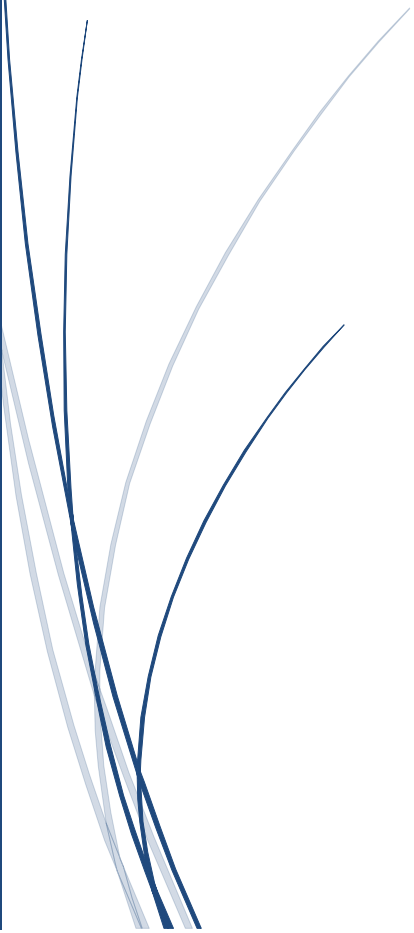


從二維材料技術發展的觀點探討臺灣學研產業之
前瞻發展及 A 世代半導體專案計畫推動歷程研析



國家科學與技術委員會
自然科學及永續研究發展處
郭廷洋 助理研究員

壹、緒論

(一)研究緣起

世界第一款商用微處理器，可追溯自 1971 年由 Intel 所生產的 4004 處理器(如附圖 1)，該處理器僅有 3×4 mm，內有 2300 晶體管，由 10 微米製程生產¹。經過 50 年後的今日，在材料、製造方法、設備以及電路方面經過無數次的創新後，已經抵達了個位數奈米製程，於製程方面已縮小了超過 1000 倍以上，但其中僅有一項東西是不變的：元素矽(Si)。至今為止，矽半導體仍是電子工作的核心，基於矽元素的設備及技術的研發支持了半世紀以來的積體電路和電子技術的進步，更是台灣經濟的支柱與優勢產業之一：根據台灣半導體產業協會統計²顯示 2019 年台灣半導體 IC 業產值達新台幣 2.66 兆元，占台灣 GDP 比重達 15%³。我們在晶圓代工產業產值全球第一，市占率超過七成；IC 設計產業產值全球第二(僅次於美國)，市占率近二成；IC 封測產業產值全球第一，市占率超過五成；全球舉足輕重的台灣半導體產業鏈成為國家經濟與安全的基石。

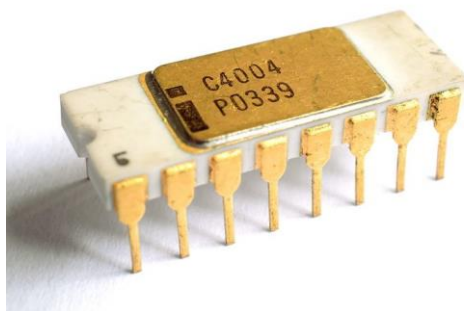


圖 1 英特爾的 4004 為世界上第一顆商用中央處理器晶片(CPU)，圖引用自 wikipedia.com⁴

¹ https://zh.wikipedia.org/zh-tw/Intel_4004

² <https://www.tsia.org.tw>

³ https://www.digitimes.com.tw/tech/dt/n/shwnws.asp?id=0000623216_KF61SEQZ2C3UD95BGSMW0

⁴ https://en.wikipedia.org/wiki/Intel_4004

但是，矽晶片最終會遇到它的極限，而目前電子元件在奈米尺度下，已經逐漸遇到許多微縮製程的困境，包括通道與金屬接觸間的焦耳熱、能量耗損、元件過熱、穿隧漏電效應等都是目前面臨的挑戰。各國產業及專家學者除針對矽的製程極限提出新穎製程架構外，也考慮用使用其他的替代材料，包括鍺和 III-V 族半導體等及一系列其他技術解決方案。

在這一些潛在材料選項，其中一個重要競爭者是低維(包含一維及二維)材料，這些材料包括了奈米碳管(一維系統)、二維系統有石墨烯、二硫化鉬、六方氮化硼等，可以提供一系列的電子特性，從電導體到半導體一直到絕緣體等物理特性。因此可以在電子元件及相關應用中發揮特殊作用，有機會在未來世代成為半導體材料及元件的引領技術。

特別值得一提的是石墨烯所屬的碳材料科學先後在 1996 年以富勒烯 C60 獲得諾貝爾化學獎⁵，在 2010 石墨烯以為二維材料獲得諾貝爾物理學獎⁶。特別是石墨烯材料，由於材料具有相當特別的電性、熱導性、堅韌性及極薄度，國際及台灣各領域的專家學者前撲後繼地開發它的相關應用，例如用在電晶體及積體電路應用、電池電極、能源材料、甚至是生醫應用材料。進行這一些基礎研究的外溢效果也可以帶來後續的研究創新能量。

(二)研究目的

在國家之三、四期前瞻基礎建設計畫之中，提出了重要的半導體技術計畫「Å 世代半導體-前瞻半導體及量子技術研發計畫」，在這個大計畫中的其中一個分項「關鍵材料:挑戰物理極限半導體元件材料」即在對這個前瞻領域進行研發，以開發新穎低維半導體材料技術為目標，將此前瞻領域之關鍵元件技術做為下世代半

⁵ <https://www.nobelprize.org/prizes/chemistry/1996/press-release/>

⁶ <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/2010/press-release/>

導體基礎打底，期能挑戰物理極限的低維材料，為下世代前瞻半導體技術開啟新契機。本自行研究報告即在盤點在國內外於此領域之研究能量，並結合目前國際文獻之重點相關技術報告進行歸納綜整，以做為未來施政及計畫執行之參考。

(三)研究方法與過程

- (1)資料蒐集：透過國科會專題計畫系統、國家圖書館臺灣博碩士論文加值系統、外部資料庫 Scopus (SciVal Dataset)、廣泛取材於國際相關論文文獻系統。
- (2)專家交流：與領域相關之專家學者之演講、座談及會議獲得第一線之研究資訊。
- (3)分析彙整：彙整所獲得之資料進行整理及後續分析，並撰寫研究報告。

貳、 研究議題及學術能量盤點分析

(一)材料背景介紹

低維材料系統包含一維材料系統，奈米碳管也是潛在的電路材料之一，它具有部分的半導體特性，例如 2013 年史丹佛大學 Max Shulaker 研究團隊利用數萬根奈米碳管打造出第一台能執行作業系統、多工運算簡單程式、儲存及輸出結果的奈米碳管電腦⁷，即便具有如此的創新成果，然而截至目前為止奈米碳管電腦受限於材料的本質(同時具金屬及半導體特性，需要進行分離純化、聚集和元件上的置放對齊等等問題)，國際上開發的進展目前較為緩慢，僅有少數學者仍在持續努力⁸。

在二維材料系統方面，在 2004 年分離出石墨烯並測量出其優異高電荷載子遷移率之後，起初大家都認為石墨烯就是下世代的解答了，但是石墨烯缺少一個製造半導體設備的關鍵：能隙(band gap)，研究人員開始著手研究將這個零能隙的材料轉變成半導體，從而做為電晶體中的通道材料，例如將其塑造成奈米帶或是應用垂直電場等方式改變能隙，但最終的種種結果說明修改石墨烯讓其具能隙是極具挑戰性的困難任務。於 2011 年發表在 Nature Nanotechnology 《自然奈米技術》的論文探討了以帶有能隙的二維材料做為通道材料⁹，使用二硫化鉬(MoS₂)完成了第一個二維電晶體，這篇劃時代的論文了解決了許多技術難題：例如說找到合適的接觸材料、在敏感的二維通道上覆蓋一層氧化鈣(HfO₂)保護不受空氣和濕氣等雜質的影響等等技術層面的改善，最終顯示出高開/關電流比(超過 1×10⁸)和非常低的洩漏電流，證明了用石墨烯以外的二維材料製造高品質的電晶體的可行性。

⁷ Shulaker, Max M., et al. "Carbon nanotube computer." Nature 501.7468 (2013): 526-530.

⁸ Franklin, Aaron D., Mark C. Hersam, and H-S. Philip Wong. "Carbon nanotube transistors: Making electronics from molecules." Science 378.6621 (2022): 726-732.

⁹ Radisavljevic, Branimir, et al. "Single-layer MoS₂ transistors." Nature nanotechnology 6.3 (2011): 147-150.

二維材料由於其晶格幾何形狀，即使在單原子層厚度下也能保持高晶體品質。這一在材料本質上的優勢確保了僅有少量的缺陷，因此在具有低於一奈米通道厚度的電晶體中電子的流動可以更快。相較於目前塊材(三維)材料半導體，如矽、鎘和 III-V 族材料，在厚度減少到幾個奈米時，其表面和內部的不完善性質大幅增加而造成缺陷，這些缺陷阻礙了電子的移動，減少了電流驅動並減慢了電路的速度。另一個二維材料的關鍵優點是其低溫製程，這將使得在同一晶片上的三維積體電路的組成成為可能，進而提高元件的密度。

發展至今，一系列的二維材料已經被測試為電晶體和其他元件的通道材料，但它們的應用在實驗室以外的運用仍然非常有限，而且大多數的研究工作都仍然是探索性質的，然而在目前的開發研究顯示出二維材料的應用層面相當廣泛，從基本邏輯到微處理器，從射頻電路到光電子電路，二維材料有可能推動電子工業的未來創新，但最重要的關鍵是開發出與工作相容的合成及製造方法，進一步規模化及量化。目前包含世界上最大的半導體公司之一-台灣積體電路製造股份有限公司，也正在為二維材料的潛在用途投入大量的研究資源，這也是台灣及國際上學術界及產業界可以攜手合作的地方，同樣也是自然處提出並執行「Å 世代半導體-前瞻半導體及量子技術研發計畫」的初衷，透過跨領域合作，整合涵蓋物理、化學、材料、微電子、儀器技術等不同領域的研究人才，進而開發具有商業競爭性的前瞻材料元件及相關技術，推動下世代的電子工業創新。

(二)國內研究盤點

國內研究低維度材料系統的學者與團隊在現今國科會及過去的科技部的長期支持下，不僅人數眾多而研究成果亦相當傑出。以「二維材料」做為論文關鍵字，截至 2022 年為止國內已至少超過 926 位碩博士發表過碩士或博士論文，以台灣的學術人口來看，針對此單一課題的開發密度算是具有一定規模及良好的研究量能。下圖 2 是以這些學生之論文所屬領域以及所從事研究的項目之直方圖，圖中顯示出從事二維材料相關研究的論文以物理、電子工程、光電工程及材料背

景最多，約占九成多左右；而近半數的學者研究的標的為石墨烯及二硫化鉬等研究，此一結果應該與近年來奈米科技在台灣及國際研究有多亮點成果、前所述石墨烯獲諾貝爾物理學獎之因，以及二維材料極具發展潛力等前述論點有所關連。

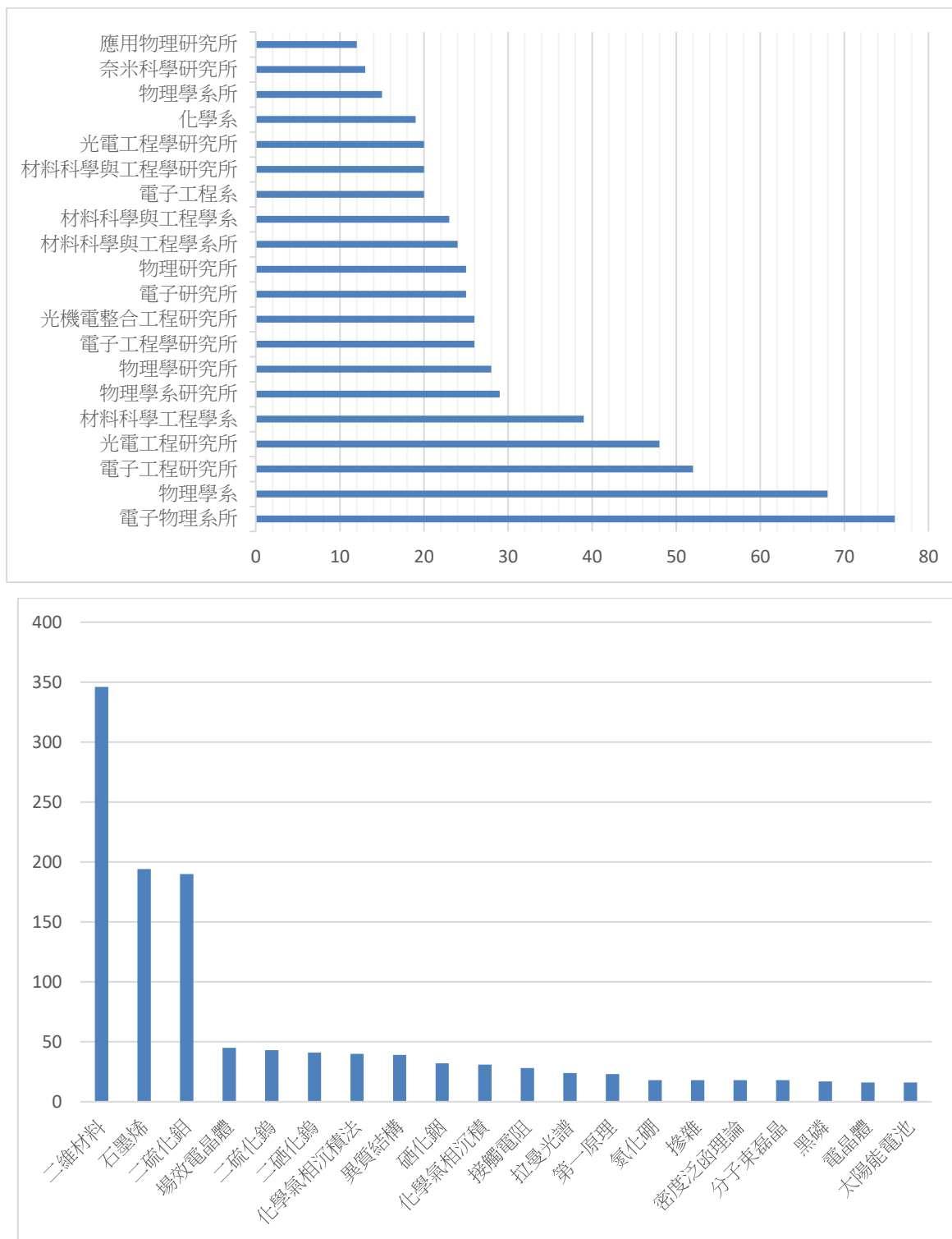


圖 2 以二維材料為關鍵字於台灣碩博士論文網之分析統計。圖 2 上：畢業論文所屬系所之直方圖分析；圖 2 下：所從事研究關鍵字之直方圖分析。

(三)國際研究能量盤點

前一章節之分析報告僅統計了台灣碩博士論文的量，然而在國際上台灣學者的競爭力會是如何呢？於此使用了外部資料庫 Scopus (SciVal Dataset)，並選定了十年區間(2012-2021)，相關統計文體選用 Article 及 Review 文獻，依據本研究題目選定了 Topic cluster 為「Graphene; Carbon Nanotubes; Nanotubes」，此一 topic cluster 包含了 130 個研究主題，從一維材料、二維材料、以及於材料應用、特性分析等均包含在內。

以上述為檢索目標，國際上於此區間共發表了 184,311 篇國際期刊論文(各年度分布如下圖 3)，由各年度分析來看，各年均呈現正成長之趨勢，可見這個領域在國際上仍十分活躍，唯 2019-2021 年成長較為趨緩，但猜想並非領域之關係，而是受限於國際 COVID-19 之疫情影響，學術活動量較為減少之故，預期 2021-2022 年後會回復成長。Field-Weighted Citation Impact (FWCI, 論文相對影響力，即該領域論文平均被引用次數，相較同一年同一領域同一文體的全球平均被引用次數，得出之比值，數值高於 1 表示影響力高於世界平均。)為 1.61，高於國際上以凝態物理、材料、工程、化學的領域論文多了不少，足見此領域仍在國際上據有相當重要性。

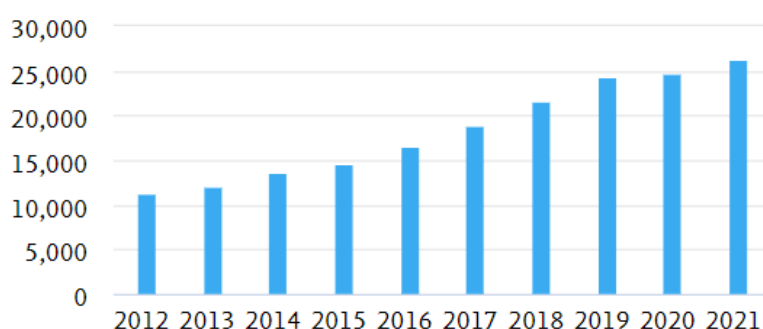


圖 3 自 2012 至 2021 於 Scopus 資料庫中屬低維材料系統之論文其分年發表情形統計。

再將國際論文分布依領域劃分(如下圖 4 所示)，其前五大佔比為材料科學(63.2%)、物理(44.0%)、工程(38%)、化學(33.7%)、化學工程(15.6%)(註：加總超

再深入分析「Graphene; Carbon Nanotubes; Nanotubes」項下的次領域，與本篇研究最有關聯的為「Molybdenum Disulfide; Monolayer; Van Der Waals」之次領域，共有 21,108 篇論文發表，佔了整體研究的 11.5%份額，但 FWCI 相對論文影響力高達 2.11，甚至比原先的主領域還高上不少。

(四)台灣研究能量於國際上之比較分析盤點

在前述 18 萬餘篇國際論文中，在主領域「Graphene; Carbon Nanotubes; Nanotubes」項下台灣學者在此即佔有 3,746 篇論文，FWCI 相對影響力指數為 1.69，稍高於此領域之國際平均，國際上的排序總量約為第 15 名，稍高於台灣的整體科研發展(註：台灣整體論文發表於國際上之指標排序約為 20 名)。

進一步分析次領域「Molybdenum Disulfide; Monolayer; Van Der Waals」，台灣學者於這個項目有驚人的研究成果展現：過去十年中雖僅有 731 篇論文發表，但 FWCI 相對影響力卻高達 3.22，平均每篇論文獲得了 73.69 次引用數。論文總數在世界國家排名中雖佔第 9 位，但若以相對影響力來看發表具有 300 篇以上論文數之國家的話排名第 4 位，僅次於美國、新加坡、瑞士之論文研發強國。

另外值得一提的是，若是以自然處近三年補助之「Å 世代半導體-前瞻半導體及量子技術研發計畫」研發人員來盤點的話，其發表數只有 194 篇論文，但是 FWCI 相對影響力再提升高達 3.83，平均每篇論文獲得 80.76 次引用次數，可以自然處在補助及選題上能夠契合國際的重點趨勢。

(五)研究能量分析小結

在二維材料領域，國內學術界已有非常前瞻的規劃投入以及傑出的表現，值得進一步加強補助及投資，讓半導體產業的面臨極限議題能夠延續其產業創新，將國內學者的心血結晶以及政府科研資源投資轉換成後續的技術應用，即成為 Å 世代半導體專案計畫的主要目的。

參、 前瞻研究與產業合作之契機

二維材料系統非常有可能被用來開發先進的積體電路或是超大型積體電路 (VLSI) 技術，然而儘管有許多文獻報導完成單個晶片及簡單電路的展示報告，而且在部分的條件及狀況下，它的性能還優於矽基積體電路，例如使用石墨烯和 MXenes 等導電二維層狀材料做為元件的互連¹⁰，可以降低電阻和訊號延遲，同時也減少了散熱和避免漏電；使用絕緣的二維材料如六方氮化硼(h-BN)可以減少漏電電流和介面的散射，以及減少場效電晶體的介質被擊穿等等的實際例子¹¹，更值得一提的是國內學者陽明交大張文豪教授與台積電合作發展六方氮化硼於大面積製程也獲刊登於 Nature¹²，亦是當時之技術發展里程碑。但整體而言，在產業界使用二維材料於積體電路或是相關的應用研發仍然是相當有限的，是否可通過異質整合使用於生產線仍有待進一步確認、整合及研發探討，這個目標需要克服多重學術界與工業界的挑戰。在此就以「Å 世代半導體-前瞻半導體及量子技術研發計畫」的產業目標進行研究提議，但在更之前，必需要釐清學術研究及產業應用研究在根本上的差異。

(一) 學術研究及產業研究工作

學術研究和產業之工作具有不同的重點和價值。學術及研究機構的學術研究高度注重「發現」，從根本上說是由人類對未知事物的好奇心所驅動。許多學術研究項目可以純粹基於科學好奇心，暫且可以不需要考慮眼前的應用潛力，或是將應用的成本估算等比重降低其優先度。因此學術界在選擇研究方向時往往有更大

¹⁰ Butler, Sheneve Z., et al. "Progress, challenges, and opportunities in two-dimensional materials beyond graphene." ACS nano 7.4 (2013): 2898-2926.

¹¹ Ji, Yanfeng, et al. "Boron nitride as two dimensional dielectric: Reliability and dielectric breakdown." Applied Physics Letters 108.1 (2016): 012905.

¹² Chen, Tse-An, et al. "Wafer-scale single-crystal hexagonal boron nitride monolayers on Cu (111)." Nature 579.7798 (2020): 219-223.

的靈活性，更強調概念創新和理解的深度。

產業界的研究通常旨在將基礎科學發現轉化為實際應用。世界上一級的企業研究通常擁有廣泛的研究組合，其重要任務是同時展開基礎研究和應用研究，建立一系列的技術選擇選項，推動重要技術的創新。與學術研究相比，產業研究專案往往更注重應用，並與更廣泛的相關行業的需求更緊密地結合，例如半導體產業就需要與上下游的設計、材料供應、機台維護等種種行業進行互動交流。

比較大的差異點還有在產業研究活動也需要解決實際的工程問題，如規模化、可擴展性、可靠性和產量，並進行技術降級選擇，不僅需要考慮技術因素，而且還要考慮成本和相容性因素。而由於缺乏一些必要的大型設施，對客戶需求的理解有限，以及研究重點的不同，這些研究活動通常不會在學術機構進行。

(二) 二維材料在基礎及工程方面的挑戰

「Å 世代半導體-前瞻半導體及量子技術研發計畫」的分項中有關關鍵材料的研發重點為是由學術與產業共同開發大於 4 吋晶圓技術，並考量實際產業面需求，挑戰目標 8-12 吋為產業主導合作開發。在目前的進度中還處在二維材料研究及開發的早期階段，在這一些材料及技術達到工業級應用的標準之前，需要解決非常大量的基礎及工程挑戰。至今盤點技術下來，這些重點研發項目在產業界尚未能規格化及規模化使用，即使在學術領域也是極具競爭及挑戰性，各個國際團隊使用不同的軟硬體技術，於不同的材料條件下進行研發測試。即便是有企圖的想做統整及評比，然而實驗條件、測試材料各不相同，詳細規格並未統一規格化，實在不易以類似單一之成熟製程指標呈現(例如幾吋晶圓，幾奈米製程等)，因此於此建議在各項技術層面上，需要面對未來需求進行完整之綜合考量。

舉二維材料之大面積成長為例，2021 年發表於 Chem. Rev. 之回顧文章提出年份及成長尺寸 X-Y 圖(如下圖 6)，二維半導體材料的成長尺寸，近十年來由微米(μm)尺寸逐步進展至接近釐米(mm)尺寸。在 2020 年最大可達數百微米。實際上，即使某些國際團隊宣稱可以 CVD 方式成長覆蓋 2-4 吋矽晶圓尺寸的材料，其單

晶局區其實僅有數百微米而已。因此除了大面積成長之外，其缺陷密度、單晶面積才是另外重要的參考指標，而這些往往不易一併在相關圖示報告中精確呈現。事實上，在 A 世代半導體計畫執行團隊，同時得兼顧增加“單晶”成長尺寸，並且同時維持超低缺陷密度與單層超薄導電通道等參數，才得以符合後期元件工藝製作之要求。

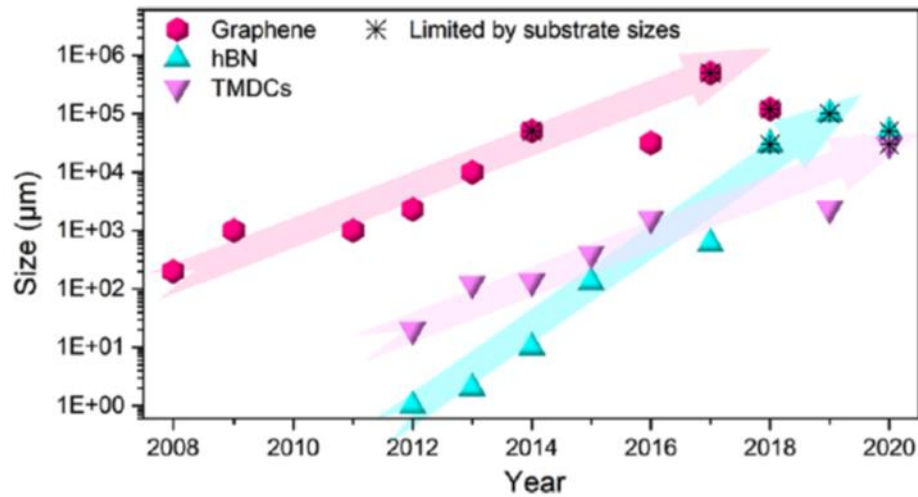


圖 6 二維材料成長及未來趨勢 (圖擷取自 Chem. Rev. 2021, 121, 6321–6372)¹³

另外例如說二維材料的最大挑戰是如何將現有的二維材料與最適合的應用相搭配，直至目前為止包括二硫化鎢和二硫化鉬為電晶體的成為主流材料選項，但若在其他的新型記憶體和感測器設備方面也可能存在其他材料的機會，這包括了幾百種不同的組合型式，每一種搭配都有獨特的電子、光學和機械性能需要探索。解決這一些問題將是個反復而漫長的過程，需要學術界與產業的共同研究與開發。

一般而言可先從建模和模擬的探索先行開始，幫助預測材料和元件的性能，做為眾多選項中的初步篩選，然而論模型通常假設為理想化的材料結構及環境，

¹³ Zhang, Leining, Jichen Dong, and Feng Ding. "Strategies, status, and challenges in wafer scale single crystalline two-dimensional materials synthesis." Chemical reviews 121.11 (2021): 6321-6372.

然而在真實環境中，不僅到內在原子結構晶格的影響，還會受到缺陷、雜質、基材、電介質環境等影響。另一個重要的關鍵挑戰是生產滿足產業標準的高品質及大面積二維材料，目前在二維材料的高品質均勻度和大面積晶圓的產量，以及長時間的可靠性研究都還很有限，第三個大挑戰是因為二維材料的自終結表面幾乎沒有懸空鍵結性，這也帶來了元件工程的新挑戰，需要製造良好的電極接觸及高品質的閘極堆疊等種種工程層面的技術開發。事實上以上這一些研究工作很難在工業界直接完成，需要與學術界的緊密合作才有機會達成。

(三)學術與產業合作有機會開創新局

從「Å 世代半導體-前瞻半導體及量子技術研發計畫」中，目前從學術界確定推動技術發展的關鍵瓶頸，未來這一些受補助之學界將持續在材料、元件和系統平台層面進行研究、開發及評估可行性，以瞭解未來改進的主要障礙，並確定好需要創新研究的材料領域。而後通過學術界及產業的合作實現基於已經完成性能、成本評估及初步可行性研究的候選材料及技術做銜接，進行更大規模的試驗和標準化等工程方面的工作。Å 世代半導體專案計畫可做為推動這個學術界及產業界界面的銜接，將國內學者的傑出研究成果以及政府科研資源投資轉換成下階段半導體世代的產品與技術。

肆、 結論

使用二維材料於電晶體的應用仍需要進行許許多多待解決的工程技術挑戰，而研究前瞻二維材料系統除了發展微電子技術，半導體產業得以受益之外，也會有許多研發外溢效果，例如在次奈米等級之檢測鑑定技術，傳統二維材料石墨烯在熱效率管理、電池電極及導電保護層材料等的應用，更進一步也會有神經計算、進階型感測元件、量子技術、未來互聯技術等方面有潛力發展應用，後續之發展值得國科會持續投資補助。

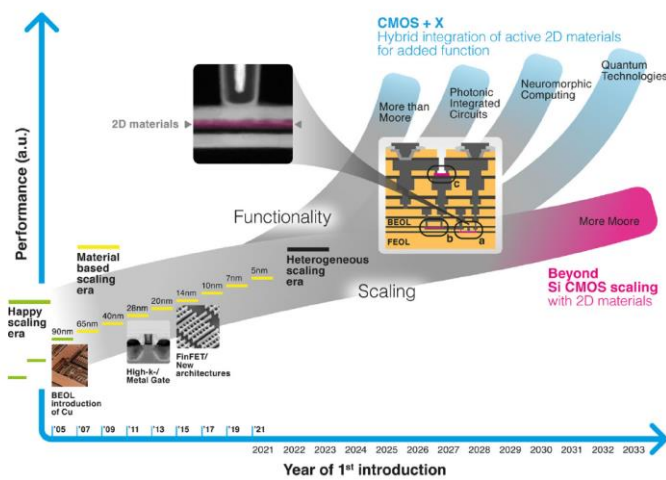


圖 7 矽半導體技術即將遇到瓶頸，後續可能由二維材料產生潛力應用(圖擷取自 Nat Commun 13, 1392 (2022)¹⁴)。

¹⁴ Lemme, Max C., et al. "2D materials for future heterogeneous electronics." Nature Communications 13.1 (2022): 1-5.