

一個分子也能當電晶體？

陳俊顯挑戰電子元件的終極極限

文字／鸞九辰 圖片提供／陳俊顯

電子

子元件微縮的脚步正以驚人速度推進，摩爾定律的預言讓智慧型手機擁有超越昔日超級電腦的運算能力。早在

這場微型化競賽逼近物理極限之前的一九七四年，馬克·A·拉特納（Mark A. Ratner）提出理論構想，開始探索終極邊界：能否用「單一分子」打造功能完整的電子元件？第六十八屆學術獎得主、臺灣大學化學系特聘教授陳俊顯，正是投身「單分子電子學」前沿領域的頂尖科學家，他帶領團隊測量並嘗試控制單分子的導電特性，以期揭露在奈米世界電子傳輸的謎團。

半導體的「不完美」， 催生單分子電子學誕生

單分子電子學屬於當前發展中的量子力學傳輸領域，陳俊顯為國內少數研究單分子電性量測實驗科學家。

「單分子電子學的發想之一，源自於矽晶半導體製程中的差異性。」陳俊顯進一步詳述，傳統半導體元件在製造過程中，無論薄膜厚度或元素摻雜含量，都難免存在微小差異，導致每個元件的效能不盡相同；相較之下，化學家能合成、分離、純

化出結構完全一致的有機分子，從而實現元件均一性，不僅簡化製造流程，更可將電子元件微縮至終極的原子尺度。

理想很豐滿，現實很骨感。研究人員很快發現，即使分子本身完全相同，其導電性卻是動態變化的過程，分子的拉伸、鍵長鍵角的振動、扭曲，甚至是與兩端電極的接觸狀態，都會影響電子傳輸效率，使得量測、歸納、預測與控制單一分子電性成為極具挑戰性的任務。

「過去的研究，多聚焦於設計不同結構的分子，以調控其軌域能階來改變導電性；但我們發現，若分子與電極接觸點不佳，即使分子本身具有優良的元件潛力，整體的元件表現仍會不如預期。」陳俊顯透露，這個發現讓團隊的研究焦點從「分子設計」擴展至電極材料的界面科學，更因此開創出「雙金屬電極」的概念與理論模型。

為金電極換「外衣」， 雙金屬電極讓導電值狂飆六十倍

以往，為求實驗便利，多數研究者都會選擇性質柔軟、化學

陳俊顯

數學及自然科學領域 第六十八屆學術獎

臺灣大學化學系特聘教授



穩定且易操作的「金」作為電極材料；但陳俊顯因為意識到，分子與電極的「接觸界面」極為重要，進而開發出革命性方法：在金電極表面運用「低電位沉積」（Underpotential Deposition, UPD）電化學技術，為金電極換上其他種類金屬的「外衣」（修飾），而且這件外衣「僅有單一原子層厚度」。

這種「換外衣」方式的精妙處，在於能巧妙將第二種金屬獨特的「電子結構」引入單分子元件系統，因而提高電子傳輸效率與導電值。

他進一步闡明，「低電位沉積」是利用原子間的「相互喜歡程度」。以銀鍍金為例，銀離子還原沉積在金表面比沉積於銀表面的所需還原能量更少（低電位），彷彿銀原子更喜歡黏在金基底上，優先占滿所有裸露的金表面。但這種低電位的「優惠待遇」只發生在第一層；一旦金表面被一層銀原子完整鋪滿，後續的銀離子便不再享有此優惠，沉積自然而然停在一層，唯有調到更強的還原電位，才會開始沉積其他厚度的銀膜。

「實驗證實，使用雙金屬電極（bimetallic electrodes）後，單分子導電值較傳統純金電極提升四十至六十倍。」陳俊顯表示，該成果發表於《自然材料科學》（Nature Materials），為單分子電子學的界面設計開創全新方向，迄今已成功嘗試鐵、鈷、鎳、鈀、鉑、銅、銀、鉛、鋁等九種金屬原子，讓團隊對電極修飾所帶來的界面效應有了更深入的了解。

如何探測微觀世界， 從STM到AFM的量測技術演進

理解陳俊顯團隊如何率先開發「雙金屬電極」嶄新架構後，下一個問題便是：他們如何在如此微小的尺度上進行有效量測？

探測微觀世界，一般都會使用掃描式探針顯微術（Scanning Probe Microscopy, SPM），即利用極其尖銳的探針，猶如唱片機的唱針般，在樣品表面掃描，藉由測量探針與樣品間的微小作用力來繪製高解析度影像，最具代表性的就是「掃描隧道顯微術」（Scanning Tunneling Microscope, STM）。

但研究單分子接點與分子——電極界面導電效果時，科學家普遍使用斷裂接合法（break junction），如「掃描隧道顯微術斷裂接合法」（STM-BJ）是讓極細的金針，反覆地撞入電極表面後再迅速拉開，寄望在金電極斷裂的瞬間，捕捉到單一分子恰好橋接於縫隙中，便能透過量測流經的微弱電流訊號推斷分子的導電特性。

陳俊顯無奈地說：「若使用斷裂接合法，會損毀我們在電極表面上精心鋪設的單層原子（外衣），使其無法應用於更進階的界面研究。」為此，團隊導入整合「虛擬實境」（Virtual Reality）力回饋系統的原子力顯微鏡（Atomic Force Microscope, AFM），讓實驗操作者能感受到探針末端與分子間的微作用力，



從而控制力道來「黏住」單一分子，以溫和、非破壞性的方式進行觀測。

用影像「看見」反芳香性分子的3D奇蹟

從溶液相製備分子膜，在原子與分子尺度解析影響分子排列堆疊的微弱作用，陳俊顯堪稱是全球領先研究者之一，這點從他與日本九州大學清水宗治（Soji Shimizu）教授攜手解開特殊「反芳香性分子」三維堆疊結構之謎，並負責量測與界面結構解析的國際合作可見一斑。

陳俊顯分享，臺灣團隊在該次合作運用STM技術，首度於液固界面以高解析影像方式說明，反芳香性分子如何自發性組裝成高度有序的單層薄膜，甚至形成立體堆疊結構。

別小看這項臺日合作的實驗與觀察，因為「反芳香性分子」形成的有機薄膜說不定有機會發展出全新的電子或光學特性，為開發新材料帶來莫大的啟發。

回歸基礎，
才能放眼未來

面對站在科學前沿的研究者，總會忍不住問：「您的研究，將對未來產生什麼影響？」我們期待一個宏偉的藍圖或是革命性的技術，但陳俊顯卻認為：「在真正掌握單分子量子傳輸機

制之前，預測遙遠的產業應用還為時過早。」他比喻，以前沒人知道「半導體」最終能做成什麼，當時人們只是出於好奇心去研究，直到投入數十年徹底搞懂其特性並學會如何控制，數位革命才就此展開。

因此，陳俊顯想傳遞給年輕學子的心得是，「所有事情都應從最基本的定義開始。如果每個名詞的定義都清楚了，後面的事就比較容易掌握；尤其念化學的人，本應從原子與分子最根本的尺度來理解這個領域。」

