

加入我們

本協會非常歡迎國內外各大產業界與相關公司企業加入本協會成為永久會員，也歡迎企業、學術界的個人加入會員，會員享有極多優惠，並可獲得鍍膜科技之最新資訊與相關研討會訊息，若有問題請與本協會秘書 施小姐聯繫。



台灣鍍膜科技協會

協會會址：300092新竹市科學園區研發六路20號

協會網址：<https://tact.org.tw/>

協會電話：(02)2771-2171#1412

協會秘書：施宜雯小姐/信箱：tact.secretary@gmail.com

國科會工程科技推展中心：<http://www.etop.org.tw/>

本期內容

-  理事長的話
-  最新消息 - TACT 2025 internation conference
-  活動報導
-  鍍膜技術分享 I
-  鍍膜技術分享 II
-  協會參加ICMCTF 2025 心得分享I
-  協會參加ICMCTF 2025 心得分享II

親愛的會員先進，大家好：

隨著全球科技不斷演進，鍍膜技術在各領域的應用持續拓展與深化。從半導體先進封裝、次世代顯示技術，到綠色能源與生醫材料，鍍膜科技都是不可或缺的關鍵角色。

回顧過去一年，台灣鍍膜科技協會積極舉辦各類專業講座、產學論壇及國際交流活動，持續作為產官學研交流的重要橋梁，在此感謝各位會員長期以來對本協會的支持與參與，共同協助台灣產業掌握技術趨勢，強化全球競爭力，攜手推動鍍膜產業蓬勃發展。

今年，協會主辦的國際鍍膜科技研討會（TACT 2025）將於10月26日至29日盛大舉行，地點選定於集思北科大會議中心（GIS TAIPEI TECH Convention Center）。TACT 2025不僅延續歷屆國際會議的專業水準，更將聚焦於永續材料、智慧製程、先進功能鍍膜等主題，邀請國內外頂尖學者專家及產業領袖共襄盛舉。這是國內鍍膜領域與國際對話的重要舞台，誠摯邀請各位會員踴躍參與，一同展現台灣在鍍膜領域的卓越成果。

展望未來，協會將持續深化國際連結，積極促進產學研技術交流，致力推動台灣鍍膜科技朝向高值化、智慧化及永續化發展。我們也將持續傾聽會員需求，提供更多專業資源與交流機會，協助會員在全球科技浪潮中持續領先。

誠摯邀請大家持續關注並參與協會各項活動，攜手為台灣鍍膜產業開創更亮麗的未來！

敬祝

萬事如意，平安健康

台灣鍍膜科技協會 理事長

王錫福

2025年7月



TACT 2025 internation conference

TACT 2025 國際會議即將於台灣盛大舉辦，邀請全球鍍膜科技專家齊聚一堂

TACT 2025 International Thin Films Conference（國際鍍膜與薄膜科技研討會）將於 2025 年 10 月 26 日至 29 日在台北市盛大舉行。這是由台灣鍍膜科技協會（TACT）主辦，每兩年一次的國際大型研討會。TACT 國際會議為亞洲地區最具指標性的鍍膜科技國際會議之一，該會議不僅為學術研究與實務應用提供交流平台，更促進國內外產學研合作與創新發展。

- ✚ TACT 2025 將涵蓋多元、前瞻的研究方向，結合薄膜技術與應用需求：
- ✚ 可持續能源塗層（Coatings for Sustainable Energy）
- ✚ 奈米結構與奈米複合塗層（Nanostructured and Nanocomposite Coatings）
- ✚ 半導體、光電與柔性元件薄膜（Semiconductor, Optoelectronic and Flexible Device Films）
- ✚ 摩擦與保護性塗層（Tribological and Protective Coatings）
- ✚ 有機與生物塗層（Organic and Biological Coatings）
- ✚ 中高熵功能性塗層（Medium/High Entropy Coatings for Functional Applications）
- ✚ 薄膜特性分析、模擬與資料科學（Advancing Coatings and Thin Films through Characterization, Simulation, Modeling, and Data Science）

本屆 TACT 2025 將持續延續國際化視野與高品質學術內容，預計將邀請來自全球多國的專家學者發表最新研究成果，並舉辦主題演講、技術論壇、產業展示與學生競賽等豐富活動，全面展現鍍膜與薄膜科技在多元產業中的潛力與影響力。

會議將由台灣鍍膜科技協會（TACT）主辦，與多所國內大學及研究機構攜手合作，不僅提升台灣在國際鍍膜科技領域的能見度，也為國內學界與產業界提供絕佳的國際交流機會。

敬請各界先進踴躍參與，一同見證鍍膜科技未來的發展趨勢與技術突破！

TACT2025

TAIPEI TAIWAN

TACT 2025 International
Thin Films Conference

<http://tact2025.conf.tw>



Symposium:

- A. Coatings for sustainable energy
- B. Nanostructured and nanocomposite coatings
- C. Semiconductor, optoelectronic and flexible device films
- D. Tribological and protective coatings
- E. Organic and biological coatings
- F. Medium/high entropy coatings for functional applications
- G. Advancing coatings and thin films through characterization, simulation, modeling, and data science

Special issues will be published in "Vacuum" and "Surface & Coatings Technology"



台灣鍍膜科技協會持續推動國際交流，組團參加 ICMCTF 2025 國際會議

第51屆國際冶金薄膜會議（ICMCTF 2025）於 2025年5月11日在 Town & Country Hotel and Convention Center 正式開幕，為期六天。本次會議由美國真空協會（AVS）旗下專業組織主辦，為全球表面處理與薄膜科技領域的重要年度盛事。

會議主題涵蓋四大領域、七大主軸，深入探討最新的研究成果與產業應用：

製程技術

- ◆ PP. Plasma and Vapor Deposition Processes（電漿與蒸鍍製程）

材料應用

- ◆ MA. Protective and High Temperature Coatings（防護與高溫塗層）
- ◆ MB. Functional Thin Films and Surfaces（功能性薄膜與表面）
- ◆ MC. Tribology and Mechanics of Coatings and Surfaces（塗層與表面的摩擦學與機械性質）
- ◆ MD. Surface Engineering of Biomaterials, Medical Devices, and Regenerative Materials（生物材料、醫療器材與再生材料的表面工程）

特性分析與計算

- ◆ CM. Advanced Characterization, Modelling and Data Science for Coatings and Thin Films（薄膜塗層之先進特性分析、建模與數據科學）

產業應用

- ◆ IA. Surface Engineering – Applied Research and Industrial Applications（表面工程之應用研究與產業應用）

本屆大會共吸引 458 位與會者，來自 32 個國家，遍佈五大洲，體現出 ICMCTF 作為國際薄膜科學與工程交流平台的高度影響力與全球化視野。

ICMCTF internation conference



圖 來自台灣地區的參加 ICMCTF2025 會議教授合影

為服務本會會員及國內產學研界有志於鍍膜科技發展之人士，台灣鍍膜科技協會依循往例，持續主辦「2025 ICMCTF 國際會議參訪團」，今年共計 68 位來自國內大學的教授、學生與業界專家共同參與。

作為全球鍍膜領域規模最大、影響最深遠的國際會議之一，冶金暨鍍膜國際研討 (ICMCTF) 長年以來皆吸引來自世界各地的專業人士共襄盛舉。會中涵蓋眾多前沿議題，包括鍍膜製程、功能性薄膜、材料性質分析、產業應用等最新技術發表，亦有許多業界研發人員分享最先進的成果與實務經驗。對參與的學者與學生而言，無疑是一場難得的學術饗宴與國際視野的拓展機會。

此外，為促進台灣學術界的交流與聯誼，本協會秘書長國立臺北科技大學陳柏均教授於會議期間，特別以協會名義召集來自台灣各大學的教授於會場附近餐廳舉辦聯誼聚餐。席間氣氛熱絡，與會者充分交流學術研究心得、教學經驗與學生指導經驗，也進一步強化師生與同儕間的聯繫與合作機會，展現了會議期間學術與人際交流並進的豐碩成果。

透過此次參訪與交流活動，不僅讓參與者掌握國際最先進的鍍膜技術發展動向，也為台灣薄膜科技與相關產業的推動注入更多能量與啟發。

廉價氧化物新星：氧化亞銅在先進太陽能與電子應用中的潛力

廉價氧化物新星：氧化亞銅 (Cu_2O) 在先進太陽能與電子應用中的潛力

Low-Cost Oxide Rising Star: The Potential of Cuprous Oxide (Cu_2O) in Advanced Solar and Electronic Applications

陳政營*

Cheng-Ying Chen*

國立臺灣海洋大學 光電與材料科技學系

Department of Optoelectronics and Materials Technology, National Taiwan Ocean University

*E-mail : chen.chengying.cyc@gmail.com; cychen0111@mail.ntou.edu.tw

摘要

氧化亞銅 (Cu_2O) 近年來成為太陽能與電子領域的焦點材料。它以價格低廉、來源豐富且環境友善著稱，具有約 2.0 eV 的直接能隙，能吸收可見光並作為自然 p 型半導體[1]。隨著製膜技術突破， Cu_2O 在多項先進應用中展現潛力：作為串聯太陽電池的高帶隙頂電池，可與矽電池組合達到超越單接面極限的效率；製作半透明太陽能模組，可兼顧建築採光與發電；擔任光電化學 (photoelectrochemical, PEC) 產氫反應的光陰極 (photocathode)，但需克服光蝕降解挑戰；以及應用於 p 型氧化物薄膜電晶體 (thin-film transistors, TFTs)，有望與 n 型氧化物實現互補電路整合。本文介紹 Cu_2O 的材料結構與特性，討論其在以上應用中的最新進展與優勢，並分析未來技術挑戰與展望。

關鍵字

氧化亞銅 (Cu_2O)；串聯太陽電池；半透明太陽能模組；光電化學產氫；p型氧化物TFT

Abstract

Cuprous oxide (Cu_2O) has emerged as a promising material in solar energy and electronics. This inexpensive and abundant p-type semiconductor features a direct bandgap of about 2.0

廉價氧化物新星：氧化亞銅在先進太陽能與電子應用中的潛力

eV, enabling strong visible light absorption[1]. Recent advances in thin-film deposition and device integration have unlocked Cu_2O 's potential in various cutting-edge applications. In tandem solar cells, Cu_2O can serve as a high-bandgap top cell stacked on silicon to exceed single-junction efficiency limits. Semi-transparent Cu_2O solar modules offer power generation while transmitting light, ideal for building-integrated photovoltaics and automotive glazing. As a photocathode for photoelectrochemical (PEC) water splitting, Cu_2O can drive hydrogen evolution, though stability against photocorrosion remains a key challenge. In electronics, Cu_2O thin films enable p-channel thin-film transistors (TFTs), paving the way for complementary oxide circuits in back-end integration. This article reviews Cu_2O 's material properties and highlights recent progress, advantages, and future challenges in these advanced solar and electronic applications.

Keywords: Cuprous oxide (Cu_2O); Tandem solar cell; Semitransparent solar module; Photoelectrochemical hydrogen; p-type oxide TFT

前言

氧化亞銅 (Cu_2O) 是一種古老卻新興的半導體材料。早在 1920 年代科學家即注意到 Cu_2O 的光電效應並研究其整流行為，為半導體理論奠定基礎[2]。 Cu_2O 晶體結構屬立方晶系的赤銅礦 (cuprite) 結構，具有直接能隙約 1.9–2.1 eV[1]。如此適中的能隙讓 Cu_2O 能有效吸收可見光大部分波長，同時保有理論上單接面約 20% 的最大光電轉換效率[3,4]。相較矽(Si) (1.1 eV)、GaAs (1.4 eV) 等主流半導體， Cu_2O 由豐富的銅和氧組成，價格低廉、無毒且製備相對簡便[5,6]。然而，以往 Cu_2O 研究進展有限，因其本質 p 型導電特性和高密度晶格缺陷導致載流子遷移率低、壽命短，光生電子電洞易於復合[7]。隨著近年材料沉積與缺陷控制技術的突破， Cu_2O 重新受到關注，被視為廉價氧化物新星，在多項先進太陽能與電子元件中展現潛力。本文將介紹 Cu_2O 的材料結構與基本特性，接著分別探討其在四個新興應用方向的研發進展：(1) 串聯太陽能電池的高帶隙頂電池；(2) 半透明太陽能模組在建築與車用上的應用；(3) 光電化學 (PEC) 水分解製氫的光陰極；(4) 作為 p 型氧化物薄膜電晶體以整合於後段製程。最後，我們將綜述 Cu_2O 未來在這些領域面臨的技術挑戰與發展前景。

材料結構與特性

Cu_2O 晶體屬於立方對稱的赤銅礦結構，每個晶胞含有兩個 Cu_2O 分子，Cu 原子和 O 原

廉價氧化物新星：氧化亞銅在先進太陽能與電子應用中的潛力

子分別形成兩套面心立方亞晶格（如圖 1 所示） [8]。其直接能隙約 2.0–2.1 eV，可隨製程略微改變（報導上限可達 2.2–2.5 eV） [9]。這一帶隙對應吸收光譜約截止於 600 nm 波長，使 Cu_2O 能吸收大部分可見光而將長波長紅外光透過。 Cu_2O 為本徵 p 型半導體，主要電荷載子為電洞。p 型導電來源於晶格中的銅空位缺陷 (V_{Cu})，此缺陷形成淺受主能級，能有效提供電洞 [1,9]。然而，過多的銅空位亦會作為電洞傳輸陷阱，降低載流子遷移率 [1]。實驗上， Cu_2O 薄膜場效遷移率常僅 $\sim 0.1\text{--}1\text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ ，導電類似本質半絕緣，顯示缺陷態密度高仍是挑戰 [9]。

在製備方面， Cu_2O 薄膜可經多種方法沉積，包括熱氧化銅膜 (thermal oxidation)、濺鍍 (sputtering)、化學浴沉積 (chemical bath deposition, CBD)、電鍍 (electrodeposition, ED)、噴塗熱解 (spray coating)、脈衝雷射沉積 (pulsed laser deposition, PLD)、化學氣相沉積 (chemical vapor deposition, CVD) 與原子層沉積 (atomic layer deposition, ALD) 等 [9]。其中 ALD 可精準控制厚度並覆蓋不規則表面，近期有研究以常壓空氣 ALD (atmospheric-pressure spatial atomic layer deposition, AP-SALD) 於 $<260^\circ\text{C}$ 製得 20–80 nm 超薄 Cu_2O ，電洞遷移率高達 $\sim 90\text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ [1]。這些高品質薄膜展現高透明度（約 90% 透過率，厚度 12 nm）和可調能隙（2.08–2.5 eV 隨沉積溫度） [1]。因此 Cu_2O 亦被視為透明氧化物材料之一。相較之下，傳統濕法電沉積可廉價製膜但結晶缺陷較多；磁控濺鍍配合退火可提升結晶，但需抑制 Cu 與 CuO 雜相生成以確保薄膜純度 [10,11]。

整體而言， Cu_2O 材料具有成本低、來源豐富、環境友好等優點，理論預測單接面光電轉換效率可達 20% [3,4]。然而其固有缺陷密度高導致載子復合嚴重，是限制性能的主因 [7]。近年的材料工程著力於降低缺陷和雜相，例如東芝 (Toshiba) 利用 X 光繞射監控 Cu_2O 薄膜中的 CuO 和金屬 Cu 雜質，以優化濺鍍條件製得純相 Cu_2O [10,11]。隨著薄膜品質提升與異質結構創新， Cu_2O 得以在多種新穎應用中嶄露頭角，下文將分別討論其應用進展。

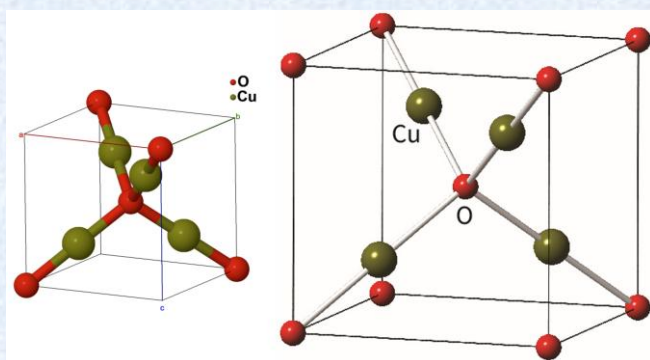


圖 1 Cu_2O 晶體屬於立方對稱的赤銅礦結構 [8]。

應用一：串聯太陽能電池頂層 ($\text{Cu}_2\text{O}/\text{Si}$ Tandem)

串聯太陽能電池透過堆疊兩個能隙互補的光電層，以分別吸收不同波段光譜，實現雙倍光子利用（如圖 2 所示）。對比單接面矽電池效率已逼近極限（實驗紀錄約 26–27%），

廉價氧化物新星：氧化亞銅在先進太陽能與電子應用中的潛力

串聯技術被視為突破 30% 效率的重要途徑[12, 13]。 Cu_2O 由於帶隙約 2 eV，透明於紅外光，非常適合作為矽(Si)電池 (1.1 eV) 之頂層電池：它吸收短波長高能光子，剩餘長波長光則穿透至下方矽電池轉換為電能[10]。早期串聯頂電池多以 GaAs 等 III-V 化合物製成，但 III-V 材料成本高昂（每單位面積成本為矽的數百至數千倍），限制了實際應用[11,12]。近年崛起的鈣鈦礦太陽電池能隙可調，也可用於串聯，但其長期穩定性和壽命難以達成矽電池 20 年以上的要求[12]。相較之下， Cu_2O 由豐富元素組成、成本低且化學穩定，被視為實現低成本高效率串聯電池的理想選項[10-15]。

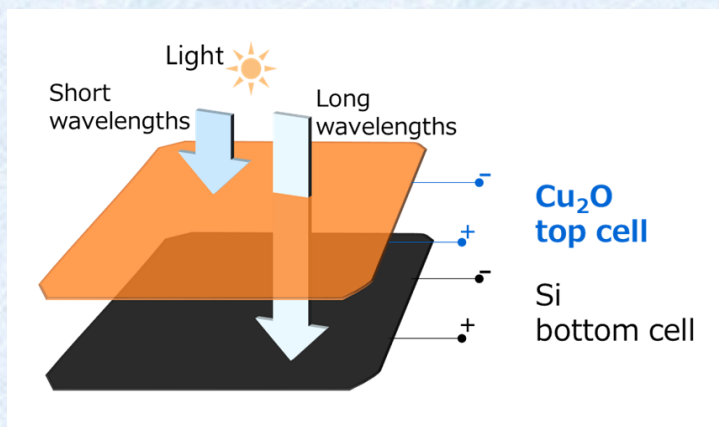


圖 2 $\text{Cu}_2\text{O}/\text{Si}$ 串聯太陽能電池結構示意圖[10]。

圖 2 $\text{Cu}_2\text{O}/\text{Si}$ 串聯太陽能電池結構示意圖[10]。上層為透明 Cu_2O 薄膜太陽電池，吸收~600 nm 以下波長光子並產生電動勢；下層為晶矽電池，負責轉換剩餘長波長光譜（600–1100 nm）。透過適當的電氣串接或光學疊層，此雙接面裝置可大幅提高單位面積發電效率。如圖 2 所示， Cu_2O 頂電池需使用透明電極（如 ITO 或 AZO）及適當的 n 型氧化物窗口層，以形成 p- $\text{Cu}_2\text{O}/\text{n}$ -氧化物的異質接面，再經由背電極與下層矽串接[10, 14]。由於 Cu_2O 目前難以 n 型摻雜，採異質結構搭配 n 型半導體是常見設計。此外，頂電池厚度與吸光程度需權衡：厚膜可吸收更多藍光提高電流，但過厚會降低對紅外的透射，不利於下層矽電池[16]。研究人員常透過優化 Cu_2O 厚度與折射率匹配來最大化串聯總輸出。

近年來，東芝公司領導了 $\text{Cu}_2\text{O}/\text{Si}$ 串聯電池的研發並取得多項突破。2021 年底，東芝宣佈透明 Cu_2O 薄膜太陽電池小面積元件效率達 8.4%，為當時世界最高，同時估算將該元件覆於 25% 效率矽電池上，可實現 27.4% 的串聯效率，超過傳統矽電池紀錄 26.7%[10-15]。2022 年，透過放大元件面積與抑制邊緣復合， Cu_2O 電池效率提升至 9.5%[14]。東芝指出，將此 9.5% Cu_2O 元件與 25% 矽電池組合，有望達到 28.5% 串聯效率[14]。2023 年底，東芝進一步將 Cu_2O 小電池效率推高至 10.5%，再次創下紀錄[12,13,15]。他們預估，結合效率 25.6% 的矽電池後， $\text{Cu}_2\text{O}/\text{Si}$ 雙接面總效率可達 30% 左右[15]。這一效率不僅大幅超越最佳單晶矽，也接近單接面 GaAs 電池的 29.1% 紀錄[17]。更重要的是， Cu_2O 材料成本遠低於 III-V 族，且穩定性優於鈣鈦礦，意味著該技術具有現實可行性[10-15]。

鍍膜技術分享I

廉價氧化物新星：氧化亞銅在先進太陽能與電子應用中的潛力

應用二：半透明太陽能模組（建築與車用）

除了提升效率，2 eV 能隙的 Cu_2O 的高透光特性也使其適用於半透明太陽能模組。 Cu_2O 僅吸收可見光中短波段（大致至橙光區），對紅光和近紅外則近乎透明[16]，即可製成可見光可穿透的發電玻璃。這樣的元件適合建築整合光伏（building integrated photovoltaics, BIPV）窗戶，既能當窗戶又可發電；在車用上，可應用於汽車天窗、擋風玻璃甚至車身表面，提供額外電力給電動車輔助系統或主電池充電，期望利用車體表面面積發電，延長行駛里程 [14,15]。

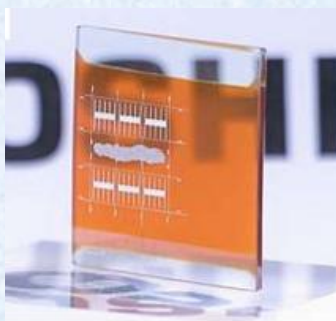


圖 2 東芝公司半透明 Cu_2O 太陽能電池[14]。

圖 2 半透明 Cu_2O 太陽能電池呈現淡橘色或淺茶色的玻璃外觀，可將部分陽光轉換為電能。此外， Cu_2O 薄膜因硬度高、耐候性佳，經封裝後可長期暴露於戶外而維持光學與電學性能（實驗顯示暴露一年效率無明顯衰減）[13,14]。這意味著 Cu_2O 半透明電池具備成為建築構件的可靠性。

應用三：PEC 光電化學產氫電極

利用太陽光直接分解水以產生氫氣是清潔能源領域的重要課題。其中，光電化學（photoelectrochemical, PEC）水分解裝置通常採用光陽極（photoanode）氧化水和光陰極（photoanode）還原水的雙電極架構（如圖 3 所示）[18]。

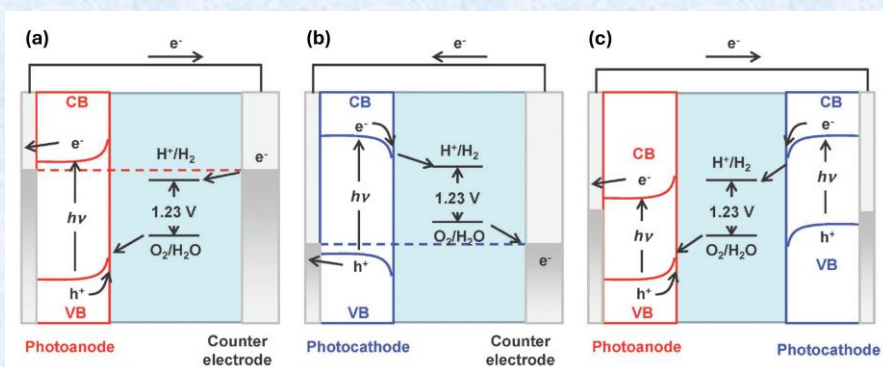


圖 3 光電化學（PEC）水分解之能帶示意圖，分別採用 (a) 光陽極、(b) 光陰極，以及 (c) 光陽極與光陰極的串聯組態。在 (c) 中將帶隙畫得較小，以強調可採用窄帶隙半導體 [18]。

鍍膜技術分享I

廉價氧化物新星：氧化亞銅在先進太陽能與電子應用中的潛力

Cu_2O 由於導帶位置滿足產氫反應要求且有良好可見光吸收，被廣泛研究作為光陰極來催化水還原反應 ($\text{H}^+ + \text{e}^- \rightarrow \frac{1}{2}\text{H}_2$) (如圖 4 所示) [19]。理論上， Cu_2O 的能帶結構令其在 AM1.5 太陽光下的光解水太陽制氫效率 (solar-to-hydrogen efficiency, STH) 可達 ~18% [20]。這使得 Cu_2O 成為極具吸引力的產氫光電極之一。

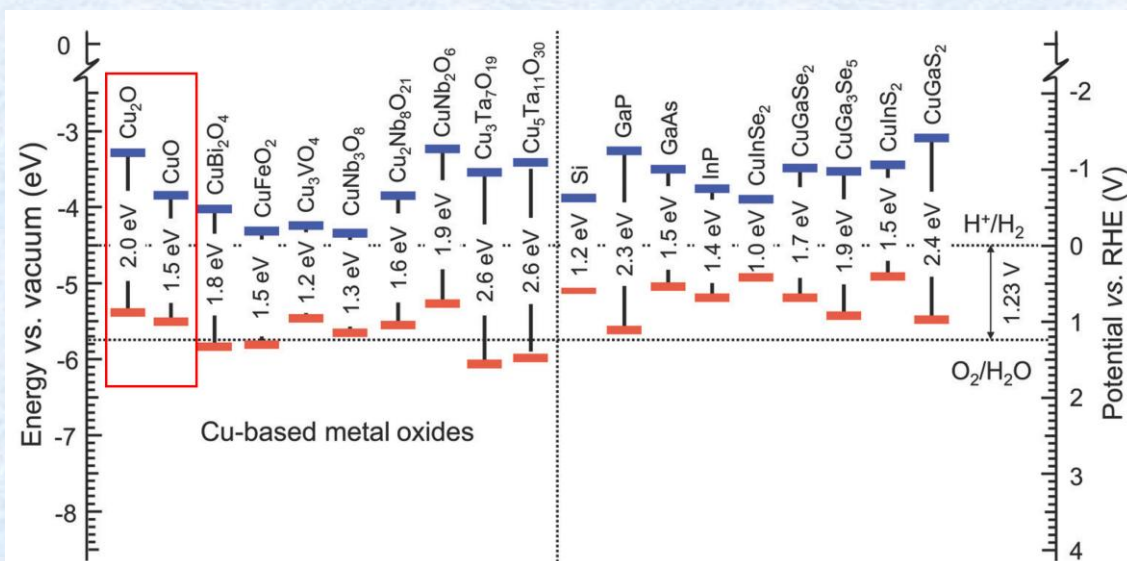


圖 4 多種銅基金屬氧化物與各類半導體的能帶示意圖。虛線表示水分解反應的氧化還原電位[19]。

然而， Cu_2O 在水溶液中工作的光穩定性不佳：在施加偏壓和光照下， Cu_2O 容易發生光腐蝕，既可能被氧化為 CuO ，也可能被還原為金屬 Cu [21]。其原因在於 Cu_2O 本身的氧化還原電位落在能帶帶隙內，照射時生成的少數載流子會促進 Cu^+ 的氧化/還原反應 [21,22]。因此，未經保護的 Cu_2O 光陰極往往在水中只能穩定工作數分鐘至數小時，極大限制了實用。

為了提升 Cu_2O 光陰極的穩定性與效率，各種策略被提出。其中最有效的是為 Cu_2O 表面加上保護層和催化層 [21]。常見做法是在 Cu_2O 上沉積一層薄的 n 型二氧化鈦 (TiO_2) 或其他寬帶隙氧化物作為保護層，再加一層析氫催化劑 (如鉑 (Pt)、 NiMo 合金等) [21]。 TiO_2 保護層具有化學惰性且能阻擋電解液直接接觸 Cu_2O ，同時其導帶位置適中，可讓光生電子順利穿隧至催化劑 [21]。研究顯示，經 Al:ZnO (AZO) 或 Ga_2O_3 等緩衝層修飾後，再覆蓋 TiO_2 保護的 Cu_2O 光陰極，光穩定性得到明顯改善 [21]。此外，異質接面的引入亦可提高光電壓，例如在 Cu_2O 與電極之間插入薄層 p 型或 n 型材料形成內建電場，能增加開路電位 [22]。透過上述工程手段， Cu_2O 光陰極的性能有長足進步：光電流密度從最初僅幾 mA/cm^2 提升到十幾 mA/cm^2 ，穩定工作時間也從秒級延長到數十小時以上 [21,22]。

鍍膜技術分享I

廉價氧化物新星：氧化亞銅在先進太陽能與電子應用中的潛力

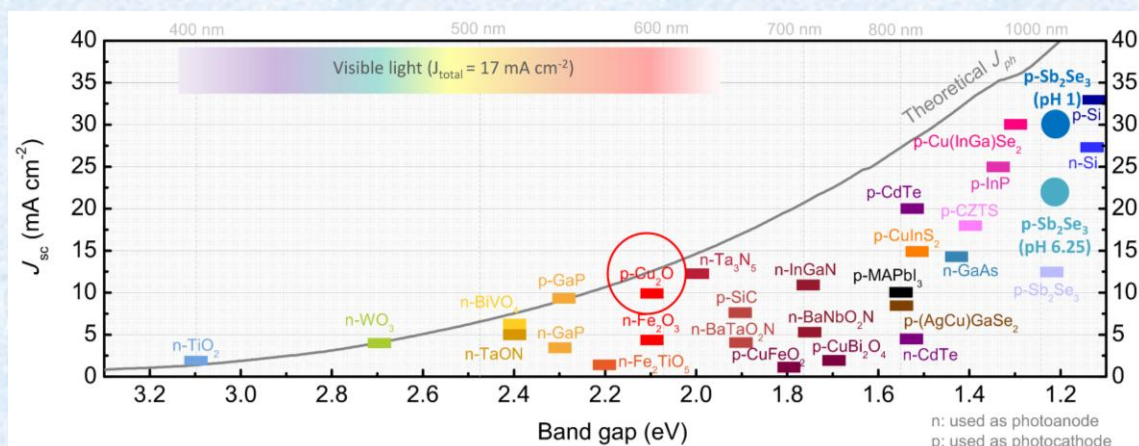


圖 5 在標準條件下進行光電化學（PEC）水分解時，光電極於短路條件下的已報導光電流密度：照度為 1.0 sun；光陽極在 1.23 V_{RHE} 的短路條件下量測，光陰極在 0 V_{RHE} 的短路條件下量測[23]。註：可逆氫電極（reversible hydrogen electrode, RHE）是電化學過程中使用的參考電極。

即便如此，Cu₂O 光電極距離實用仍有差距。當前紀錄的 Cu₂O 基光陰極在弱鹼溶液下實現了約 5–7 mA/cm² 的光電流（在 0 V_{RHE} 附近）並穩定運行超過 10 小時[20,21]。但相較理論約 15 mA/cm² 的飽和光電流仍有不少提升空間（如圖 5 所示）。未來，Cu₂O 光陰極若能和其他光陽極（如 BiVO₄、Fe₂O₃ 等圖 5 所示）組成全氧化物 PEC 元件（如圖 3 (c) 所示），有望打造低成本全光解水系統。總的來說，Cu₂O 在太陽能製氫領域具有理想的能帶與吸收特性，只要能克服穩定性挑戰，其潛在效率值得期待。再進一步，將 Cu₂O 與 Si 以「串聯 PEC」整合（無論是單體雙吸收體的光電極，或以 Cu₂O/Si 串聯光伏為 PEC 提供偏壓），可同時獲得光譜互補與光壓相加的優勢；只要藉由 ALD 保護層、選擇性接面與低過電位催化妥善抑制光腐蝕並降低復合，朝向無偏壓 ≥10% STH、連續運轉 100 h 以上的實用化目標是可期的。

應用四：p 型氧化物薄膜電晶體（BEOL 整合）

氧化物半導體因可低溫成膜且具透明特性，已廣泛應用於顯示面板中的薄膜電晶體（thin-film transistors, TFTs）。目前主流為 n 型氧化物（如 IGZO），而穩定的 p 型氧化物則相對缺乏。Cu₂O 作為天然 p 型的氧化物半導體，是實現 p 通道 TFT 的熱門候選，有望與 n 型氧化物組成全氧化物互補式金屬氧化物半導體（complementary metal-oxide-semiconductor, CMOS）電路[9,24-31]。特別是在晶圓後段製程（back end of line, BEOL）中，若能在低溫下沉積 p 型 TFT 於矽積體電路上方，將大幅提升 3D 電路整合度。Cu₂O 具備此可能性：一些研究已於低於 400°C 溫度下製作出 Cu₂O TFT 元件[1,26,27]。Cu₂O TFT 常見結構為底閘極（bottom-gate），即在絕緣基板（或 Si 基板/SiO₂ 絕緣層）上，先沉積閘極金屬與介電層，再沉積 Cu₂O 作為有源層，最後在其上圖形化源/汲極電極[9]。由於 Cu₂O 為 p 型，TFT 表現為閘負偏壓導通，呈現場效電洞傳輸特

廉價氧化物新星：氧化亞銅在先進太陽能與電子應用中的潛力

性[9]。

早期報導的 Cu_2O TFT 遷移率僅約 10^{-1} – $10^0 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ ，開關電流比 ($I_{\text{on}}/I_{\text{off}}$) 在 10^2 – 10^3 級，遠低於同等製程下 n 型 IGZO TFT [9]。其原因一方面是 Cu_2O 載流子有效質量較大、本徵載子濃度低，另一方面源於薄膜缺陷態高，導致關態漏電流和亞閾值特性不佳 [9]。為改善性能，研究者著手於提高薄膜結晶品質與缺陷鈍化。例如，Bae 等人採用電漿強化 ALD 成長 12 nm 超薄 Cu_2O 膜，經 800°C 快速退火結晶後，使 TFT 遷移率達 $0.86 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ ， $I_{\text{on}}/I_{\text{off}}$ 提高到 1.6×10^4 [9]。儘管 800°C 退火不適用於 BEOL，但顯示了改善晶粒與降低 Cu 空缺濃度對電晶體性能的裨益 [9]。另一方面，有研究透過介面工程降低接觸電阻，例如在 Cu_2O 與源/汲極之間引入薄層 NiO_x 作接觸修飾，或在背道（背溝道）進行硫化處理終止缺陷，均顯著降低漏電 [28]。此外，摻雜控制亦被嘗試：如輕度摻雜氮以降低 Cu_2O 中的本徵空洞濃度，改善關態電流。然而過多摻雜會轉變相組成，因此需精細控制 [28]。再者，以高親氧性的 Ga 摻雜於 Cu_2O 薄膜，在 $\text{CuO} \rightarrow \text{Cu}_2\text{O}$ 的還原過程中抑制氧空缺 (V_O) 的生成，使 (Ga 1.56 at%) 薄膜的 V_O 比例由 20.2% 降至 7.5%；對應的 TFT 指標亦同步改善：次臨界擺幅 (subthreshold swing) 由 12.50 降至 7.72 V/dec、 $I_{\text{on}}/I_{\text{off}}$ 由 2.74×10^2 提升至 1.22×10^4 、飽和遷移率由 0.46 增至 $0.74 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ ，閾值電壓由 -8.06 V 正向移至 -4.56 V ，顯著提升開關與關態表現 [30]。

隨著上述技術進展， Cu_2O TFT 性能正逐步逼近實用門檻。一些最新成果報導了在塑膠基板上製作柔性 p 型 Cu_2O TFT 陣列，搭配 n 型 IGZO 實現簡單的互補反相器電路，證明了 Cu_2O 作為透明電子元件的可行性 [29]。在矽大規模集成方面， Cu_2O TFT 有望直接製作於 CMOS 電路上層，形成單晶-薄膜混合 3D 電路。其低溫製程特性符合 BEOL 要求 ($<400^\circ\text{C}$)，且不含有毒元素，兼具透明度可用於感測等特殊用途。然而，目前 Cu_2O TFT 距離商用仍有差距，特別是遷移率和元件一致性尚須提高，同時驅動電壓偏高（數十伏）需要降低。未來，透過更先進的沉積技術（如室溫鹽溶液沉積結合 UV 退火）以及缺陷補償設計，p 型 Cu_2O TFT 有望獲得突破。若能成功，全氧化物薄膜電路將可實現，並應用於新一代顯示、感測與物聯網裝置中。

小結與展望

作為一種廉價氧化物半導體，氧化亞銅 (Cu_2O) 正展現出跨領域的技術潛力。在先進太陽能應用中， Cu_2O 的高能隙與透明性使其成為矽串聯電池的理想頂層，已逼近 30% 效率里程碑。在建築與車輛領域，半透明 Cu_2O 模組為光伏與環境美學結合提供了新思路，其耐久性也經初步驗證。於光電化學製氫方面， Cu_2O 良好的能帶位置帶來高理論效率，但穩定性瓶頸仍需透過保護層與異質結構創新來克服。在電子領域， Cu_2O 作為 p 型 TFT 材料補足了氧化物半導體「只能 n 型」的短板，為實現透明且可 3D 整合的電子電路鋪平道路。

展望未來， Cu_2O 技術要走向實用仍面臨諸多挑戰。首先，材料品質需進一步提升，例如在大面積沉積時如何保持薄膜均勻純淨，以實現高效率且穩定的元件。從近期研發成果可以看出， Cu_2O 正在一步步克服障礙。我們有理由相信，憑藉其獨特優勢， Cu_2O

廉價氧化物新星：氧化亞銅在先進太陽能與電子應用中的潛力

有望在未來的先進太陽能電池、智慧建築以及新型電子元件中扮演舉足輕重的角色，真正落實「廉價氧化物新星」的潛力，為能源永續與電子科技發展帶來新的契機。

參考文獻

- [1] Sekkat, A. et al., “Open-air Printing of Cu₂O Thin Films with High Hole Mobility for Semitransparent Solar Harvesters,” Commun. Mater., 2, 78 (2021)
- [2] Grondahl, L. O., “Unidirectional Current Carrying Device,” US1640335A (1927).
<https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/021694422/publication/US1640335A?q=pn%3DUS1640335A>
- [3] Meyer, B. K. et al., “Chapter Six—the Physics of Copper Oxide (Cu₂O),” Semicond. Semimetals, 88, 201–226 (2013)
- [4] Olsen, L. C., et al., “Experimental and Theoretical Studies of Cu₂O Solar Cells,” Sol. Cells, 7, 247–279 (1982)
- [5] 朱丽萍，覃超，“一种超薄 MgO 层修饰 Cu₂O 平面异质结太阳能电池，” CN109309136B (2018) <https://patents.google.com/patent/CN109309136B/zh>
- [6] Chen, S. , et al., “A Review of Cu₂O Solar Cell,” J. Renewable Sustainable Energy, 15, 062701 (2023)
- [7] Liu, Y. et al., “Solution-Processed High-Quality Cu₂O Thin Films as Hole Transport Layers for Cu₂O/Si Heterojunction Solar Cells,” Solar RRL, 3, 1800272 (2019)
- [8] Copper (i) Oxide – Cu₂O Crystal Structure <https://www.chemtube3d.com/ss-cu2o/>
- [9] Bae, H. et al., “Ultrathin transparent Copper(I) Oxide Films Grown by Plasma-enhanced Atomic Layer Deposition for Back-end-of-line p-Type Transistors,” Nano Ex., 2, 020023 (2021)
- [10] Toshiba’s Transparent Cu₂O Tandem Solar Top Cell Achieves 8.4% Efficiency -A boost to development of no-plug charging EVs and transition to renewable energy-
22 December, 2021 Toshiba Corporation
<https://www.global.toshiba/ww/technology/corporate/rdc/rd/topics/21/2112-02.html#:~:text=the%20typical%20PCE%20of%20stand,silicon%20solar%20cells%20was%2022>

廉價氧化物新星：氧化亞銅在先進太陽能與電子應用中的潛力

- [11] Shibasaki, S. et al., “Highly Transparent Cu₂O Absorbing Layer for Thin Film Solar Cells, Appl. Phys. Lett., 119, 242102 (2021)
- [12] Wada, A., “Toward Carbon Neutrality: Development of high-efficiency Cu₂O/Si tandem solar cell,” in The 70th Japan Society of Applied Physics Spring Meeting 2023 Highlighted Presentations Press Release, April 18, 2023 <https://www.jsap.or.jp/docs/pressrelease/JSAP-2023spring-chumoku-14-en.pdf>
- [13] Yoshio, S. et al., “Thermal Stability of Cuprous Oxide Top Cells for High-Efficiency Cu₂O/Si Tandem Solar Cells,” in 2024 IEEE 52nd Photovoltaic Specialist Conference (PVSC), Seattle, WA, USA, 2024, pp. 0149-0151, doi:10.1109/PVSC57443.2024.10749024
- [14] Toshiba Asia Pacific, Press Release: “Toshiba Boosts Transparent Cu₂O Tandem Solar Cell to a New High” (27 Sep 2022) <https://asia.toshiba.com/press-release/english/toshiba-boosts-transparent-cu2o-tandem-solar-cell-to-a-new-high/>
- [15] High Efficiency Cu₂O Tandem Solar Cell System that Contributes to Carbon Neutrality <https://www.global.toshiba/ww/sustainability/corporate/related-information/case/e03.html#:~:text=With%20this%20transparent%20Cu,Development%20Center%20and%20Toshiba%20Energy>
- [16] Yang, Y. et al., “Cu₂O/CuO Bilayered Composite as a High-Efficiency Photocathode for Photoelectrochemical Hydrogen Evolution Reaction,” Sci. Rep., 6, 35158 (2016)
- [17] Green, M. A. et al., “Solar cell efficiency tables (Version 64),” Prog Photovolt Res Appl., 32, 425-441(2024)
- [18] Hisatomi, T. et al., “Recent Advances in Semiconductors for Photocatalytic and Photoelectrochemical Water Splitting,” Chem. Soc. Rev., 43, 7520-7535 (2014)
- [19] Li, C. et al., “Earth-Abundant Cu-Based Metal Oxide Photocathodes for Photoelectrochemical Water Splitting,” Energy Environ. Sci., 13, 3269-3306 (2020)
- [20] Chen, S. et al., “Recent Progress and Perspectives on Sb₂ Bagal, I. V. et al., “Cu₂O as an Emerging Photocathode for Solar Water Splitting - A Status Review,” Int. J. Hydrogen Energ., 44, 21351-21378 (2019)
- [21] Jang, Y. J. et al., “Photoelectrochemical Water Splitting with p-Type Metal Oxide Semiconductor Photocathode,” ChemSusChem., 12, 1835-1845, (2019)

- [22] Lu, H. et al., “Advances in Cu₂O-based Photocathodes for Photoelectrochemical Water Splitting,” *Acta Phys. -Chim. Sin.*, 40, 2304035 (2024)
- [23] Se₃-based Photocathodes for Solar Hydrogen Production via Photoelectrochemical Water Splitting, *J. Energy Chem.* 67, 508-523 (2022)
- [24] Lee, J. H. et al., “Cu₂O p-type Thin-Film Transistors with Enhanced Switching Characteristics for CMOS Logic Circuit by Controlling Deposition Condition and Annealing in the N₂ Atmosphere,” *ACS Appl. Electron. Mater.*, 5, 1123-1130 (2023)
- [25] Han, S., "Cu₂O Thin Films for P-type Metal Oxide Thin Film Transistors," Ph.D. dissertation, University of Cambridge (2018)
- [26] Kuo, C.Y. et al., “Development of High on/off Current Ratio in p-type Copper Oxide Thin-film Transistors with a Back-end-of-line Compatible Process, *J. Vac. Sci. Technol. A*, 42, 053412 (2024)
- [27] Fortunato, E. et al., “Thin-film Transistors Based on p-type Cu₂O Thin Films Produced at Room Temperature,” *Appl. Phys. Lett.*, 96, 192102 (2010)
- [28] Chang, H. et al., “Back-Channel Defect Termination by Sulfur for p-Channel Cu₂O Thin-Film Transistors,” *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 12, 51581–51588 (2020)
- [29] Jo, J., "Investigation of p-type Oxide Semiconductor Thin Film Transistors for Complementary Metal Oxide Semiconductor Technologies," Ph.D. dissertation, University of Michigan (2023)
- [30] Bae, J. H. et al., “Gallium Doping Effects for Improving Switching Performance of p-Type Copper(I) Oxide Thin-Film Transistors,” *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 12, 38350-38356 (2020)
- [31] Meyer, B. K. et al., “Binary Copper Oxide Semiconductors: From Materials towards Devices,” *Phys. Status Solidi B*, 249, 1487-1509 (2012)

鈷基赫斯勒磊晶薄膜製備與應用

國立台灣師範大學 物理系

*E-mail : yichengchen@ntnu.edu.tw

鈷基赫斯勒(Heusler)化合物 Co_2MnGa 磊晶薄膜因其半金屬、高自旋極化率與拓撲電子結構使其具有優異的物理性質，如半金屬性、巨大異常霍爾效應(AHE)與異常能斯特效應(ANE)，此類化合物特性高度依賴於其化學有序性，採用共濺鍍技術能精確控制成分，達成高度有序的 L2_1 結構，是實現其優異性能的重要因素，本文探討了薄膜厚度對其拓撲傳輸特性的影響，以及在可撓性元件的應用可能，說明鈷基赫斯勒(Heusler)化合物其在高效自旋電子學與可撓式電子裝置方面的巨大潛力。

赫斯勒化合物(Heusler compound)最早於 1906 年由 Fritz Heusler 爵士發現，他發現在 Cu_2MnAl 化合物中，雖然不含任何傳統意義上的鐵磁性元素，材料卻表現出鐵磁的性質，數年後，他的兒子透過 X 光繞射實驗解析了赫斯勒結構的獨特性，進而解釋了此特殊物理現象，傳統上，Heusler 結構由四個相互穿插的面心立方晶格所組成，形成所謂的 L2_1 結構，其通式為 X_2YZ (如圖 1 所示)，其中 X 與 Y 通常為 3d 過渡金屬元素，Z 則多為 IIIA 至 VA 族的元素，此類獨特的原子排列方式所引發的自旋與軌道交互作用，給予赫斯勒化合物多樣的物理性質，例如半金屬、拓撲絕緣體、熱電和超導等性質。

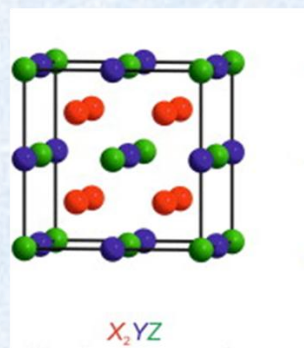
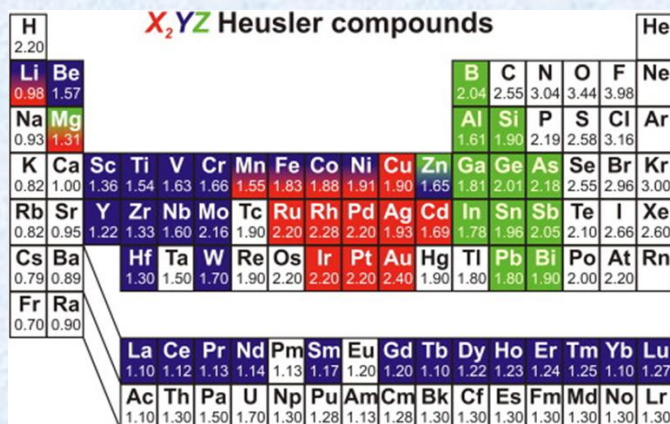


圖 1 可透過元素週期表上不同配色組合出不同的赫斯勒化合物^[1]

鍍膜技術分享II

鈷基赫斯勒磊晶薄膜製備與應用

赫斯勒化合物的物理性質與其成分與晶體結構具有相當的關連性，其中化學有序性在半金屬性赫斯勒化合物中是個重要的因素，理論上，赫斯勒化合物的半金屬性可藉由密度泛函理論 (Density Functional Theory, DFT) 進行預測，然而在實驗中，實現完美有序的結構 (如 $L2_1$ 或 $C1_b$) 具有挑戰性，因此，增進化學有序性對於提升半金屬赫斯勒化合物特性亦是個有效的策略，I. Galanakis 等人的理論計算指出^[2]，當 Co_2MnGa 與 Co_2MnAl 系統中產生無序 (disorder) 現象時，半金屬性將不再存在，無序化不僅會破壞半金屬性，也會影響晶格中自旋的排列，Y. Otani 等人實驗證實^[3]，具備 $L2_1$ 有序結構的 Co_2MnGa 薄膜，其飽和磁矩與異常霍爾電阻率皆高於具有 $B2$ 有序結構或非晶相 (amorphous) 之 Co_2MnGa 薄膜，這些研究顯示，赫斯勒化合物的物理性質與其化學有序性密切相關，除了提升化學有序性之外，引入外部摻雜元素也是改善赫斯勒化合物功能性的另一可行方式，在 Co_2MnGa/Al 系統中，I. Galanakis 等人針對不同摻雜元素進行了詳細的電子態密度 (Density of States, DOS) 計算^[2]。在不同摻雜濃度下， Co_2MnGa/Al 雖仍保有優異的半金屬性，但費米能階的位置可被調控，摻雜 Cr 可擴展少數自旋能隙 (minority gap) 的寬度，使費米能階更接近能隙中心，從實驗角度來看，當費米能階更靠近少數自旋能帶的中心時，半金屬性會更加穩定，此外，摻雜元素亦能降低赫斯勒化合物的生成焓，使其在熱力學上更穩定，進一步保留其半金屬特性。

製備樣品傳統上，會使用電弧熔煉、感應熔煉、連續鑄造或 Czochralski 法等方式，以獲得具有長程有序結構的單晶材料，在過去二十年間，基於 Co 、 Mn 、 Ni 以及 Cu 的赫斯勒化合物被廣泛研究於多個領域，包括自旋電子學、拓撲絕緣體、Weyl 半金屬、熱電效應、鐵磁形狀記憶合金等，然而，傳統單晶形式的赫斯勒化合物在自旋電子裝置中的實際應用仍面臨挑戰，因此，如何將赫斯勒化合物有效整合於薄膜元件，成為一項重要的研究方向，赫斯勒化合物的物理性質與其化學組成與原子排列密切相關，對成分比例的敏感性極高，若以單靶材 (X_2YZ) 進行薄膜沉積，因不同元素的濺鍍速率差異，容易導致成分偏離設計比例，進而影響薄膜的結構與物性，為克服此問題，採用共濺鍍 (co-sputtering) 技術進行沉積已成為主流方法，此方法採用共聚焦 (confocal) 式濺鍍架構，配置三個獨立的金屬靶材 (X , Y 和 Z)，並可獨立調整各靶材的輸出功率，以精確控制薄膜的組成比例與厚度，進一步提升其成分穩定性與重現性，此外，為促進薄膜中的化學有序性，在完成沉積後，樣品會維持在成長溫度下退火一段時間，以提高原子有序排列程度，進而改善其磁性與電子性質。

鈷基赫斯勒化合物作為一種具備半金屬性質的鐵磁材料 (half-metallic ferromagnet, HMF)，在自旋電子裝置領域具有高度吸引力，在 1983 年，Kubler 等人^[4]首次在 $L2_1$ 結構的鈷基赫斯勒化合物中發現半金屬性，其理論計算指出，在 Co_2MnAl 與 Co_2MnSn 中，自旋向上能帶 (spin-up band) 的電子態密度 (density of states, DOS) 在費米能階附近持續存在，而自旋向下能帶 (spin-down band) 的 DOS 則在費米能附近完全消失，導致其展現出獨特的電傳輸性質。基於此理論預測，後續已有大量鈷基赫斯勒化合物在實驗中被驗證具備類似的半金屬性質，該材料被預測具有高自旋極化率 (high spin polarization)、高居里溫度 (Curie temperature, 大於 700 K)，且其晶格常數與常見 III-

鍍膜技術分享II

鈷基赫斯勒磊晶薄膜製備與應用

V 族半導體高度匹配，被視為極具潛力的磁性電極材料，可應於巨磁阻 (GMR) 裝置、磁穿隧界面 (MTJs)，以及作為實現自旋注入至半導體的鐵磁電極材料。以 Co_2MnGa 為例，為典型 $L2_1$ 赫斯勒結構，晶系屬於立方對稱 $Fm\bar{3}m$ (空間群編號 225)， Co_2MnGa 具有四個相互穿插的面心立方 (fcc) 次晶格，分別對應於兩個 Co 原子、Mn 原子與 Ga 原子，組成 X_2YZ 結構，其中，Co 原子佔據 Wyckoff 位置 8c ($1/4, 1/4, 1/4$)，Mn 與 Ga 原子分別位於 4a ($0, 0, 0$) 與 4b ($1/2, 1/2, 1/2$) 位置，然而近年來，具有拓撲電子結構的鈷基赫斯勒化合物因其巨大的異常霍爾效應 (AHE) 而被深入研究，此效應被認為源自於動量空間中由 Weyl 點或 nodal lines 所貢獻的固有貝里曲率 (Berry curvature)，為探討如何將 Co_2MnGa 這類理論上優異的拓撲材料轉化為可應用的薄膜元件，Markou et al 系統性地製備了一系列高品質的磊晶 Co_2MnGa 薄膜^[5]，並深入探討了厚度對其結構、磁性及磁電輸運性質的影響，研究發現，不同厚度薄膜均具有高度有序的 $L2_1$ 結構(圖 2a-b)與優異的鐵磁性，其中較薄的薄膜呈現輕微的正方晶格扭曲 (tetragonal distortion)，而厚膜則趨近於理想立方晶相，在磁電傳輸方面，厚度為 80 nm 的薄膜展現出高達 1138 S/cm 的異常霍爾導電率 (anomalous Hall conductivity, AHC) (圖 2c)與 13% 的巨大異常霍爾角 (anomalous Hall angle, AHA) (圖 2d)，此結果與第一性原理計算高度吻合，證實其 AHE 主要源於材料本身的固有機制 (intrinsic mechanism) 然而，隨著薄膜厚度減小，側跳散射 (side-jump scattering) 等外在機制的影響則逐漸顯著，該研究證實 Co_2MnGa 薄膜在厚度調控下仍可保有其拓撲電子結構所驅動之傳輸特性，為實現包含 nodal line 與 Weyl 點等固有拓撲特性之薄膜元件設計提供了重要的潛在應用方向。

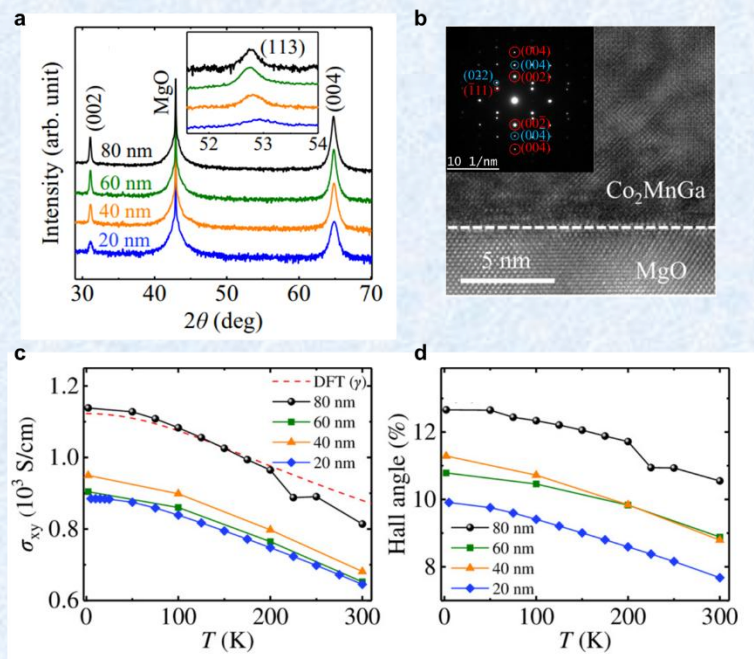


圖 2 a. 不同厚度 (20–80 nm) Co_2MnGa 薄膜的 XRD 繞射結果，內圖為 (113) 非對稱繞射峰，說明其有序性 b. Co_2MnGa 薄膜之橫截面高解析掃描穿透式電子顯微鏡 (HRSTEM) 影像，插圖:選區電子繞射圖 (SAED) 其中藍色空心圓(Co_2MnGa 繞射點)

鈷基赫斯勒磊晶薄膜製備與應用

與紅色空心圓(MgO 繞射點) (c) 不同厚度 Co_2MnGa 薄膜的溫度依賴性霍爾導電率(紅色虛線為第一性原理計算中採用恆定能帶展寬參數 γ 的模擬結果) d. 不同厚度 Co_2MnGa 薄膜的在變溫下的異常霍爾角。[5]

除了拓撲電子結構及異常霍爾效應的研究外， Co_2MnGa 亦展現出顯著的異常能斯特特效應 (Anomalous Nernst Effect, ANE)，Reichlova et al 利用晶片內建熱測量技術 (on-chip thermometry) 精確量化溫度梯度，圖 3a 中可看到霍爾棒 (Hall bar) 結構透過光學微影技術定義；影像中明亮區對應於 Co_2MnGa 材料，暗區則為經蝕刻去除 Co_2MnGa 後裸露的基板，將樣品平面內施加溫度梯度 ∇T ，並於垂直於樣品平面施加磁場，異常能斯特電壓 (V_{ANE}) 於一對橫向電極間量測如圖 3b，進而直接測得 Co_2MnGa 薄膜的 ANE 係數(圖 3c-e)，並與參考材料 CoFeB 薄膜進行比較(圖 3f)，結果顯示，厚度為 50 nm 的 Co_2MnGa 薄膜在室溫 (300 K) 下展現出高達 $2 \mu\text{V/K}$ 的 ANE 值，遠高於傳統 3d 過渡金屬薄膜(通常低於 $1 \mu\text{V/K}$ 的數量級)，然而，當厚度降至 10 nm 時，即便體積磁化強度相近，其 ANE 仍顯著下降，此結果顯示 Co_2MnGa 中的 ANE 具有複雜的微觀因素，可能同時包含偏向散射 (skew scattering)、側跳機制與固有 Berry 曲率等貢獻，研究結果證實，即便 Co_2MnGa 薄膜的飽和磁化強度僅約 700 kA/m，仍可實現較高的 ANE 值($2 \mu\text{V/K}$)，顯示出其在高效自旋熱電裝置 (spin-caloritronic devices) 中的潛力，此外，結果顯示 ANE 並不簡單與飽和磁化強度成正比，且其厚度依賴性與結構變化、磁性差異及內外在機制間的交互作用密切相關，在自旋熱電領域具有應用的潛力。

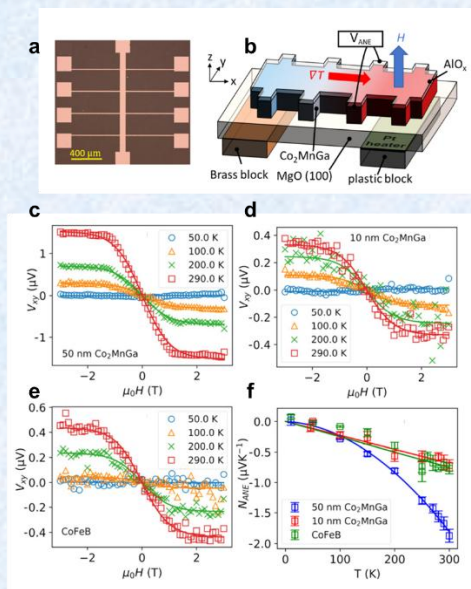


圖 3 a. 元件的顯微鏡影像 b. 實驗裝置的示意圖 (非實際比例繪製) V_{ANE} 對應外加垂直磁場的關係曲線: c. 50 nm 厚 Co_2MnGa 薄膜、d. 10 nm 厚 Co_2MnGa 薄膜，以及 e. 參考樣品 CoFeB [6]

鍍膜技術分享II

鈷基赫斯勒磊晶薄膜製備與應用

近年來，為滿足物聯網 (IoT) 與可撓式穿戴裝置的需求，將這類高效能材料從剛性基板整合至可撓性平台，是熱門研究的議題， Co_2MnGa 作為一種性能優異的具有熱電特性的半金屬鐵磁體，其特性與本身的有序性和結晶性有關，其結晶所需溫度比市面上大多數的可撓高分子基板耐受的溫度還要高而超薄玻璃則為非晶質結構，為成功克服結晶性與耐溫性，可利用具可撓性的白雲母基板(muscovite)成長 Co_2MnGa 可撓性薄膜 [7]，研究指出 Co_2MnGa 可以成功地磊晶生長於白雲母基板上(圖 4a)，且具有與高品質單晶塊材相當的飽和磁矩 (約 $3.93 \mu\text{B}/\text{f.u.}$) (圖 4b)及巨大的異常霍爾導電率 ($680 \Omega^{-1} \text{cm}^{-1}$) (圖 4c)，由於赫斯勒化合物的磁性來源複雜，利用同步輻射光源技術，解析出各元素的磁矩貢獻(圖 4d-e)，經由總和法則，可以得知在微觀元素解析下，磁矩大約為 $4.05 \mu\text{B}/\text{f.u.}$ 接近巨觀量測的數據，說明薄膜成長在雲母基板可以保有塊材的特性，在可撓測試中，優異的磁電特性在反覆的機械彎曲測試下仍能穩定保持(圖 4f)，雲母基板為赫斯勒化合物的薄膜異質結構開發提供了全新的柔性平台。

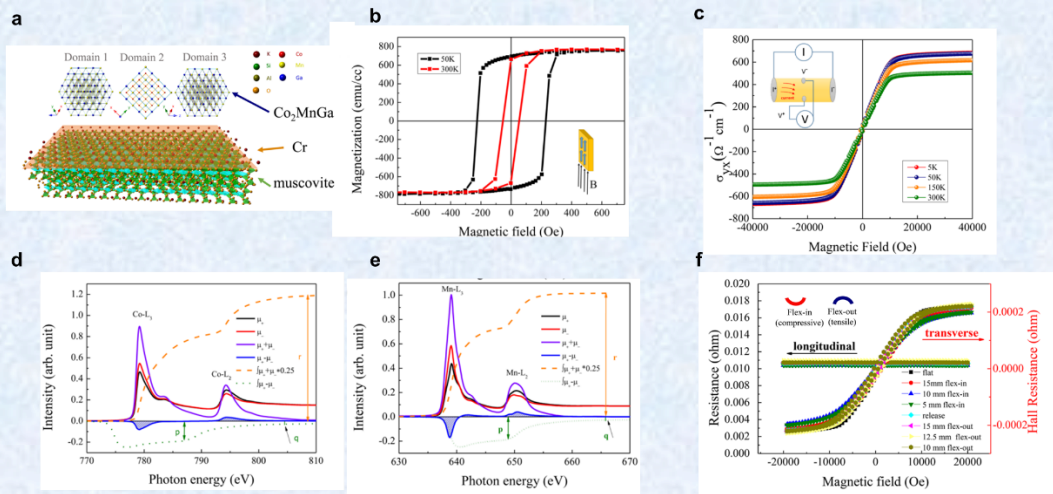


圖 4 可撓 Co_2MnGa 異質磊晶結構 a. 可撓 Co_2MnGa /雲母示意圖 b. 不同溫度下磁化量測 c. 不同溫度下的霍爾導電率 d. Co 的 XAS-XMCD 吸收光譜 e. Mn 的 XAS-XMCD 吸收光譜 f. 平坦狀態以及在不同彎曲半徑下(包括向內彎曲\與向外彎曲模式)所進行之磁阻與霍爾效應量測結果 [7]

結論

鈷基赫斯勒化合物因其獨特的半金屬性質、高自旋極化率與拓撲電子結構展現出高異常霍爾導電率與顯著的異常能斯特效應，超越傳統 3d 過渡金屬薄膜的性能限制，展現出在次世代自旋電子與熱電轉換元件中的應用潛力，然而，赫斯勒化合物的物理性質和其化學有序性與結晶品質有高度相依性，透過共濺鍍搭配熱處理的薄膜製程控制，可有效提升 Co_2MnGa 薄膜之成分準確性與原子有序性，薄膜不僅具備由固有貝里曲率(Berry curvature)主導的巨大異常霍爾效應(AHE)與異常能斯特效應(ANE)，且這些特性雖受厚度調控，仍能保持其拓撲本質，進一步最佳化其磁性與電子傳輸特性，為未來拓

鈷基赫斯勒磊晶薄膜製備與應用

撲材料與自旋熱電效應結合於異質整合元件中提供實驗基礎，另外，藉由引入可撓性白雲母基板，成功將高品質 Co_2MnGa 薄膜磊晶成長於柔性平台，保有高飽和磁矩與異常霍爾效應，並在反覆彎曲下維持穩定的磁電特性，展示了赫斯勒化合物應用於可撓式自旋電子與熱電裝置的潛力。

參考文獻

- [1] T. Graf, C. Felser, S. S. Parkin, Progress in solid state chemistry 2011, 39, 1.
- [2] K. Özdoğan, E. Şaşıoğlu, B. Aktaş, I. Galanakis, Physical Review B—Condensed Matter and Materials Physics 2006, 74, 172412.
- [3] Z. Zhu, T. Higo, S. Nakatsuji, Y. Otani, AIP Advances 2020, 10.
- [4] J. Kübler, A. William, C. Sommers, Physical Review B 1983, 28, 1745.
- [5] A. Markou, D. Kriegner, J. Gayles, L. Zhang, Y.-C. Chen, B. Ernst, Y.-H. Lai, W. Schnelle, Y.-H. Chu, Y. Sun, Physical Review B 2019, 100, 054422.
- [6] H. Reichlova, R. Schlitz, S. Beckert, P. Swekis, A. Markou, Y.-C. Chen, D. Kriegner, S. Fabretti, G. Hyeon Park, A. Niemann, Applied Physics Letters 2018, 113.
- [7] Y.-C. Chen, M. Yen, Y.-H. Lai, A. Markou, L. Zhang, Y.-Y. Chin, H.-J. Lin, C.-T. Chen, C. Felser, Y.-H. Chu, ACS Applied Materials & Interfaces 2019, 11, 35162.

作者：陳彥友(國立屏東科技大學材料工程系助理教授)

冶金鍍膜及薄膜國際會議(International Conference on Metallurgical Coatings and Thin Films, ICMCTF)是由美國加州大學洛杉磯分校(University of California, Los Angeles, UCLA)的Bunsha教授於一九七四年發起，迄今已發展成有最多曾有超過七百篇論文發表，及超過一千個出席者規模的國際會議，為國際上鍍膜及薄膜領域最重要的會議之一，本會議為美國真空學會(American Vacuum Society, AVS)的先進表面工程組(Advanced Surface Engineering Division, ASSED)所主辦，為每年舉辦一次國際鍍膜及薄膜專業領域盛會。

第51屆冶金塗層與薄膜國際會議（ICMCTF 2025）於2024年5月11日至16日在美國加州聖地牙哥Town & Country Resort舉行。ICMCTF是薄膜、鍍膜、與先進表面工程領域的頂級國際會議，旨在促進科學家、技術人員和製造商之間的全球思想和資訊交流。ICMCTF 2025會議強調與永續發展相關的材料、製程和應用等目標。此次大會邀請了超過90位知名演講嘉賓，會議包含10大主題，共吸引近四百篇專業論文發表。參與的專家學者分別來自約二十餘個國家，其中台灣投稿超過八十餘篇的學術論文為僅次於主辦國美國為排名第二的國家，台灣約有八十餘位專家學者參與此研討會。

筆者於台灣時間5/10晚間搭乘華航 CI24班機於桃園機場出發，於美國時間 5/10晚上到達美國洛杉磯安大略機場，並隨即與台灣共同前往學者驅車前往聖地牙哥 ICMCTF會場旁旅館進行住宿，5/11下午於大會舉辦地點Town & Country resort報到註冊。筆者的口頭論文報告時間為5/12星期一下午2:00~2:20，會議分項主題為TS1-2-MoA Coatings for Batteries and Hydrogen Applications II，經過5日的參與研討會，筆者於美國時間5/16日凌晨12點10分搭乘華航CI23航班返回台灣，而於5/17日抵達台灣。

會議主題中，與筆者研究領域最相關的為TS1 MoA Coatings for Batteries and Hydrogen Applications，為筆者發表論文的會議分項主題，亦是筆者主要參與聆聽論文發表的主要項目。會議開場的Plenary Lecture由來自於美國Princeton University的Kelsey Hatzell教授發表，主題為Past, Present and Future of All Solid State Batteries-Challenges and Opportunities。演說中介紹鋰電池的發展歷程與最先進的研究課題，演講中提出許多新穎的概念與方法，讓與會學者獲益良多。由於與筆者研究主題相近，於報告後與Kelsey Hatzell教授針對全固態氧化物型電解質交換意見，對於LLZO材料低溫燒結進行探討收穫頗豐。

本次會議台灣發表論文數量稍減，正如資深學術界前輩對我們的銘言：國際專業領域台灣不能沒有聲音，吾輩當努力參與並為台灣發聲。因此，敝人在此極力推薦鍍膜相關專長的專家與學者，未來能有機會共襄盛舉參與此鍍膜國際盛會。



圖一、筆者與台灣學者交流剪影
(左一筆者、左二台科大朱謹教授、右一
二明志科大李志偉、劉定宇教授)

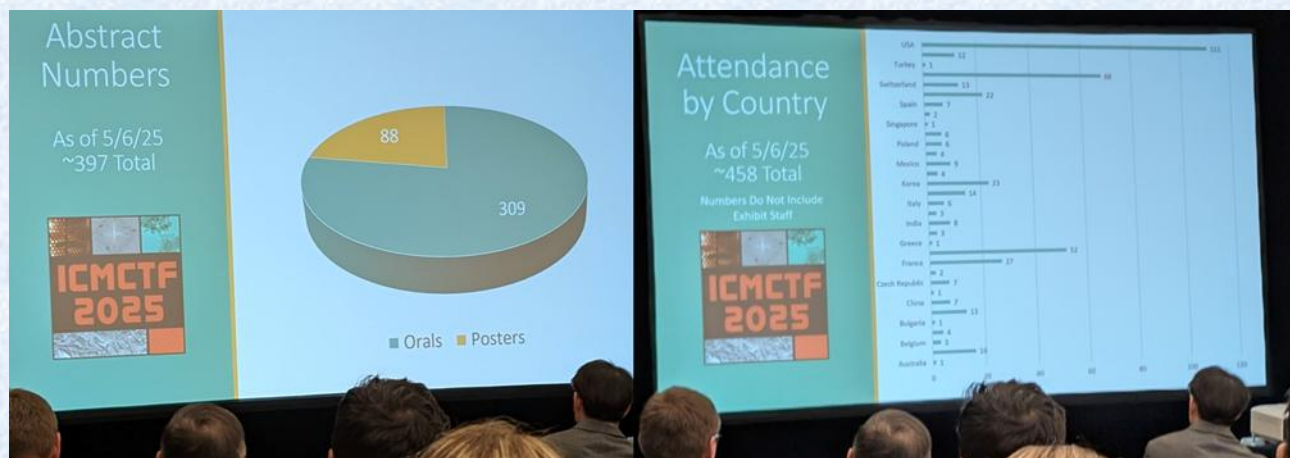


圖二、與會台灣學者共同合影留念

作者：藍貫哲(國立清華大學核子工程與科學研究所助理教授)

後學致力表面改質技術應用於核子工程之相關研究，獲得113年國科會計畫補助，參加了冶金鍍膜與薄膜國際會議 (International Conference on Metallurgical Coatings and Thin Films, ICMCTF)。此會議為美國真空學會(American Vacuum Society, AVS)的先進表面工程組(Advanced Surface Engineering Division, ASSED)所主辦，為表面鍍膜技術與材料技術領域，占據重要地位的頂級年度國際學術會議，對於台灣的表面材料技術更是意義重大。藉由台灣鍍膜科技協會諸位先進積極參與以及國科會大力支持累計超過20年的努力，目前台灣成員在ICMCTF會議組織中已佔有一席之地。今年ICMCTF已邁入第五十一屆，於2025年5月11日至16日在美國加州聖地牙哥Town & Country Resort舉行。下文向各位鍍膜學會舊雨新知分享後學參加今年會議內容與心得。

今年ICMCTF 2025會議論文發表總數為397篇，其中有88篇為海報發表，309篇為口頭發表，且來自台灣之發表論文總數近七分之一，可見台灣在鍍膜與表面工程技術的積極投入與重要性。參與會議總人數為458人，其中來自台灣的與會師生總數達八十餘人，約佔總人數超過15%，僅次於地主國美國的111人，為ICMCTF 2025二十多國與會人數的第二大國。細讀最新版電子議程，發現撤稿論文比例顯著高於去年的特殊狀況，使得論文發表以及與會人數減少近30%，據了解今年大量撤稿原因，或許與再次就任的Trump總統於年初各種行政舉措有關，一方面美國對於世界各國大幅增加關稅，使許多國際學者以不參與在美國境內舉辦之任何活動表達抗議。另一方面美國對於入境簽證審查更加嚴格，使得部分學者或是廠商難以在會議順利前取得美國入境簽證。



圖一、左圖今年會議投稿論文摘要統計。右圖為參與會議人數統計。

本年度會議主題為永續發展。邀請專題演講除了ICMCTF會議每年主軸的表面鍍膜技術之外，今年有高比例的論文報告發展薄膜材料的即時分析技術，希望突破瓶頸，掌握材料製程最佳化參變數與進而提升鍍膜材料性能。今年會議主席由瑞典 Linköping University 的 Johanna Rosen 教授擔任，議程主席由英國 Manchester Metropolitan University 的 Peter Kelly 教授擔任。開場大會特邀專題演講 Plenary Lecture 由美國 Princeton University 的 Kelsey Hatzell 教授報告關於固態燃料電池材料的開發，以及如何利用穿透式的分析技術，包含穿透式電子顯微鏡與同步輻射，來達成電池材料在實際工作環境中的材料微結構分析。幾乎每兩頁投影片就是一位專職的博士後研究員或是博士生的研究成果，除了見識材料即時分析技術的最先發展也讚嘆美國科研大國重型研舊設備的充沛資源挹注。另外幾個印象深刻的主題有由美國 Oerlikon Metco 公司 Kevin Kaufmann 博士介紹該公司的材料微結構分析中的 EBSD 技術，針對高達六種相近似的複雜晶體結構，可以搭配機器深度學習法，提升複雜晶體分析結果的合理性。鍍膜的應用領域的諸多論文議題探討包含刀具表面強化，磨潤性能改善，親疏水性，熱阻障，殘餘應力分析與控制。

大會第三天晚上Bunshah Award頒發加拿大蒙特婁工程學院的Ludvik Martinu教授，表揚畢身致力於薄膜材料的光學應用。當晚演講後晚宴，後學與諸多相關領域先進，交流鍍膜製程技術，分享教學生涯心得，獲益良多。圖二為後學與多位ICMCTF知名先進，以及台灣老中青學者合影。在今年會中所獲得新研究構想，將在此領域持續深耕，探討鍍膜技術在輻射環境下如何提升材料性能的相關議題，期望能不辱先進為台灣建立的這個領域的優異成績。



圖二、與諸多ICMCTF知名先進，以及台灣老中青學者合影，由左到右分別為Aharon Inspektor, Ivan Petrov, Michael Stüber, Lars Hultman, Jochen M. Schneider, 黃嘉宏教授，清大工科系碩士生楊定軒同學，後學，清大工科系博士候選人丁奕盛同學。

今年後學在歐陽汎怡教授的推薦下，將擔任ICMCTF 2026-2028年的材料研討會Protective and High-temperature Coatings MA3: Hard and Nanostructured Coatings子議程主席之一。歡迎本學會成員，以及鍍膜科技與表面技術相關研究與應用的師長同學，產業界朋友踴躍投稿ICMCTF 2026，繼續讓世界看見台灣。明年美國加州聖地牙哥見。

出版委員會主任委員：歐陽汎怡（國立清華大學工程與系統科學系）

委員(按筆畫順序)：朱英豪(國立清華大學材料科學工程學系)、陳嘉勻(國立成功大學材料科學及工程學系)、魏大欽(中原大學化學工程學系)、藍貫哲(國立清華大學核子工程與科學研究所)

台灣鍍膜科技協會 (TACT, Taiwan Association for Coatings and Thin Films Technology)

理事長：王錫福校長/講座教授 國立臺北科技大學材料及資源工程系

秘書長：陳柏均教授 國立臺北科技大學材料及資源工程系

會址：300092新竹市科學園區研發六路20號

網址：www.tact.org.tw/

電話：(02)2771-2171#1412

信箱：tact.secretary@gmail.com

