永續淨零科技——二氧化碳光催化還原

文／陳姿羽、謝定翰、李權倍

圖／李權倍

本文介紹永續發展背景、淨零科技背景與應用、光觸媒材料與光催化反應和光觸媒材料應用於二氧化碳光催化還原。

永續發展背景

隨著全球經濟的快速發展和人口增長，能源需求持續增加，這對環境和社會帶來了極大的壓力。這些能源的使用雖然支撐了現代社會的工業與生活方式，但卻帶來了嚴重的環境破壞，尤其是二氧化碳排放的顯著增加。根據國際能源署（International Energy Agency，IEA）的數據[1]，2023 年全球能源相關之碳排量較前一年增加約 1.1%（4.1 億噸），達到 374 億噸的歷史新高，導致全球氣候變遷、溫室效應惡化，並引發其他環境問題，如：酸雨。為了應對這些挑戰，世界各國正在積極尋找替代能源與再生能源，以減少對化石燃料的依賴並降低碳排放。再生能源的類型多樣，包括太陽能、風能、地熱能、水力、生質能等，且其發展是實現永續發展的關鍵。同時，透過提升再生能源的效能、發展碳捕捉與再利用技術，我們可以大幅減少對化石燃料的依賴，降低二氧化碳的排放。未來的能源轉型需要多種策略並行，以實現全球永續能源系統的發展。

淨零科技背景

全球正在經歷能源轉型的過程，積極發展可再生能源和其他低碳能源技術，期能減少對化石燃料的依賴並減少對環境的衝擊。因此各國積極投入碳中和行動，意旨採取再生能源和碳減量措施，使大氣的碳排放量至少能維持現狀；此外，為了進一步減少碳含量，各國也開始推行淨零科技。然而，能源轉型過程並非一帆風順。在過渡期內，社會面臨的缺電風險增加，尤其是在電力需求高峰期時，可再生能源如太陽能和風能的間歇性供電可能不足以滿足需求。這種供應的不穩定性可能導致電價波動，增加經濟負擔。另一方面，全球課徵碳稅等政策也對企業及民生層面有帶來大幅影響，這些政策通常會增加生產和消費的成本，從而推高物價。雖然多數人對於氣候變化的緊迫性有所了解，並支持淨零排放政策，但當涉及具體的經濟和生活影響，許多人開始表現出不安和焦慮。根據 2023 年臺灣綠色和平的調查[2]，八成以上的受訪者認為氣候議題緊急且支持淨零排放目標，但一旦面臨具體實施的挑戰以及消費成本全面性的提高，則反對聲浪有可能浮現。此為全球性現象，不僅限於臺灣，像是法國、歐盟和美國也出現了類似的抗議和

政策波動，可能使得淨零推進難度增加。

淨零科技的應用

在這樣的背景下，全球必須尋求創新解決方案來應對這些能源和環境挑戰。再生能源技術，如太陽能、風能、氫能，成為實現能源永續發展的關鍵。根據研究，氫氣作為一種能源載體，具有高達 143 MJ/kg 的能量密度，這比液態碳氫化合物燃料的能量密度高出三倍[3]。使得氫能成為替代化石燃料的潛在解決方案之一。傳統上，氫氣可通過化石燃料重整，如天然氣蒸氣重整或煤氣化來生產。然而，這些技術仍然會產生大量的二氧化碳排放。電解水技術為一種更環保的氫氣生產方式，近年來引起了廣泛關注。它利用電能將水分解為氫氣和氧氣，且產品純度高，適用於大規模或小規模生產。雖然氫能使用後的產物為水可視為極潔淨之能源，但它消耗大量電力，因此如何確保使用來自可再生能源的電力進行電解是關鍵問題。此外，光催化水分解技術作為另一種環保的氫氣生產方法也在近年獲得了關注，這種技術利用太陽光來驅動水的分解。然而，目前的技術效率仍然很低，需進一步的研究和改進。相比之下，光重整反應（Photo-reforming）提供了一條更具潛力的氫氣生產途徑[4]，利用含氧有機化合物作為反應介質，這些反應比純水分解反應更具熱力學可行性，並且能同時減少逆反應的發生。

除了實施永續能源發展之外，減少大氣中二氧化碳含量也是淨零排放的核心目標之一。根據聯合國政府間氣候變遷專門委員會（Intergovernmental Panel on Climate Change，IPCC）2018 年報告[5]，若要維持地球環境的穩定，全球需要在 2030 年之前將二氧化碳排放量從 2010 年的水平減少 45%，並在 2050 年達到淨零排放。然而報導中指出 2018 年的全球二氧化碳排放量仍比 2010 年高出 12%，因此需要更有力的行動來應對這一挑戰。目前具有前瞻性的解決方案是將二氧化碳作為原料，並利用太陽光能與光觸媒作用下將其轉化為可儲存和使用的燃料，這樣的技術即被稱為「人造光合作用(Artificial Photosynthesis)」或「太陽燃料(Solar Fuel)」。此技術可將二氧化碳和水分子轉化為碳氫化合物燃料，這些燃料可以儲存和輸送，並且能夠在現有的能源基礎設施中使用。近期研究中，科學家已經成功實現了 1%以上的二氧化碳光催化轉換效率，這為未來的大規模應用提供了可能性。隨著光電技術從低效的利基市場設備轉變為全球性產業，光催化技術也有望通過進一步的研發實現類似的技術突破。

光觸媒材料與光催化反應

光催化反應是指具有半導體特性之材料在光照射下，能夠吸收光能並催化反應的過程。而其材料為此反應之催化劑，稱為光觸媒。半導體材料通過外部能量源(例如：電壓

或光)，生成電子-電洞對（Electron-Hole Pair）進行催化反應。當半導體吸收到的光能大於或等於其能隙（Band Gap）的能量時，光子能量被價帶中的電子吸收，電子會被激發至導帶，形成電子-電洞對 (圖 1)。然而，光激發的電子和電洞會在半導體內部或表面發生快速復合(Recombination)，這導致大部分的光能以光或熱的形式消散，從而降低光催化反應的效率。為了驅動光催化反應，不僅需要大於或等於能隙的能量，半導體材料的導帶和價帶位置也必須與反應物的氧化還原電位匹配。理想的光觸媒材料應具備以下特點：廉價、無毒且由地球上豐富的元素組成；具有合適的能隙及導帶、價帶位置；能夠有效分離光激發的電子和電洞對；並且具有良好的穩定性。

光觸媒材料應用於二氧化碳光催化還原

隨著大氣中二氧化碳濃度持續上升，全球變暖和氣候變化成為最嚴峻的環境問題之一。除了盡量減少二氧化碳排放之外，也在開發能補獲並更進一步將二氧化碳轉化生成具經濟效益之物質。光催化還原為一種將二氧化碳還原為可用燃料的潛力技術，最近引起了廣泛關注。1979 年，Inoue 等人首次展示了利用半導體光觸媒進行二氧化碳的光催化還原，生成有機化合物[6]。在這一過程中，水與太陽能被用來光催化還原二氧化碳，生成碳氫化合物。太陽光照所激發的電子(e^-)和電洞(h^+)經過有效分離後，電子具有還原性，從光觸媒表面傳遞到二氧化碳分子，進行還原反應；同時，電洞氧化水分子生成氧氣。而在二氧化碳還原反應中，不同產物的生成對應不同的電化學電位(圖 1)。自此以來，科學家們探索了各種寬能隙半導體材料用於二氧化碳還原。其中，二氧化鈦（TiO_2）及以 TiO_2為主的複合材料異質光觸媒，由於成本低、化學穩定性高而被廣泛研究。

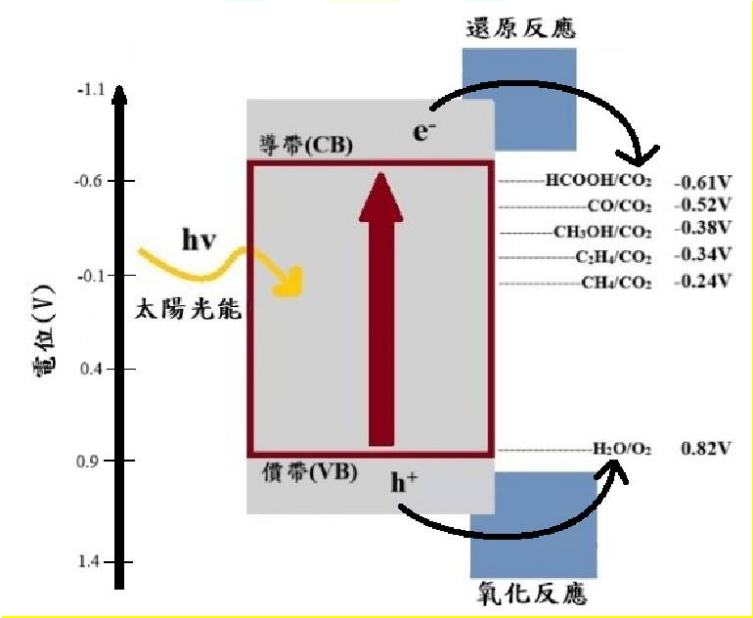

圖 1、價帶中的電子吸收光能後被激發至導帶示意圖以及對應二氧化碳還原反應產生不同產物的電化學電位。

然而半導體材料中電子-電洞再結合與寬能隙半導體較少的可見光吸收範圍，將使得二氧化碳光催化還原的效率大幅受限。為了解決這些問題，相關研究透過合成複合材料，藉由形成異質接面與吸收光譜互補之方式，分別達成降低電子-電洞再結合率及增廣可見光吸收範圍，進而提高整體光催化二氧化碳還原效率。臺北市立大學應用物理暨化學系李權倍教授研究團隊近來則研製以銅基、石墨烯、導電高分子等材料(即：PEDOT 電沉積於經石墨烯層表面修飾之銅奈米線結構薄膜(CuNWs/MLG/PEDOT))作為光觸媒材料。其中，銅（Copper）具有良好的導電性、導熱性和延展性，且在自然界中廣泛存在；石墨烯（Graphene）是由單層碳原子以六邊形蜂巢結構排列而成的二維材料，厚度僅一個原子。它具有高化學穩定性、高導電性且可穩定整體結構。石墨烯被廣泛應用於電子元件、能源存儲等領域；導電高分子（Conductive Polymer）是一具有電導能力的高分子材料，結合傳統高分子的可加工性與金屬或半導體的導電特性。它們的分子結構中通常包含共軛雙鍵（Conjugated Double Bonds），這些共軛結構使電子能夠沿著高分子鏈自由移動，從而產生導電性以及對特定波段的光產生吸收。在二氧化碳光催化還原之光觸媒的設計中，奈米結構的引入被認為是一種提升其催化性能之有效策略。材料的奈米結構化能大幅增加光觸媒的比表面積，從而提供更多的反應活性位點。同時，奈米結構有助於反應物分子的傳輸，增強二氧化碳與光觸媒的接觸效率。因此可以藉由將金屬觸媒基板表面奈米結構化來提升反應面積。研究團隊將銅基板(Cu)表面透過溶液蝕刻成 Cu 奈米線結構(Nanowires)，再將多層石墨烯層(Multilayer Graphene，MLG)沉積於銅奈米線結構(CuNWs)上；為有效利用可見光波段能量，更進而將具可見光吸光性的導電高分子 Poly(3,4-ethylenedioxythiophene) (PEDOT)電鍍在 CuNWs/MLG 上(圖 2)。從圖 3 中 PEDOT 的分子結構圖可知其含有硫元素(S)，透過掃描式電子顯微鏡（Scanning Electron Microscope）與能量散射 X 射線譜（Energy-dispersive X-ray Spectroscopy)之元素分布(圖 4)可以看到有硫的訊號，進而證實 PEDOT 的存在。而透過紫外可見光光譜圖(圖 5)，可以看到 CuNWs/MLG/PEDOT 在可見光範圍(340 nm~550 nm)具有吸光性。另一方面，透過拉曼光譜分析技術可以證實石墨烯的存在。拉曼光譜技術是用來研究材料的分子結構。將雷射光打到樣品上，大部分的光被反射或吸收，少部分的光則會被散射且改變能量，能量改變主要是因為光子與材料分子間的振動或旋轉模式相互作用，這導致分子吸收或釋放少量能量，進而改變光子的能量。這些能量的改變可反映出材料的分子結構。圖 6 為拉曼光譜圖，可以看到明顯的 D 譜帶(Disorder Band)與 G 譜帶(Graphite Band)，而 2D 與 D +G 譜帶則表示有非平面石墨結構，這種有缺陷的結構能作為活性位點(Active Site)有利於光催化反應的進行。

圖 2、導電高分子 PEDOT 包覆附有石墨烯層之銅奈米線結構照片（薄片右半部藍黑色部分）。

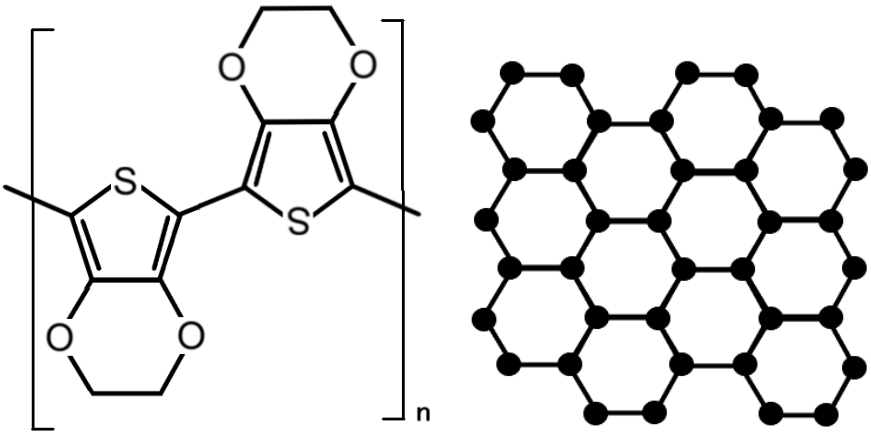

圖 3、導電高分子 PEDOT 分子結構圖（左）。石墨烯層分子結構圖（右）。

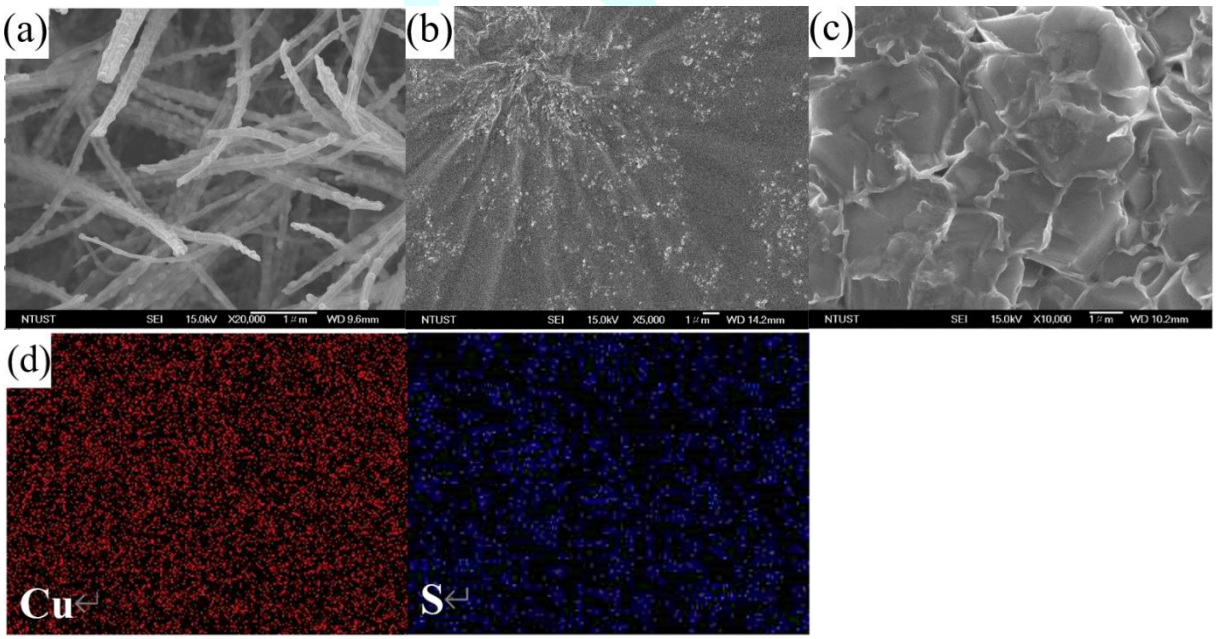

圖 4、(a) CuNWs/MLG、(b) PEDOT 與 (c) CuNWs/MLG/PEDOT 之掃描式電子顯微鏡影像圖。(d) 圖 (c) 之元素分布圖。

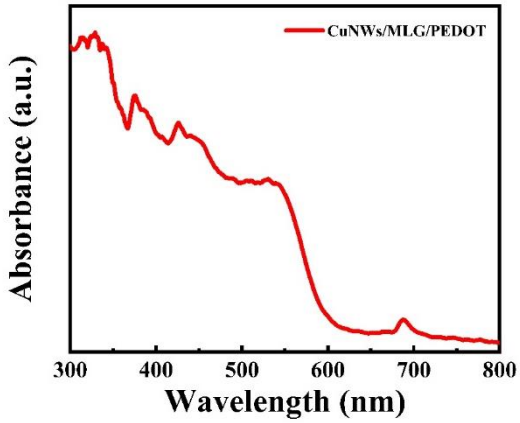

圖 5、 CuNWs/MLG/PEDOT 之紫外可見光光譜圖。

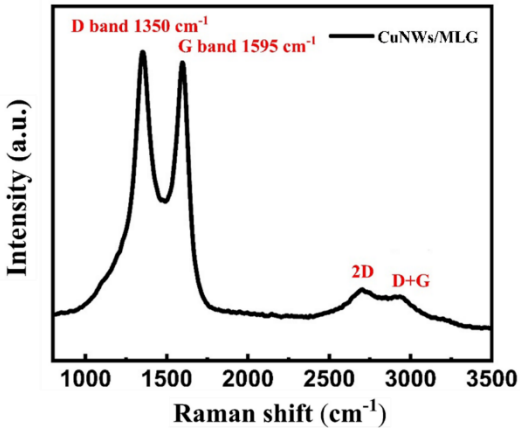

圖 6、CuNWs/MLG 之拉曼光譜圖。

圖 7 為使用 CuNWs/MLG/PEDOT 作為光觸媒應用在二氧化碳光催化還原反應的產物產率。在經過 4 小時模擬太陽光源照射反應後，可以看到每平方公尺的光觸媒薄膜還原二氧化碳可得到主產物甲烷與極少量的其它產物甲醇及乙醛。雖然總產量尚少，但如果考慮到這些反應是使用天然資源(如：陽光和水)作為能量與反應物來源，並且能達到碳中和與碳排量淨零的目標，則此產量在永續能源發展面向亦具有重要意義。

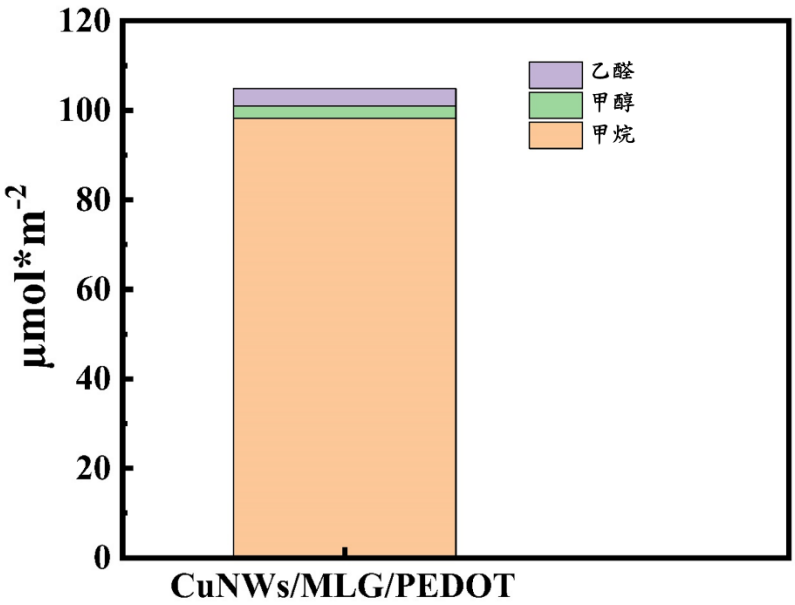

圖 7、光觸媒複合材料二氧化碳光催化還原之產物產量。

未來如果能進一步建立太陽能光催化水分解與二氧化碳還原的系統，通過太陽光能產生氫氣，並以太陽光能作為二氧化碳還原所需能量，同時完善二氧化碳捕集系統，將能實現以太陽能為基礎的可持續能源體系。此外，若未來能將此二氧化碳光催化還原技

術大規模產業化，並裝載於建築物表面或較無經濟效益之空曠場域全面普及化，則達到永續淨零的目標指日可待！

陳姿羽、謝定翰
臺北市立大學應用物理暨化學系專題生
李權倍
臺北市立大學應用物理暨化學系副教授

參考資料

[1] IEA （2024），2023 年二氧化碳排放量，IEA，巴黎，許可證：CC BY 4.0

[2] GREENPEACE 綠色和平（2023）。什麼是淨零碳排？臺灣怎麼實現？國際作法一次看。氣候專題報導。

[3] Munusamy, T. D.; Chin, S. Y.; Khan, M. M. R. （2022）. "Hydrogen production via photoreforming of wastewater under LED light-driven over CuO@exfoliated g-C（3）N（4） nanoheterojunction." Chemosphere 301: 134649.

[4] Iapichino, M. T. A., et al. （2024）. "H2 production by solar photoreforming of plastic materials using SiC-g-C3N4composites." Catalysis Communications 187.

[5] 台達電子文教基金會（編譯）。IPCC 地球暖化 1.5°C 特別報告--決策者摘要。

[6] Shown, I.; Hsu, H. C.; Chang, Y. C.; Lin, C. H.; Roy, P. K.; Ganguly, A.; Wang, C. H.; Chang, J. K.; Wu, C. I.; Chen, L. C.; Chen, K. H. （2014）. "Highly efficient visible light photocatalytic reduction of CO2 to hydrocarbon fuels by Cu-nanoparticle decorated graphene oxide." Nano Lett 14（11）: 6097-6103.

[7] Jingrun Ran, Mietek Jaroniec, Shi-Zhang Qiao, Cocatalysts in Semiconductor-based Photocatalytic CO2 Reduction: Achievements, Challenges, and Opportunities, Adv. Mater. 30,7 （2018） 1704649.