

# 2019 年臺灣國際科學展覽會 優勝作品專輯

作品編號 200002

參展科別 環境工程

作品名稱 銅修飾二硫化錫應用於光催化二氧化碳還  
原產生太陽能燃料

得獎獎項 大會獎：四等獎

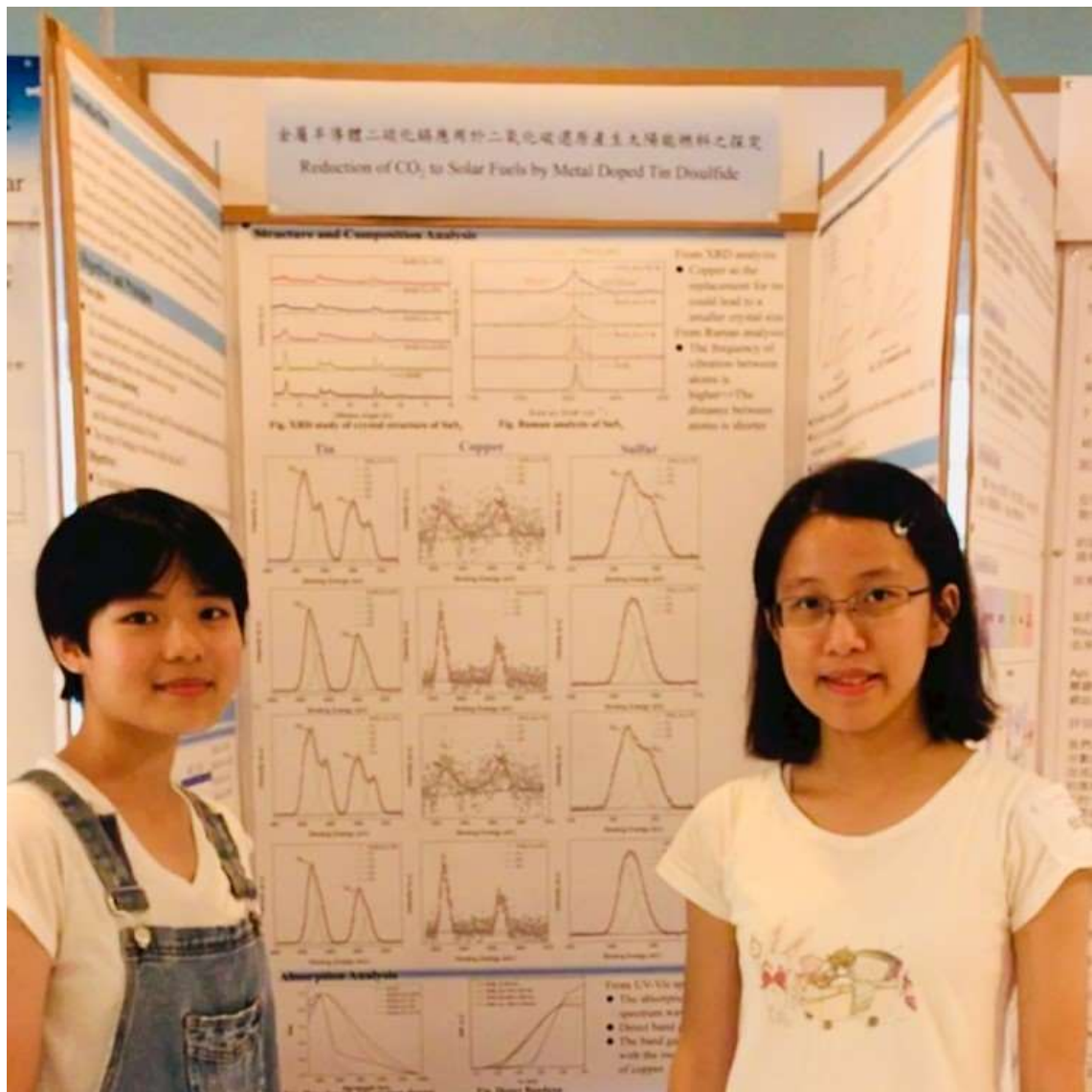
就讀學校 臺北市立第一女子高級中學

指導教師 林麗瓊、黃克雄

作者姓名 王愛琳、邱奕馨

關鍵詞 二氧化碳還原、光觸媒、二硫化錫

## 作者簡介



## 摘要

本文研究轉換二氧化碳成為替代能源，介紹運用太陽能源，以  $\text{SnS}_2$  及光觸媒進行  $\text{CO}_2$  還原反應，以產生碳氫和碳氫氧化合物。我們以溶劑熱法配置  $\text{SnS}_2$ ，過程中藉由加入不同重量百分比的銅(0, 0.5, 1, 5, 10 wt.%)探討銅的添加對於觸媒的影響：能隙縮短、底面為從六角形至四邊形晶體結構、吸收光範圍延伸至可見光之域。以活性測試探討其綜合性能，結果呈現 1 wt.%銅修飾的  $\text{SnS}_2$  光觸媒有最高  $\text{CO}_2$  轉換效率，且產物單一為乙醛。未來希望藉由研究最佳銅修飾的比例，以改良二硫化錫光觸媒的吸光特性、減少電子電洞對復合，並進一步增加其量子轉換效率、增加產量。

## Abstract

In our paper, we studied the conversion of carbon dioxide as an alternative energy source by using solar energy with chalcogenide photocatalyst performing  $\text{CO}_2$  reduction reaction, which produces hydrocarbons and oxygen-containing hydrocarbons. We have investigated the different structural properties of copper doping with varying proportions in tin disulfide (0, 0.5, 1, 5, 10 wt.%) — the bandgap, the crystal structure and the absorption of sunlight. The results showed that with increasing doping concentration, the bandgap structure has shortened, the crystal structure has been from hexagonal to tetragonal, and the absorption range has spanned visible light. From comprehensive activity performance test, we found tin disulfide with 1 wt.% Cu doping exhibited the highest efficiency of converting  $\text{CO}_2$ , and the only product was acetaldehyde. In the future, we hope to improve the light harvesting of tin disulfide by optimizing the concentration of copper, reduce the recombination of electron and hole, and further increase the quantum efficiency and enhance the formation yield.

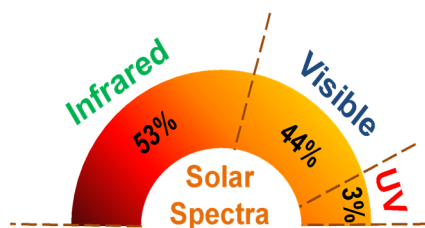
## 一、前言

### (一)、研究動機

近期許多探討全球暖化議題的文獻，皆指向過去至今大量增加的溫室氣體是其主要原因，其中又以  $\text{CO}_2$  自工業革命後增加快速。因此生活在高度工業化環境的人們，如何利用工業排放的  $\text{CO}_2$ ，生產替代能源，以減緩全球暖化的趨勢，成為當今重要且緊急之議題。

溫室氣體之一的二氧化碳( $\text{CO}_2$ )成為目前研究的熱門焦點，而現今處理  $\text{CO}_2$  較為成熟的技術是「碳捕捉與碳封存」，方法僅是將  $\text{CO}_2$  氣體強壓注入地層岩石圈或水圈封存，環境中  $\text{CO}_2$  總量並沒有減少，而且極有可能再度返回大氣中。

因此，本研究是利用「人工光合作用」，以 n 型半導體  $\text{SnS}_2$  材料之電化學原理將  $\text{CO}_2$  還原各種成為碳氫化合物( $\text{C}_x\text{H}_y$ )或含氧碳氫化合物( $\text{C}_x\text{H}_y\text{O}_z$ )，並可再度使用這些產物成為我們可利用的燃料。這個方法是當今處理  $\text{CO}_2$  的最佳方案之一。而  $\text{SnS}_2$  無生物毒性，並經由文獻探討得知  $\text{SnS}_2$  的能帶結構符合光催化二氧化碳還原反應之條件。由於可利用的太陽光中可見光佔 44% (如圖一)，但是半導體材料可見光吸收率低，因此限制反應效率。所以，本研究希望使用銅修飾二硫化錫以提高二氧化碳還原反應( $\text{CO}_2$  reduction reaction, 簡稱  $\text{CO}_2\text{RR}$ )的產率。



圖一 地表太陽光各波段比例

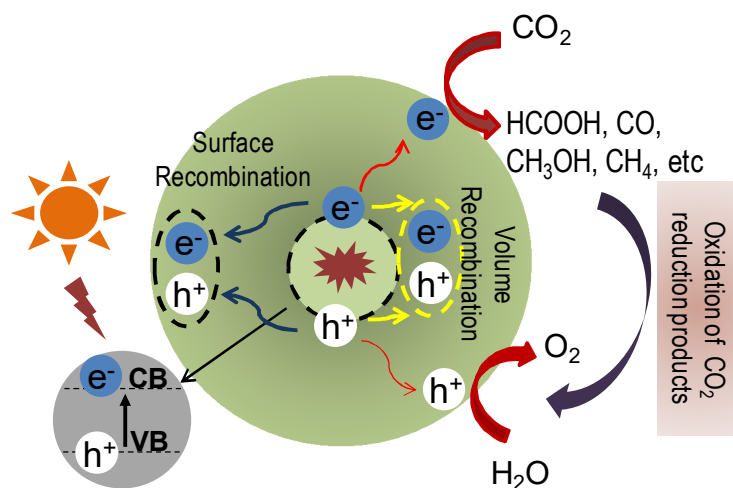
### (二)、研究目的

一、探討  $\text{SnS}_2$  添加 Cu 的觸媒形態、性質。

二、探討不同比例之 Cu 修飾  $\text{SnS}_2$  光觸媒對於  $\text{CO}_2\text{RR}$  的最佳反應情形。

## 二、研究方法或過程

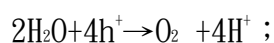
### (一)、研究原理



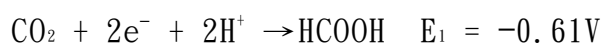
圖二 光觸媒之氧化還原反應與產物。

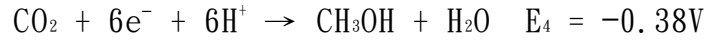
#### 1. 人工光合作用與二氧化碳還原反應 (CO<sub>2</sub>RR)：

人工光合作用的構想源自於植物光合作用其中的二氧化碳還原反應。利用光觸媒吸收光子，使光觸媒中電子獲得光子能量而躍升至導帶 (CB)，而在原來的價帶 (VB) 處留下對應的電洞 (hole，符號為  $h^+$ )，電子與電洞分別移動至光觸媒表面，當  $H_2O$  分子遇到電洞時，因失去電子而氧化為氧氣與氫源，淨反應式為：



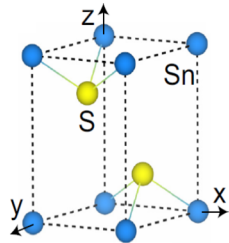
另一方面，當  $CO_2$  分子遇到光觸媒表面的電子，將使  $CO_2$  還原成碳氫化合物（例如： $HCOOH$ ， $CO$ ， $HCHO$ ， $CH_3OH$ ， $CH_4$ ，等等），淨反應式例如：



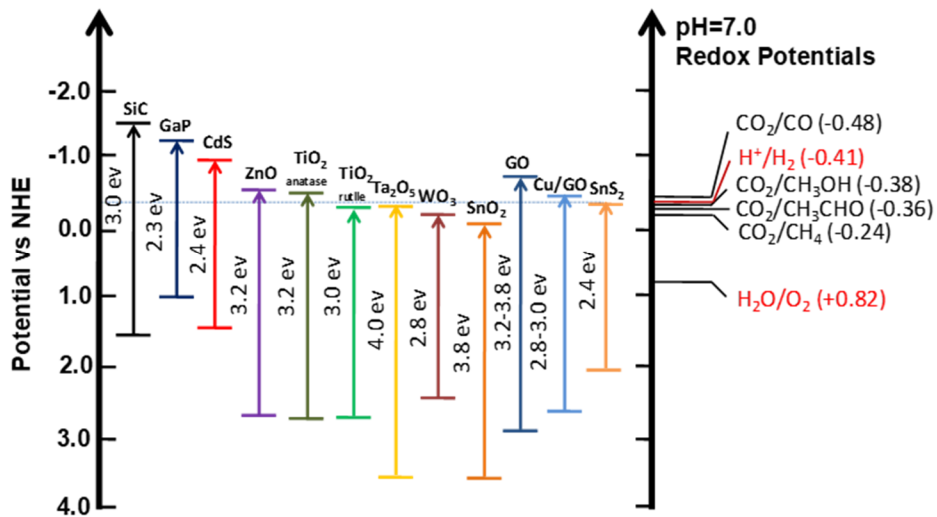


## 2. 適合 CO<sub>2</sub>RR 光觸媒之特性：

- (1). 導電帶電位須低於 CO<sub>2</sub> 產物的還原電位，反應才得以發生。
- (2). 能隙大小位於可見光光子能量的範圍，才能利用可見光波段的光子能量。由參考資料[12]得知，SnS<sub>2</sub>為斜方晶系（圖三），屬於窄能隙的 n 型半導體。



圖三 SnS<sub>2</sub>為斜方晶系結構。



圖四 SnS<sub>2</sub>能隙為 2.4 eV。

由圖四中可知 SnS<sub>2</sub> 的能隙約為 2.4 eV（圖中最右端之橘紅色線）。以光子能量公式：

$$E \text{ (eV)} = 1240 / \lambda \text{ (nm)}$$

計算得知紅外光的光子能量位於 1.24 eV~1.6 eV，可見光的

光子能量位於 1.6 eV ~ 3.1 eV，紫外光的光子能量位於 3.1 eV ~ 124 eV。紫外光的光子能量比可見光的光子能量高，但其於太陽光波段的佔比太低；紅外光佔太陽光比例 53%，但能量過低，難以激發電子躍過能隙至導帶，因此本研究期望以可見光為主要能量來源。

而當吸光材料能隙愈小，表示其可以使用太陽光中較長波長的光子，因此吸收光波段範圍越大。而  $\text{SnS}_2$  之價帶電位需比  $\text{H}_2\text{O}$  氧化反應正，使  $\text{H}_2\text{O}$  得以氧化，成為氫源來源；導帶電位需較  $\text{CO}_2$  還原負，使  $\text{CO}_2$  可以還原。讓  $\text{CO}_2$  還原反應順利進行。

基於以上原因，我們將  $\text{SnS}_2$  作為  $\text{CO}_2$  還原反應之光觸媒。

### 3. 選取修飾的金屬銅：

由參考資料[1]，得知使用 d 軌域之過渡金屬有延緩電子-電洞對復合的性能，而銅相較這些金屬有量多價廉、易取得的優勢，所以我們選取銅並探討不同比例修飾下，二硫化錫進行  $\text{CO}_2\text{RR}$  的效率。

## (二)、研究方法

### 1. 實驗器材

器材名稱	用途與規格
電子秤	最小刻度至 0.1 mg
量筒	最小刻度至 1 ml
秤量紙	
樣本瓶	
磁石攪拌器	攪拌溶質形成溶液
去離子水(DI water)	離心清洗用
乙醇	清洗用

丙酮	清洗水熱罐用
水熱釜	加熱使用
水熱罐	加熱盛裝溶液
對流式烘箱	水熱法加熱
烘箱	可控溫式，容器烘乾用
離心機	進行離心以分離溶質與溶劑
離心瓶	離心時盛裝溶液
試管振盪器	均勻混合溶液
真空烘箱	沉澱物蒸乾用

## 2. 實驗試藥

試藥名稱	英文名稱	廠牌	純度
硫代乙醯胺	Thioacetamide	Afa Aesar	99%
五水四氯化錫	Tin(IV)chloride Pentahydrate	Acros	98+%
三水硝酸銅	Copper(II) Nitrate Trihydrate	Acros	99%
乙二醇	Ethandiol	Acros	99%

## 3. 實驗設備與測量目的

### (1). X-ray 繞射儀 (XRD, X-ray Diffraction)：

藉由 X-ray 繞射分析所得結果與標準圖譜比對，了解我們所合成之觸媒的種類及晶格特性。

### (2). 紫外光、可見光光譜儀 (UV/Vis Spectrophotometer)：

藉由紫外光、可見光光譜儀，得知吸收波長的範圍。

### (3). 雷射拉曼光譜儀 (Laser Raman Spectrophotometer)：

藉由拉曼光譜儀檢測原子振動。



(4). 掃描式電子顯微鏡 (SEM, Scanning Electron Microscopy) :

藉由電子束掃描觸媒表面，觀察合成觸媒形貌。

(5). 化學氣相層析儀-火焰游離偵測器 (GC-FID) :

由氣相層析法得知產物的種類，並以火焰游離偵測器偵測產量。

#### 4. 以水熱法製作 $\text{SnS}_2$ :

(1). 將 80 ml 去離子水倒入 20 ml, 0.004 mol 乙二醇

(Ethyleneglycol) 混合，並倒入五水四氯化錫 ( $\text{SnCl}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ )

350.6 mg, 0.001 mol，放上攪拌機利用磁石攪拌 15 分鐘。

(2). 再加入硫代乙醯胺 (Thioacetamide, TAA) 295.35 mg, 0.004

mol，攪拌 1 小時。

(3). 配置完成溶液放入 150 °C 烤箱持溫 24 小時，可得  $\text{SnS}_2$  沉澱

溶液。

(4). 待自然冷卻後，利用離心機將溶液進行離心以分離溶質與溶劑：

轉速調為 9000 rpm，每次運轉十分鐘。而後加水與先前所得

沈澱物均勻混合並進行離心，重複數次，直至離心完成之水溶

液澄清。

(5). 放入烘乾箱，取得  $\text{SnS}_2$  結晶。

(6). 利用鉢與杵將  $\text{SnS}_2$  磨成粉末，作為實驗觀測用。

#### 5. 以水熱法製作 $\text{SnS}_2\text{-Cu}$ :

過程大致與製作  $\text{SnS}_2$  相同，僅有 1、中之實驗步驟(2)有所不

同，變換成如下：

(1). 加入硫代乙醯胺後須攪拌時間變為 15 分鐘。

(2). 分別加入三水硝酸銅( $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ ) 1 wt.%, 5 wt.%, 10 wt.%, 然後攪拌 1 小時。

6. 測量  $\text{SnS}_2$  與  $\text{SnS}_2\text{-Cu}$  的晶體結構與形貌：

- (1). 利用 X-ray 繞射 (XRD) 測量晶體結構。
- (2). 利用 SEM (掃描式電子顯微鏡) 觀察其表面型態。
- (3). 利用拉曼繞射鑑定分子間的振動模式。

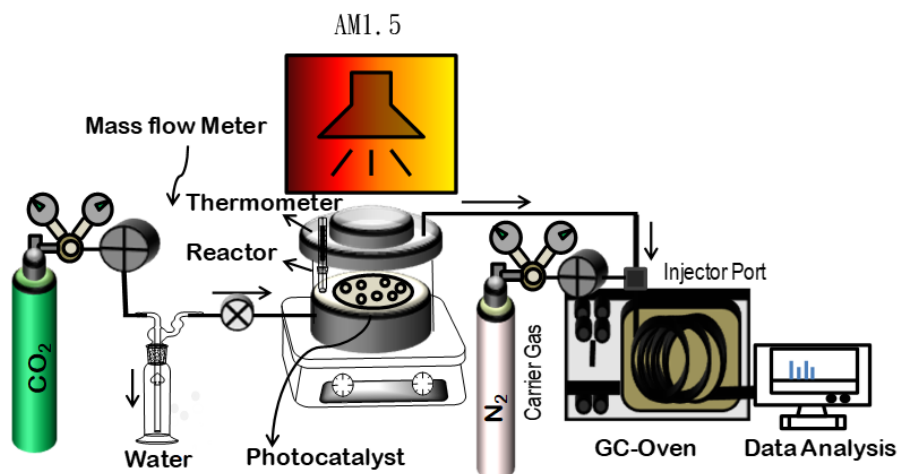
7. 測量及探討  $\text{SnS}_2$  與  $\text{SnS}_2\text{-Cu}$  吸收光譜：

利用可見光／紫外光之分光光譜儀測量觸媒吸收光譜範圍。

8. 測量及探討  $\text{SnS}_2$  與  $\text{SnS}_2\text{-Cu}$  於  $\text{CO}_2$  還原反應之效率及氣體產物之種類：

利用氣相層析儀量(GC)及火焰游離偵測器(FID)分別測其氣體產物之種類及反應效率。

如圖五所示，以氣相為反應環境，使用本研究方法獲得的光觸媒 0.1 g 放置於體積 300 ml 不鏽鋼製的圓柱形反應器中央，並用石英玻璃覆蓋。於樣品盤上、反應器外部垂直置放 AM1.5 做為光源，且置放風扇固定在燈的周圍，避免系統溫度過度上升。



圖五 以 GC 分析之實驗裝置

在環境溫度 ( $25\pm5^{\circ}\text{C}$ ) 下，連續氣流反應器中進行還原  $\text{CO}_2$  的光催化實驗。首先，將反應器在  $50^{\circ}\text{C}$  脫氣，接著用  $\text{N}_2$  吹拂 1 小時，以除去反應器表面任何殘留化合物，再將  $\text{CO}_2$  以 10 SCCM 的流速清洗，並通過水以提供氫源及控制濕度。

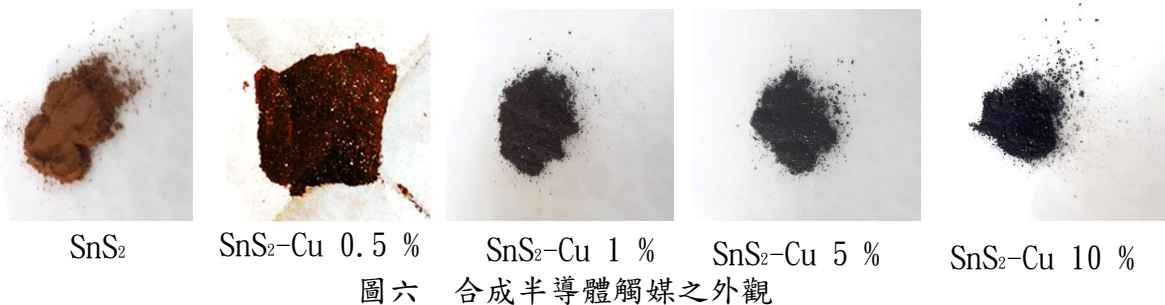
接著，將樣品均勻分布至直徑 4 cm 的玻璃盤，並以 AM1.5 照射。

最後，以氮氣作為載流氣體，將產物通過氣相層析儀火燄離子偵測器 GC/FID 持續測量產物的濃度以及種類。

### 三、研究結果與討論

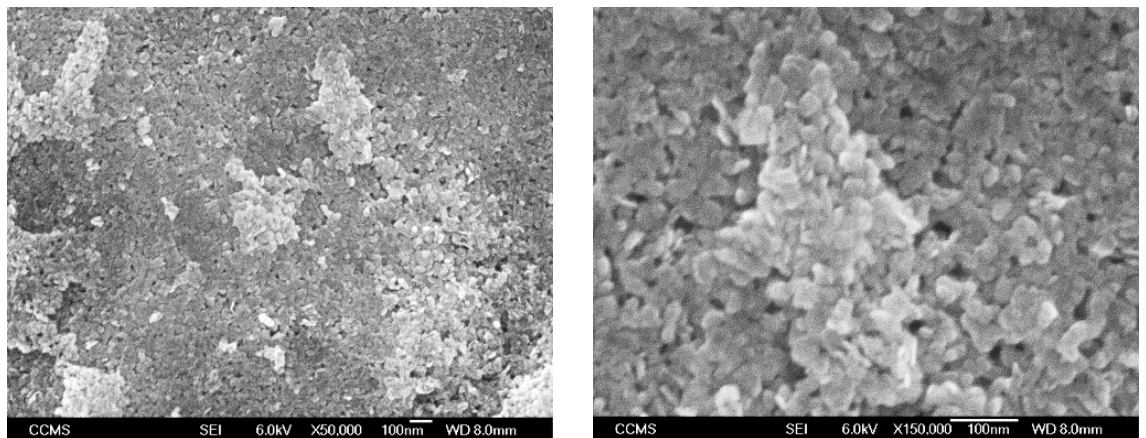
#### (一)、研究結果

##### 1. 光觸媒半導體的外觀

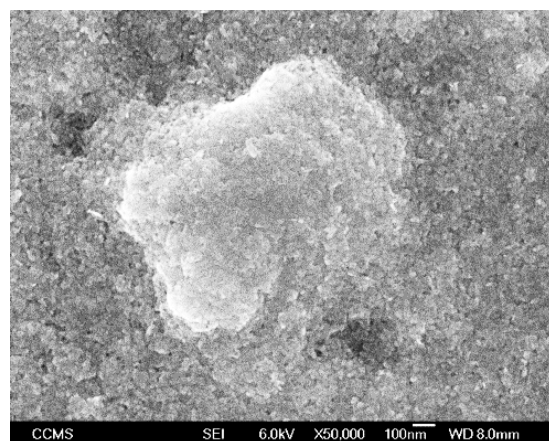
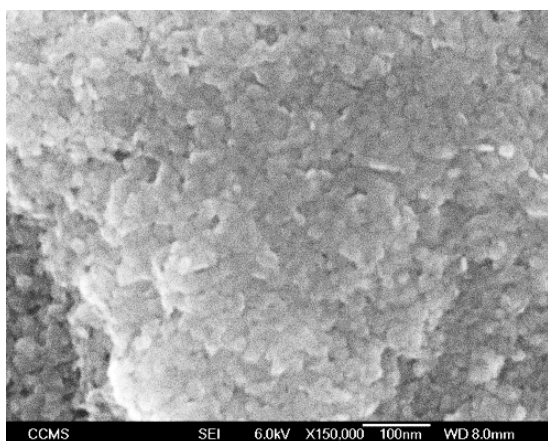


##### 2. 分析觸媒基本特性

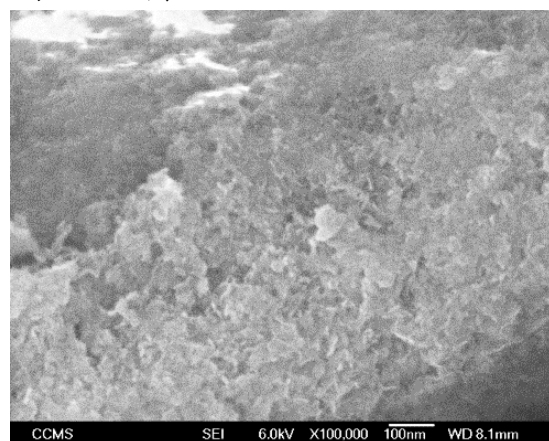
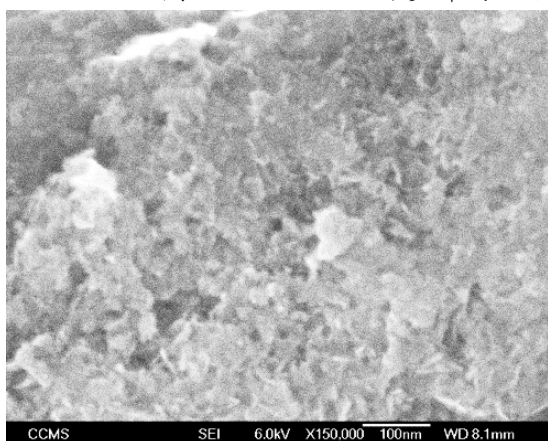
(1). 掃描式電子顯微鏡分析 (SEM, Scanning Electron Microscope) :



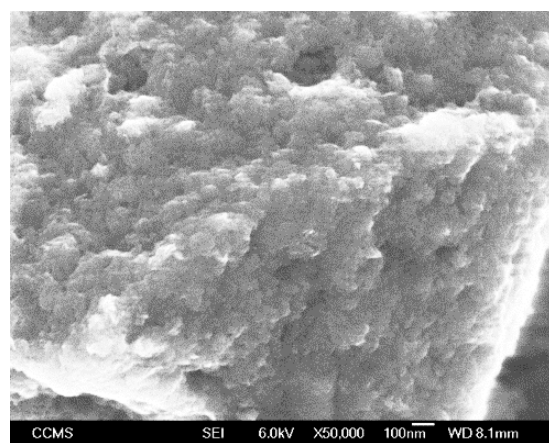
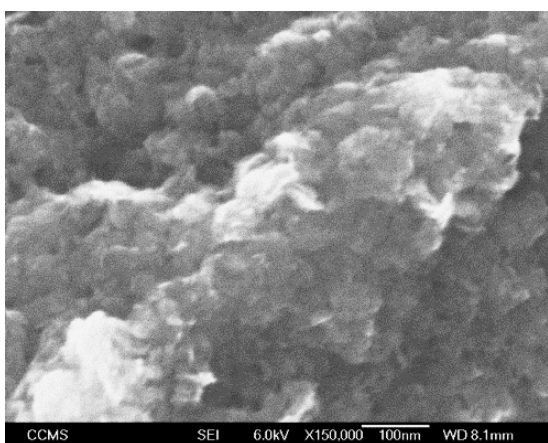
圖七 未經銅修飾的二硫化錫之 SEM 圖。



圖八 1 wt.% 銅修飾的二硫化錫之 SEM 圖



圖九 5 wt.% 銅修飾的二硫化錫之 SEM 圖



圖十 10 wt.% 銅修飾的二硫化錫之 SEM 圖

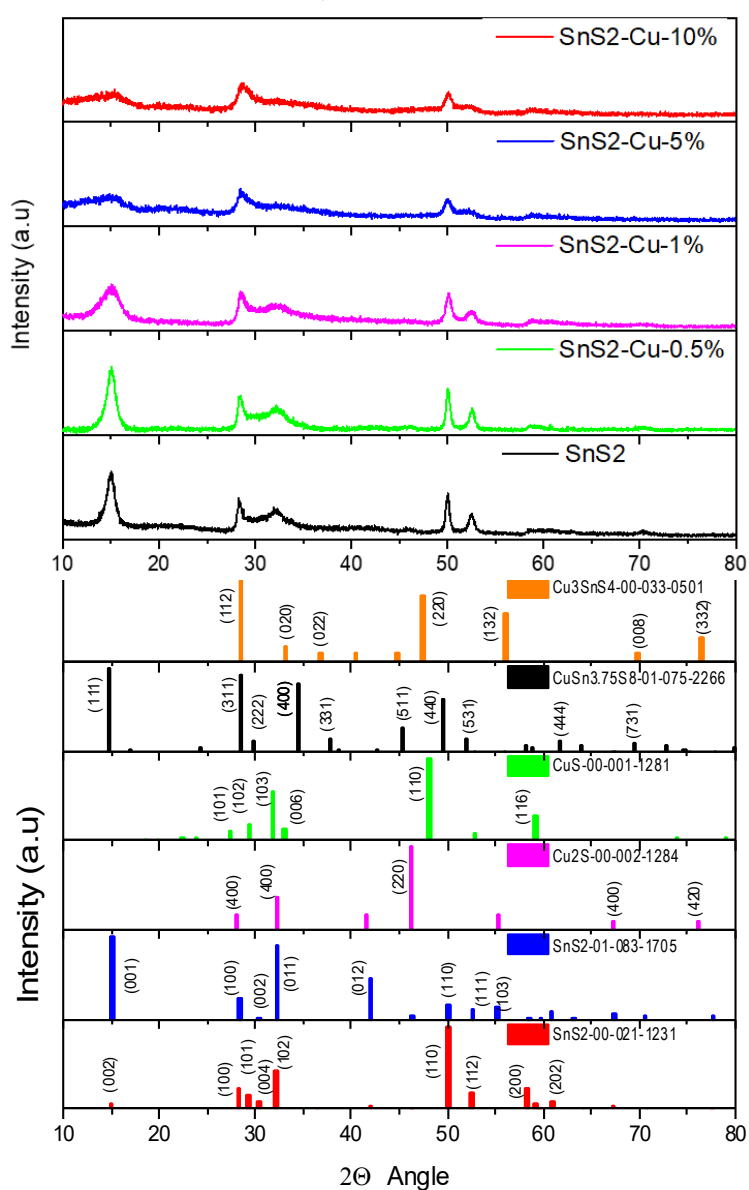
掃描式電子顯微鏡由反射電子、材料經電子束照射後產生的二次電子偵測樣品表面。觀測之材料若非導電物質，可鍍上金屬，以避免電荷累積造成影像扭曲。由圖七至圖十之分析，銅修飾過後的二硫化錫，在 SEM 觀察下，粒子呈現聚集的現象。

表一 銅的摻雜量

Elements	SnS <sub>2</sub>		SnS <sub>2</sub> -Cu 1 %		SnS <sub>2</sub> -Cu 5 %		SnS <sub>2</sub> -Cu 10 %	
	wt. %	at. %	wt. %	at. %	wt. %	at. %	wt. %	at. %
Sn	68.76	37.28	69.04	37.91	70.03	40.35	68.13	39.08
Cu	0	0	0.90	0.98	4.33	4.94	6.84	7.78
S	31.24	62.72	30.06	61.11	25.64	54.70	25.03	53.14

由表一可知銅的修飾比例接近原先預計修飾的比例，表示有確實合 SnS<sub>2</sub>-Cu。

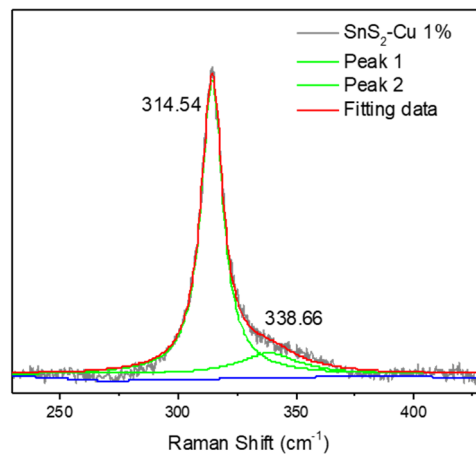
(2). X 光繞射分析 (XRD, X-ray diffraction) :



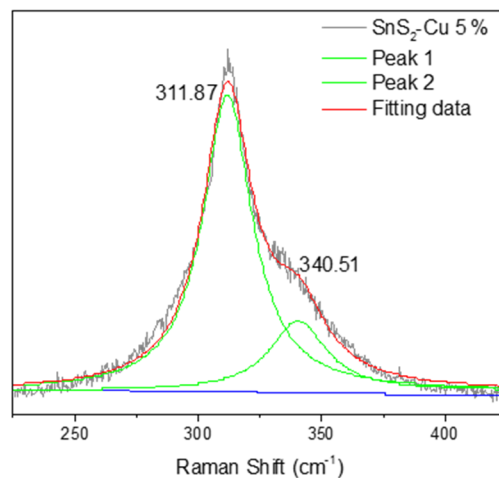
圖十一 粉末繞射標準圖譜

X 光繞射分析以對照圖譜、數據特徵峰於  $2\theta$  的位置來大致判別其晶格種類、特徵。其原理為當入射光波長與晶面間距相近，產生繞射現象，若鄰層散射之波相位相同，光程差為波長整數倍，產生建設性干涉，可用布拉格定律  $n\lambda = 2d \sin \theta$  來計算晶面間距。對比數據 SnS<sub>2</sub>01-083-1705 與 SnS<sub>2</sub>00-021-1231 參考資料庫的二硫化錫，參考幾個主要特徵峰(001)、(011)、(110)與銅修飾比例，可知較高比例的銅修飾這幾個特徵峰變得較寬且不明顯，且其晶形為混和相，可能介於底面為六角形至四邊形的晶形間。較寬的特徵峰可能意味晶格縮小或層錯疊、微應變和不均勻結構等現象。圖中並未偵測到金屬銅的特徵峰，意即未有銅原子裸露在表面，而是修飾在晶格裡。

### (3). 雷射拉曼光譜分析(Laser Raman spectra)：

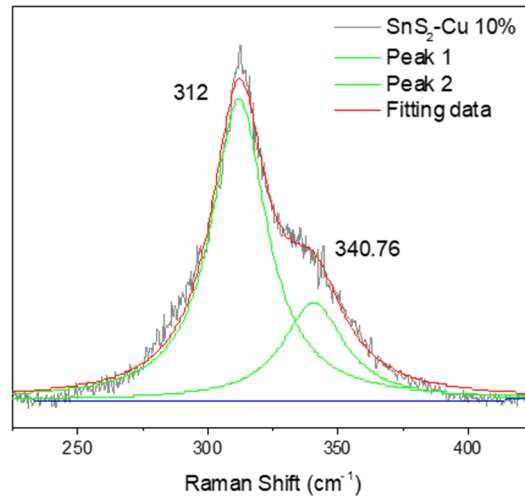


圖十二 Cu(1 wt. %)-SnS<sub>2</sub> 拉曼圖譜

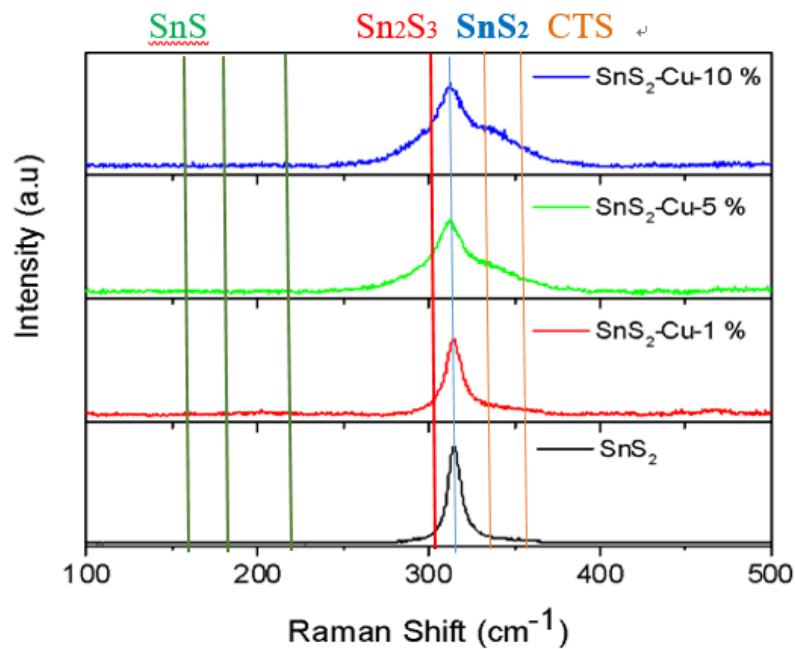


圖十三 SnS<sub>2</sub>-Cu(5 wt. %) 拉曼圖譜





圖十四 SnS<sub>2</sub>-Cu(10 wt.%)拉曼圖譜



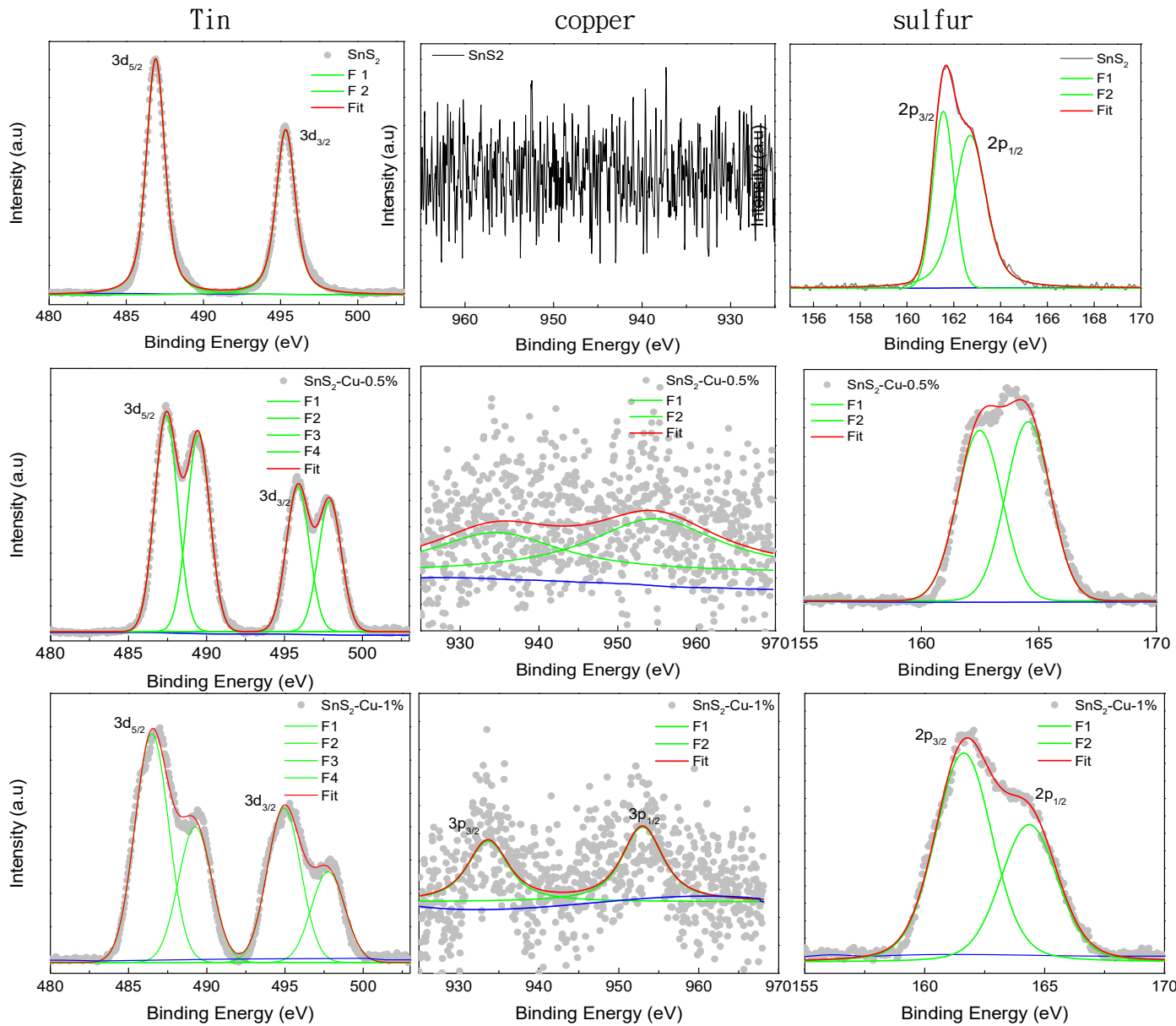
圖十五 拉曼圖譜

雷射拉曼光譜由光子散射前後的頻率改變來探測其與樣品分子發生的交互作用。大部分散射後的光子頻率仍與入射時相同，少部分為非彈性散射，能量給予材料分子而自身能量較低，頻率也較低( $E = h\nu$ )，稱為斯托克散線(Stokes Raman scattering)，而有些則是光子得到能量，頻率較入射頻率高，稱為反斯托克散線(Anti-Stokes Raman scattering)，但以斯托克散線較為常見。每個官能基振動及電子雲變形有其振動模式，由拉曼光譜可得知鍵結狀態，其特徵峰的位置可判別物質種類，而由半高寬可

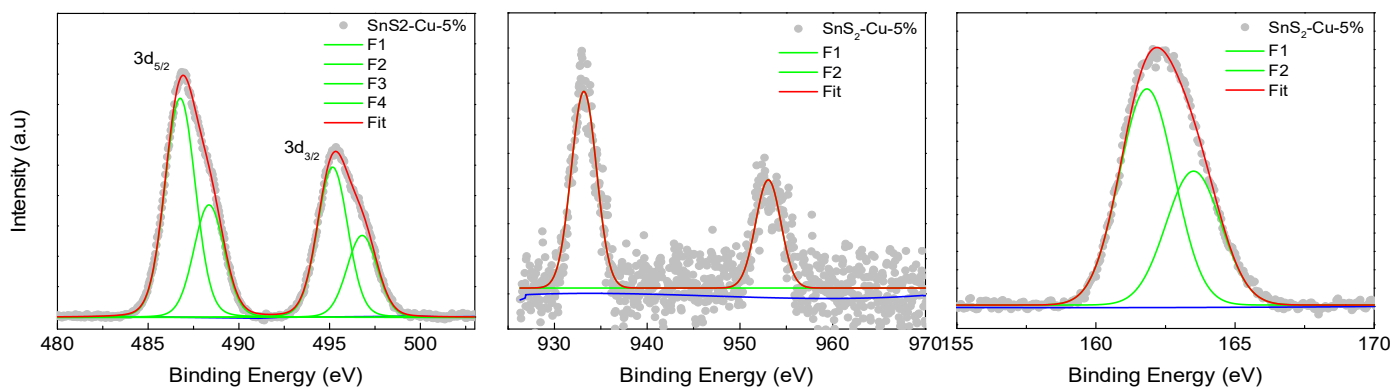
得知晶格狀況，橫移則能顯示分子間的應力作用；其數值為波長的倒數 (Wavenumber)，又稱拉曼位移(Raman Shift)。

數據中  $\text{SnS}_2$  的特徵峰於  $315 \text{ cm}^{-1}$ ，而經銅修飾的二硫化錫其特徵峰向右方多了 CTS( $\text{Cu}_3\text{SnS}_4$ ,  $336 \text{ cm}^{-1} \sim 351 \text{ cm}^{-1}$ ) 的特徵，可知其為混和相，部分晶體結構受壓變形。

#### (4). X-射線光電子光譜(XPS, X-ray photoelectron spectroscopy):



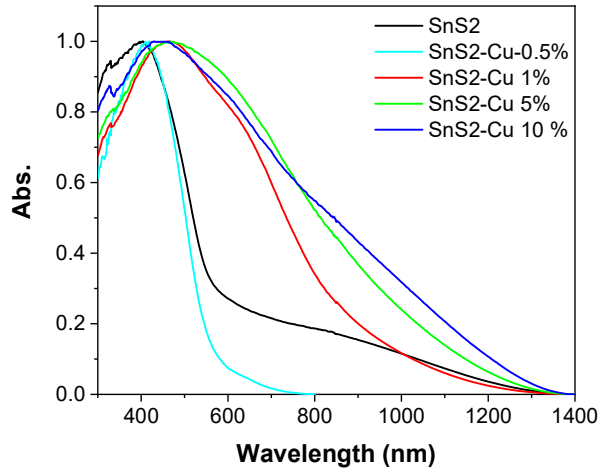




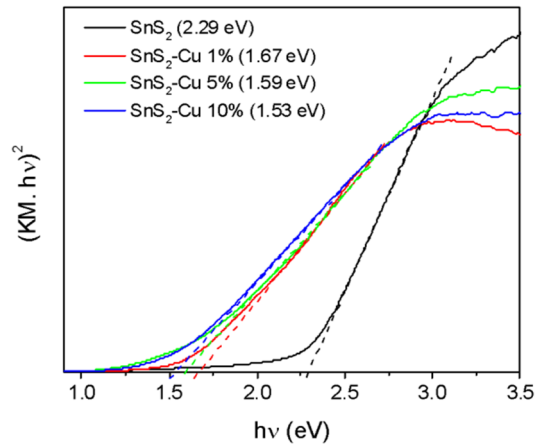
圖十六  $\text{SnS}_2\text{-Cu}$  0, 1, 5 wt.% X-射線光電子光譜(Sn 3d, Cu 2p, S 2p)

X-射線光電子光譜以 X 射線激發試樣表面價電子或內層電子，並分析不同能量的光電子及其數量，以測定試樣表面的定量原子組成及化學、鍵結狀態，因為催化反應於觸媒表面進行，所以表面結構及特性分析較重要。縱軸為相對強度，橫軸為結合能或光電子的動能。結合能( $E_b$ )可由入射已知能量的光子減去功函數(work function)和光電子動能而得。原子因不同化學環境而有不同電子分佈，而密集的電子有屏蔽效應(Screening effect)，彼此間的斥力與和原子核間的引力，其淨力為較小的引力，顯示出較小的結合能，化學位移往能量低處移動。由圖十六可知銅 2p、硫 2p、錫 3d 結合能在純二硫化錫及銅修飾後的二硫化錫的特性。經銅修飾的二硫化錫，其中錫的 3d 軌域的結合能有一多加的高峰可能與少量銅、硫、錫三相組成有關。而當銅的比例漸增，代表銅的特徵峰在其位置及強度會比較明顯被偵測到。

#### (5). 紫外線、可見光分光光譜(Ultraviolet/Visible Spectrophotometer)：



圖十七 樣品之吸收率與波長的關係圖

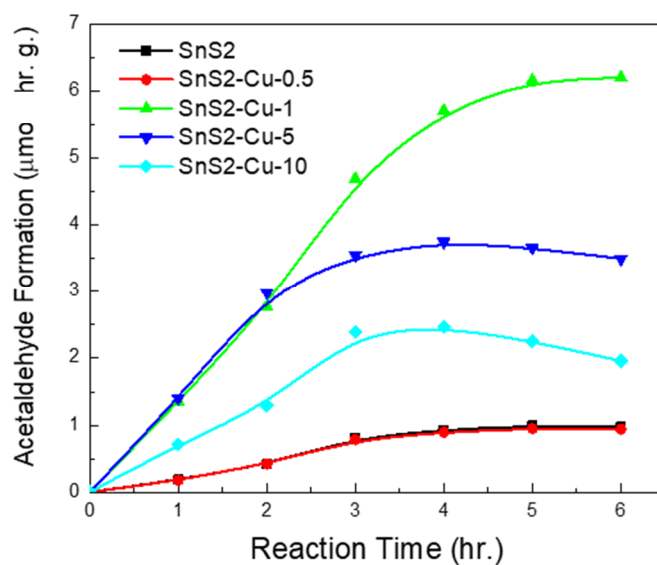


圖十八 直接能隙值

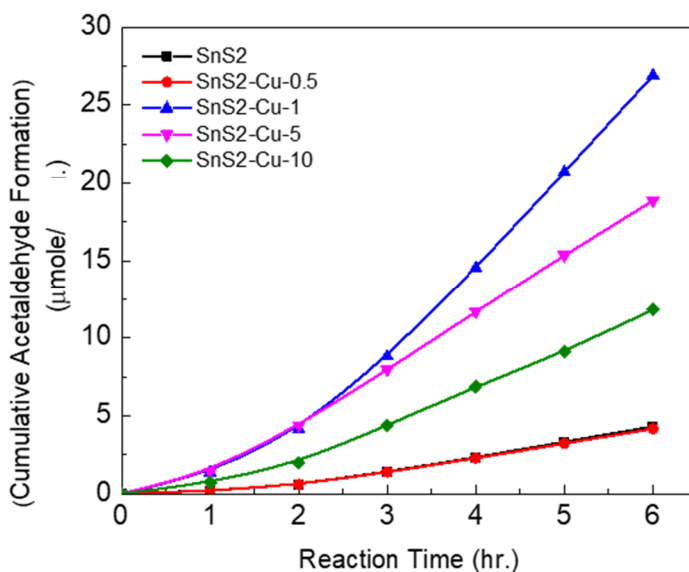
紫外光可見光分光光譜儀以濾光鏡選定由氬燈和鹵素燈放出的光波長範圍，再由狹縫選定特定波長，比對樣品吸收的光能量和原先的光能量，能得知樣品的吸收、反射、穿透等特性。縱座標由 Kubelka-Munk 公式可得  $(KM \cdot h\nu)^n$ ，而直接能隙的條件使得  $(KM \cdot h\nu)^n$  的  $n$  值為 2(平方)。由圖十七、十八半導體粉末的測試，可知大致上越高比例的銅修飾有較廣泛的吸收波長範圍與較短的能隙值，意即能使用的能量較多。未經修飾的  $\text{SnS}_2$  能隙為 2.29 eV，而經 1 wt. %, 5 wt. %, 10 wt. %之銅修飾後，其能隙分別為 1.67

eV, 1.59 eV, 1.53 eV，直接能隙明顯變小。對照組 SnS<sub>2</sub> 能隙為 2.29 eV，能利用之太陽光波段須小於 541 nm，電子才能越過能隙至導帶進行 CO<sub>2</sub>RR，而 1 wt.%, 5 wt.%, 10 wt.% 之銅修飾後的 SnS<sub>2</sub> 能利用之波段分別是小於 742 nm, 770 nm, 810 nm。因此我們得知，銅修飾得以縮小能隙並增加利用可見光光波段的範圍。

(6). 氣相層析光觸媒活性分析 (GC, Gas chromatography)：



圖十九 以 GC 檢測其六小時反應時間的產率。



圖二十 六小時反應時間的累積產量

表二 各觸媒乙醛產量

	SnS <sub>2</sub>	SnS <sub>2</sub> -Cu 0.5 %	SnS <sub>2</sub> -Cu 1 %	SnS <sub>2</sub> -Cu 5 %	SnS <sub>2</sub> -Cu 10 %
乙醛單位時間 最大產量 ( $\mu\text{mole/hr}$ )	0.978	0.94	6.2	3.5	1.96
乙醛總產量 ( $\mu\text{mole}$ )	4.309	4.1	26.9	18.87	11.83

氣相沉析經氣化試樣並以攜載氣流帶至分離用管柱，管柱上的固態載體表面有液相薄層與試樣互相吸引，其力與攜載氣流反向。不同化合物在管柱上移動速度為因其所受淨力值有異而分離，但並非一定分離，要視管柱填充物及壓力、溫度、流速等條件。在室溫下，經銅修飾的 SnS<sub>2</sub> 光觸媒於 CO<sub>2</sub>RR 中，無論產出速率或者累積產量皆較 SnS<sub>2</sub> 高，以 GC-FID 測得產量及產物為乙醛 (CH<sub>3</sub>CHO)。其中又以 SnS<sub>2</sub>-Cu 1 wt.% 有顯著的產率及產量，並於 5~6 小時間達反應巔峰 (6.2  $\mu\text{mole/hr}$ )，其累積產量為 26.9  $\mu\text{mole/hr}$ 。並由計算得知：光化學量子效率 (PCQE = Photochemical Quantum Efficiency) 達到 0.23%，其中 PCQE = 電子數 × CH 莫耳數 / 觸媒吸收光子數 × 面積。

## (二)、討論

銅修飾所影響的光吸收範圍、減少電子-電洞對復合、縮短能隙等相關機制及對二氧化碳還原的因果關係尚在研究中，尤其是何種比例的銅修飾能有較高的轉換產量。由參考資料[1]得知過量銅修飾會造成銅與光觸媒 SnS<sub>2</sub> 競爭光吸收，導致光觸媒 SnS<sub>2</sub> 實際吸收光能降低，能用於 CO<sub>2</sub>RR 的電子數減少，反而有產量下降現象，這可能是一種為何較多比例的銅修飾未必能提升產量的主因。但我們也持續研究銅修飾比例影響二氧化碳還原產量之其他因素，並希望得出最佳銅修飾比例。

## 四、結論與應用

### (一)、結論：

本研究主要研究銅修飾二硫化錫對於還原二氧化碳的影響。實驗首先是合成經過銅修飾的二硫化錫，再經由儀器檢測銅摻雜進入二硫化錫的確切比例與特性。最後，透過為本實驗設計之裝置，測量其還原二氧化碳的效率。並藉由氣相層析儀同步分析產出物質及濃度。以下為本研究的研究結論：

銅修飾二硫化錫——意即部份銅原子取代晶格中的錫原子——使原子有聚集的現象。且修飾後光觸媒的能隙縮小，吸收光波段的範圍變大，能利用更多光子能量進行反應，但由 5wt.%, 10wt.% 結果得知並非較多比例的銅就擁有較高的轉換產量。我們在 GC 測試中， $\text{SnS}_2\text{-Cu}$  的效率皆優於  $\text{SnS}_2$ ，其中又以 1 wt.% 累積產量為 26.9 毫莫耳效果最為良好。

### 二、應用與未來展望：

現階段以銅修飾二硫化錫之實驗結果呈現：銅修飾於吸收光能及轉換  $\text{CO}_2$  效率有所貢獻，如未來能進一步針對銅和二硫化錫的比例，並探討其中銅修飾所影響的吸收光範圍、減少電子-電洞對復合、縮短能隙等相關機制，以及銅修飾與二氧化碳還原之更為精確的因果關係，則必能提升  $\text{SnS}_2$  光觸媒於二氧化碳還原反應的效能。

## 五、參考文獻

- [1] 匡佳謙、吳紀聖 (2016)。利用光觸媒處理CO<sub>2</sub>再利用技術。《化工》，vol. 63-1, pp. 18-31.
- [2] 林昌輝 (2014)。還原氧化石墨烯作為二氧化碳轉換為甲醇之光觸媒。國立臺灣科技大學材料科學與工程所碩士學位論文。
- [3] 林信翰 (2014)。二硫化錫於可見光驅動光催化水分解產氫之研究。國立清華大學化學工程研究所碩士論文。
- [4] 林家裕 (2015)。「潔」能減碳——太陽能科技的新運用。《科學發展》，508 期，pp. 34-39。
- [5] 林麗娟 (1994)。X 光繞射原理及其應用。《工業材料》，86 期，pp. 100-109。
- [6] 林麗瓊 (2014)。在凝態中心築夢踏實我的科研生涯——以光觸媒還原二氧化碳為例。《物理雙月刊》，36卷2期2014. 4，pp. 134-141。
- [7] 施正雄。《儀器分析原理與應用》。初版，臺北市，五南圖書。pp. 43-77, pp. 101-110, pp. 219-246, pp. 319-335, pp. 583-585，2012。
- [8] 羅盛全 (2013)。科學基礎研究知重要利器——掃描式電子顯微鏡。《科學研習》，52-5，pp. 2-4。
- [9] Kan Li, Bosi Peng, and Tianyou Peng. (2016). Recent Advances in Heterogeneous Photocatalytic CO<sub>2</sub> Conversion to Solar Fuels. *ACS Catalysis*, pp. 7485-7547.
- [10] Hsin-Cheng Hsu, Indrajit Shown, Hsieh-Yu Wei, Yu-Chung Chang, He-Yun Du, Yan-Gu Lin, Chi-Ang Tseng, Chen-Hao Wang, Li-Chyong Chen, Yu-Chuan Lin and Kuei-Hsien Chen. (2013). Graphene oxide as a promising photocatalyst for CO<sub>2</sub> to methanol conversion. *Nanoscale*. Vol. 5, pp. 262-268.

- [11] Joseph H. Montoya, Linsey C. Seitz, Pongkarn Chakthranont, Aleksandra Vojvodic, Thomas F. Jaramillo and Jens K. Nørskov. (2017). Materials for solar fuels and chemicals. *Nature Materials*, vol. 16, pp. 70–81.
- [12] Babu Ram and Abhishek K. Singh. (2017) Strain-induced-to-direct band-gap transition in bulk SnS<sub>2</sub>. *Physical Review*, B 95, 075134.

## 【評語】 200002

本作品的主題為將二氧化碳以太陽能光源及  $\text{SnS}_2$  光觸媒之下還原為乙醛。 $\text{SnS}_2$  製程中，藉由加入不同重量百分比銅，發現可將能隙縮短，吸收光範圍則可延伸至可見光之域，而 1wt% 銅修飾的  $\text{SnS}_2$  光觸媒有最高  $\text{CO}_2$  轉換效率，且產物單一為乙醛。建議未來對為何 1wt% 銅修飾的  $\text{SnS}_2$  光觸媒有最高  $\text{CO}_2$  轉換效率，及產物單一為乙醛的機制可再深入探討。