農業及醫療診斷等領域的可能性，將有助於推動光感測技術的發展與創新應用。

## 陸、參考文獻資料

- [1] 吉家威, & 張國明 (2010)。藉由大氣電漿沉積主動層之氧化鋅薄膜電晶體之研究 [碩士論文, 陽明交大電子所]。
- [2] 周哲晗 (2023)。利用噴射式大氣電漿系統製備氧化鋅吸收增加層以提高鈣鈦礦太陽能電池光電轉換效率 [碩士論文, 台大機械系]。
- [3] Ramos, F. J., López-Santos, M. C., Guillén, E., Nazeeruddin, M. K., Grätzel, M., Gonzalez-Elipe, A. R., & Ahmad, S. (2014). Perovskite solar cells based on nanocolumnar plasma-deposited ZnO thin films. *ChemPhysChem*, 15(6), 1148-1153.
- [4] Ma, A., Rousseau, F., Donsanti, F., Lincot, D., & Morvan, D. (2015). Deposition of ZnO thin films from aqueous solution in a low power plasma reactor. *Surface and Coatings Technology*, 276, 186-194.
- [5] Ghanbari, H., Abnavi, A., Hasani, A., Kabir, F., Ahmadi, R., Mohammadzadeh, M. R., Fawzy, M., De Silva, T., & Adachi, M. M. (2023). Multilayer WSe<sub>2</sub>/ZnO heterojunctions for self-powered, broadband, and high-speed photodetectors. *Nanotechnology*, 34(28), 285207.
- [6] Kalepu, C. D., Kondepati, V., Aier, K. M., & Dhar, J. C. (2024). Design of High-Performance UV-Visible Broadband Photodetector Using Cd-Doped ZnO/ZnO Thin-Film Heterostructure. *IEEE Transactions on Electron Devices*.
- [7] Wang, X.-X., Zeng, G., Yu, Q.-J., Shen, L., Shi, C.-Y., & Lu, H.-L. (2024). Photodetectors integrating waveguides and semiconductor materials. *Nanoscale*, 16(11), 5504-5520.
- [8] Al-Shawabkeh, A. F., Elimat, Z. M., & Abushgair, K. N. (2023). Effect of non-annealed and annealed ZnO on the optical properties of PVC/ZnO nanocomposite films. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 36(3), 899-915.
- [9] Husna, J., Aliyu, M. M., Islam, M. A., Chelvanathan, P., Hamzah, N. R., Hossain, M. S., Karim, M., & Amin, N. (2012). Influence of annealing temperature on the properties of ZnO thin films grown by sputtering. *Energy Procedia*, 25, 55-61.
- [10] Tonezzer, M., Le, D. T. T., Iannotta, S., & Van Hieu, N. (2018). Selective discrimination of hazardous gases using one single metal oxide resistive sensor. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 277, 121-128.
- [11] Lin, P.-T., Tseng, Z.-C., & Huang, C.-Y. (2024). Machine Learning Assisted Wavelength Recognition in Cu<sub>2</sub>O/Si Self-Powered Photodetector Arrays for Advanced Image Sensing Applications. *ACS Applied Electronic Materials*.

## 【評語】052417

該研究以大氣電漿法製備氧化鋅材料，透過退火溫度之改變分析氧化鋅之結晶行為，並以 AI 技術分析光響應波形以進行光源識別，有助於提升光偵測效率與準確性，為智慧光感測應用提供嶄新的技術方案。以下幾個意見提供參考。

1. 退火溫度為 600 °C 時，氧化鋅達到最佳結晶形態，應加以評估其他較高退火溫度之優化程度。
2. 為什麼選擇大氣電漿沉積技術來製備氧化鋅薄膜？這種技術相較於其他方法（如真空沉積或化學氣相沉積）有哪些優勢和劣勢？
3. 利用人工智慧技術分析光響應波形？具體的演算法是什麼？這些技術如何提升光源識別的精度和效率？
4. 實驗中如何考慮環境因素（如溫度、濕度等）對光感測器性能的影響？

作品海報

大氣電漿成長的氧化鋅結晶材料

製作寬頻光感測器

結合人工智慧辨識感測光之種類

# 壹、研究動機

近年來半導體產業發展迅速，對全球產業與政治經濟產生深遠影響，台積電技術突破吸引全球科技公司合作。在半導體元件應用中，半導體光感測器應用廣泛，如紅外線熱像儀、血氧測量、植物健康監測等，不同波段的光偵測在現代科技中扮演著重要角色。但現有技術偵測不同波段的光需多個光感測器，增加系統複雜度與成本，因此我們構想開發單一感測器，可同時偵測不同波段光源。而半導體晶片光感測器體積小、低能耗，反應迅速且高靈敏，適用於光通信與影像處理等。利用大氣電漿技術可在矽晶片上製成高靈敏度光感測器，無需昂貴設備且環保。結合人工智慧 (AI) 的光感測器，能即時分析光響應並進行自動分類，提供高效的監測與防護。

# 貳、研究目的

- (一) 設計輕便的設備，方便隨身攜帶並使用。
- (二) 偵測日常中各種波段的光：環境中監測對皮膚有害的紫外光、對電腦、手機顯示器中藍光強度測量與評估、評估植物健康和生長狀態的綠光感測、可用於血氧濃度檢測的紅光監測及可應用於虹膜辨識的紅外光感測。
- (三) 利用大氣電漿技術在矽晶片上生長氧化鋅以及退火技術，實現高靈敏度的光波感測。
- (四) 透過人工智慧 (AI) 辨識不同波段的光之光響應電流-時間曲線 (I-t圖) 中的波形特性，提升光源識別精度和效率。

# 參、研究設備及器材

## 實驗儀器

名稱	功能
大氣電漿系統	進行大氣電漿沉積
注射幫浦	控制溶液的流量
攪拌器	協助藥品的溶解加速並均勻
指叉電極晶片	光感測元件
對流烘箱	退火
半導體參數分析儀	測量光感測器的各項電性參數
暗箱	光感測器置放及量測光感之處
光源時脈控制器	控制光源開關
光源	發射目標波段的光以進行光感測
電腦	處理實驗數據

## 材料分析設備

名稱	用途
光學顯微鏡 (OM)	利用可見光觀察樣品表面結構
掃描式電子顯微鏡 (SEM)	使用電子束獲取樣品表面高解析影像
穿透式電子顯微鏡 (TEM)	透過電子束穿透分析樣品內部細微結構
X光能量散佈光譜儀面分析 (EDX Mapping)	了解元素分佈與成分分析
X光繞射儀 (XRD)	分析材料結晶結構與組成
X射線光電子能譜 (XPS)	元素鍵結化學態和電子態的能譜技術
掠角入射X光廣角散射 (GIWAXS)	研究薄膜和表面的結構與分子堆疊方向
光致發光光譜儀 (PL)	分析材料的光學與能帶結構
紫外-可見光分光光譜儀 (UV-Vis)	研究物質對光吸收的相對強度

## 實驗器材

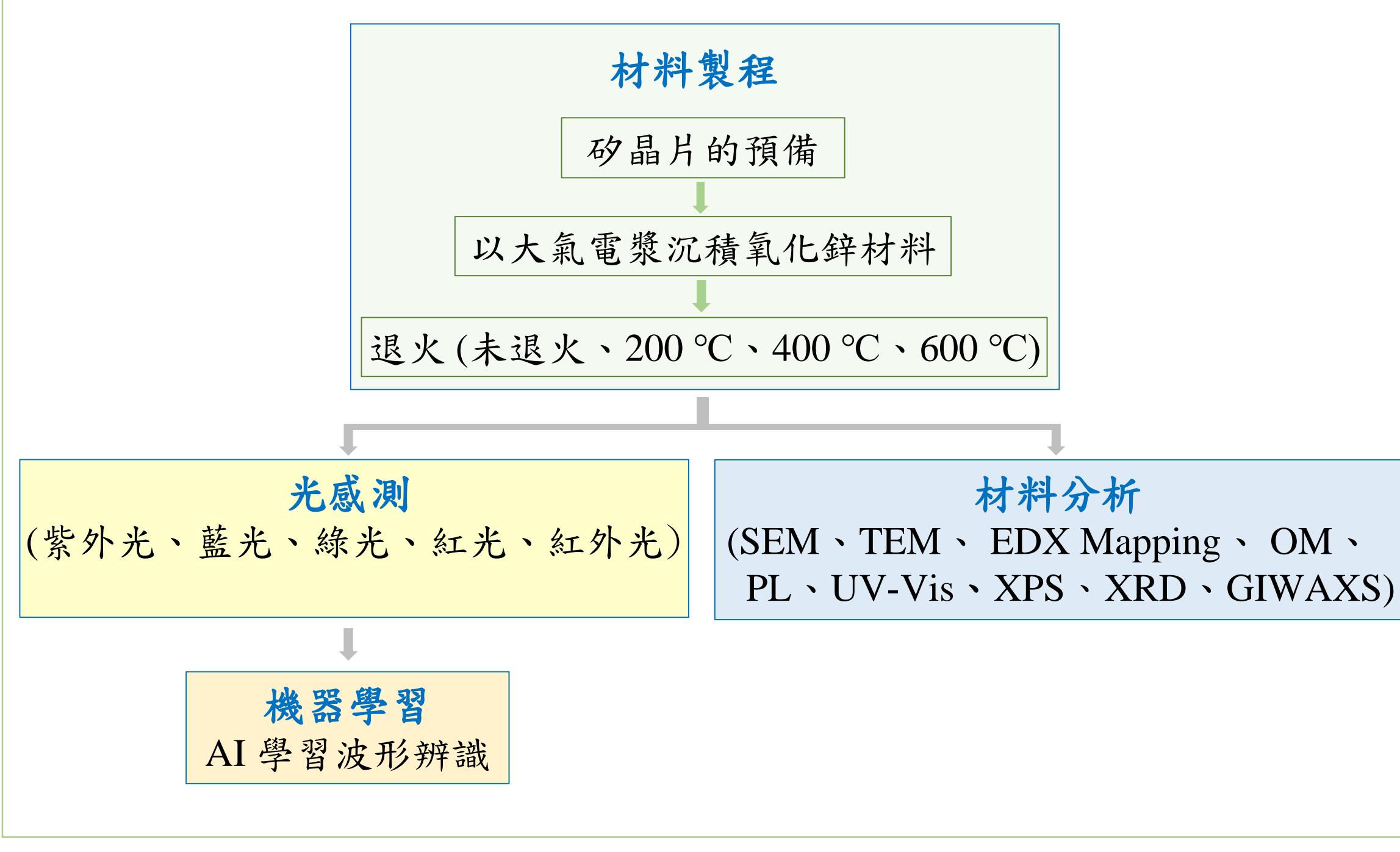
針筒、燒杯、量筒

## 實驗藥品

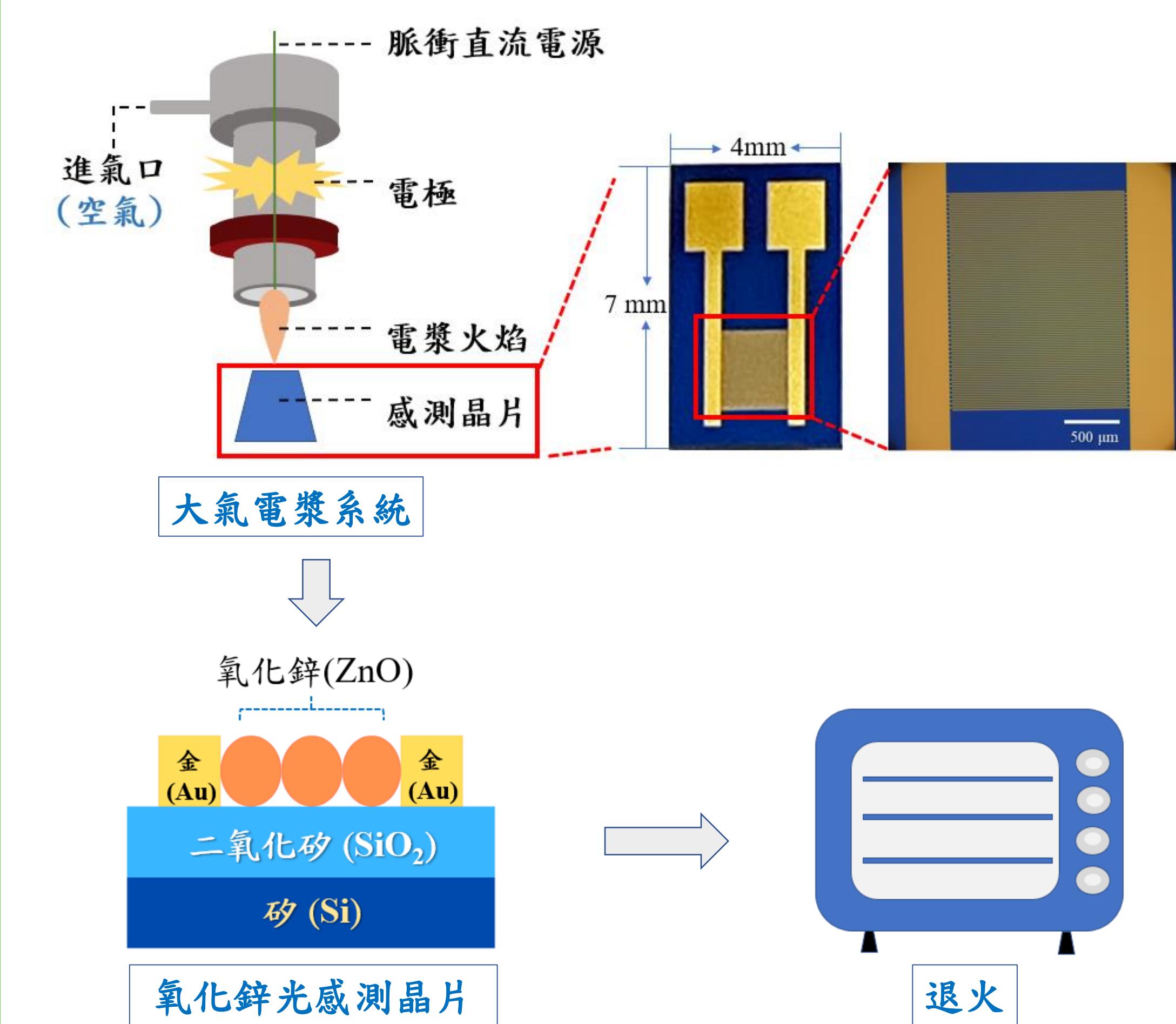
硝酸鋅 ( $Zn(NO_3)_2$ ) 粉末、乙醇 ( $C_2H_5OH$ )

# 肆、研究過程與方法

## 一、研究流程圖(作者自行製作)



## 二、材料與元件製備

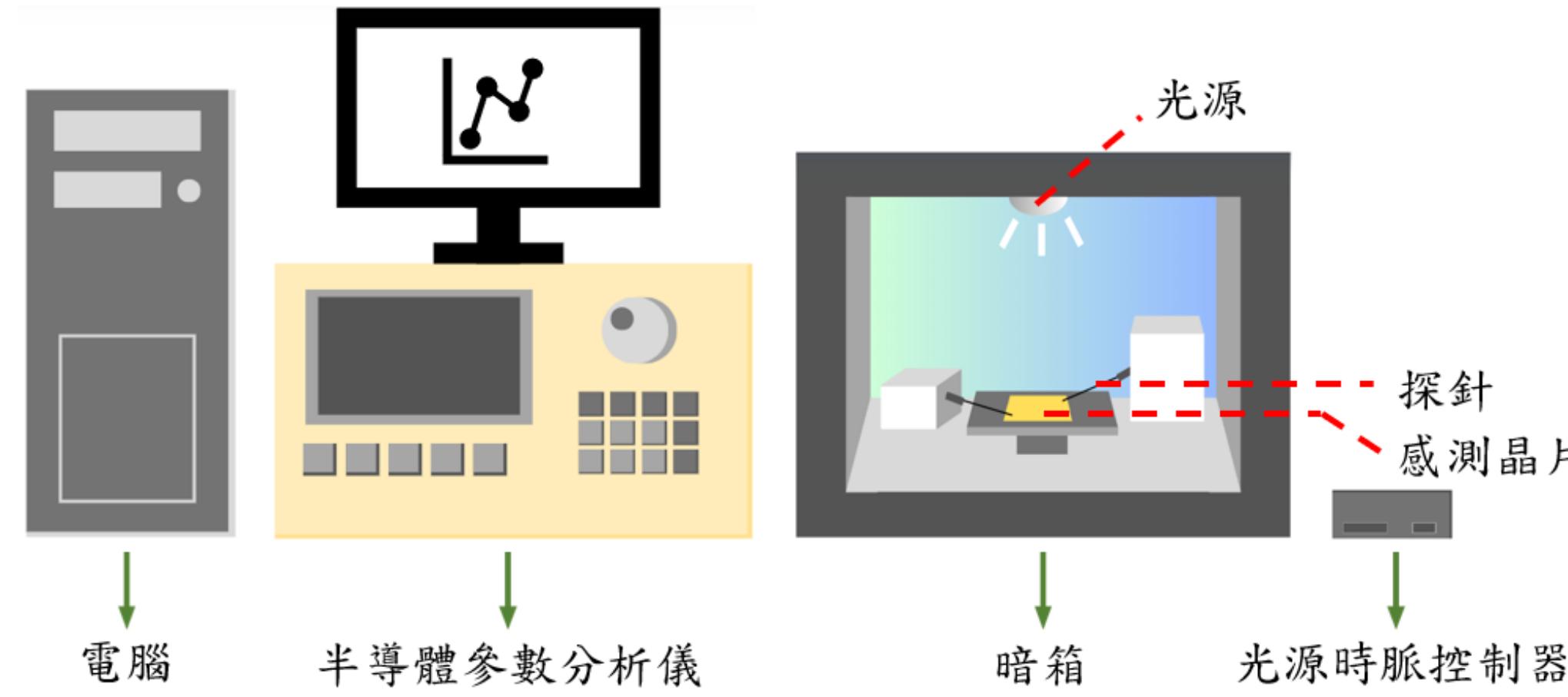


圖一、以大氣電漿成長氧化鋅並以不同退火條件製程光感測晶片。(作者自行繪製)

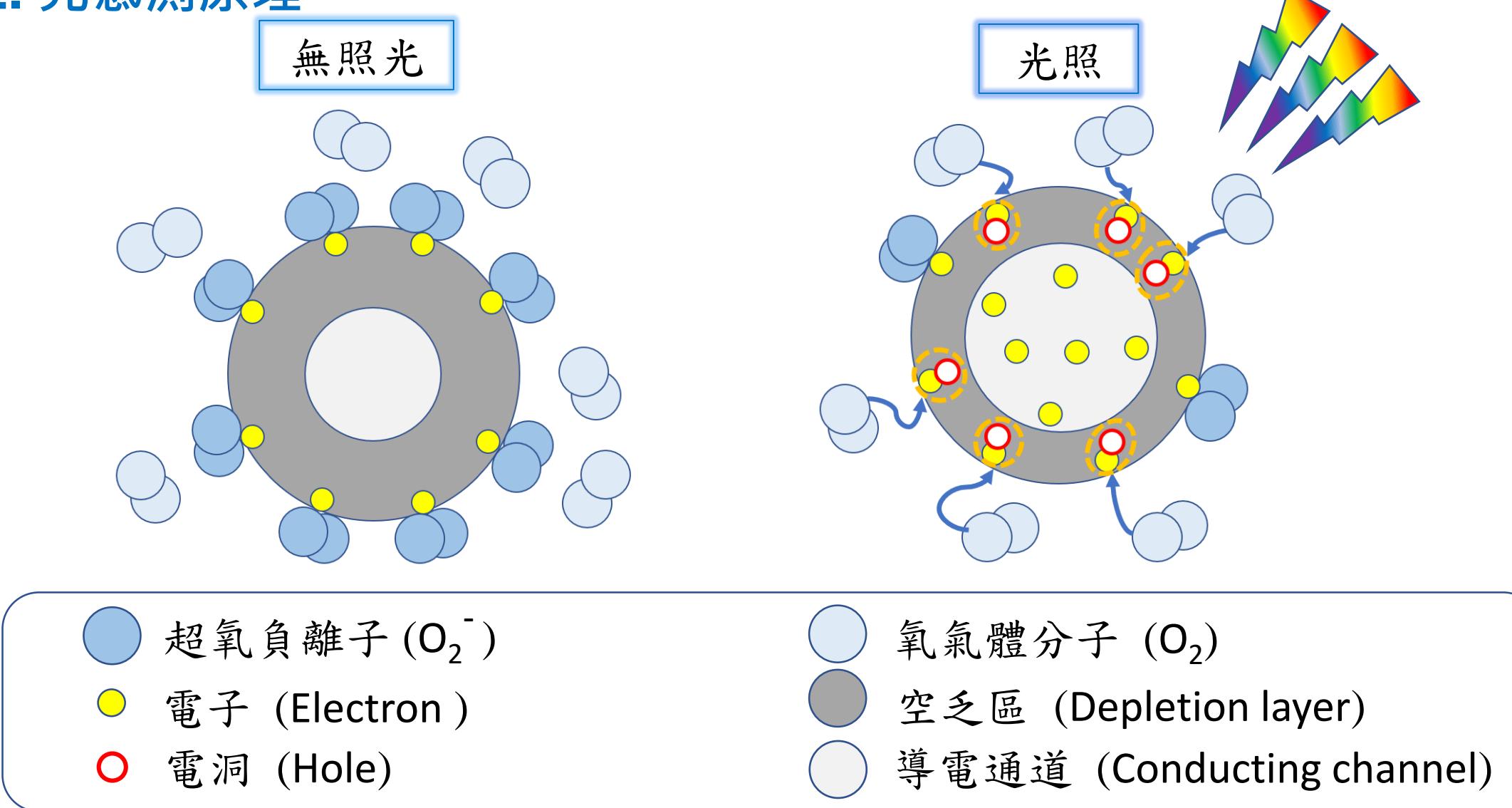
- 配置硝酸鋅和乙醇溶液，透過注射幫浦霧化成微小液滴。
- 微小液滴被引至電漿火焰，分解並沉積為氧化鋅薄膜。
- 將氧化鋅薄膜晶片在  $200\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $400\text{ }^\circ\text{C}$  和  $600\text{ }^\circ\text{C}$  退火 30 分鐘。
- 電漿從溶液中成長氧化鋅的化學式：  
 $O_2 + e^- \rightarrow O + O + e^-$   
 $Zn^{2+} + 2 e^- + O \rightarrow ZnO$

## 三、光響應的量測和分析

### 1. 光響應的量測



### 2. 光感測原理



◆無光照：氧化鋅表面會吸附空氣中的  $O_2$  分子，形成超氧陰離子 ( $O_2^-$ )，排斥自由電子，導致空乏區變大，導電通道變小，電阻上升。反應式： $O_2(gas) + e^- \rightarrow O_2^-(adsorb)$

◆光照：空乏區產生電子-電洞對 (electron-hole pair)，內部電場作用下，電洞移動到表面與超氧陰離子上的電子結合，使  $O_2^-$  重新釋放回空氣中。反應式： $h^+ + O_2^-(adsorb) \rightarrow O_2(gas)$

因此空乏區縮小，導電通道變大，導致電阻下降、電流上升。

### 3. 光感測分析方法

#### (1). 光靈敏度 (photosensitivity) 之計算：

$$\text{光靈敏度 (\%)} = \frac{I_{ph} - I_d}{I_d} \times 100\% \quad (I_{ph} : \text{光電流}, I_d : \text{暗電流})$$

#### (2). 光響應度 (photoresponsivity) 之計算：

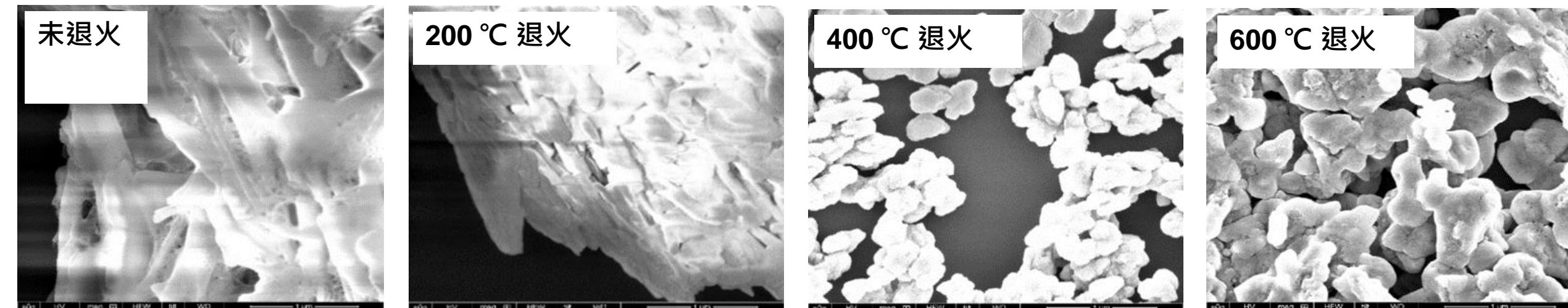
$$\text{光響應度 (mA/W)} = \frac{I_{ph} - I_d}{W} \quad (I_{ph} : \text{光電流}, I_d : \text{暗電流}, W : \text{光功率})$$

#### (3). 韻應時間 (response time) 和回復時間 (recovery time) 之計算：

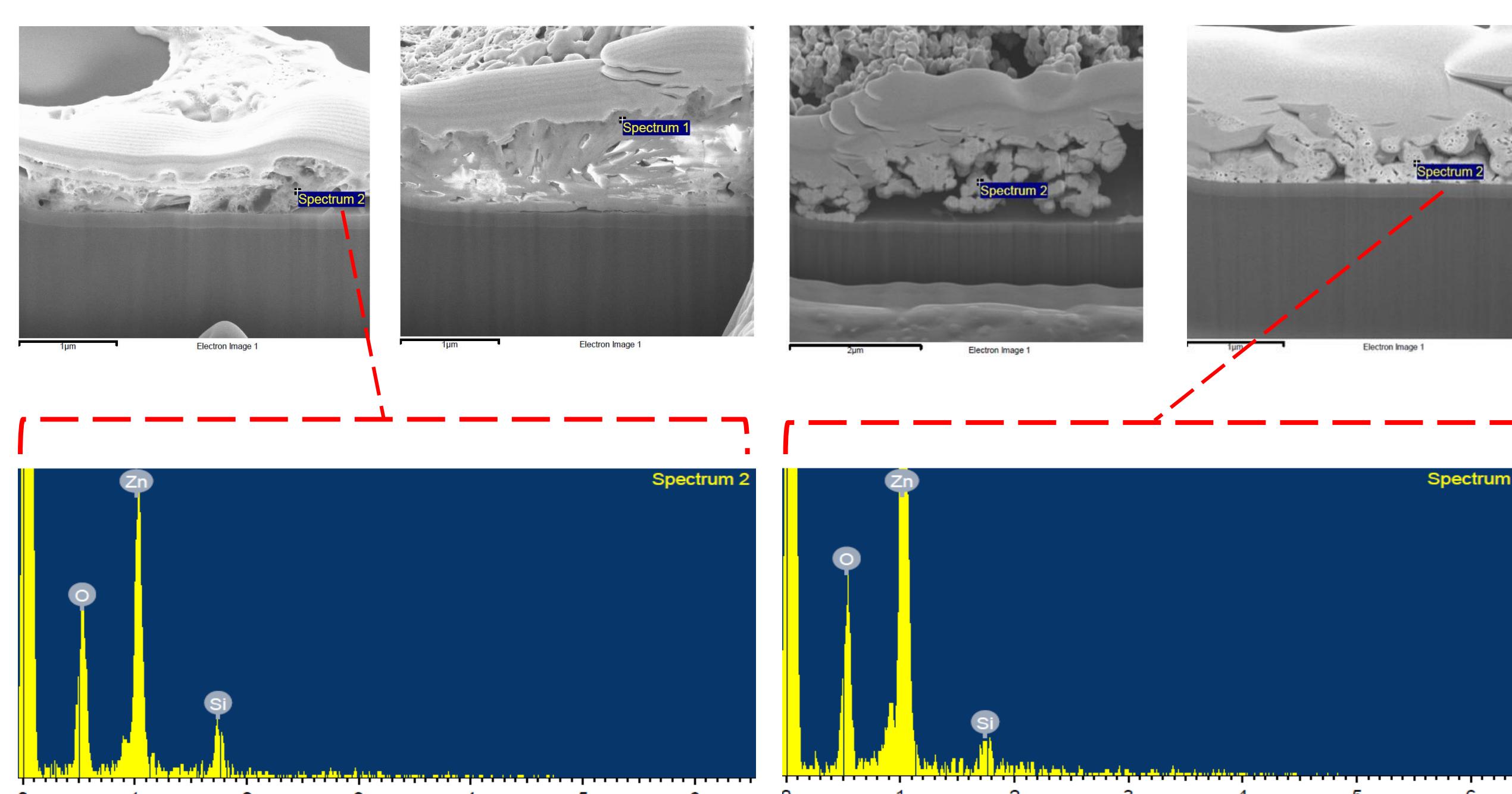
電流從最大值之 10% 增加至 90% 之上升時間為響應時間；電流從最大值之 90% 減少至 10% 之下降時間為回復時間。

# 伍、研究結果與討論

## 一、掃描式電子顯微鏡 (SEM) 和X光能量散佈光譜儀 (EDX)



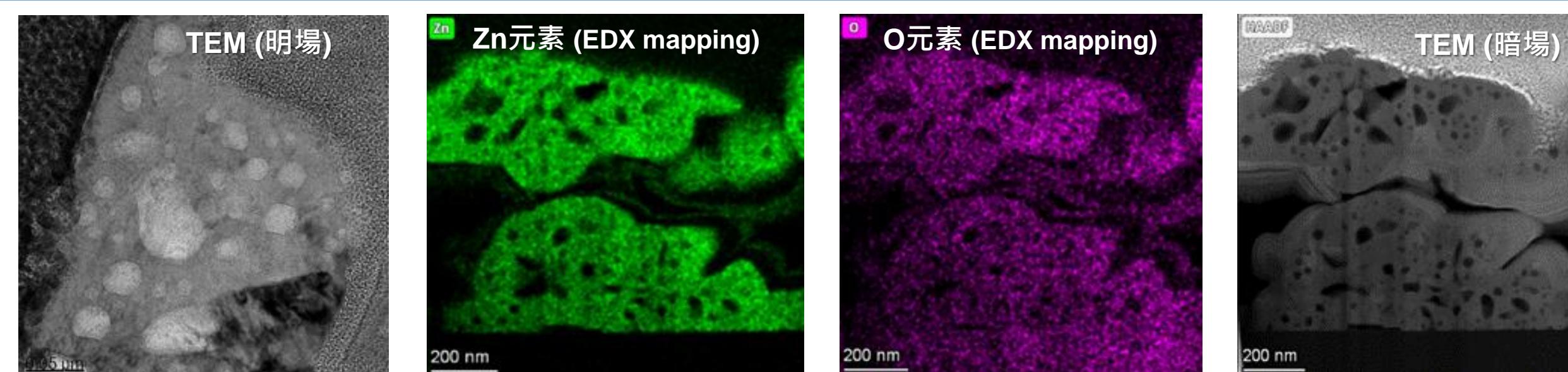
圖四、以大氣電漿所成長氧化鋅之 SEM 影像。(委託○○大學\*\*系拍攝)



圖五、以聚焦離子束切開大氣電漿所成長的氧化鋅之SEM剖面側視圖以及EDX元素分析。(委託○○大學\*\*系拍攝)

未退火的氧化鋅結晶不明顯，但有層狀結構。200 °C 退火後可看出不明顯的氧化鋅結晶。400 °C 退火後，有較大且明顯的氧化鋅結晶顆粒。600 °C 退火後，除了有較大氧化鋅顆粒外，也開始出現明顯孔洞。此外，從EDX的元素分析結果發現退火前和以不同溫度退火後的氧化鋅中，主要元素都是氧和鋅。

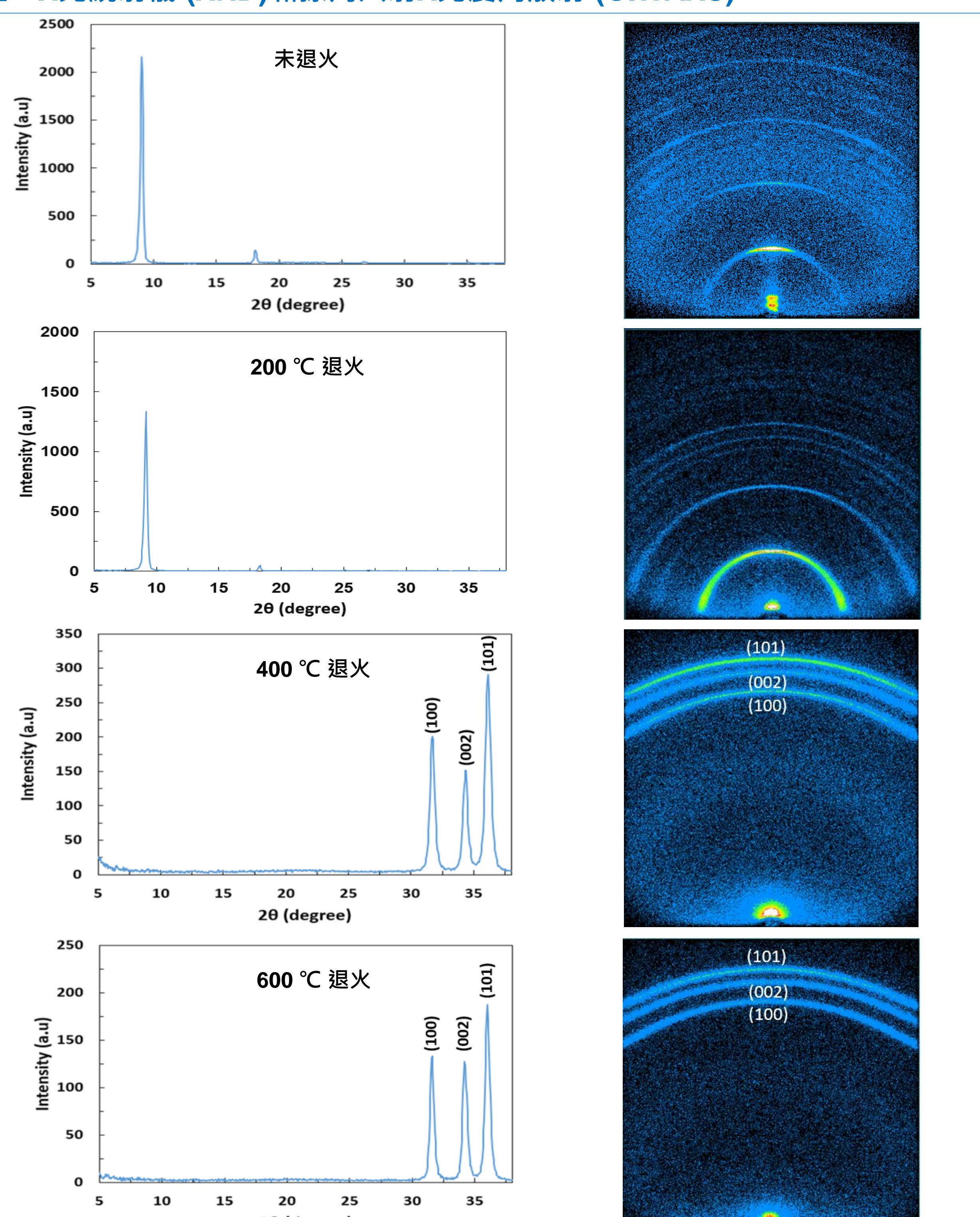
## 二、穿透式電子顯微鏡 (TEM) 和X光能量散佈光譜儀面分析 (EDX Mapping)



圖六、以大氣電漿所成長氧化鋅退火600 °C 之 TEM 和 EDX Mapping 之影像。(委託○○大學\*\*系拍攝)

在 TEM 明場影像中，有許多數十奈米大小的近圓形孔洞，最小的尺寸接近 10 nm。使用 EDX mapping 進行元素分析，發現成長的結晶位置正是氧和鋅的位置。TEM 暗場影像，為對應的氧化鋅結晶及孔洞剖面的高解析影像。

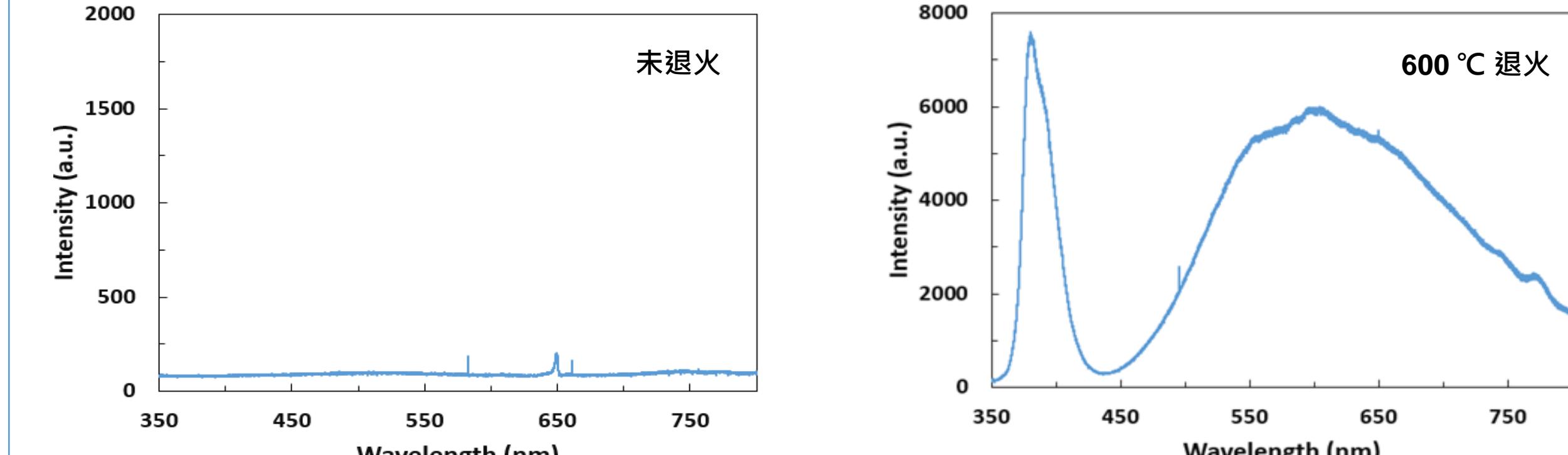
## 三、X光繞射儀 (XRD)和掠角入射X光廣角散射 (GIWAXS)



圖七、大氣電漿所成長的氧化鋅之 XRD 圖譜和 GIWAXS 影像。(作者自行繪製及委託○○大學\*\*系拍攝)

未退火及退火 200 °C 的氧化鋅在 2θ 為 10° 左右可觀察到一個低角度的 XRD 峰，可能是層狀結構。根據 GIWAXS 影像，未退火的氧化鋅堆疊方向與基板平行。退火溫度增加到 400 °C 及 600 °C，明顯可觀察到一般氧化鋅常見的 2θ 為 30°~35° 附近的 XRD 特徵峰，晶面方向為 (100)、(002) 及 (101)。最高峰為 (101)，非垂直於基板的 (002) c-軸方同，符合SEM所觀察的顆粒狀結構，而非一般六方晶 (002) 方向的奈米柱結構。

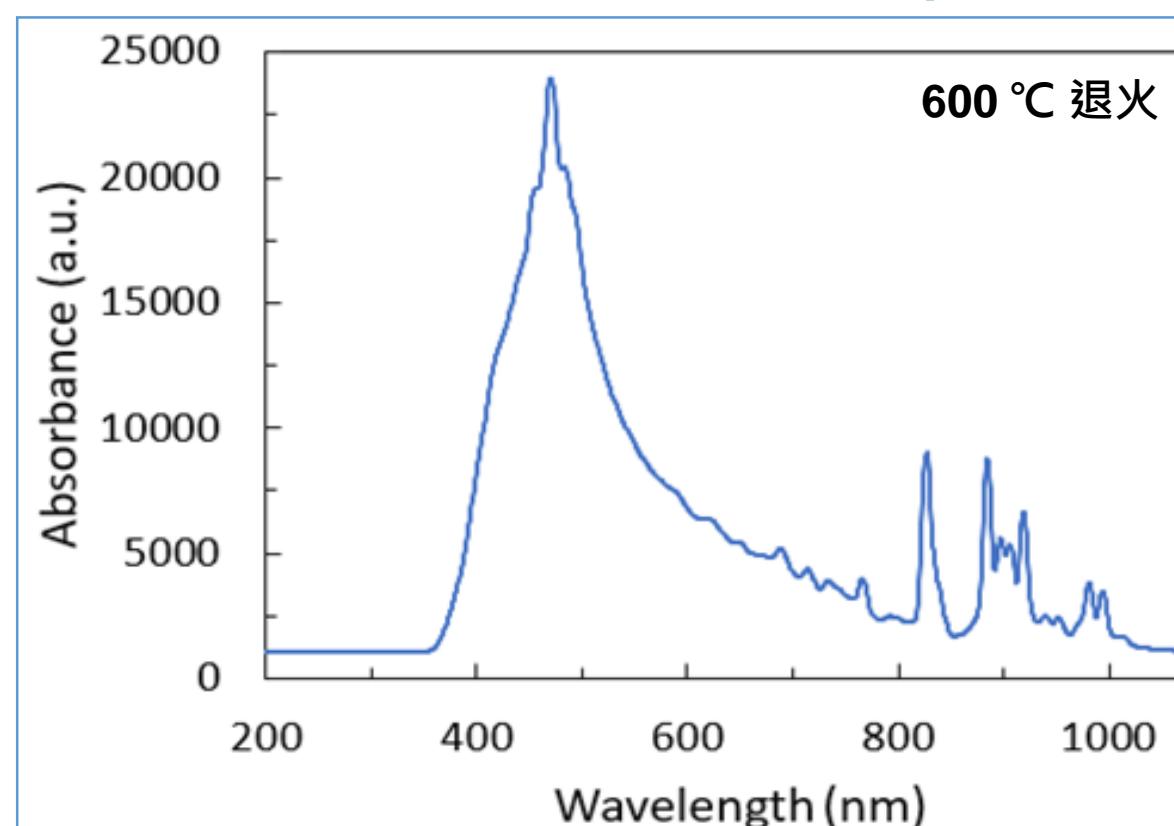
## 四、光致發光光譜 (Photoluminescence spectra, PL)



圖八、以大氣電漿所成長的氧化鋅之光致發光光譜。(作者自行繪製)

未退火的氧化鋅的光致發光光譜中，只有很小的雜訊。但 600 °C 退火的氧化鋅可觀察到峰值波長 375 nm 帶至帶 (band-to-band) 躍遷，屬於氧化鋅 (能隙 3.4 eV) 的正常載子躍遷。波長峰值 600 nm 左右的極寬頻 (500-800 nm) 光致發光光譜範圍，可能是孔洞及缺陷造成的載子躍遷。這種極寬頻的載子躍遷光譜對多波段寬頻光感測器的感測有助益。

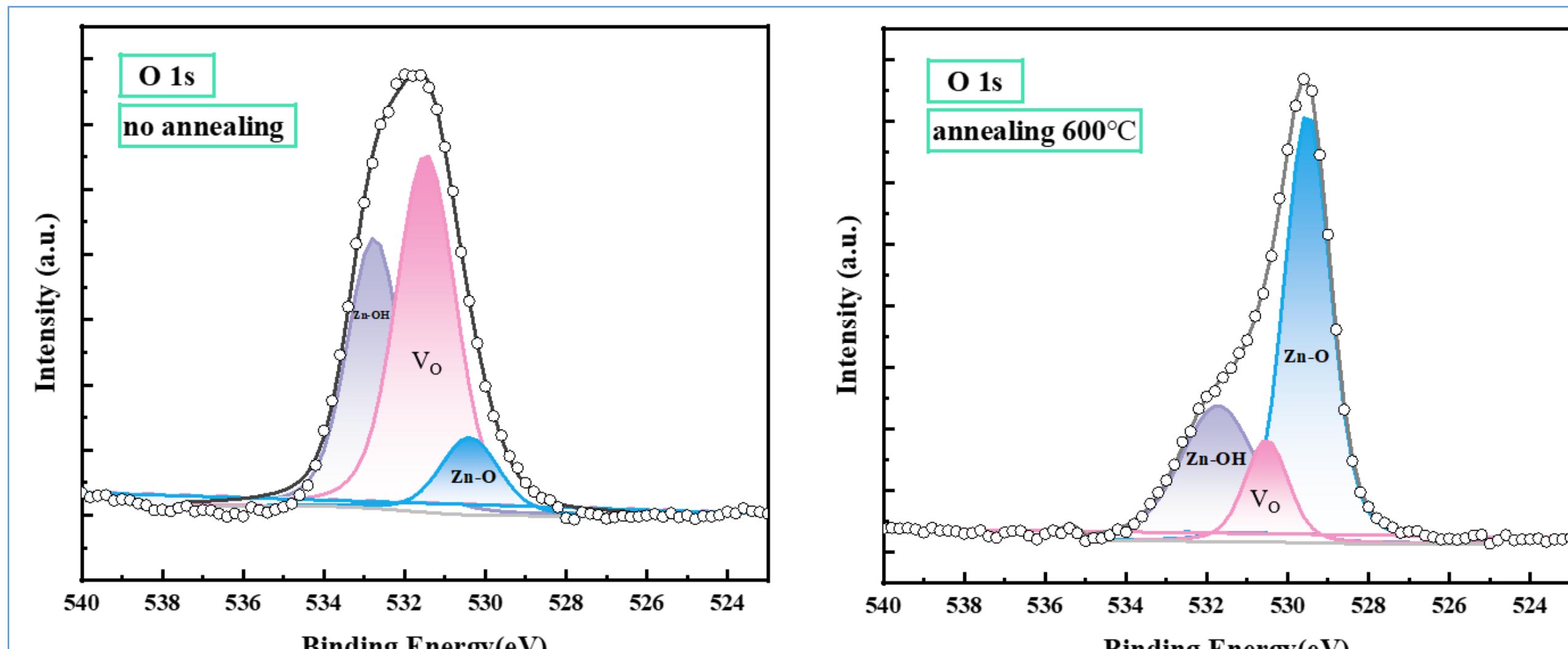
## 五、紫外-可見光分光光譜 (UV-Vis)



圖九、以大氣電漿所成長的氧化鋅紫外-可見光分光光譜。(作者自行繪製)

根據 600 °C 退火氧化鋅的紫外-可見光分光光譜，發現吸收波長最大峰值約在 470 nm。這些光吸收可能將光子轉成電子電洞對，也可能將光子轉成熱能。如果所吸收的光子大部分轉換成電子電洞對，進而提升光電流，有可能在波長接近 470 nm 附近時有最大的光響應。

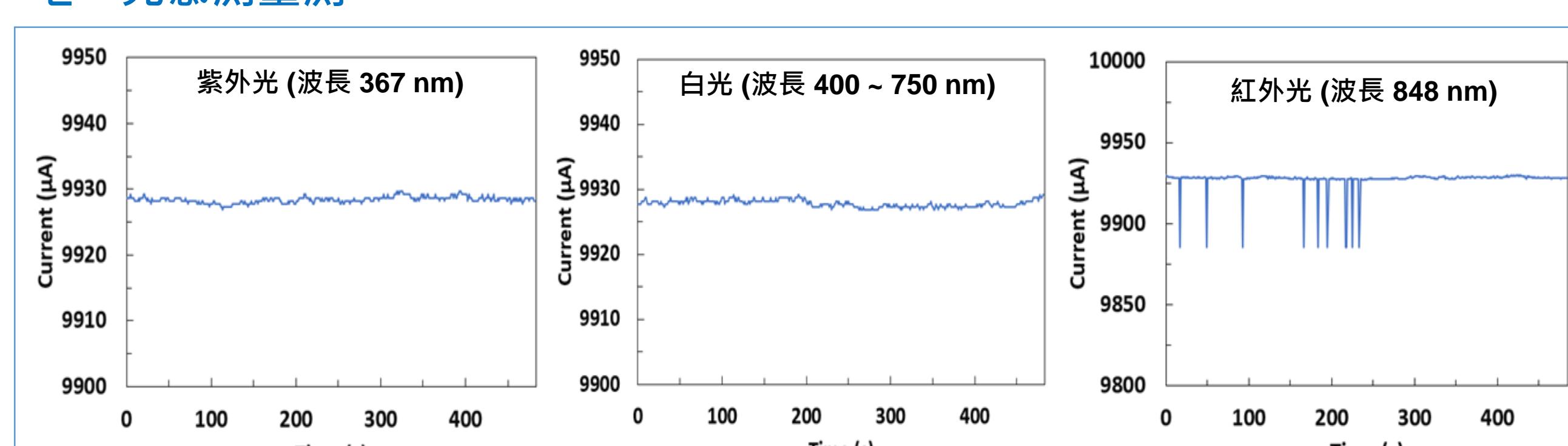
## 六、X射線光電子能譜 (XPS)



圖十、以大氣電漿所成長未退火和600 °C退火後氧化鋅 O1s X射線光電子能譜。(委託○○大學\*\*系製作)

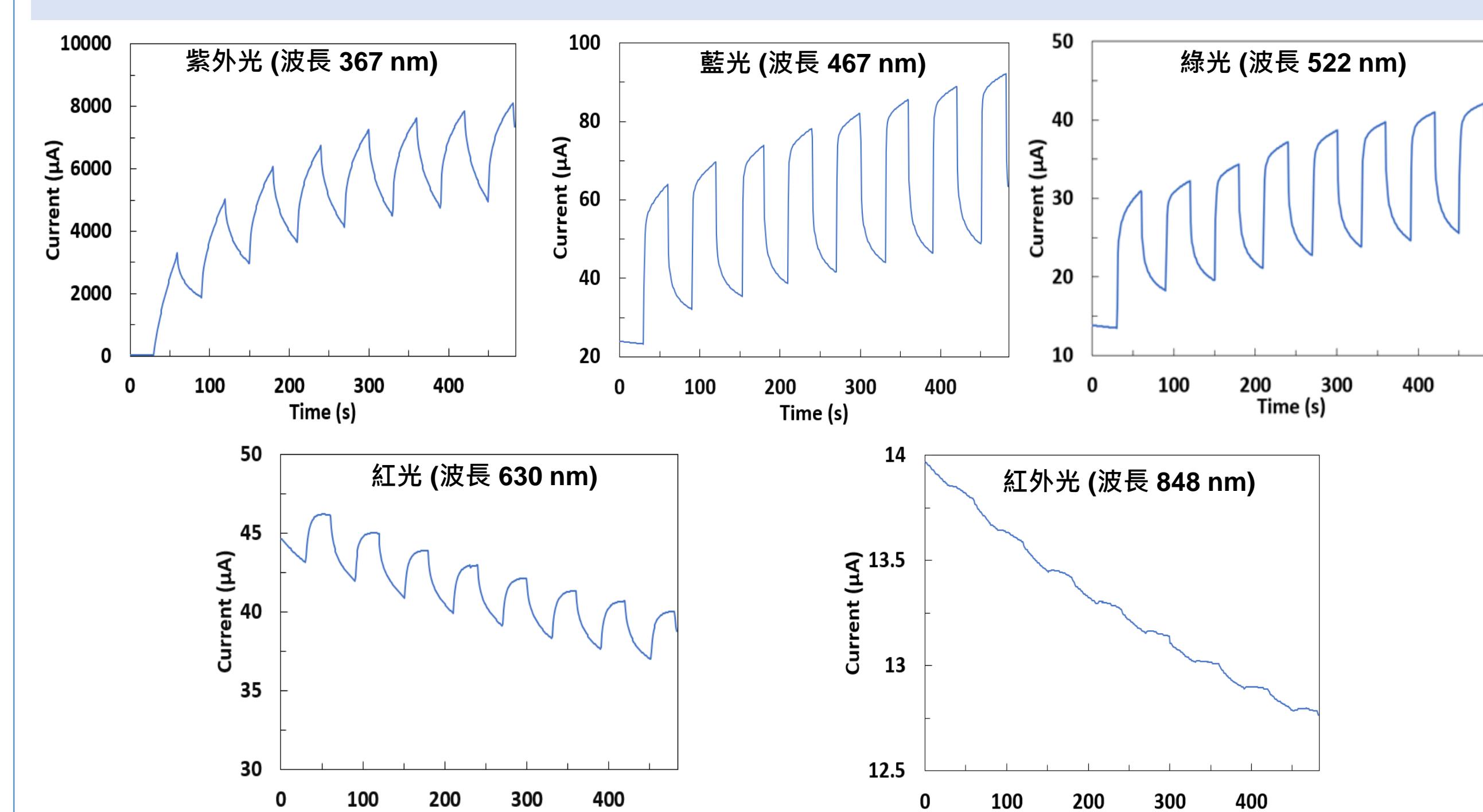
O1s X射線光電子能譜分析顯示，未退火的氧化鋅合成先驅物 (ZnOx) 因缺陷多，尤其是氧空缺缺陷 ( $V_O$ )，因此電子電洞在傳輸過程中易復合，難以產生光電流。經600 °C退火後，氧空缺缺陷 ( $V_O$ ) 減少，從能譜中的鍵結能觀察到晶體氧化鋅 (ZnO) 明顯增加，因而減少電子及電洞在傳輸過程中的復合，以致提升光電流生成。

## 七、光感測量測



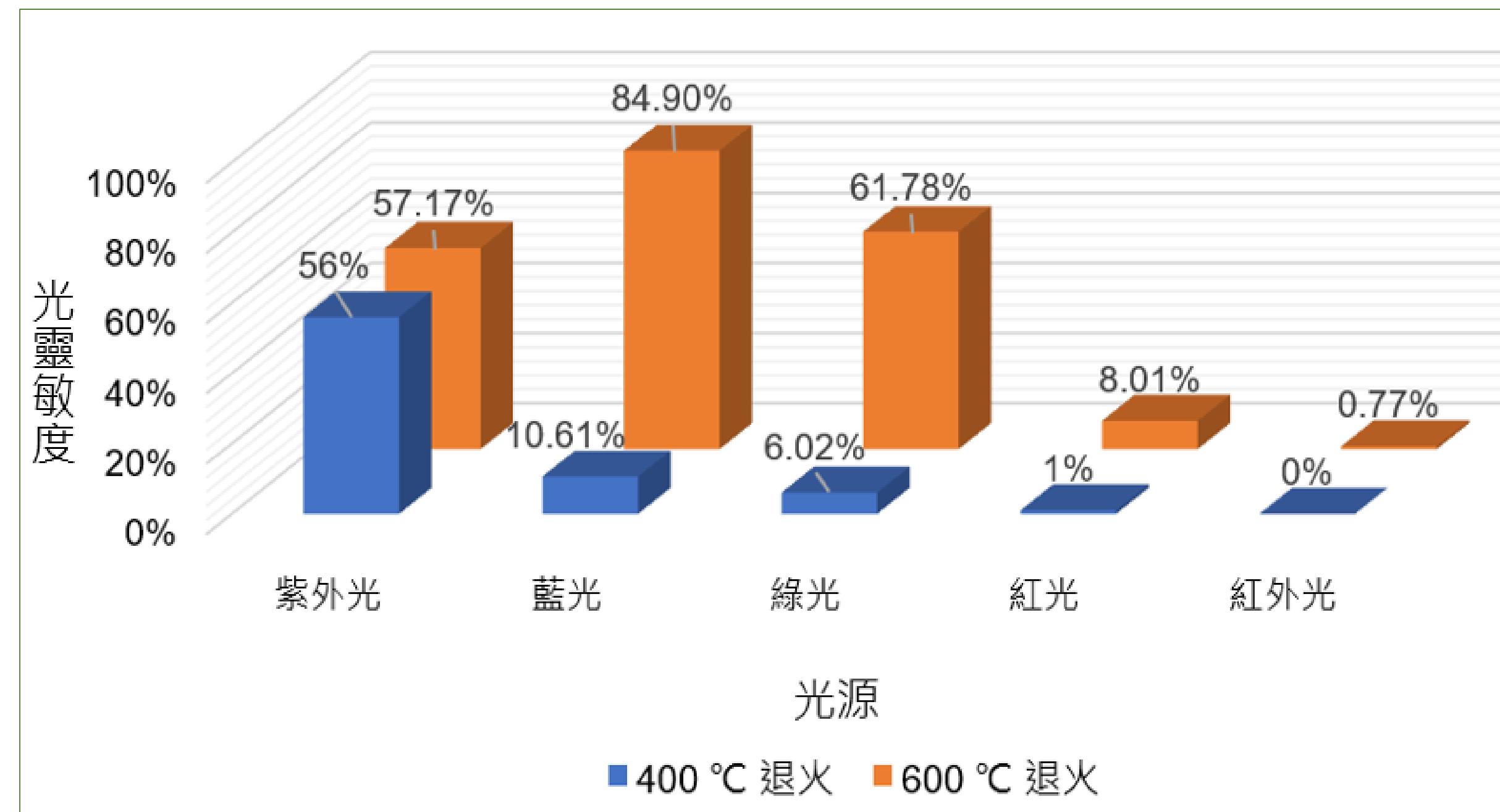
圖十一、未退火元件之光感量測 I-t 圖。(作者自行繪製)

未退火元件並無產生結晶，在各種光源中，感測的波形僅有無效的雜訊。此外，導電性質不佳，又有大量缺陷成為電子與電洞的復合中心，使光生成電子-電洞對迅速消失，難以達到有效的光電轉換。退火處理能提升材料結晶性、最佳化界面以及降低缺陷，使材料具備作為高效光感測器的必要條件。



圖十二、600 °C 退火元件之光感量測 I-t 圖。(作者自行繪製)

以高溫 600 °C 退火能進一步改善材料的光響應，主要是因高溫為原子提供更大動能，使材料內部結晶結構更完整，深層缺陷得以有效修復，降低電子-電洞對的復合率，使光生載子的生成、分離與傳輸效率大幅提高。除了能偵測紫外光、藍光、綠光及紅光等光源外，以600 °C 退火之元件還能進一步偵測到紅外光，其原因可能是如SEM及TEM所觀察到孔洞結構的產生所致。不僅如此，反應速度 (響應時間和回復時間) 最快及光靈敏度最大的光是藍光及綠光，與之前紫外-可見光分光吸收光譜之量測結果相對應。



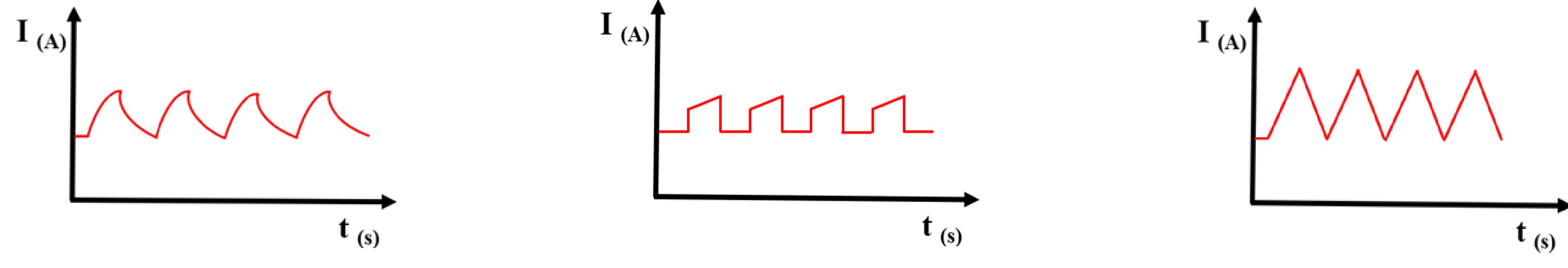
圖十三、400 °C 退火和 600 °C 退火之光感測器的光靈敏度。(作者自行繪製)

退火溫度	光源				
	紫外光	藍光	綠光	紅光	紅外光
400 °C	18463.70	30.00	6.89	0.44	--
600 °C	25815.22	434.78	224.07	37.09	0.19

表一、400 °C 退火和 600 °C 退火之光感測器的光響應度 (mA/W)。

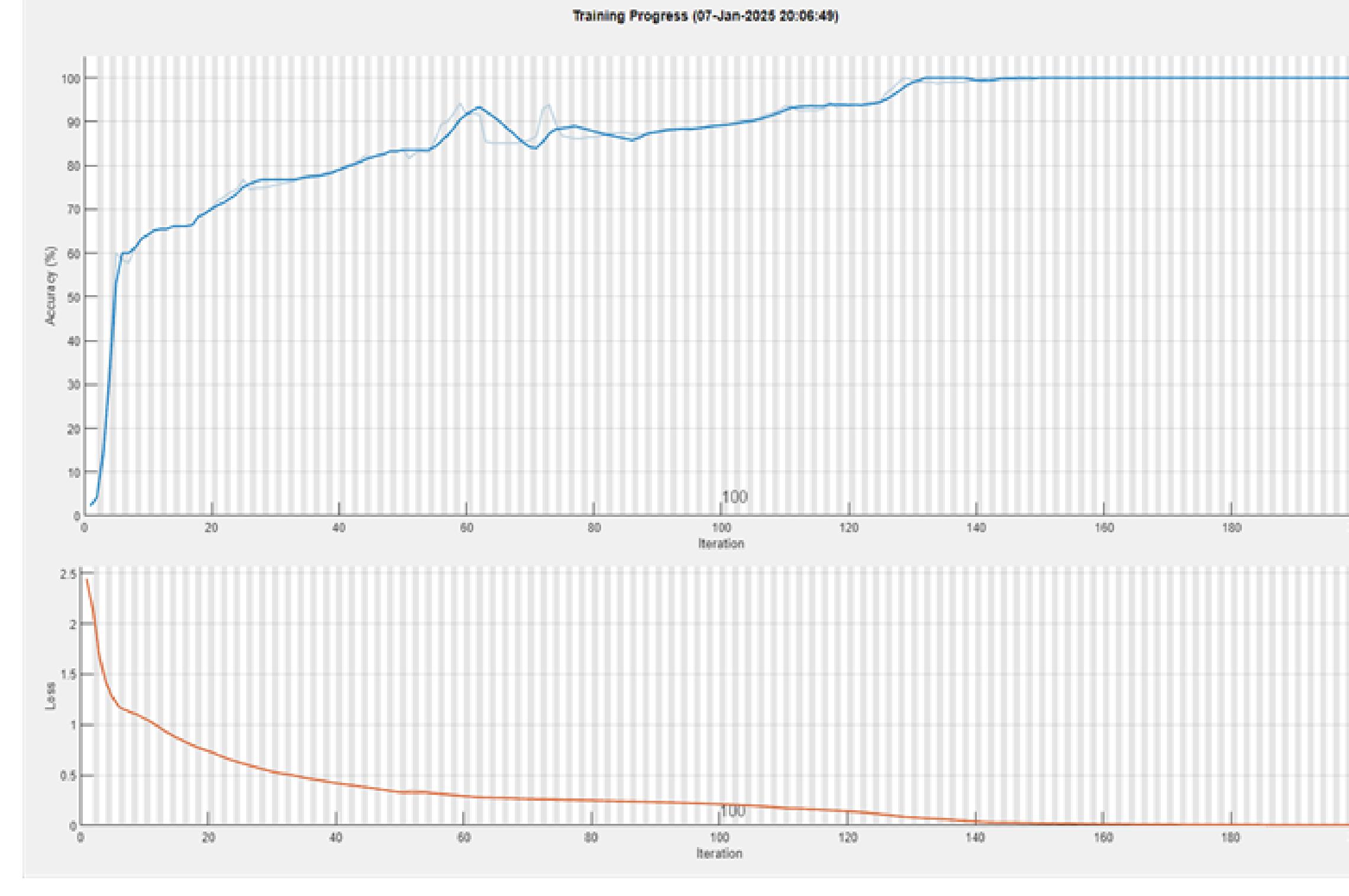
在光靈敏度上，經過 600 °C 退火的氧化鋅，無論是對紫外光、藍光、綠光和紅光都有較好的表現。此外，對於光響應度及反應速度 (響應時間和回復時間)，600 °C 退火的氧化鋅的表現都是最好的。

## 九、AI 辨識波型

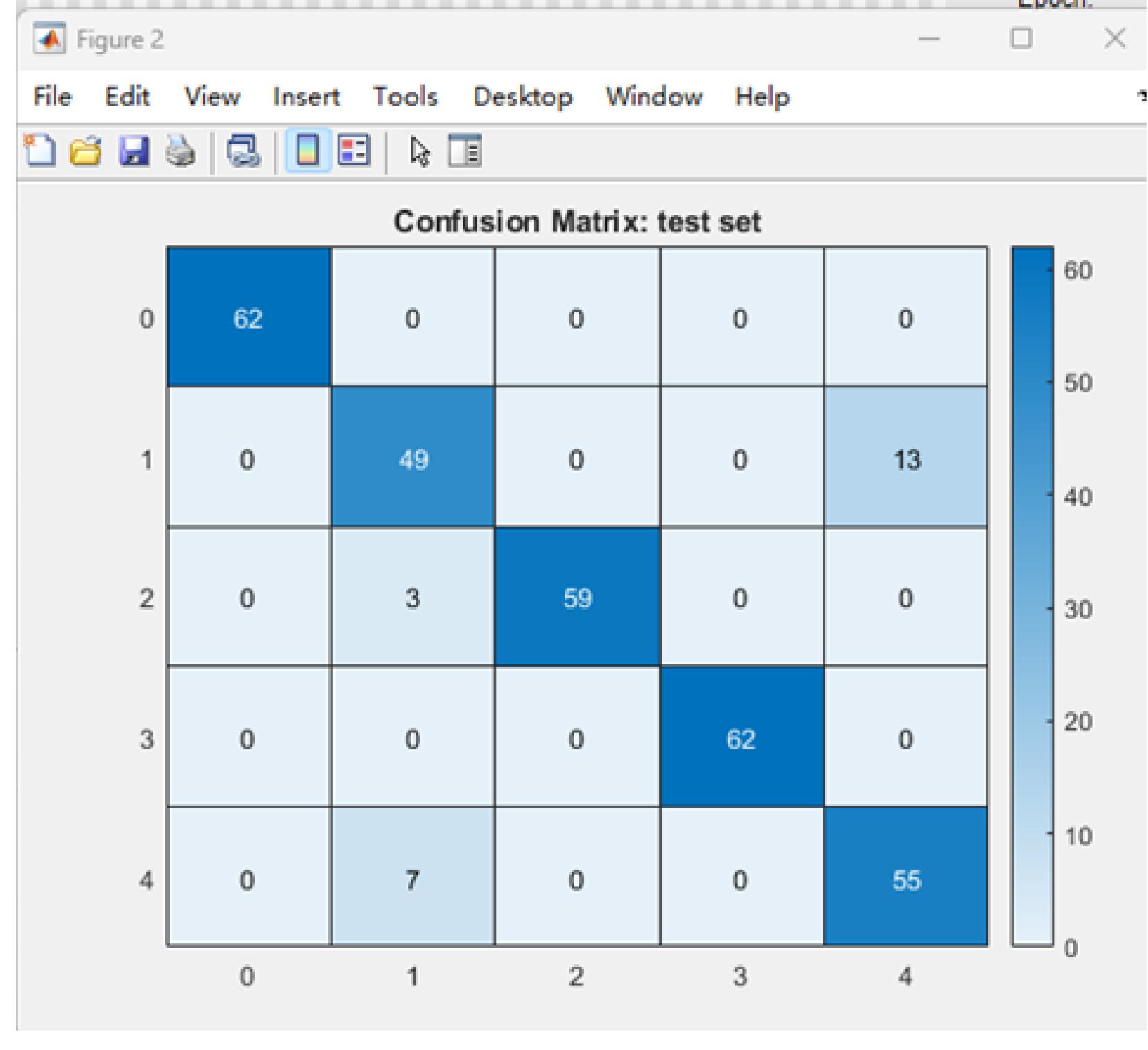


圖十四、不同種類的光感測波型。(作者自行繪製)

光感測器偵測不同的光源，會產生出不同的電流-時間之光響應 (I-t 圖) 波形，可能是弧形波、梯形波或鋸齒波，因此可以利用波形的差異來辨識光的種類。辨識波形的技術有許多的應用，比如心電圖以及雷達回波的辨識等，而此研究要將波形辨識應用於光感測中之不同光源的辨識。



圖十五、機器學習過程。(委託○○大學\*\*系製作)



圖十六、光辨識表。(委託○○大學\*\*系製作)

以 600 °C 退火後之氧化鋅，具有從紫外光到紅外光各波段的光感測能力，因此我們可以利用光感測的不同的電流-時間的光響應波形來對各種光源作辨識。對於此種寬頻的多波段感測器，在應用上可以根據需要針對特定波長的光來做偵測。本研究利用 MATLAB 程式來辨識五種光源的光感測波形。圖十五是以 MATLAB 進行訓練和辨識的過程，經過約 200 次機器學習的訓練，辨識率能夠接近 100 %。

光的辨識結果如圖十六。橫軸的部分是實際偵測的光源，如紫外光 (UV, 0)、藍光 (Blue, 1)、綠光 (Green, 2)、紅光 (Red, 3) 及紅外光 (IR, 4)，由數字 0 到 4 所代表。縱軸的部分是機器學習之後，利用波形辨識出光源種類的結果，因為紅外光波形較不明顯，因此失誤率較高。目前光源辨識已經有不錯的初步結果。

## 陸、結論

- ◆ 本研究透過大氣電漿沉積技術及以不同溫度退火之方法，成功在矽晶片上成長出氧化鋅奈米結構薄膜，進一步製作出具有高靈敏度的光感測器。研究結果證實，隨著退火溫度的提升，氧化鋅結晶逐漸明顯，並在 600 °C 時達到最佳結晶形態，但也伴隨孔洞生成現象。
- ◆ 高溫退火後之氧化鋅，具有從紫外光到紅外光各波段的光感測能力。此外，實驗中光感測結果顯示出不同波段的光會產生獨特的電流隨時間變化的波形，透過人工智慧 (AI) 技術可準確識別光源種類，展現了光感測系統的高準確性與應用潛力。
- ◆ 本研究具有多項創新與實用價值。首先，大氣電漿沉積技術操作簡單、成本低廉且環保，不需要昂貴的真空設備，展現了良好的工業應用前景。其次，氧化鋅材料具有優異的化學穩定性、生物相容性及高靈敏度，使其在光感測領域具備競爭優勢。透過退火技術的最佳化處理，成功提高了材料的結晶品質，進一步增強了感測器性能。
- ◆ 未來研究可考慮最佳化退火參數，同時針對不同光源進行更大範圍的測試。此外，結合人工智慧 (AI) 進一步提升多波段辨識精度，並探索應用於環境監測、智慧農業及醫療診斷等領域的可能性，將有助於推動光感測技術的發展與創新應用。

## 柒、參考文獻資料

- [1] 吉家威, & 張國明 (2010)。藉由大氣電漿沉積主動層之氧化鋅薄膜電晶體之研究 [碩士論文，陽明交大電子所]。
- [2] Ma, A., Rousseau, F., Donsanti, F., Lincot, D., & Morvan, D. (2015). Deposition of ZnO thin films from aqueous solution in a low power plasma reactor. *Surface and Coatings Technology*, 276, 186-194.
- [3] Kalepu, C. D., Kondepati, V., Aier, K. M., & Dhar, J. C. (2024). Design of High-Performance UV-Visible Broadband Photodetector Using Cd-Doped ZnO/ZnO Thin-Film Heterostructure. *IEEE Transactions on Electron Devices*
- [4] Al-Shawabkeh, A. F., Elimat, Z. M., & Abushgair, K. N. (2023). Effect of non-annealed and annealed ZnO on the optical properties of PVC/ZnO nanocomposite films. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 36(3), 899-915.
- [5] Lin, P.-T., Tseng, Z.-C., & Huang, C.-Y. (2024). Machine Learning Assisted Wavelength Recognition in Cu<sub>2</sub>O/Si Self-Powered Photodetector Arrays for Advanced Image Sensing Applications. *ACS Applied Electronic Materials*.