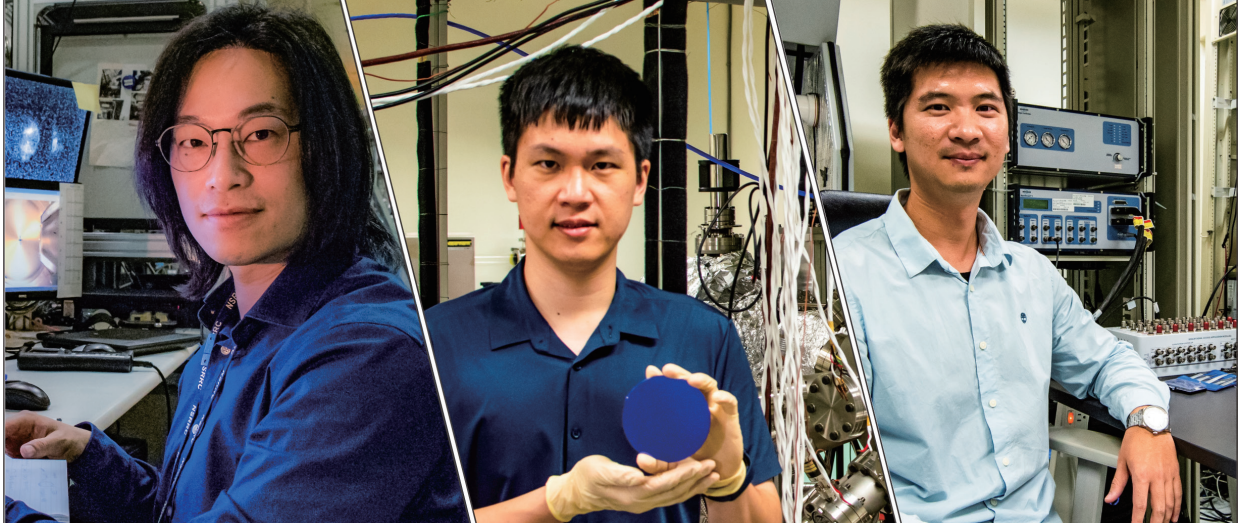


會記憶的「原子層」薄膜：石墨烯上的二維鐵電六方氮化硼

吳忠霖教授
成功大學物理系



此研究由跨領域研究團隊合作完成。(由左至右：翁聖翔、林臻佑、何勝竹。)

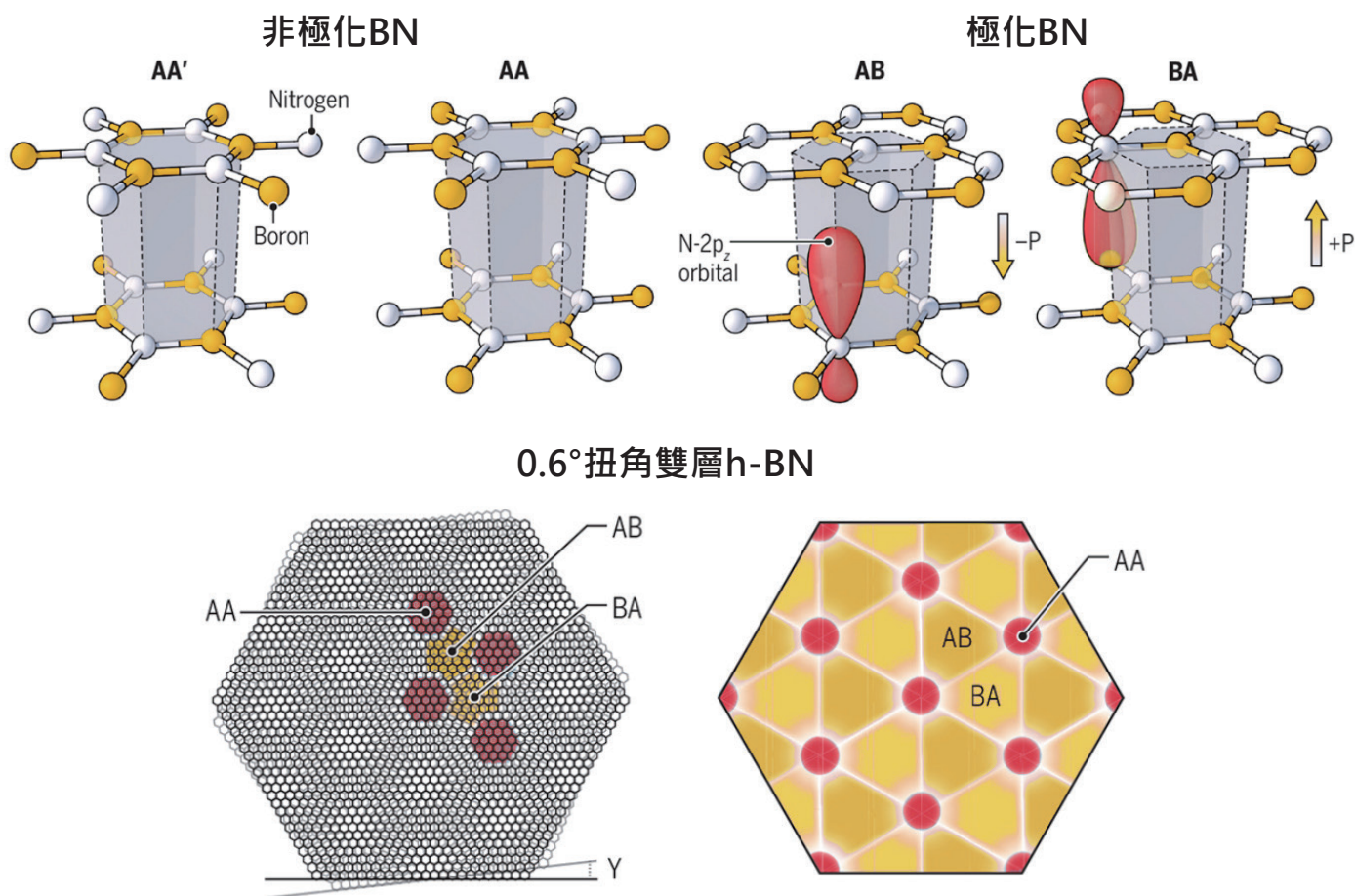
在智慧裝置、雲端與 AI 算力愈來愈龐大的今天，晶片面臨的最大壓力之一，是如何在更小的體積、以更低能耗，可靠地儲存與切換數位資料。所謂「鐵電性」，指的是當外加電場改變時，材料內部結構的方向性（極性）也會同步改變；移除電場後，材料仍能保持剛被寫入的狀態。當材料薄到僅有數個原子層時，可以把它想像成幾張透明塑膠片：塑膠片彼此輕輕滑移，層與層的原子對齊狀態亦即堆疊順序就會改變，而薄膜的對齊方向性（極性）也會隨之反轉。這種以「層間滑移」為核心的鐵電切換，不需要原子大幅翻身，而是小幅錯位就能完成；若能穩定、可逆地操控，便能做成更省電、可重複寫入、而且不需長時間通電就能記住資訊的記憶體與感測元件。而二維材料迷人的地方，在於它們既薄又穩定，而電子的傳輸行為就像被限定在一張紙上奔跑，受外界影響時可反應迅速、亦可精細調控。然而，要讓這些天性對稱、平坦的原子級薄膜自發地出現「上下不一樣」的極性，並能在外電場下可靠切換，並不容易。過去的做法，多倚賴把兩片或多片薄層以特定角度「旋扭」起來的人工堆疊 (twisted stacking) (圖一)。這在實驗室裡可行，也幫科學家證實了二維薄膜確實能展現鐵電性，但要做到大面積、一致性，且與晶圓製程相容難度很高，離大規模的應用仍然有差距。

最近，台灣的研究團隊改走一條更接近工業化的途徑：讓原子「在生長時自己排隊」，透過生長在 4° 微斜切碳化矽 (SiC) 基板上的單晶石墨烯 (graphene) 作為成長基礎。

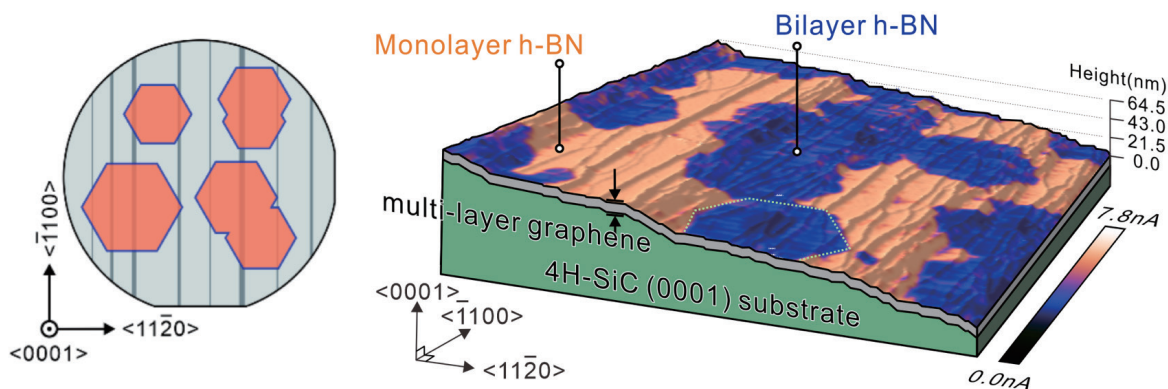
這類微斜切的晶圓表面會天然形成一階一階像跑道邊線的台階，默默地指引上方薄膜的成長方向。研究團隊使用半導體工業熟悉的分子束磊晶 (MBE) 技術，在氮電漿環境下，精準地把硼與氮的原子輸送到石墨烯表面，讓六方氮化硼 (h-BN) 一層一層地堆疊起來。而台階的邊緣位置降低了成長所需能量，使得第一層 h-BN 喜歡「順著台階」成長；後續的每一層又傾向沿著特定相對位置重複排列，如同整隊行進，逐層形成具有方向性的堆疊 (圖二)。這是一條可控條件、可面積放大的磊晶成長路線，從一開始就朝向與晶圓整合相容的目標設計。其中更關鍵的是，h-BN 與石墨烯的晶格長度有微小的差距，這樣的差距會使得兩者在貼合時在界面上出現規律的莫爾 (moiré) 圖案，這不是單純的視覺花紋，而是電荷分布與表面電位高低的奈米級「地形圖」。研究團隊以導電原子力顯微鏡 (c-AFM) 在表面掃描，直接看見這些週期性的起伏，除了證明原子級潔淨界面的存在外，並看見了界面自身的偏向性；這種界面偏向會「推波助瀾」，讓上方 h-BN 在成長時更偏好產生帶極性的堆疊序，為後續的可逆切換奠定基礎。

為了確定二維 h-BN 薄膜確實長成了想要的帶極性堆疊，研究團隊透過「看見」它的電子結構來加以驗證。利用同步輻射光源進行角解析光電子能譜 (ARPES)，這種能譜技術好比替晶體拍攝電子的「能量等高線分佈圖」，與理論計算對照的結果顯示，從單層、雙層到三層的電子能量分布特徵，與帶極性的堆疊情況一一對應 (圖三)；重要的是，這

六方氮化硼(h-BN)中的極化現象



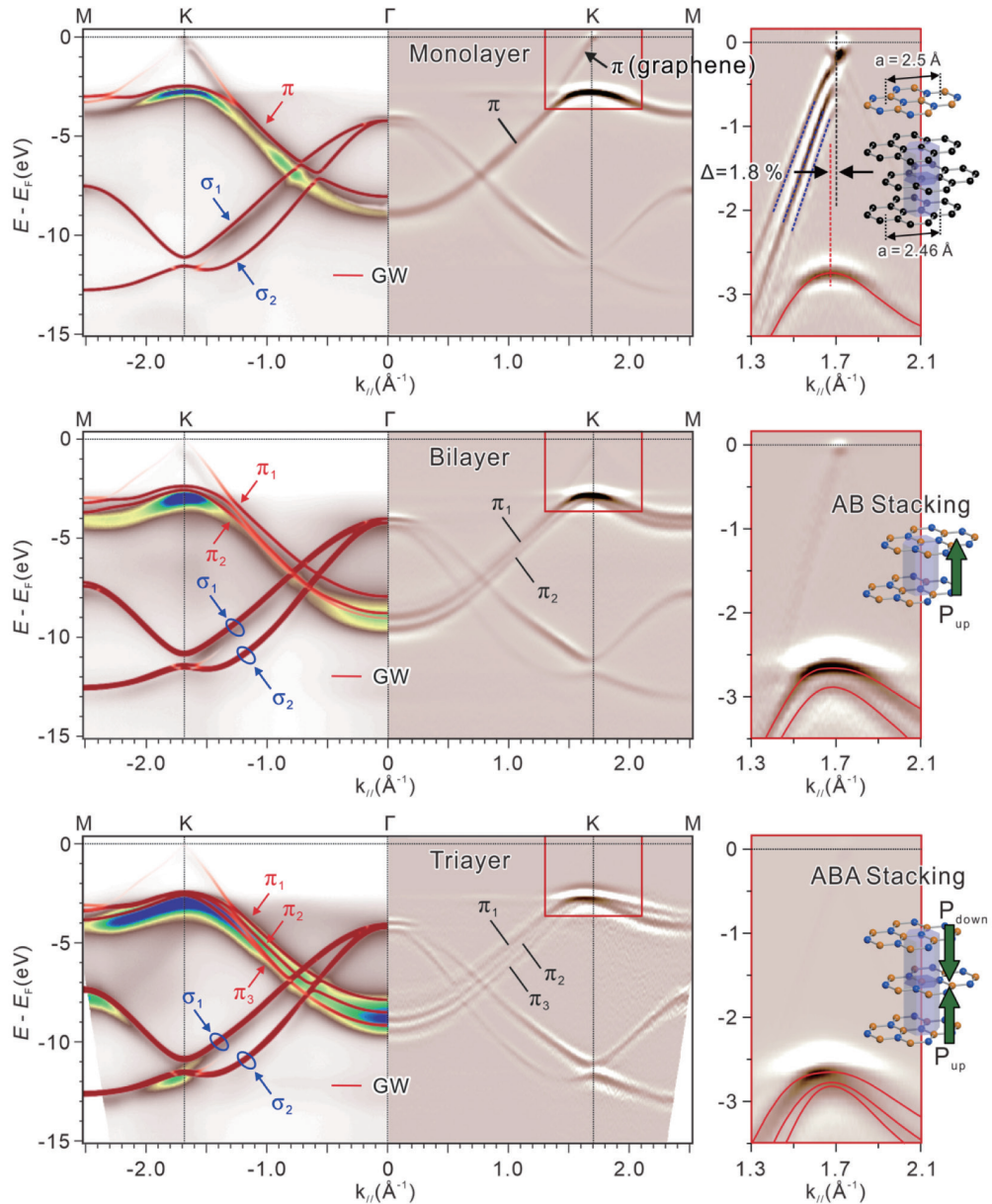
圖一 旋扭雙層 h-BN 的極化場如何來自層間堆疊。上：AA/AA'堆疊為非極性；中：當改為 AB 或 BA，硼與氮的垂直對齊使 N-2p_z 軌域產生垂直方向的偶極場 ($\pm P$)；下：在 0.6° 微扭角雙層 h-BN 中，原子鬆弛形成大片 AB/BA 極性網域，其間由 AA 區域與網域壁分隔。此機制解釋了為何輕微滑移 / 扭角即可觸發 2D 鐵電性 [1]。



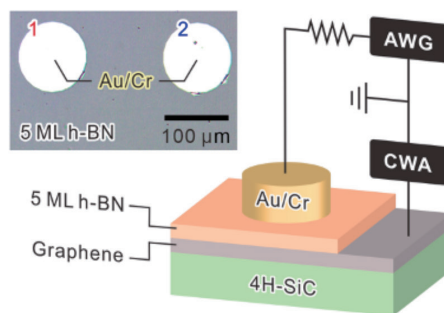
圖二 台階導引的磊晶成長。左圖示意在 4H-SiC(0001) 晶圓上，因微斜切形成的平行台階（灰色條紋）如跑道邊緣，引導 h-BN 六角島（橘色）單向排列；旁註座標軸為晶向標示。右圖為 cAFM 電流－形貌疊圖：在石墨烯／4H-SiC 基板上成長之 h-BN，橘色區為單層、藍色區為雙層，台階導引 h-BN 層層堆疊。

些特徵在大範圍的量測範圍內一致，顯示二維 h-BN 薄膜不是東一塊西一塊的隨機拼貼，而是整片同向、層層均勻堆疊的結構。換句話說，原子不只排隊成功，而且排得很整齊，這對日後製作元件的成效至關重要。接著要回答另一個核心問題：它真的能切換嗎？在奈米尺度上，研究團隊以壓電力顯微鏡 (Piezoresponse Force Microscopy, PFM) 對薄膜施加類似三角形的電壓掃描，觀察其機械回應，量測到典型的「蝴蝶形」壓電反應回饋曲線與 180° 相位翻轉訊號，即為教科書中的極性切換指標 (圖四)。更特別的是，相較一般薄膜所需的切換電壓，驅動只需要大約 ± 1.5 伏特的電壓，顯示在這樣薄的厚度下能有效地以節能的方式驅動切換。此外，為了避免把表面靜電誤認為極化訊號，團隊採用「在零偏壓讀取」與時間相依的凱爾文探針 (Kelvin Probe Force Microscope, KPFM) 顯微鏡檢查，具有不同極性區域的表面電位，兩者之間可量到約 0.3 電子伏特的表面電位差，而且至少能穩定維持一週以上。這說明它不是曇花一現的帶電累積，而是貨真價實、能記住狀態的鐵電切換。

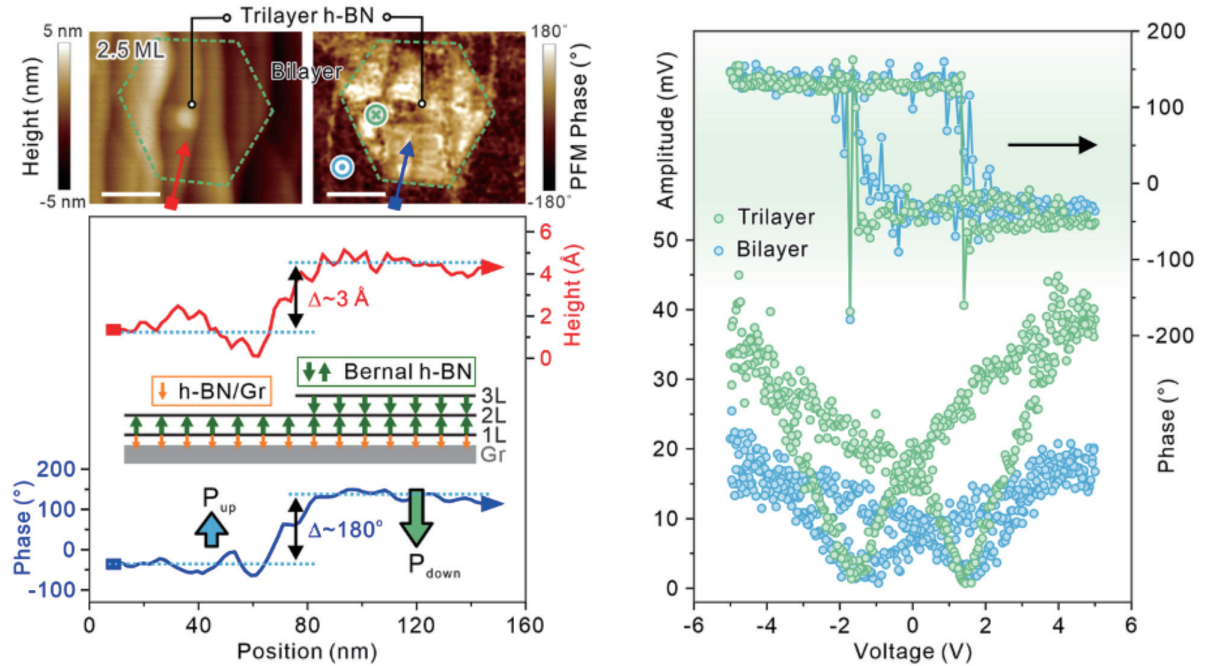
如果僅止於顯微鏡下的現象，離實用仍有距離。由於此二維 h-BN 薄膜具有可成長大面積的優勢，因此極易透過加入表面金屬電極製作成的電容元件來加以驗證。以上電極金屬、下電極石墨烯、與中間 h-BN 層的三明治電容結構進行量測，清楚的展現了極化-電場 (P-E) 的電滯特徵曲線。而這曲線背後的意義，是薄膜不僅能在奈米尺度上被寫入與讀出，更能在元件等級穩定運作，跨過從「現象」到「元件」的門檻，並凸顯了此項成果「從實驗室手工藝走向工業級成長」的能力 (圖五)。實驗室中的手工扭角堆疊像是精緻的工坊製作，雖然漂亮但難以量產；相對地，基板台階導引加上 MBE 的磊晶成長技術，讓參數可追溯、品質可複製，適合與晶圓製程接軌。更重要的是，石墨烯本身就是極佳的導電層，h-BN 又是特殊的鐵電



圖三 與 h-BN 層數相關的能帶結構與極性堆疊印記。灰階為同步輻射 ARPES 量測的不同層數之 h-BN 能帶圖，紅線為 GW 理論計算，右側放大圖對應紅框區域。上排 (單層)：可見 h-BN 的 π 、 σ 能帶，並在 K 點辨識到基板石墨烯的 π 帶。中排 (雙層)：能帶分裂為 π_1/π_2 等特徵，與計算高度吻合。下排 (三層)：出現 $\pi_1/\pi_2/\pi_3$ 等層數相關之能帶結構。整體顯示能帶隨層數與極化堆疊結構的理論計算結果一致。



圖四 h-BN 鐵電元件的極化電滯曲線 (P-E)。左：在 5 層 h-BN/graphene/4H-SiC 上製作的電容元件示意與光學圖，圓形 Au/Cr 金屬電極 (直徑約 $100\ \mu\text{m}$)，石墨烯作下電極；以任意波形產生器 (AWG) 施加電壓，並以電荷積分讀取模組 (CWA) 量測極化電荷。右：兩個相鄰元件的 P-E 曲線 (紅：Device 1；藍：Device 2) 呈現清晰的極化翻轉電滯特徵，殘餘極化約 $0.35\ \mu\text{C}\ \text{cm}^{-2}$ 、切換電壓約 $\pm 6\ \text{V}$ ，證明 5 層 h-BN 具備元件等級、可逆且可重複的鐵電切換行為。



圖五 h-BN 在奈米尺度的極性切換。左：同一區域的 AFM 形貌與 PFM 相位對照。掃描剖面（下顯示對應層數變化高度差約 3 Å，而 PFM 相位在兩域之間翻轉約 180°，分別標記為 P ↑（雙層）／P ↓（三層）。右：雙層（藍）與三層（綠）h-BN 的 PFM 振幅－電壓與相位－電壓曲線，其中雙層與三層皆呈現典型的「蝴蝶形」振幅－電壓振幅曲線與 ±180° 相位翻轉，證明在約 ±1.5 V 即可實現可逆極化切換；三層的訊號幅度較大、切換更明顯。

絕緣與保護層，兩者疊合可作為全二維元件平台的核心「基座」，再往上整合過渡金屬硫化物等半導體層，便能形塑更豐富的電子傳輸或光電功能。想像一下：在同一片基板上，以二維材料堆疊出電晶體、記憶體、光電與感測元件，彼此距離縮到原子尺度，通訊延遲與能量消耗同步下降，這正是下一代低能耗電子元件的藍圖。

透過從二維元件應用的想像，可以更具體地理解鐵電 h-BN 的潛力。對行動裝置與穿戴式系統，非揮發記憶體可減少待機時的能耗；對邊緣運算與物聯網裝置，低寫入電壓與高密度整合可望延長電池續航；對資料中心與 AI 加速器，將「記憶」與「運算」更緊密地擺在一起，甚至用極性狀態做為數位訊號儲存，能降低資料搬運的瓶頸。再往感測與類腦神經計算延伸，極性的多樣態性與可重構性，亦能化作可調靈敏度的感測元件，或能「學習」突觸式元件，讓硬體更聰明地因應環境。然而，從實驗室邁向工業產線，仍有許多工程問題需要逐步攻克。例如，如何在更大面積上維持同向磊晶與均勻層數；如何在頻繁讀寫下延長循環壽命、維持極化保持時間；如何在更低電壓下快速切換，同時把漏電與雜訊壓到更低；如何與既有矽基製程的金屬電極、絕緣層與互連結構相容，而不犧牲二維材料的原子級平整與潔淨，這些課題都有賴台灣在「能做、也能看清楚」的基礎科學研發能量。同步輻射光源提供高亮度、高解析度的探測工具，讓研究者不只在化學成分上描述材料，更能直接讀取電子能帶與界面電位；而各式的顯微鏡技術，則可以把原子位置、成核

路徑與滑移機制一一釐清。從成長到量測、從理論到驗證，這些串接起來的能力，正是把基礎研究成果變身為工程實物的關鍵，也展現出台灣長年布局在材料與加速器科學的集體成果。

總結來說，研究團隊在單晶石墨烯上成長出極性可切換的多層 h-BN，證明二維材料的「層間滑移」可以被工程化、可靠地操控，並以元件形式呈現。它讓二維鐵電從小尺度的物理巧思，透過同步輻射光的引領，轉身為一條可擴充、可整合的技術路徑，為低能耗記憶體與新型二維電子打開新的入口。故事並未結束：更大的面積、更薄的極限、更長的壽命與更快的切換，都在前方等著被一一實現。當原子層之間輕輕錯開的那一瞬間，或許就是下一代資訊科技悄悄改寫能耗與性能邊界的開始。這項研究已發表於《Advanced Materials》[2]，期待它很快能在更多的應用場景中出現。

參考文獻：

1. K. Yasuda *et al.*, *Science* **372**, 1458 (2021).
2. S. S. Wong *et al.*, *Adv. Mater.* **37**, 2414442 (2025).