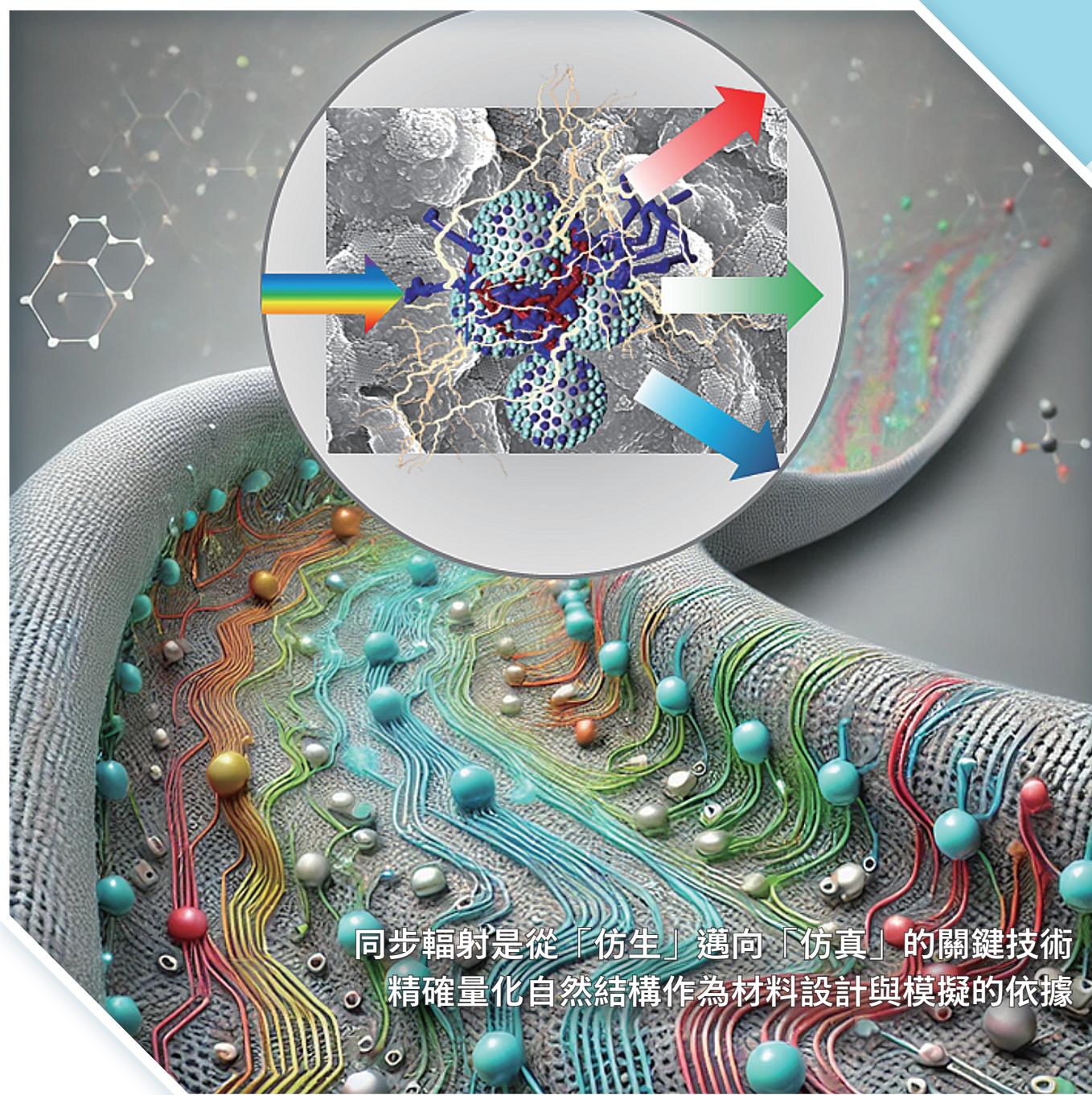




研究專文

從羽毛結構看見未來色彩
仿生結構色的秘密與應用



同步輻射是從「仿生」邁向「仿真」的關鍵技術
精確量化自然結構作為材料設計與模擬的依據

魏副主任的話

創新與發明是推動科技文明的主要引擎，但是觸動它們的發生則經常是來自於人們對生活周遭事物的觀察和領悟。國家同步輻射研究中心是國內最大的研究設施，它所提供的加速器光源不僅能夠讓我們一窺肉眼不容易觀測到的大自然，甚至還可以在極端環境下進行探測。多年來，中心同仁持續引入適合在大型設施運轉的新穎技術和實驗系統，也本著化研為用的精神將中心的技術用之於社會。本期簡訊介紹的仿生學研究、硬 X 光光電子發射能譜技術、和承續前期的毫米波地熱鑽探計畫便是幾個和大家分享的例子。此外，我們也藉此機會恭賀台大化學系劉如熹教授獲得本中心第四屆光環論文獎，台大物理系林麗瓊院士榮膺第 28 屆數學及自然科學類之「國家講座主持人」和清華大學化學工程系何榮銘教授

榮膺第 68 屆「學術獎」(工程及應用科學類)。每當國內外用戶在善用國輻中心所提供的利器來完成優良研究後獲得獎項的肯定，都會讓中心感到與有榮焉。

中心是一個探索未知科學的實驗場所，也將持續為突破各項研究瓶頸創造契機。最後，感謝用戶與中心同仁的共同努力，讓國輻中心成為匯聚國內相關研究的焦點。

魏德新

重要事務

- 本中心於 113 年 12 月 10 日召開第八屆第三次董事會暨第四次監事會聯席會議，會中除中心現況報告，並通過 115 年度預算編列及工作計畫、第六屆科學諮詢委員會委員聘任、113 年度稽核報告和 114 年度稽核計畫等議案。
- 本中心於 114 年 3 月 28 日召開第八屆第四次董事會暨第五次監事會聯席會議，會中報告中心現況，並通過 113 年度決算(含工作成果)、中心內部規章修訂和講座人員聘任等議案。同日亦召開第八屆第六次監事會，通過 113 年度決算(含工作成果)。
- 教育部近日舉行國家講座主持人、國家產學大師暨學術獎頒獎典禮，本中心用戶林麗瓊院士榮膺第 28 屆數學及自然科學類之「國家講座主持人」和何榮銘教授榮膺第 68 屆「學術獎」(工程及應用科學類)。林麗瓊院士於固態物理、光電物理、材料科學、奈米科技、綠色與永續能源應用等相關科學研究成果卓著，是本中心的資深用戶，亦曾任本中心董事與監事多年。林院士的眾多研究之一就是利用本中心的同步輻射光源探究二氧化碳和水對光觸媒材料的反應模型，目標透過「人工光合作用」把二氧化碳轉換成實用的碳氫燃料。清華大學化學工程系何榮

銘教授曾任本中心用戶執行委員會主席，目前擔任本中心計畫審查委員會委員。何教授以高分子物理、高分子型態學、高有序奈米網狀材料與奈米圖案成形技術之前瞻研究獲獎，於高分子自組裝物理學基礎研究與高分子奈米科技應用研究的影響卓著。

- 2050 淨零城市展於 3 月 18 日至 21 日由國家發展委員會主辦，本中心由產業應用組陳世偉博士籌劃，以「1600 度的煉獄：先進同步輻射 X 光技術透析煉鐵高爐黑盒子，照亮淨零碳排放光明路」為主題參展。本中心研究團隊與成功大學、中鋼公司共同合作，建造了全球首座臨場氫氣高溫反應爐，可以快速升溫到 1600 度、通入氫氣並同時進行臨場同步輻射 X 光分析，即時呈現氫氣還原鐵礦的機制與效率，成功達到減碳的目的並能同時維持良好的高溫爐運轉效率。
- 立法院教育及文化委員會於 4 月 7 日由張雅琳委員率隊蒞臨中心視察，當日由國輻中心蘇振綱董事長與徐嘉鴻主任接待，參觀加速器與光束線實驗設施。張委員對國輻中心長期深耕科學研究及積極導入產業應用表達高度肯定，同時期許中心持續扮演國家科技發展的支柱，成為引領台灣科技創新的推手。

從羽毛的結構看見未來色彩顏料： 仿生結構色的秘密與應用

莊偉綜副研究員

國家同步輻射研究中心軟物質科學小組



當我們欣賞一隻鳥時，很容易被牠們那一身穩定而鮮豔的藍綠色羽毛所吸引。然而，這些亮眼的色彩其實並不是由染料或色素所產生，而是來自羽毛中極為精巧的奈米結構。這類被稱為「結構色彩 (structural color)」的現象，在自然界中廣泛存在，其背後的原理和功能，正啟發著當代材料科學家打造未來的高功能性材料。

由國輻中心 (莊偉綜、王俊杰、蔡一葦、鄭有舜、林智敏、陳軍佑和周哲民等) 與國內多所大學組成的跨校團隊 (清華大學洪毓珽教授、臺灣科技大學洪伯達教授、中山大學蔣西旺教授和成功大學孫亞賢教授)，發表了一項創新研究：開發出一種結合導電性與結構性色彩的水性墨水，既能畫圖又能傳導電流，適用於智慧穿戴裝置、電子布料與創意電子藝術。[1]

從無序中看見有序：鳥羽毛的非虹彩結構色

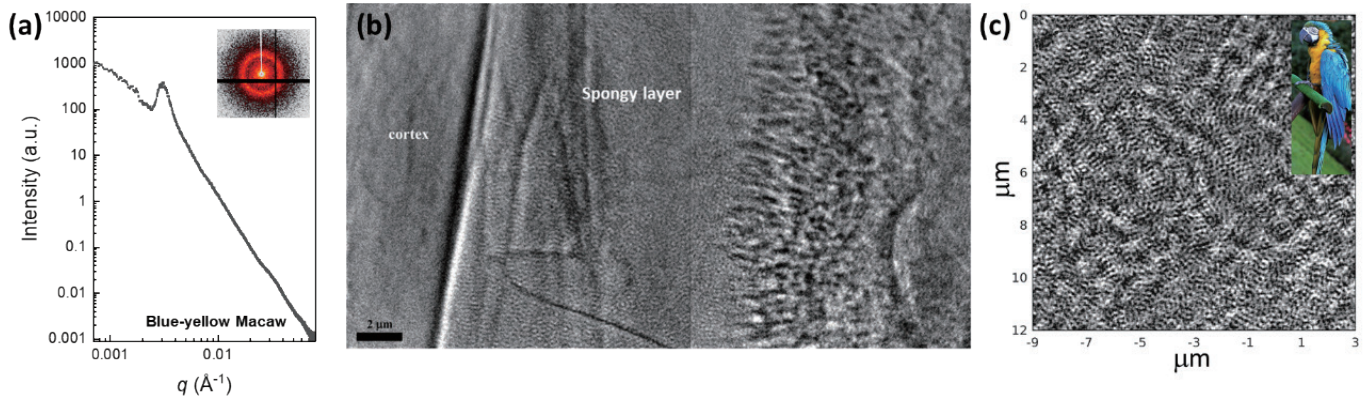
在結構色彩材料中，「虹彩性」與「非虹彩性」的差異，根源於內部奈米結構的排列方式。光子晶體 (photonic crystals) 具有高度規則、可見光波長的週期性結構，類似於三維晶體中原子的排列。這樣的長程有序排列會導致光在其中發生布拉格繞射，反射波長依照入射角改變，因此形成隨觀察角度變化的虹彩色彩。蝴蝶翅膀與某些甲蟲鱗片就是自然界光子晶體的例子。相對地，光子玻璃 (photonic glass) 則是由尺寸均勻、但排列隨機的膠體或奈米粒子所構成，僅具有短程有序、長程無序的結構。這種排列可選擇性散射特定波長的光，形成色彩穩定、不具角度依賴性的非虹彩結構色。例如翠鳥或金剛鸚鵡的羽毛就屬於光子玻璃型態

的結構色。簡言之，光子晶體造就閃爍多變的虹彩效果，而光子玻璃則創造出從任何角度看都一樣的純淨色彩，兩者皆為自然與材料科學中極為重要的光學結構。

在自然界中，部分鳥類羽毛展現的顏色並非因含有色素，而是來自羽毛內部的微觀結構對光的選擇性反射。以金剛鸚鵡為例，其羽毛中的海綿層由角蛋白與空氣孔洞交織而成，孔洞大小約幾百奈米，與可見光波長相當。這些空隙並非排列成完美的晶體結構，而是以一種介於有序與無序之間的方式存在—無序中的有序。這種「短程有序」的結構在學術上被稱為「最大無規最密堆積 (Maximally Random Jammed Packing)」(圖一)。這種排列雖不具長程對稱性，卻也能有效選擇性地反射特定波長光線，同時不隨角度改變產生虹彩，因而造就了穩定、柔和且飽和的非虹彩結構色。

同步輻射技術：揭開鳥羽結構色的秘密

若要從仿生邁向真正可控制的材料設計，僅有靈感還不夠，關鍵在於能否精確重現自然界的結構細節。這就需要從「仿生」進一步走向「仿真」，不只模仿外觀，更要理解與再現其奈米尺度的結構排列邏輯。在這方面，同步輻射 X 光技術提供了無可取代的工具。透過小角度 X 光散射 (SAXS)、X 光散射成像 (ptychography) 與 X 光三維斷層掃描 (TXM tomography)，使得該團隊得以觀察如鳥羽毛中非虹彩結構色所依賴的最大無規最密堆積的短程有序奈米團簇結構，並量化其排列距離、孔洞大小與局部對稱性 (圖一)。此種最大無規最密堆積團簇在鳥羽非虹彩結構色扮演了關鍵角色。這是一種看似隨機、實則高度緊密的排列方



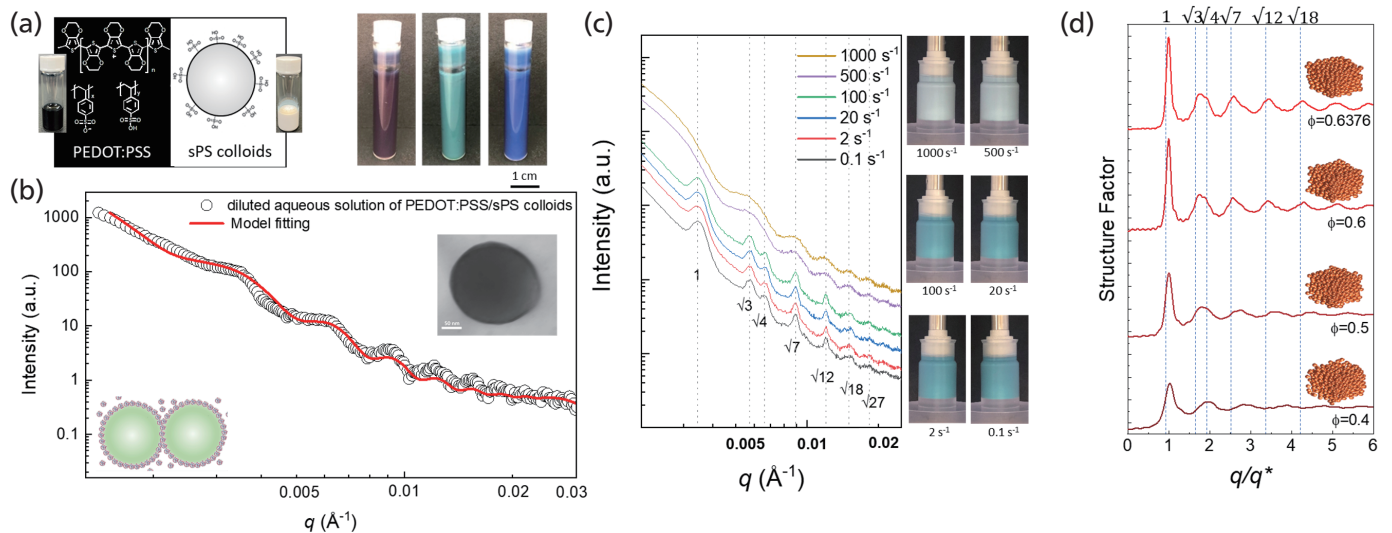
圖一 藍黃金剛鸚鵡羽毛結構分析：(a) 小角度 X 光散射、(b) 穿透式 X 光顯微影像和 (c) X 光散射成像。

式，能在無需長程有序的前提下，產生穩定的短程結構。這些同步輻射 X 光技術不僅揭示自然設計背後的物理規律，更成為仿生材料進行數值模擬、反射光譜預測與結構優化的基礎，使研究團隊不只是模仿自然，而是能理性建構出具有類似性能甚至超越自然的人工結構色材料。因此，若要讓仿生真正走向可工程化的仿真與應用，同步輻射技術的精密結構解析，無疑是通往自然設計密碼的關鍵鑰匙。

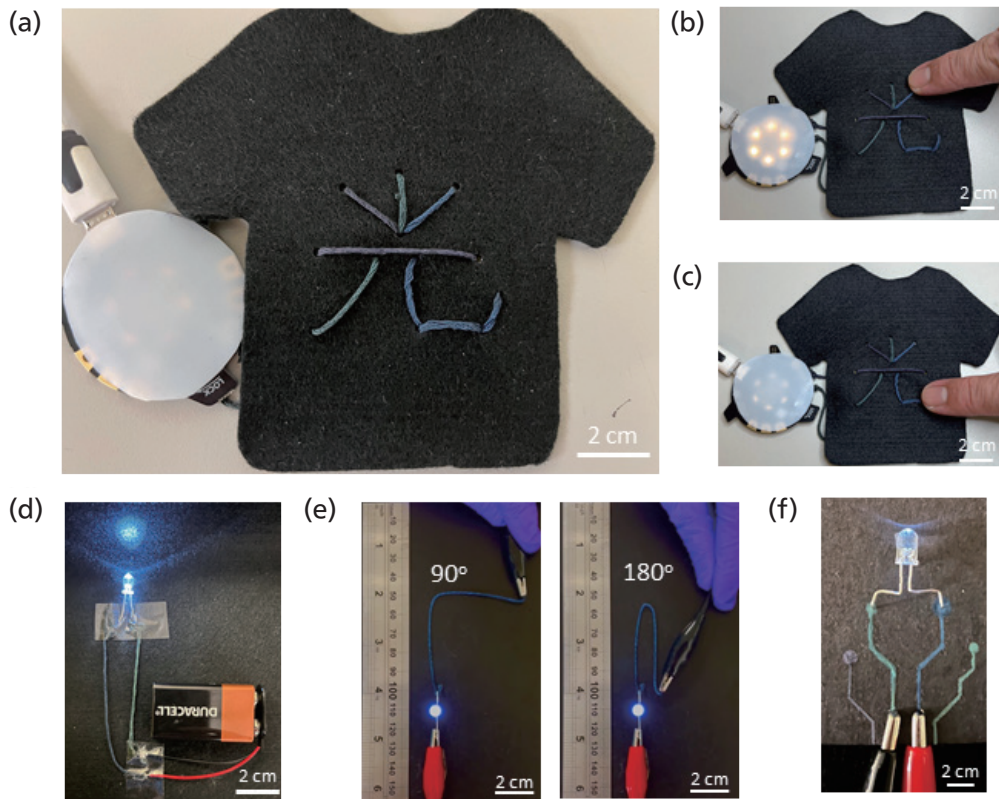
仿生材料創新: 在水中自組裝的導電結構色墨水

理解大自然的原理後，接下來就是如何「模仿自然」。要製造出穩定、鮮明、又不隨角度改變的結構色彩，材料中的奈米結構必須非常講究地排列。而這裡的關鍵就是**最大無規最密堆積**，這種堆積模式，乍看之下像是「亂中有序」：微小的球形粒子（像是膠體）雖然排列得像隨機倒入罐中的彈珠，但在這個亂中，其實每顆粒子都被緊緊擠壓到不能再移動的位置，形成一種「最緊密但仍保有隨機性」的結構。

在受到這些羽毛結構色的啟發，研究團隊設計出一種以水為基底、可自組裝的導電彩色墨水。他們將白色膠體粒子 sPS(磺酸化聚苯乙烯) 作為核心，外覆黑色導電高分子 PEDOT:PSS，形成「核 - 殼型微粒」(圖二 (b))。這些微粒在水中透過靜電交互作用力可以自發形成類似**最大無規最密堆積**的排列，此時雖然缺乏晶體般的週期性，但其局部間距仍能選擇性反射特定波長的光，形成不隨角度改變的結構色彩。這種排列方式不僅避免了過度雜亂造成的灰白混濁，也排除了光子晶體所產生的彩虹效應，是非虹彩色穩定呈現的最佳幾何基礎。如圖二 (a) 所示導電墨水產生角度不變的紅、綠、藍結構色彩。此外，最大無規最密堆積結構可透過膠體自組裝自然形成，無需繁複製程，展現出自然啟發與永續材料設計的完美結合。同時，導電高分子 PEDOT:PSS 提供良好的導電性，使這種墨水兼具「視覺美感」與「電功能性」。墨水可透過書寫、塗布等方式應用在柔性基材上，乾燥後仍保有穩定色彩與導電性。更令人驚喜的是，這些色彩具有「可逆性」—搖晃後顏色消失，靜置後又會自動重現，展現出仿自然材料的動態自組裝特性 (圖二 (c,d))。



圖二 (a) 磺酸化聚苯乙烯膠體粒子 (sPS) 與導電高分子 PEDOT:PSS 混合形成紅、綠和藍色墨水。(b) 小角度 x 光散射圖譜與電子顯微影像證實為導電墨水內的膠體粒子核 - 殼型微粒。(c) 流變場下導電墨水的小角度 x 光散射圖譜。(d) 理論模擬不同堆疊密度下的結構因子，其中 $\phi = 0.6376$ 為最大無規最密堆積。



圖三 彩色導電墨水在電子裝置中的應用。(a) 以彩色導電線繡製中文字「光」所形成的觸控開關，可用來控制 LED 裝置。(b) 與 (c) 當手指觸碰字的上半部時，LED 亮起；觸碰下半部時，LED 熄滅。(d) 利用彩色導電線構成電路的 LED 照明裝置。(e) 對藍色導電線進行 90° 與 180° 彎折測試，以評估其導電穩定性。(f) 將導電墨水塗畫於紙面形成圖案電路的 LED 照明裝置。

這種結構色導電墨水的應用潛力極廣，不僅可用於柔性電子元件、可觸控衣物、智慧紙張電路，還能透過浸泡棉線等方式製成彩色導電線，用於繡在布料上的開關或電源線（圖三）。由於墨水成分為水性且無毒，整體製程不需高溫、不產生污染，極具永續性，也符合現今材料開發對環保與個性化的雙重追求。

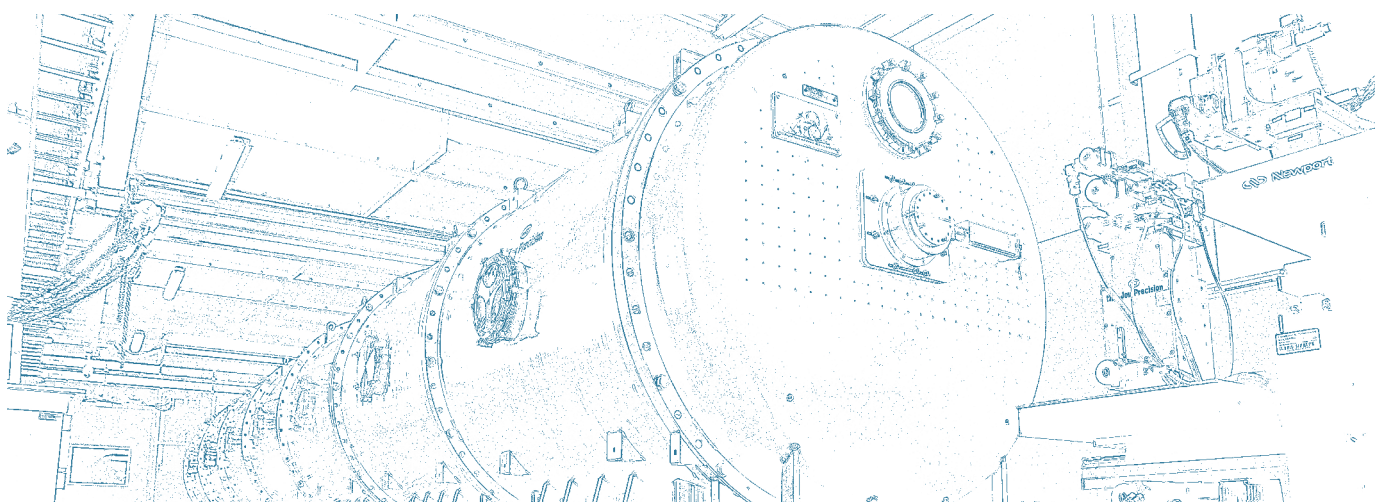
未來展望

這項來自鳥羽毛的仿生設計提醒我們，自然不只美麗，也充滿智慧。透過觀察自然、理解結構、創新材料與實踐應

用，我們能創造出更環保、更美觀、更有功能的未來科技。在這樣的科技路上，大自然既是靈感來源，也是最佳老師。同步輻射不只是分析工具，更是從「仿生」邁向「仿真」的關鍵技術，讓我們得以精確量化自然結構，作為後續材料設計與模擬的依據。在未來的衣櫃裡，衣服不只會發光、會感應、還會隨你風格呈現各種顏色——這不再是科幻，而是來自台灣研究團隊的最新科技突破！

參考文獻

1. W. T. Chuang *et al.*, *ACS Appl. Mater. Interfaces* **16**, 52856 (2024).



硬X光光電子發射能譜

廖彥發博士

國家同步輻射研究中心 X 光散射小組

硬 X 光光電子發射能譜 (Hard X-ray Photoelectron Spectroscopy, HAXPES) 是近年來迅速發展的非破壞性檢測技術，它可應用於半導體多層膜內膜層或其界面的分析 (例如二維材料與高介電材料異質界面電阻) 或能源材料分析 (例如固態電池界面的電阻或電池 SEI 膜的形成) 等方面研究。HAXPES 技術結合高元素靈敏度與高探測深度，使其在材料的元素分析、化學組態鑑定及電子結構能譜方面具備強大的解析能力，從而理解材料內膜層或是界面間的化學價態與電子結構組成及其相關物理和化學性質 [1]。

X 光光電子能譜 (XPS) 技術原理如下：當 X 光入射進入樣品時，X 光光子與材料中的原子相互作用，激發內層電子 (通常為核心能階電子) 攜帶足夠能量逃脫出材料表面。逃逸光電子具有特定動能，計算公式如下：

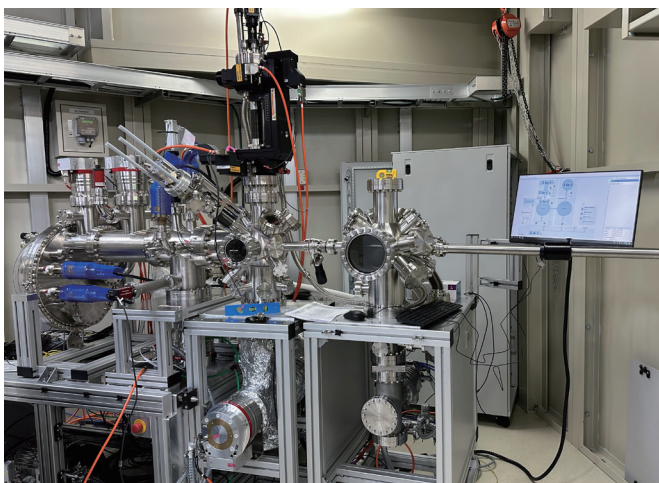
$$E_k = h\nu - E_b - \phi$$

其中 E_k 是光電子的動能， $h\nu$ 是入射 X 光的光子能量， E_b 是電子的束縛能， ϕ 是材料的功函數。通過測量光電子的動能，可以反推出其束縛能，這與特定元素的化學狀態及電子結構直接相關。而 HAXPES 利用高能入射 X 光 (通常在 3-10 keV 範圍內) 作為激發光源，除了可以量測較深層核心能階之外，所產生較高動能的光電子也會增加其從樣品內部的逃逸距離，所以相較於傳統 XPS 可具備較高的樣品探測深度 (光子能量 8 keV 約 10-50 nm 逃逸深度)，這對於研究層狀

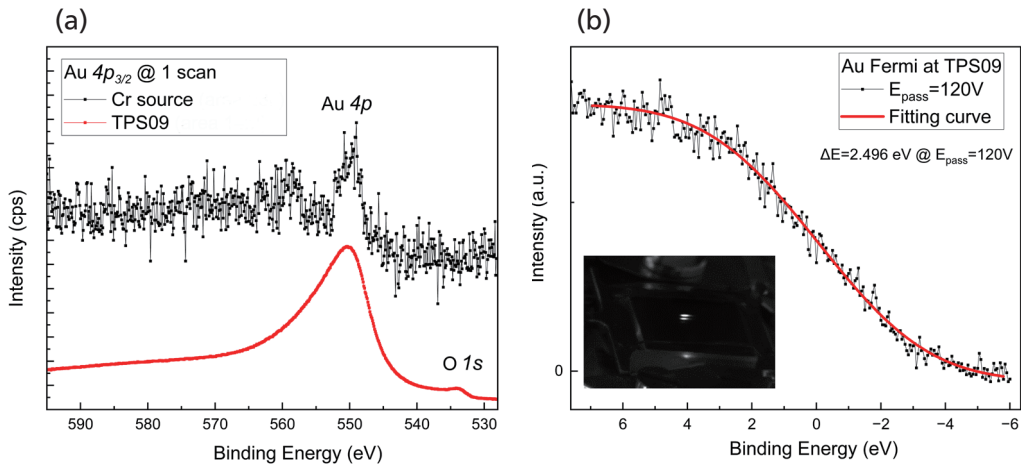
結構或多層膜材料系統 (如金屬 - 氧化物 - 半導體結構) 至關重要。隨著半導體元件進入奈米尺度，許多分析方法因靈敏度不足而無法準確測量分析。穿透式顯微鏡雖能勝任奈米尺度的分析，但樣品製備過程可能導致樣品損傷。因此，非破壞性分析技術對於奈米尺度半導體元件的研究至關重要。

HAXPES 是具有高靈敏度的非破壞性分析技術，特別適合奈米尺度的半導體元件。硬 X 光激發的高能光電子能夠測量被表面薄膜覆蓋的半導體結構 (例如金屬電極或保護層)。利用其卓越的元素分辨率和高探測深度，HAXPES 能精準地針對內膜層或界面進行測量，分析樣品特定深度之化學組態與電子結構。此外，HAXPES 還可以在施加電壓下動態測量元件或多層膜結構中的內膜層或膜層界面的變化。在施加電壓下，檢測到的光電子能譜能真實反映元件操作時的化學鍵合狀態，並顯示裝置內部的動態電子結構。HAXPES 被廣泛應用於研究金屬氧化物半導體裝置的化學組態和能帶結構 [2]，也用於分析金屬 - 絕緣體 - 金屬電阻變化記憶體中因電壓變化而引致的化學鍵合狀態變化 [3]。

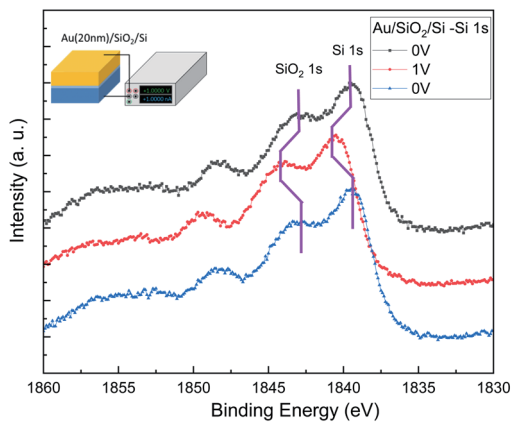
考量台灣在半導體研發與產業方面的需求，本中心規畫在 TPS 47A 光束線上建立 HAXPES 實驗站。2024 年完成該實驗站的建設，目前置於 TPS 09A2 光束線進行測試 (圖一)。利用 TPS 的高亮度光源，其強度為一般實驗室光源的 100 倍，顯著提升了 HAXPES 實驗數據的擷取效率。我們在 TPS 09A2 實驗站的測試實驗中，選用光子能量 8 keV 之 X 光和鉻靶實驗室光源 (光子能量 5.4 keV) 對 Au(20nm)/SiO₂/Si 多層膜進行測量，除了獲得 Au 4p 軌域核心能階和價帶 (valence band) 光譜外 (圖二)，還取得 Si 1s 軌域核心能階的光譜數據 (圖三)。因為 Si 1s 軌域光電子能夠穿過表面 Au 電極層被光電子能量儀測量到，顯示本實驗的探測深度超過 20 nm。此外，我們以 Au(20nm)/SiO₂/Si 多層膜作為 HAXPES 臨場實驗測試樣品，依序在未施加電場 0V，在外加 1V 電場，再回到 0V 電場不同條件下所量測的 Si 1s 軌域核心能階。結果發現，在 0V 外加電場下，Si 1s 軌域核心能階有兩種價態 (S⁰-Si 與 Si⁴⁺-SiO₂)；施加 1V 電場後，Si 1s 軌域核心能階偏移 1V，移除外加電場後，Si 1s 軌域核心能階則恢復至未加電場的狀態。這些實驗數據不僅證明了 HAXPES 具備高探測深度 (>20 nm)，還顯示出在本實驗站可針對多層膜或是半導體元件進行臨場 HAXPES 實驗的可行性。



圖一 在 TPS 09A2 的 HAXPES 實驗站，並具備不同的臨場測量環境 (外加電場，變溫等)。



圖二 (a) 利用鉻靶實驗室 X 光光源 (光子能量為 5.4 keV) 與 TPS 09A2 光束線 (入射光子能量為 8 keV) 量測金標準片 Au 4p 軌域核心能階。(b) 利用量測金標準片費米能階確定能量解析度, 小圖為 TPS 09A2 聚焦光點 < 10 X 10 μm²。(TPS 09A2 因未裝置此能量區段之高解析分光晶體, 待實驗站轉移至 TPS 47A 光束線後預估能量解析將優於 300 meV)。



圖三 臨場 HAXPERS 測試, 外加電場參數依序為 0V - 1V - 0V, 樣品中 Si 1s 核心能階隨著外加電場偏移。(小圖為實驗配置)

TPS 高亮度的優點可以成功克服高能量 X 光對於探測材料的光電子作用面積隨能量上升而減小, 因而導致訊號過小的問題, 例如圖二中, 使用 8 keV 光源量測之光電子作用面積約僅有使用 5.4 keV 光源的 1/10。然而 TPS 高亮度光源彌補了此一缺失, 進而實現了高元素靈敏度和高樣品探測深度的特性, 使 HAX-PES 成為非破壞性測量的理想技術之一, 充分符合奈米尺度半導體元件量測的需求。未來, 期望此技術能在

更廣泛的應用領域中發揮作用, 特別是在材料科學、能源材料、電子元件及量子材料的研究中。同時進一步拓展 HAX-PES 應用技術, 以探索更複雜材料系統的化學組態和電子結構, 為半導體研究的創新與發展提供強有力的支持。

參考文獻

1. C. S. Fadley, in *Hard X-ray Photoelectron Spectroscopy (HAXPES)*, ed. J. Woicik, (Springer, Cham, 2016).
2. A. Ohta *et al.*, *Microelectron. Eng.* **178**, 80 (2017)
3. T. Szyjka *et al.*, *Phys. Status Solidi RRL* **15**, 2100027 (2021).



16th International Particle Accelerator Conference
TAIPEI, TAIWAN
1-6 June 2025



毫米波地熱鑽探計畫 (下)

張嘉君博士 / 歐懿中博士
國家同步輻射研究中心高頻小組

編者按：上一期簡訊中已介紹運用加速器毫米波技術來進行地熱鑽探計畫，說明台灣地熱優勢和傳統開採方法，本期接續介紹運用毫米波鑽探技術的優勢與挑戰。

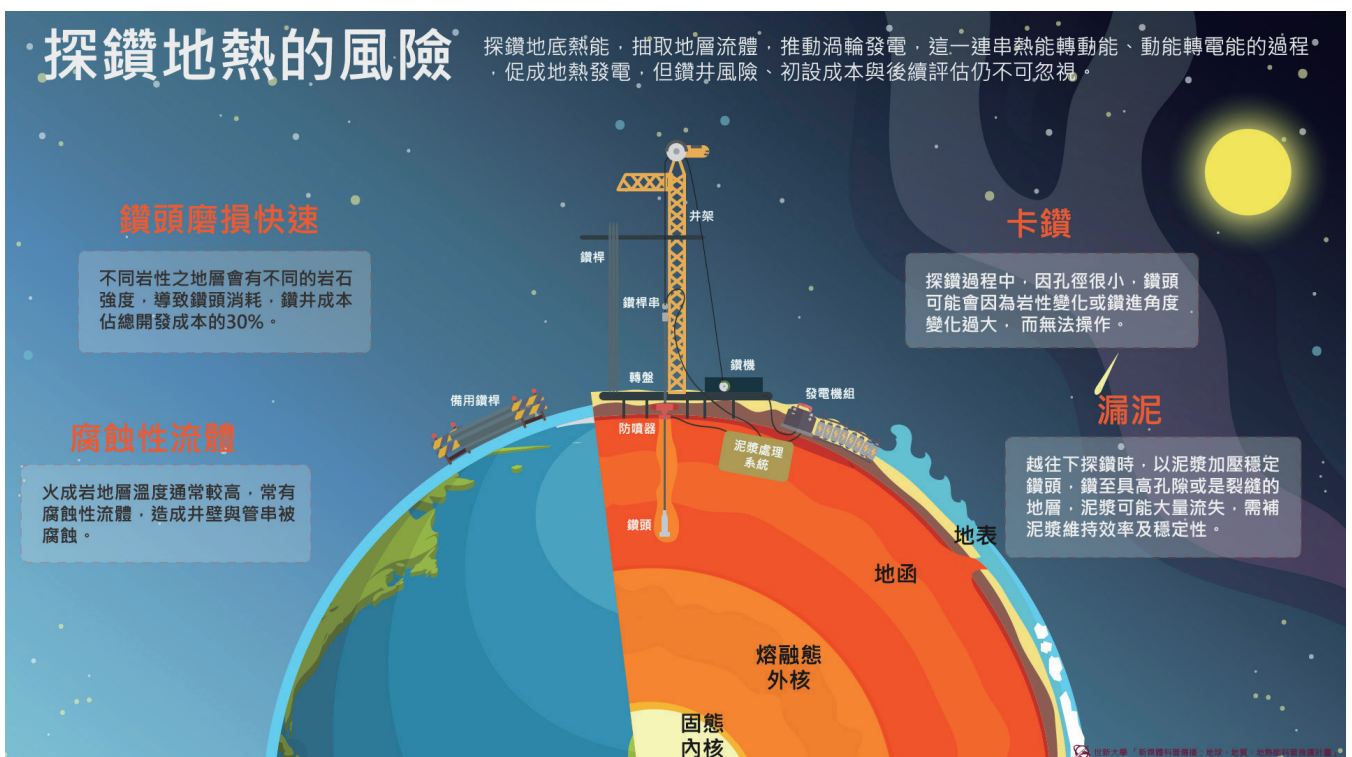
毫米波鑽探地熱深井的優勢與挑戰

毫米波鑽探技術的原理在於它藉由能量（高功率毫米波）與物質（岩石）的交互作用，取代鑽頭和井內的監控裝置等，因此避免了機械鑽鑿的磨損。傳統鑽頭總是和岩石硬碰硬，當遇到高溫高壓、高硬度岩層、酸性地下水等險峻的地質環境時，器械和設備經常磨損不斷甚至腐蝕，有時還因此中斷工作徒增成本，如圖一所示 [1]。相較之下，毫米波藉由直接加熱並氣化岩石的方式將其結構破壞，不需接觸岩石就可以往下鑽探。這種非接觸式地移除岩層避免了機具的磨損和經常更換，降低維護成本，進而大幅縮短鑽探時間，提升效率。

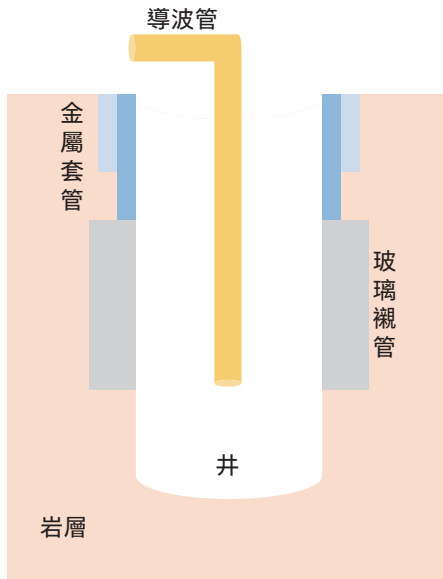
為確保地熱井結構穩固，傳統鑽井技術每鑽進一定深度時，即需要下放金屬套管，以防止井孔因壓力不平衡造成坍塌

或破裂。這項工作不但耗時又繁瑣，還需付出高昂的成本。相對而言，毫米波的技術提供一種更新穎的解決方案。這項技術的構想是利用毫米波將井底的岩石氣化的同時，由地面向井內提供高壓氣體，迫使高溫的岩石氣體滲入周圍岩壁的縫隙中。當周圍的岩壁被高溫岩石氣體入侵後，便會吸收其熱量，隨之逐漸升溫融化，最後冷卻形成玻璃化的結構 [2]。這種結構如同在井壁周圍安裝了一層玻璃製的套管一般，有機會達到維持井孔穩定的效果。這種鑽鑿與固井同步進行的方式將有望顯著提升鑽井效率，將費時費力且耗資甚鉅的下套管工程化為一氣呵成的高效操作（圖二）。

在開採地熱能源的過程中，毫米波技術也展現出它的優勢。由於地層深處的高溫高壓（例如地下 16 公里深處可達 400 °C，壓力可達 392 百萬帕）使水處於超臨界狀態，若將超臨界狀態的水當作工作流體使用，引導到地面成為高焓值的過熱蒸汽，將可以進行高效的電力轉換，類似目前正在使用的渦輪發電機；如果地熱井就在發電廠內，經由適當的改造現有的發電機組和電網，可以節省重建相關設備的費用和時間，避免資源浪費。



圖一 傳統地熱鑽探技術雖十分成熟，但鑽探過程可能遇到的風險和高昂的成本仍不可忽視。[1]



圖二 高功率毫米波束由導波管傳輸至目標岩層後，藉由直接氣化岩石向下鑽探地熱深井，可使用複合式固井方式，即淺層部份使用傳統金屬套管，較深處利用高溫岩石氣體向井壁滲透後形成的玻璃化結構，即為玻璃襯管 (glass liner)。

然而，這項想法目前正面臨一系列嚴峻的技術考驗。首先，毫米波技術對於操作環境的要求十分嚴格，從磁旋管和導波管的設計，到冷卻和熱管理系統，再至井下壓力控制和高溫岩石氣體排開等，每個環節都須精確掌握，才能確保能量得以有效傳遞。若這些高溫岩石氣體未能如預期地清除，可能導致鑽井速率降低；若冷卻系統的設計或操作有誤，或者井孔內壓力失控，導致磁旋管或導波管的毀壞，將損失慘重。此外，自然生成的玻璃襯管在固井上是否真的耐久可靠？厚度和抗壓強度是否足夠？這些都需要仔細計算評估與實驗驗證。另外，製作高功率的磁旋管和導波管所需的資金也相當可觀，這對整體的投資報酬與風險管控無疑是一大挑戰。雖然這項技術在長期運行中有望降低成本，但初期投入的高昂費用仍然是亟需克服的難題。再者，這項技術的應用需要較廣的專業知識和操作經驗，因此對於相關技術人員的培訓和設備操作要求也比較高。

總體而言，毫米波地熱鑽探是一項革新想法，它能藉由提高毫米波的功率密度提升鑽探效率，並應對困難的地質條件。相較於傳統鑽探技術，毫米波技術有機會可以鑽得更快更深，獲取更深處的地熱能源。儘管目前仍有許多山頭需要攻克，但若有更多人力及研究資源投入，這些問題有望逐步解決。

談地熱資源的公平性及全球影響

地熱資源具有全球普適性，無論是先進或發展中國家，其下深處的地層都儲存著源源不絕的熱能。透過毫米波地熱開採技術的引進，即使是天然資源較為匱乏的地區，也有機

會開發過去無法觸及的深層地熱，實現能源自主和經濟發展，進而提升生活和教育水準，為全球能源轉型與永續發展提供新的契機。

參考文獻

1. 世新大學新媒體科普傳播：地球、地質、地熱能科普推廣計畫
2. K. D. Oglesby *et al.*, Impact Technologies LLC (2014).

用戶資訊

實驗計畫申請

- 2025-2 期實驗計畫申請目前審核中
2025 年第二期 (2025 年 7 - 12 月) 實驗計畫申請目前正陸續進行初複審中，核定的光束線排程後續將於 6 月初公告於用戶入口網首頁。
- 2026-1 期實驗申請預告
2026 年第一期 (2026 年 1 - 6 月) 光束線使用預計 2025 年 7 月初開放申請，截止日期為 2025 年 8 月 15 日 (五)，歡迎計畫主持人踴躍上網申請。

近期開放光束線如下

- TPS 09A2 Hard X-ray Photoelectron Spectroscopy for Semiconductor (高能 X 光光電子發射能譜 - 前瞻半導體)
- TPS 15A1 Micro-crystal X-ray Diffraction (微米晶體結構解析)
- TPS 25A2 Coherent Diffraction Imaging (同調 X 光影像)
- TPS 27A1 Soft X-ray Nanoscopy (軟 X 光奈米顯微術)
- TPS 32A1 Tender X-ray Absorption Spectroscopy (柔 X 光吸收光譜)

其他資訊

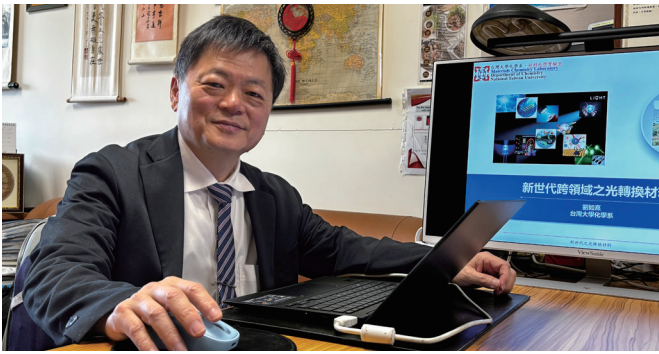
- 實驗排程期間，實驗成員若需住宿本中心宿舍，請完成以下流程：
 1. 計畫主持人須先於「實驗安全核可表」勾選實驗成員。
 2. 住宿者務必於實驗開始 3 個工作日前完成線上預訂，逾期無法受理。
 3. 本中心宿舍申請及使用採實名制。

人物報導

專訪第四屆光環論文獎(應用科學領域)得主-

劉如熹教授

採訪 / 整理 王俊杰、李宛萍、劉振霖



劉如熹教授。

編者按：本屆應用科學領域光環論文獎由臺灣大學化學系劉如熹特聘教授榮獲。劉教授於 1983 年畢業於清華大學原子科學研究所碩士班，隨後於 1990 年取得化學所博士學位，並於 1992 年 6 月獲得英國劍橋大學化學系暨高溫超導中心博士學位。碩士畢業後，劉教授旋即加入工業技術研究院工業材料研究所，服務於該所期間（1983 年至 1995 年），歷任副研究員、研究員、正研究員及主任等職務。自 1995 年 8 月起，任教於臺灣大學化學系，歷經副教授（1995 年 8 月至 1999 年 7 月）、教授（1999 年 8 月至 2016 年 6 月），並自 2016 年 7 月起擔任特聘教授至今。劉教授的研究領域廣泛且具創新性，涵蓋應用於發光二極體的光轉光螢光材料；應用於能源的光轉電水分解材料、燃料電池、鋰離子二次電池與金屬空氣電池；以及應用於生化醫藥的光轉熱與光動力治療奈米材料等。憑藉其卓越的研究成果，劉教授獲獎無數，曾多次榮獲科技部傑出研究獎與教育部學術獎，並入選科睿唯安 (Clarivate Analytics) 跨領域全球高被引學者，深受國際學術界的高度肯定。

請向中心用戶簡單介紹您這次得獎的主題與得獎感言。

多年來，我專注於材料化學核心技術中的「光轉換光」、「光轉換電」及「光轉換熱」的配方設計、合成、分析與應用，這些技術廣泛應用於光電、綠能、生醫與奈米材料等多個產業，並取得多項發明專利與技術轉移成果。本次研究以運用同步輻射光源開發「光轉化近紅外線發光二極體」的成果，從眾多優秀研究論文中脫穎而出，獲得此殊榮。

我要特別感謝同步輻射中心前主任陳建德院士，他將總統科學獎的獎金全數捐贈給同步輻射中心，成立了這個獎項；更要感謝同步輻射中心提供世界級的加速器光源設施，讓我們得以藉由這些資源提升研究水準。此次獲獎實為我們團隊、國外合作夥伴（主要為波蘭格但斯克大學）以及業界

合作夥伴（主要為億光電子）共同努力約 30 年的成果，榮譽應歸屬於所有成員。此外，也要感謝同步輻射中心的工作人員，他們在我們研究過程中提供的協助亦功不可沒。

請介紹此次得獎研究工作的重大突破是哪些具體方面？當初是什麼樣的啟發讓您展開這項研究？

此次獲獎的論文是我和我的研究團隊於 2018 年在 ACS Energy Letters 上發表題為“Super Broadband Near-Infrared Phosphors with High Radiant Flux as Future Light Sources for Spectroscopy Applications”的文章。該研究利用藍色發光二極體 (light-emitting diode, LED) 激發超寬帶之近紅外線螢光粉 [$\text{La}_3\text{Ga}_{5(1-x)}\text{GeO}_{14} : 5x\text{Cr}^{3+}$] 可取得 600 - 1200 nm 之近紅外線光源，而其光譜半高寬高達 330 nm，並達到 18.2 mW 之輻射通量。此輻射通量較鹵鎢燈於該近紅外光區域有較高之放射能量並且省電，改善了傳統紅外線光源僅能發射窄頻寬 (< 50 nm) 近紅外線之缺點。藉由電子順磁共振、同步輻射之 X 光吸收近邊緣結構、穩態光譜以及常壓與高壓環境下之時間分辨光譜分析，研究結果說明超寬的頻寬主要源自於螢光粉 [$\text{La}_3\text{Ga}_{5(1-x)}\text{GeO}_{14} : 5x\text{Cr}^{3+}$] 的不同 Cr^{3+} 發光中心，並利用相應之組態坐標圖 (configurational coordinate diagrams) 探討了發光的機理。此為螢光粉研究領域首次完整揭示如何利用藍光激發螢光粉，來簡易獲得具實用性的高放射強度且具高頻寬之近紅外光光源。此論文發表至今已被引用 370 次以上，成為此領域之經典論文。

早期我們團隊在白光 LED 材料方面建立了相當豐富的開發經驗，由於白光 LED 具有發熱量低、省電、壽命長、反應速度快、體積小、可平面封裝…等優點，已成為現代照明之發展趨勢。現今白光 LED 用於商品化的發光效率已達到 100 lm/W 以上，且由於其特性穩定與高可靠度，已大量商品化，並逐漸取代目前市面上的白熾燈泡及日光燈，成為照明光源的主流之一。白光 LED 亦可應用於顯示器，例如：手機、電視、電腦、電子看板…等。

目前生產白光 LED 主要為利用藍光 LED 配合黃色螢光粉 [YAG (yttrium aluminum garnet; $\text{YAG}:\text{Ce}^{3+}$)] 形成白光。早期白光 LED 的關鍵技術仍源自於藍光 LED 技術，但其中將藍光轉化為白光的重要技術為螢光粉，而這些螢光粉專利權一向掌握在日本日亞化學與豐田合成、美國 GE、歐

洲 OSRAM 等少數廠商手中。這些廠商專利的獨家壟斷，使得白光 LED 的價格與供應完全由其支配，導致急於量產的國內業者進入此產業相當困難。

我們團隊以高溫超導所學之固態材料化學的背景，強調材料的配方與合成、分析及應用之核心技術，並利用專利及論文地圖之研究方法，找出白光 LED 專用螢光粉的特性需求與所面臨的挑戰等重要課題，並摒棄傳統螢光粉開發所採用的 try and error 研究方法，成功合成出白光 LED 專用的高效螢光材料。

我們將白光 LED 相關的豐富開發經驗，應用於近紅外光 LED 的材料開發，成功發展出高頻寬、高亮度的近紅外 LED 光源。近紅外光為波長範圍在 650 - 1400 nm 之電磁波，介於電磁光譜中可見光與紅外光區域之間。近紅外光能無損地穿透人體生物組織，且具有高衰減特性。在區分腫瘤組織以及獲取生物組織資訊方面，人體內有色化合物與組織的特徵吸收或散射特性，為非侵入式無損檢測提供了可能性。此外，近紅外光源還可廣泛應用於食物分析、健康監測、虹膜識別及紅外線攝影…等臨場無損檢測技術中。目前商用紅外線光源主要以鹵鎢燈、發光二極管及雷射為主，但這些光源具有光譜穩定性不佳、發射光譜窄、耗電高、壽命短、且易生成大量熱源…等缺點。

由於食品與人體中的有機元素於藍光與近紅外區域有較寬的吸收與反射，故紅外光源的發射譜應盡可能的寬，所以我們在此研究中取得 600 - 1200 nm 超寬頻寬之近紅外線光源，是本研究的一項最重大的突破。

Q 能否與我們分享此次得獎研究中使用的同步輻射光束線？這些光束線在研究中扮演了哪些角色，具備哪些優勢？

這次獲獎的研究成果主要使用國輻中心 TLS 01C2 X 光粉末繞射光束線，進行合成樣品之純度及結構分析。確認合成樣品為純相後，再進行結構精算，可獲得樣品中各元素之

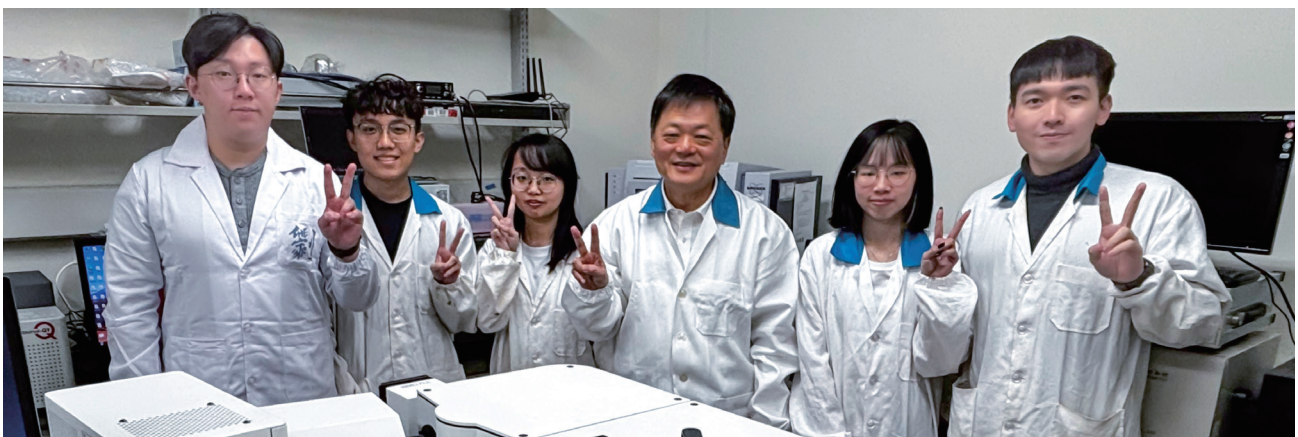
精準位置與分布。本研究利用發光中心取代不同主體晶格之位置，再利用放光中心於不同晶體場放射出不同波長之近紅外線，進而產生寬頻寬之紅外線光譜，我們利用 TLS 01C2 光束線確認了晶體的結構如前所述。此外，我們也使用 TLS 17C1 光束線獲得發光中心 Cr-K 之 X 光吸收近邊緣結構，以探索材料的價態資訊，對於發光中心之發光機制的瞭解提供了關鍵的訊息。

Q 您的研究主題主要聚焦於發光二極體材料及其他先進材料的研究，在應用上展現了多元且明確的方向。當初您選擇這個研究主題時，是先進行基礎研究再推廣應用，還是基於應用需求而投入研究？

我們實驗室成立時即命名為材料化學實驗室，發展策略為「跨領域的應用導向基礎學術研究」，以材料化學基礎研究之核心技術（配方與合成、分析與應用），發展各種具可應用於光轉換為光、光轉換為電與光轉換為熱之相關無機材料，以應用於發光二極體（照明）、水分解產氫及電池（能源）與熱療（生醫）等重要領域。所以，研究選題均以業界之發展需求為導向，若與我們的核心技術符合，再佐以專利及論文地圖擬定研究方向，藉此確立材料化學基礎研究之課題，藉此所獲得的研究成果也相對較容易為產業界所接受。

Q 您當初在工研院服務後，為何沒有投入業界而是轉至學術界發展，主要的原因為何？您是否有一些建議可以分享給正在抉擇方向或剛踏入學術領域的年輕研究者？

這要從我為什麼要來學校任職說起。其中一件有趣的事，由於當初與服務之工研院材料所所長還蠻熟，有天傍晚在中庭碰到他，因為擔任所長在五六百人之上，我就問他：「所長，怎麼看您悶悶不樂啊？」，我那時年紀輕什麼東西都亂問，他說：「今天去進行計畫審查，被審查委員 K 了！」，我說：「誰敢 K 所長？」他說：「教授！」。我就想：本來立志想當所長的，然而當所長還被教授 K！那我得改變一下方向，還是去當教授。另外一個原因因為我碰到當初擔任



劉如熹教授（右三）與其研究團隊。

我們工研院顧問的教授們，因為他們來指導我們，就寫一大堆公式給我們看，我說這麼厲害。後來其中一位顧問就跟我說，你要當教授，自己知識才會提升。為什麼？因為你要教書，自己要真正讀懂內容才能教學生。那我當下就了解當教授可真正提升自己對科學知識之掌握。我就想說有機會就去教書，那一年我只有一篇論文發表，若不趁這個機會出來當教授，就出不來了，因為接下來繼續在工研院工作，就很難有論文發表。當時工研院的經費走一比一的方式，也就是一塊錢來至政府補助，一塊錢就要工業界來，基本上不鼓勵你發表論文，而希望你到外面去找業界合作計畫賺錢。剛好那時臺大化學系要找一個老師，可做材料化學研究又可教無機化學相關課程。我就跟我太太說：「這好像是找我的？」，結果果然是我很幸運被甄選上。然後，既然當教授了，我最不喜歡的就是做一成不變的研究工作，我喜歡做完研發，接下去就給別人去接手，這樣自己又可做新的研發。若是要開一家公司，就要將產品從小做到大、大到可以量產、量產至價格降低，最後才可以賺錢，非常辛苦。我覺得我的個性好像不適合，我比較適合的是做研發性質的工作，我就是發展材料製作技術，然後把它技轉給別人，之後自己再做新的研發工作。

至於對新進研究人員的建議，首先應確立基礎研究之核心技术，再根據此核心技术找出相關之應用領域。再由相關之應用領域與其核心技术相符者，依據專利及論文地圖擬定研究方向，那麼就可以確立容易為產業界所接受研究課題，既可發行專利，也可以發表學術論文。

Q 您的研究領域相當廣泛，並且在學生人才培育上投入了不少心力。能否談談您如何引導研究生進行研究以取得重要成果？又是如何培養學生從事研究工作的能力與熱情？

為了將實驗室管理的經驗與方法與更多人分享，在化學學會的協助下，我在 2024 年 12 月出版了《高效率實驗室管理術》一書。本書是一部實驗室管理的實用指南，深入探討如何打造一個高效、創新且可持續發展的實驗室，並對研究管理與行政管理這兩大核心領域進行了詳細剖析。它不僅有助於指導研究生取得重要研究成果，還能有效培養學生從事研究工作的能力與熱情。這本書的主要內容涵蓋研究管理、團隊建設、行政管理、安全保障及跨領域合作等方面，為實驗室管理者提供了寶貴的理论基礎與實務策略。通過這些方法，更期望能藉此提升團隊協作能力與研究效率，並激發創新活力。

常常有人問我，研究工作這麼忙碌，還要帶領眾多學生進行研究取得重要成果，該怎樣才能辦到呢？我將實驗室依研究特性分為二大組，二大組中再細分三小組，由其中的學生擔任大組長和小組長，大小組長各自分層負責，每周、每月定期聚會報告每周工作事項與研究進度。我常跟學生說「No pain, No gain」，但同樣的「No gain 也 No pain」，在團隊的研究生活雖然辛苦，但曾有畢業的學生回來時跟我說，怎麼他去上班後寫的周報告跟在實驗室寫得差不多？其實，學生在實驗室的組織化架構、分層管理和進度追蹤的訓練，就是在培養同學們這套學習的歷程。

會議 / 課程

- 第十六屆國際粒子加速器研討會 (IPAC'25)
(6月1日至6日)
- 2025 先進光源暑期科學實習
(7月7日至8月5日)
- 2025 年全場式紅外影像顯微術訓練課程 (7月10日至11日)
- 2025 年薄膜 X 光散射訓練課程
(8月13日至15日)
- 2025 蛋白質結晶學訓練課程
(8月18日至29日)
- X 光暑期學校 (8月18日至21日)
- 2025 年 X 光吸收光譜暑期訓練營
(8月20日)
- 第三十一屆用戶年會暨研討會
(9月2日至4日)
- TPS Open House (11月2日)
- The Asian Crystallographic Association (AsCA) 2025
(12月1日至5日)



※ 上述資訊僅供參考，請以網頁正式公告為主。

發行人 / 徐嘉鴻
 總編輯 / 王俊杰
 編輯委員 / 康敦彥 王嘉興 林彥谷 鄭澄懋 劉振霖
 鍾廷翊 鄧碧雲 蘇慧容
 執行編輯 / 李宛萍

國家同步輻射研究中心 版權所有
 National Synchrotron Radiation Research Center
 300092 新竹市東區新安路101號
 TEL: +886-3-578-0281 FAX: +886-3-578-9816
<https://www.nsrrc.org.tw>