



國立清華大學物理系

果尚志 教授

人生就是每個當下加總的結果

Life is Made up of the Sum of Every Moments.

撰文：林麗娥

在本期《科儀新知》245期中，我們以「光學超穎材料／超穎介面及其應用」為專題，帶領讀者探索近年於光電科技領域迅速崛起、並被視為開創次世代光學元件的重要關鍵技術—超穎材料。此領域結合奈米製程、電磁理論與創新光學設計，使人們得以突破傳統材料的限制，實現前所未見的光操控能力。為了讓讀者更全面理解超穎材料的科學突破與未來應用潛力，我們特別邀請國立清華大學物理系的果尚志教授進行深度專訪。果教授不僅長期投入凝態物理、奈米光電與光電材料的跨領域研究，且目前擔任由國科會所指導的跨部會「量子系統推動小組」召集人，在臺灣的量子科技推動與跨領域整合上扮演關鍵角色。果教授的研究跨越不同材料世界，累積了量子科技與超穎材料研究所需的核心知識架構。因此，果教授不僅是本期超穎材料專題的最佳引路人，也是最能帶領讀者理解「材料如何引領科技、科技如何走向量子」的研究者。透過他的視角，我們得以回望材料科技的演進，也得以預見量子光電與超穎光學未來可能的樣貌。

涵蓋半導體、導體、超導體至量子系統的全方位前瞻研究旅程

果教授目前擔任國家量子系統推動小組召集人，並由中研院應科中心張文豪特聘研究員擔任執行長，整合產官學研成立推動小組，期待在臺灣半導體技術的全球領先優勢上，加速量子科技的布局。回顧自己的研究歷程，果教授笑說：「如果用材料的導電特性來做我研究軌跡的分類，恰好是一條從半導體 (semiconductor) 到導體 (conductor) 再到超導體 (superconductor) 的技術演進路徑。英語字義來看，好比交響樂的指揮家，一開始是半吊子的指揮 (semi-conductor)，邊學邊摸索。隨著技術愈磨愈精，逐漸能夠駕馭複雜的音樂舞台，晉升成為真正的指揮家 (conductor)。後來，跨足到超導體研究、自己也夠資深，朝向多功能型指揮家 (super-conductor) 發展」從結果看來，彷彿命運早早替他畫好藍圖，默默把他推向量子系統研究的核心。但實際上不然，他回顧自己求學、研究歷程，一路彎彎曲曲、停停轉轉。無論當下是好或不好的經驗，常常在他研究還是擔任行政管理職時，默默派上用場。當年的徬徨、挫折與努力都不會白走，都成為他後來做研究的底氣與基礎。

赴美攻讀博士，展開「半導體」研究

果教授大學時考上國立陽明交通大學電子物理系後，因家人對未來職涯的期待，在大二時選擇轉入交大電子工程學系。然而他並未因轉系而放棄原本熱愛的物理，反而把電子物理系的課程都修完，同時完成兩個領域的專業訓練。這段跨領域的學習歷程，使他得以在基礎科學理論與工程實務之間建立起堅實穩固的連結。例如，在設計實驗時，他具備電子工程學生常有的系統整合思考，會自己寫程式、會同時考慮儀器配置、電路設計、訊號處理等環節，使整個實驗架構更有效率，也更容易驗證底層的物理假設。

在大學時期完成電子物理與電子工程的跨領域訓練後，果教授前往美國德州大學奧斯汀分校物理系攻讀研究所，展開他在物理領域的探索之旅。然而，他的研究方向並非一開始就十分明確。而是繞過一圈不小的彎路才逐步找出真正适合自己、也最能發揮專長的方向。起初，果教授對高能理論物理十分著迷。著重應用數學來研究特定物理現象，像是粒子物理與宇宙學。後來，他的興趣又轉往數學物理，希望能利用數學方法 (如微分、幾何、拓樸學) 來嚴謹地建構和分析物理理論，兩者都是理論物理的分支。在美國攻讀博士時，一開始都是以理論為主要方向，甚至在博士班資格考時，仍是以理論物理作為考試的主要領域。直到找施至剛教授擔任指導教授時，才開始作實驗。果教授開玩笑表示：「當時施老師還是助理教授，沒有太多學生找他指導，所以可選擇的學生也不多。儘管我那時沒有什麼實驗經驗，施老師還是願意收我當學生，給我轉研究方向的契機。」，在施教授的帶領下，他開始走進結合理論洞察、實驗技術與材料科學的凝態實驗物理世界。當時兩個人年輕又充滿熱情，還一起到美國長島的同步輻射中心 (National Synchrotron Light Source, NSLS) 作實驗，師徒共同打拼、討論作研究。

最終，果教授在凝態實驗物理中找到了真正的歸屬感。這個領域讓他能將本科時兼具的「物理理論」與「工程技術」充分運用，既能以深刻的理論視角理解現象，又能動手設計實驗、親自驗證想法。這種從抽象到具體的完整鏈結，成為他長久以來一直在進行的研究模式。

果教授攻讀博士時，主攻半導體表面科學，奠定了他對材料界面、電子能帶與電荷行為的深刻理解；這些基礎物理正是所有固態元件最根本的語言。1993 年取得博士學位後，即前往日本筑波市 JRCAT 研究機構 (日本通產省十年期奈米科技研究計畫) 及產業技術融合領域研究所任職研究員。1997 年初返台受聘於清華大學物理系任教。回到清大後，他延續半導體材料研究主軸，深入氮化物半導體、光電元件、雷射與 LED 研究。這些技術不僅涉及高品質磊晶、奈米尺度缺陷控制，也需要精準操控電子與光子的相互作用，這些能力後來成為設計量子光源與量子通訊元件的重要基礎。

與指導教授攜手「導體」研究

2010 年前後，果教授的研究開始跨進下一個材料世界：導體 (尤其是金屬奈米材料)。其中，金屬電漿子的核心物理機制是「光致自由電子集體振盪」，讓光波能在奈米尺度被極度壓縮與增強，也讓他從原本控制半導體電子，進一步走向光與電子在極限尺度的耦合。這些金屬電漿子研究，正是後來在電漿子光學 (plasmonics) 中能量侷限、場強放大與非線性效應的基礎。

而這段研究在 2012 年迎來重要里程碑，果教授與國立清華大學材料科學工程學系陳力俊教授、博士班指導老師施至剛教授合作，利用施教授團隊開發的原子級平坦單晶銀膜，解決了多晶銀高損耗的致命缺點，成功打造出全球最小的電漿子奈米雷射 (plasmonic nanolaser)，並首次展現能以連續波運作且具低臨界功率，突破了傳統半導體雷射受限於光學繞射的瓶頸，此研究成果刊登於《Science》、他並於 2013 年榮獲美國物理學會新會士。

長久以來，半導體雷射很難縮小到與電晶體相匹配的奈米尺寸，光學繞射更像一堵牆。但藉由單晶銀低損耗電漿子共振腔結成果教授實驗室發展的 InGaN/GaN 奈米柱增益介質，他們證實了真正能突破三維繞射極限的奈米雷射確實可行。這也開啟了主動式奈米電漿子系統的新方向，為未來在矽晶片上整合電子、光子與奈米光學元件奠定基礎。

而這段金屬與電漿子的研究，不只寫下奈米光電元件的重要紀錄，也成為果教授後來進入量子科技領域的關鍵階段：因為要操控量子態，就必須理解電子、光、能量侷限及材料界面在極端尺度的行為，而這些他都在半導體、導體與電漿子研究中逐步掌握。

邁向「超導體」研究

果教授研究的下一個躍進，是他開始投入超導體材料領域。這一步成為他正式跨入量子科技領域的門檻。因為無論是量子計算或量子感測，主流的高靈敏度元件，像超導量子位元 (qubits)、超導微波腔體和超導量子干涉儀 (superconducting quantum interference devices, SQUID)，全都仰賴超導材料的零電阻、可維持量子相干性等特性。換言之，沒有超導體，就進不去真正可實作的量子電路世界。

因此，果教授從半導體、奈米電漿子、金屬導體材料到超導體的研究路徑，看似跨界，實則是一路向著更低雜訊、更高相干、更能精準控制量子態的方向前進。也正因為掌握不同材料在電子、光子、電漿與量子態的物理行為，才能在量子電腦與量子通訊系統的發展上具備關鍵能力，能同時理解製程、材料、界面物理與量子操作需求，並把這些要素整合成真正可運作的量子元件與系統。

果教授也將這樣研究量能推廣鏈結漢民科技股份有限公司，於今 (2025) 年 11 月成立「漢民－清華聯合研發中心」，組成跨領域研究團隊，聚焦高品質半導體、金屬與超導體異質磊晶結構的開發，應用於次世代光子與電子元件製造及關鍵量子科技。

臺灣半導體製程基礎適合發展超穎材料與量子系統

超穎材料 (metamaterials) 與半導體材料看似分屬光學與電子領域，但它們的基礎科學都源於固態物理。固態物理研究晶體中電子、原子與能帶結構的行為，而這些概念是兩者設計物性的共同語言：都是利用結構去控制傳播。超穎材料主要操控光子、半導體材料主要操控電子。光子屬於玻色子，其行為以電磁波的方式展現；電子則是費米子，遵循不同的量子統計規則。然而，無論是光子或電子，它們在材料中的傳播皆會受到材料週期性結構的影響。半導體透過原子排列形成能帶結構，從而控制電子的流動；超穎材料則是以人造的微結構或奈米結構形成等效的折射率分布結構，用以操控光的路徑與行為。兩者的核心精神都是以固態物理為理論基底，以奈米製程為工具，實現對電子或電磁特性的控制設計。以超穎介面 (metasurface) 為例，它同樣使用半導體材料並仰賴半導體製程技術，在奈米尺度上製作出具高度功能性的超穎鏡頭 (metalens)。臺灣半導體產業具備世界頂尖的製程能力，已經可以做高階奈米的製程；相較之下，超穎介面的典型線寬多落在 100 奈米左右，落在臺灣產業的製程能力範圍。因此，若臺灣半導體業切入超穎介面市場，無論在技術或量產能力上，都擁有相當明顯的優勢。

踏入行政管理職，人生就是每個當下加總的結果

果教授曾先後擔任清大研發長、國家同步輻射研究中心 (國輻中心) 主任、中央研究院應用科學研究中心 (中研院應科中心) 主任等重要職務，在科研管理與組織領導上累積了深厚經驗。他回憶起被時任清大校長陳力俊教授邀請擔任研發長時他才四十多歲。而研發長的工作職掌之一就是學校的研究經費分配，是一門「高難度社交工作」。老師們個個都是一座山頭，一不小心就可能踩雷得罪人。更妙的是，在接下這份重任前，他完全沒有行政歷練，甚至連系主任都沒當過。當時學校有位資深老師跟他開玩笑說：「你可能是校內史上最年輕的研發長，在你當研發長前應該有一半的人不認識你，當完之後或許會有一半的人討厭你。」回想起來，果教授形容自己當年就像行政界菜鳥冒險者，帶著一股出生之犢不畏虎的勇氣，一腳踏進了管理的大舞台。儘管這樣，在清大任職研發長時，也闖出不少成績，像是位於新竹市寶山路上的研發大樓 (清華實驗室) 暨創新育成大樓就是在果教授任內開始規劃興建的，如今吸引很多產業進駐，場地、辦公室進駐滿載。許多年輕教授擔憂擔任行政職可能影響學術發展，果教授直言行政職是不一樣的機會與訓練，對他而言，擔任行政職，研究上儘管發表量減少，但品質上還是可以維持水準。而過去擔任研發長組織領導的經驗也回饋到自身目前擔任召集人和與產業的合作上。他認為在做任何決策時，若能將個人利益排除在外，便能保持更公正客觀，也更容易讓大家心悅誠服。

談到擔任國輻中心主任時，每逢國會審議、預算可能遭砍時，果教授笑說，當時必須定期到立法院接受質詢，並拜訪各委員辦公室，而立委的助理們總會事先做足功課，瞭解來訪者的背景，一查到他曾獲選第 39 屆「十大傑出青年」，態度立刻和緩不少。



果尚志教授當選第 39 屆「十大傑出青年」，其後由時任行政院院長張俊雄親自接見，備受肯定。

分享至此，果教授語氣轉為溫柔且感性：「你完成再多的事，大家也不見得會記得你作了多少事，最後真正在意的也只有你自己。」果教授的感想好比喜劇天王金凱瑞 (Jim Carrey) 曾經說過：「我希望每個人都能變得富有和出名，擁有他們夢寐以求的一切，這樣他們就會明白那些並不是答案。(I hope everybody could get rich and famous and will have everything they ever dreamed of, so they will know that it's not the answer)」也許真正重要的，不只是實現了目標，而是每一個當下怎麼活，在追夢的過程中，是不是自己真覺得值得。長久累積下來，就會成為自己的人生資產。

AI 對研究的影響

談到近年迅速崛起的人工智慧 (artificial intelligence, AI) 技術，果尚志教授坦言，AI 的確能協助人類提升效率、加速研發、改善生活品質，但背後也隱含不可忽視的挑戰。首先，是資料使用的風險。「你把資料上傳，就是在餵養它知識。」果教授提醒。許多人習慣將文件、圖片、甚至技術資料直接投入 AI 工具，而這些資料往往會成為模型訓練的一部分，尤其在撰寫專利、技術報告或商業機密時，更要格外謹慎。寫專利時最好不要用 AI，否則你等於把還沒公開的東西，先免費送給 AI 一份。

另一個讓他憂心的是 AI 的能耗問題。多數人只看到 AI 神奇的回答，卻忽略背後的龐大運算成本。AI 看似虛擬，其實非常耗電，訓練一次大型模型所消耗的能源，足以讓一座小城點亮好一陣子。而與 AI 能耗問題形成對比的是，量子科技的發展反而可能成為節能的新契機。像是傳統超級電腦需要大量重複計算、消耗巨大電力；但量子位元可以同時處理多種狀態，使特定演算法的效率大幅提升。同一件事，如果傳統電腦要跑一年，量子可能幾秒就完成。



果尚志教授(時任清大學研發長)於2013年在日本仙台舉辦的第32屆「東亞研究型大學協會(AEARU)」年會中,發表題為「不受繞射限制的電漿子超穎材料與奈米雷射」(Diffraction-Unlimited Plasmonic Metamaterials and Nanolasers)之專題演講。其研究成果深獲肯定,並由時任日本東北大學校長里見進(Susumu Satomi)(左一)與清華大學校長陳力俊(右一)共同頒授「卓越講座獎」,以表彰果教授在該領域的傑出貢獻。

何謂尚志？仁義而已矣

訪談的最後,果教授分享他名字的「尚志」是《孟子·盡心章句上》中重要的儒家概念,源於孟子與齊國王子墊的對話。

王子墊問曰:「士何事?」孟子曰:「尚志。」曰:「何謂『尚志?』」曰:「仁義而已矣。殺一無罪,非仁也;非其有而取之,非義也。居惡在?仁是也;路惡在?義是也。居仁由義,大人之事備矣。」

主要核心意涵是指士人立身之道,應以「仁義」為志。殺一無辜者,不仁;取非已有者,不義。行事所依,是仁;處世所循,是義。能「居仁由義」,便已具備為大人之道,這也是《孟子》一書和儒家強調的君子立身處世之道。回望自己的研究生涯,在量子科技、超穎材料與跨領域研究快速向前的今日,果教授以他的名字作為其治學處世的註腳。