

### 跨領域永續研究整合型計畫:

#### 臺灣國立大學系統年輕學者創新性合作計畫執行報告格式

申請單位	國立雲林科技大學/電子系
總計畫主持人	國立雲林科技大學/電子系/林士弘/教授
總計畫名稱 (中文)	全波段紫外光感測器研製及環境光害之偵測應用
總計畫名稱 (英文)	Development of Broad-band Ultraviolet Light Sensors and the Applications of Environmental Light Pollution Detection
子計畫主持人	<b>子計畫一主持人:</b> 國立雲林科技大學/電子系/林士弘/教授 國立雲林科技大學/電子系/廖哲浩/助理教授 <b>子計畫二主持人:</b> 國立虎尾科技大學/電子系/水瑞鐔/教授 <b>子計畫三主持人:</b> 國立中興大學/電機系/蔡宛邵/副教授
中文摘要	<p>COVID-19 疫情於 2020 年全球蔓延，病毒藉由空氣傳播迅速擴散導致全球大流行。針對病毒的防治，美國疾病控制中心(CDC)及歐洲研究期刊指出以紫外光照射滅菌(UVGI)對大樓空調或醫院加護病房消毒以減少病毒傳播的功效，我國亦有類似研究發。可見在病毒防控中紫外光殺菌是趨勢，但伴隨而來的是紫外光處理不當所導致對人體眼睛及皮膚的危害。另外，工業的快速發展造成空氣污染也引發了溫室效應及臭氧層破壞，這使得太陽光譜中深紫外光 UVC 因缺少臭氧層吸收而能直接照射地表造成對生物的危害。因紫外光為不可見光，所以發展紫外光偵測器成為有效控制及紫外光應用上重要的一環，以避免因不可見的環境光害造成人體永久傷害。</p> <p>紫外光感測器應用範圍十分廣泛，包括半導體微影製程、工業上 UV 膠固化與印刷、火焰及導彈偵測、醫學</p>

	<p>化療及偵測、天氣天文研究、氣體感測及生物化學研究等領域。在這些應用中的紫外光感測器需要具有高響應性及抗紫外線輻射耐久性，且開發全波段紫外光感測器，將能擴展其適用性應對各種場合，嘉惠大眾。因此本計畫全波段紫外光感測器為主軸，跨領域整合不同研究團隊開發的氧化物材料，例如氧化鋅、氧化鋅奈米柱、氧化鎵、氧化鋁鎵，以及摻雜鎂的氧化鋅奈米柱，匹配最佳響應光波段，研製偵測覆蓋 UVA、UVB 及 UVC 的全紫外波段感測器。並針對設計製作的元件進行物理性質、材料特性、與光電特性的量測與分析，以達全波段環境紫外光感測的目的，讓人們能永續生活於無光害污染的健康環境。</p>
英文摘要	<p>In 2020, the global spread of the COVID-19 epidemic underscored the interconnected nature of our world, facilitated by technological progress that transcends traditional boundaries. Concurrently, the escalation of global warming and disruption to the ecological balance have dismantled natural barriers, enabling regional diseases to breach boundaries and trigger a worldwide pandemic. The swift growth of industrialization has exacerbated air pollution, rapidly intensified the greenhouse effect, and contributed to the depletion of the ozone layer. Consequently, the absence of ozone absorption allows deep ultraviolet light (UVC) in the solar spectrum to directly impact the Earth's surface, posing risks to organisms.</p> <p>Addressing viral prevention and treatment, the U.S. Centers for Disease Control (CDC) and European research publications have highlighted the efficacy of ultraviolet light sterilization (UVGI) in disinfecting building air conditioners and hospital intensive care units, mitigating virus transmission. Similar research has been undertaken in Taiwan. While ultraviolet light sterilization emerges as a pivotal trend in virus prevention, improper handling of ultraviolet light poses potential risks to human eyes and skin. As ultraviolet light is imperceptible to the human eye, developing ultraviolet light detectors becomes crucial in effectively managing and applying ultraviolet light,</p>

	<p>preventing enduring harm caused by invisible environmental light pollution.</p> <p>Moreover, UV sensors find widespread applications, encompassing semiconductor lithography, industrial processes such as UV glue curing and printing, flame and missile detection, medical chemotherapy and detection, weather astronomy research, gas sensing, and biochemical research. Ensuring high responsiveness and durability against UV radiation is imperative for UV sensors employed in these diverse fields. The potential development of full-band UV sensors holds promise, broadening their applicability to various scenarios and benefiting users.</p> <p>Thus, our project is focused on creating full-band ultraviolet light sensors. It integrated oxide materials, i.e., ZnO, ZnO Nanorods, Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, AlGa<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, and Mg-doped ZnO Nanorods, from diverse research teams across disciplines, optimizing response light bands to develop sensors capable of detecting UVA, UVB, and UVC. The physical, material, and optoelectronic properties of the designed devices have been meticulously analyzed. The goal is to achieve comprehensive environmental ultraviolet light sensing, fostering sustainable living in an environment free from light pollution for the well-being of individuals.</p>
<p>執行方法 及步驟</p>	<p>針對不同紫外光波段，採用不同感測主動層材料執行開發，以整合達到最佳響應度/感測效率：以氧化鋅奈米柱(ZnO)表面聲波型紫外光感測器偵測 365 nm 附近波段(UVA)，以摻鎂的氧化鋅奈米柱表面聲波型紫外光感測器調變感測波長，使其感測範圍包含至 300 nm 附近波段(UVB)，氧化鎵β-Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>及氧化鋁鎵β-(AlGa)<sub>2</sub>O<sub>3</sub>指叉電極感測器則可偵測 255 nm 及小於 250nm 附近波段(UVC)，特別以能隙可調的製程方法研製最佳響應波長在 240 nm 以上及 230 以下的感測器，藉以區分對人體有害的 240-280 nm 紫外光及較無傷害的 200-225 nm 遠紫外光。本計畫執行方法如下：</p>

## 1. UVA 與 UVB 波段感測器研製

### (1) 氧化鋅薄膜濺鍍

使用射頻磁控濺鍍法(RF Magnetron Sputtering)成長氧化鋅薄膜在玻璃基板上，氧化鋅摻雜鋰之靶材可由固態反應合成製作，經由調變濺鍍參數(濺鍍速率、濺鍍壓力、O<sub>2</sub>/Ar 流量比、基板溫度)以得到均勻且緻密的高阻值氧化鋅薄膜。

### (2) 表面聲波紫外光感測器元件製作

電極設計:將指叉電極黃光微影製程成長在玻璃基板上，電極設計為10 $\mu$ m(波長40 $\mu$ m)，探討不同氧化鋅膜厚對感測器靈敏度之影響。

### (3) 氧化鋅奈米結構製作

利用水熱法成長氧化鋅奈米結構，六亞甲四酸與硝酸鋅溶液會以水解的方式產生胺、然後在水中所產生的氫氧根離子與鋅離子反應形成氧化鋅，在與鋅離子行成的錯合物而形成氧化鋅奈米柱陣列，經由調變六亞甲四酸與硝酸鋅濃度、持溫時間、反應溫度，便可成長不同表面型態的奈米柱薄膜，添加硝酸鎂進行鎂離子之摻雜。探討不同不同鎂離子濃度對紫外光感測器靈敏度的影響。

### (4) 表面聲波紫外光感測器電性分析

使用阻抗分析儀與網路分析儀、分析指叉狀電極電性(阻抗與電容)與波傳特性(相位、中心頻率與波傳能量比)。

### (5) 表面聲波紫外光感測器量測

將元件置於密閉腔體內，以365nm 與254nm 紫外光照射元件，量測與分析元件共振頻率、S<sub>21</sub>頻率響應、S<sub>11</sub>頻率響應、S<sub>21</sub>相位、波傳損失、元件阻抗值、電容值在照射紫外光前、後的變化量。

## 2. UVC 波段感測器研製

### (1) 氧化鎵 $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>薄膜沉積

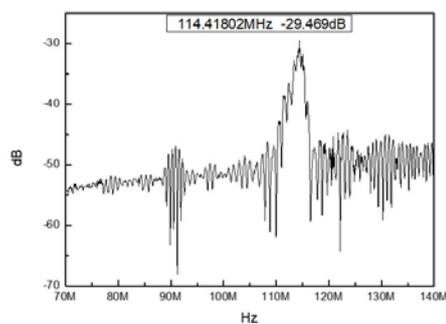
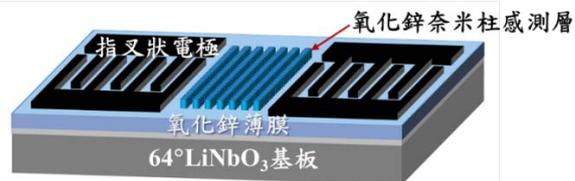
氧化鎵 $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>以脈衝雷射鍍膜(PLD)或射頻濺鍍(Sputter)方式將約50 nm 的氧化鎵( $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)薄膜鍍於藍寶石基板( $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)之上。

### (2) 氧化鋁鎵 $\beta$ -(AlGa)<sub>2</sub>O<sub>3</sub>薄膜改質

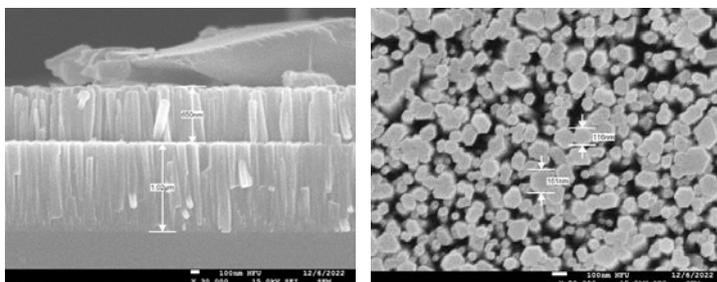
以高溫熱退火造成樣品相互擴散的特性，使上層 $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>薄膜的鎵(Ga)原子往下擴散而下層基板 $\alpha$ -

	<p><math>\text{Al}_2\text{O}_3</math>之鋁(Al)原子往上擴散，達成薄膜改質。</p> <p>(3) 材料分析  實驗樣品進行各項材料分析：  ①形貌分析-  原子力顯微鏡(AFM)檢測表面粗糙度、掃描式電子顯微鏡(SEM)觀察樣品形貌及以光學方式(Filmetrics)估計膜厚及鍍率。  ②晶體品質-  以 X 光繞射儀(XRD)量測<math>2\theta-\omega</math>及<math>\omega</math>-scan FWHM，及穿透式電子顯微鏡(TEM)觀察(FFT)晶格繞射圖形評估其晶體品質。  ③成份分析-  量測穿透頻譜(UV-Vis)評估能隙，以 X 射線光電子能譜(XPS)或二次離子質譜儀(SIMS)，及穿透式電子顯微鏡(TEM)之 X 光能量散佈光譜儀(EDS)分析元素組成。</p> <p>(4) 感測器元件製作  在完成氧化鋁鎵<math>\beta\text{-(AlGa)}_2\text{O}_3</math>薄膜材料分析後，將進行 UVC 紫外光感測器製作。設計並製作指叉狀電極圖形所需光罩，之後進行金屬接觸製作，分別以物理沉積方式鍍上鈦/金(Ti 20 nm/Au 200 nm)，並以黃光微影及掀金方法(Lift-off)完成指叉狀電極製作。</p> <p>(5) 感測器特性量測  使用紫外光光感測量測系統進行氧化鋁鎵紫外光感測器元件的光電特性量測及分析。</p>
<p>成果與績效</p>	<p>本計畫研製全紫外波段感測器。包含自製靶材濺鍍氧化鋅薄膜及氧化鋅奈米柱感測器(圖一)以感測 UVA 波段、鎂摻雜氧化鋅奈米柱表面聲波型紫外光感測器製作，並經由控制鎂摻雜濃度來調變感測波長(可延伸至 UVB 及 UVC 波段範圍)，及氧化鋁及高溫退火氧化鋁鎵深紫外光感測器感測 UVC 波段，以達成全波段環境紫外光感測。</p> <p>1. UVA(及其可延伸至 UVB、UVC 波段)感測器成果：  UVA 感測器材料氧化鋅為典型的 n 型氧化物半導體材料，在室溫下具有寬能隙(3.37eV，波長368 nm) 和高激子束縛能(60 meV)，在常溫為直接能隙半導體材</p>

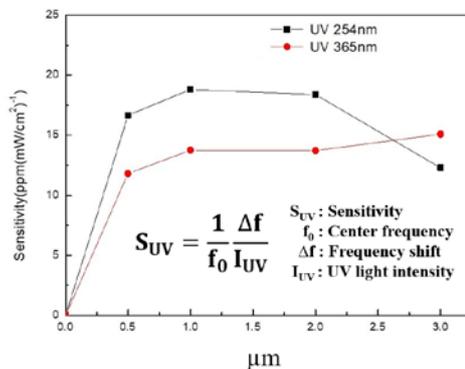
料。如圖二所示，氧化鋅表面易形成奈米結構，氧化鋅奈米柱可增加紫外光的吸收能力，大幅提升紫外光感測器的靈敏度和反應速。由圖三量測結果顯示，氧化鋅膜厚(1 μm)/波長(40 μm)比為2.5%時有最佳紫外光靈敏度。



圖一、氧化鋅奈米柱表面聲波感測器及本計畫製作之表面聲波感測元件頻率響應特性圖。

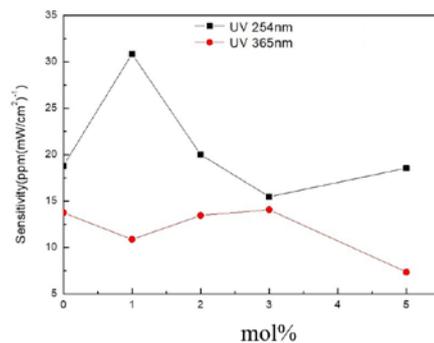


圖二、本計畫製作之氧化鋅奈米柱結構。

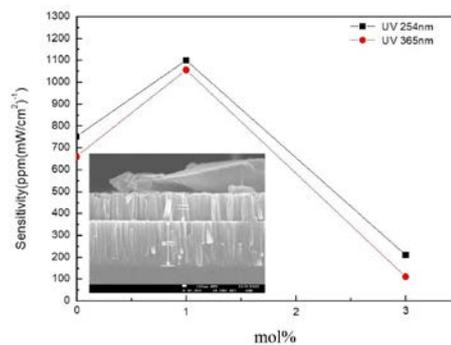


圖三、氧化鋅膜厚對元件紫外光靈敏度影響(氧化鋅薄膜/64°鋰酸鋰基板)。

本計畫利用摻雜鎂氧化鋅奈米柱為 UVA 頻段的感測層，鎂摻雜可調變能隙(MgO 7.8 eV)，經由調變鎂摻雜濃度來控制氧化鋅能隙大小，進而感測不同波長的紫外光，再將氧化鋅奈米柱薄膜成長於高機電耦和常數64°鈮酸鋰基板基板上製作高靈敏度表面聲波型紫外光感測器。由圖四可知若氧化鋅薄膜摻雜鎂1 mol%和純氧化鋅薄膜相比，其紫外光靈敏度提升86%。圖五為對氧化鋅奈米柱進行不同鎂摻雜濃度其紫外光靈敏度的影響分析，針對有無氧化鋅奈米柱的比較，具氧化鋅奈米柱薄膜的元件於254 nm 紫外光的靈敏度較無奈米柱薄膜提升約23.4倍；於365 nm 紫外光靈敏度則提升約54.2倍。若考慮摻雜鎂氧化鋅奈米柱的樣品，則氧化鋅奈米柱摻雜鎂1 mol%的樣品與無奈米柱的元件相比，於254 nm 紫外光靈敏度提升約34.6倍；365 nm 的紫外光靈敏度提升約88.3倍。表面聲波型紫外光感測器在改變不同能隙材質的感測層後也可應用於感測 UVB/UVC 頻段。



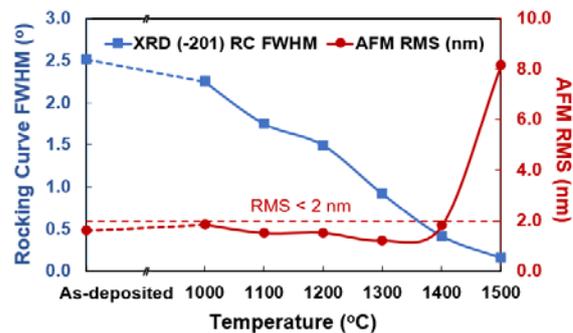
圖四、氧化鋅膜厚1 $\mu$ m，鎂摻雜濃度對元件紫外光靈敏度影響。



圖五、氧化鋅奈米柱不同鎂摻雜濃度對元件紫外光靈敏度影響(氧化鋅膜厚1 $\mu$ m、氧化鋅薄膜鎂摻雜濃度1mol%)。

## 2. 高溫退火氧化鋁鎵深紫外光(UVC)感測器成果:

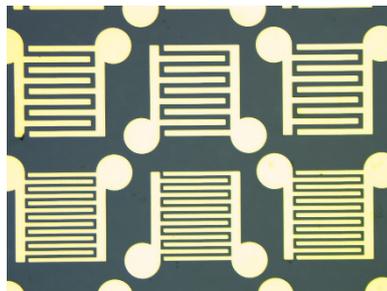
因為熱退火溫度可控制鎵/鋁原子相互熱擴散的程度，將氧化鎵( $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ )薄膜改質成氧化鋁鎵 $\beta$ ( $\text{AlGa})_2\text{O}_3$ ，且其晶體品質隨著溫度上升而變好(X-ray 搖擺曲線半高寬變窄)，而表面粗糙度仍可維持(在退火溫度小於 $1500^\circ\text{C}$  條件下 AFM RMS 值 $< 2\text{ nm}$ ，如圖六所示)，退火溫度與薄膜能隙/厚度近似線性關係，可將鋁組份(材料能隙)及膜厚(元件厚度設計約 $200\text{ nm}$ )精確控制在所需的感測波長設計範圍。



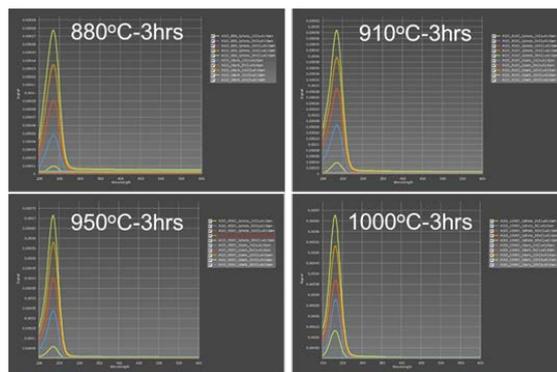
圖六、氧化鋁鎵不同高溫退火溫度之 XRD 搖擺曲線

半高全寬 FWHM 及 AFM 表面粗糙度關係圖。

圖七為本計畫以高溫退火方式製作之可調能隙(響應波長)UVC 紫外光感測器。以不同退火溫度製作之氧化鋁鎵深紫外光感測器，其波長響應特性曲線如圖八所示。將量測結果整理於表一之中，可知以 $950^\circ\text{C}/3$ 小時退火條件製作之 UVC 紫外光感測器具有最高的光電流，元件感測較果最佳。此時，高溫退火改質後的氧化鋁鎵薄膜材料，其鋁含量推算約在  $\text{Al}\%=22.8\%$ ，而紫外光響應波長移動到 $246\text{ nm}$ ，證實本研究團隊的製程方法能成功以退火溫度控制鋁含量，並調變紫外光感測器的響應波長；同時也實現高鋁含量的氧化鋁鎵紫外光感測器製作。



圖七、本計畫製作之氧化鋁鎵深紫外光(UVC)感測器。



圖八、不同退火溫度製作之氧化鋁鎵深紫外光感測器之波長響應曲線。

表一、不同退火溫度製作之氧化鋁鎵深紫外光感測器特性整理：

	AlGa <sub>2</sub> O <sub>3</sub> Al %	Annealing Condition	Response Wavelength	Photocurrent @20V
1	0.0%	As-deposited	255 nm	4.80 x 10 <sup>-4</sup> μA @ 20V
2	11.8%	880°C-3hrs	248 nm	1.77 x 10 <sup>-4</sup> μA @ 20V
3	18.3%	910°C-3hrs	247 nm	4.88 x 10 <sup>-4</sup> μA @ 20V
4	22.8%	950°C-3hrs	246 nm	7.15 x 10 <sup>-4</sup> μA @ 20V
5	26.0%	1000°C-3hrs	238 nm	6.77 x 10 <sup>-4</sup> μA @ 20V

對永續議題  
之貢獻

1. 確保健康的生活方式，促進各年齡人群的福祉：

在 COVID-19 新冠疫情蔓延下  
病毒防控常以各種紫外光殺菌，其為  
不可見光，因此開發全波段環境紫外  
光感測器，以供人們使用偵測環境是  
否存在紫外光害以避免過度暴露於紫  
外光下而對人體造成傷害，讓人們能  
永續生活於無光害的健康環境。



2. 保育和永續利用陸域生態系統，永續管理森林，防治  
沙漠化，防止土地劣化，遏止生物多樣性的喪失：

工業化的快速發展加劇了空  
氣污染，同時加劇了溫室效應及全  
球暖化，氟氯碳化物（CFCs，又稱  
氟氯烴）使用加劇了臭氧層的消  
耗。於缺乏臭氧吸收，太陽光譜中



	<p>的深紫外光 (UVC) 會直接影響地球表面，對陸域生態造成風險。研製全波段環境紫外光感測，讓人們能在沒有光污染的陸域環境中永續生活。</p>
<p>結論與建議</p>	<p>1. 本次藉由灣國立大學系統年輕學者創新性合作計畫，將雲科大、虎尾科技大學、中興大學三校四位老師的研究能量匯集，有機會共同合作分享研究資源及互相交流學習技術與不同領域專長，讓大家都收穫豐碩，期望將來能持續合作、共同創造出更多研究成果。</p> <p>2. 本次也因實驗室相互交流，讓研究生們互相學習研究，交流技術及知識，對於三校的研究生而言也是難得的學習機會，並能相互認識彼此砥礪，將來也能有機會在研究或工作上互相合作幫忙，實為最大收穫，希望創新性合作計畫及實驗室交流補助能持續舉辦，造福台灣高等教育的莘莘學子。</p>
<p>附件</p>	<p>1.ICSS 2022國際會議傑出論文獎得獎獎狀。</p>

備註：

1. 本報告內容以5至10頁為限。
2. 報告繳交時請提供電子檔各1份至總計畫主持人所屬學校之研發處承辦人及本案承辦學校承辦人。

臺灣國立大學系統年輕學者創新性合作計畫補助計畫各校聯絡人

學校	姓名	電話	E-mail
彰師大	鍾權煌先生	04-7232105 # 1803	rainlove@cc.ncue.edu.tw
聯合大	陳慧珍小姐	037-381406	huichen@nuu.edu.tw
高雄大	莊家琦小姐	07-5919106	ccchi6565@nuk.edu.tw
嘉義大	盧青廷小姐	05-2717161~4	yen@mail.ncyu.edu.tw
興大	溫晨昀小姐	04-2284205-709	joannewen@nchu.edu.tw
中教大	陳昭如小姐	04-2218-3680	research2@gm.ntcu.edu.tw
暨南大	林佩宸小姐	049-2910960#2811	peichen@ncnu.edu.tw
雲科大	沈秀容小姐	05-534-2601#2546	hjshen@yuntech.edu.tw
勤科大	顏泳閑小姐	04-23924505#2611	shian@ncut.edu.tw
臺體大	王羿婷小姐	04-2221-3108#2206	<a href="mailto:ytwang@ntus.edu.tw">ytwang@ntus.edu.tw</a>
虎科大	陳沛孜小姐	05-631-5729	<a href="mailto:pz10640@nfu.edu.tw">pz10640@nfu.edu.tw</a>