A man with short dark hair and glasses, wearing a dark suit, white shirt, and dark tie, stands with his arms crossed in front of a dense background of green leaves and small purple flowers. The lighting is soft, highlighting his face and the texture of his suit.

化工 / 材料科技

SCIENCE AND TECHNOLOGY

Chemical Engineering / Material Technology

「一個人的價值，在於他貢獻了什麼，
而不在於他能得到什麼」愛因斯坦

“The value of a man resides in what he gives and
not in what he is capable of receiving.”-Albert Einstein

「施比受更為有福」聖經

“It is more blessed to give than to receive.”
(Bible, Acts 20:35)

Science and Technology

Chemical Engineering / Material Technology

陳智 先生

Chih Chen · 53 歲 (1970 年 1 月)

學歷

美國加州大學洛杉磯分校 (UCLA) 材料系 博士
美國加州大學洛杉磯分校 (UCLA) 材料系 碩士
國立清華大學材料系 學士

現任

國立陽明交通大學 材料科學與工程學系 講座教授

曾任

國立陽明交通大學材料系 主任
國立陽明交通大學 特聘教授
國立陽明交通大學工學院奈米學士班 主任
國立陽明交通大學材料系 教授

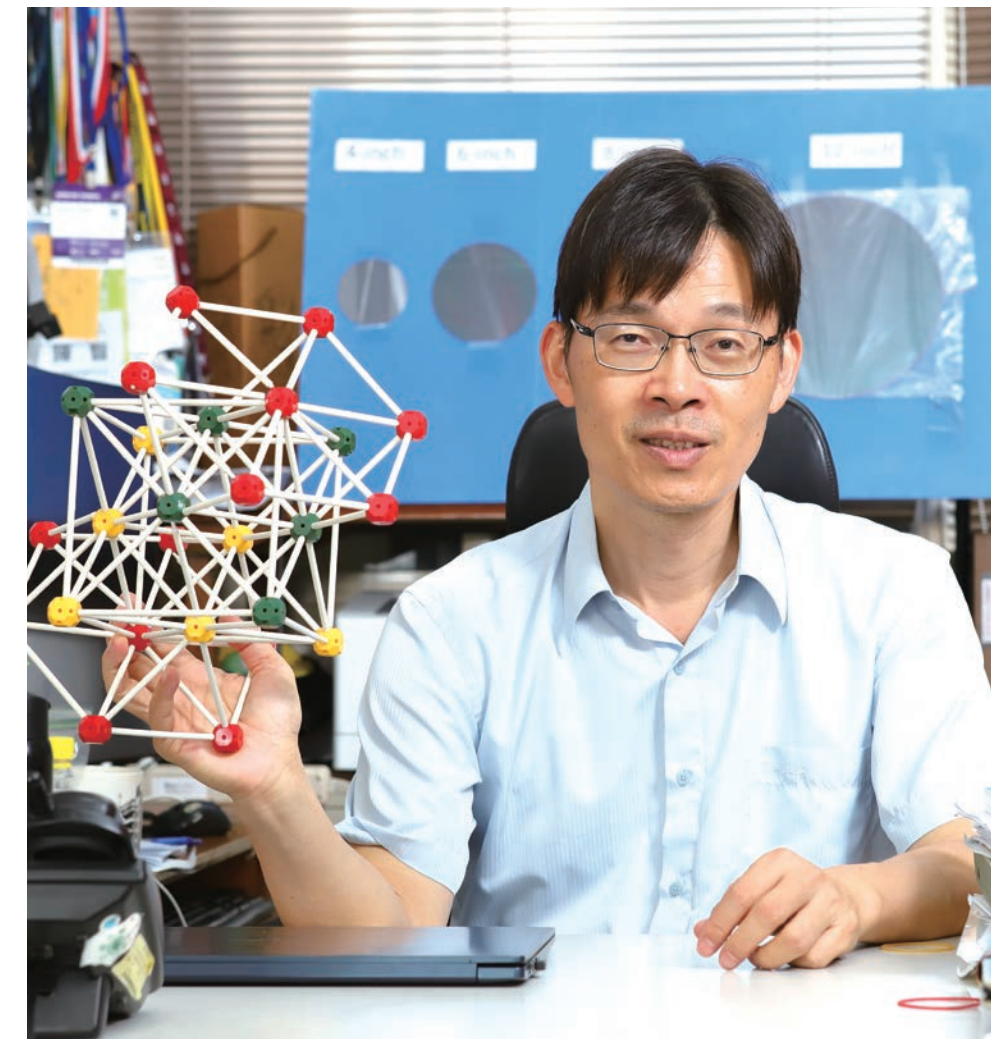
評審評語

致力於先進封裝材料研究，推動銅-銅異質接合，且為電鍍奈米雙晶銅的先驅，在此領域具世界領先地位。研究成果對於全球先進封裝產業，影響深遠，貢獻卓著。

Prof. Chih Chen committed to the research of advanced packaging materials, promoting copper-copper heterogeneous bonding, and being a pioneer in electroplating nano-twin copper. He is a world leader in this field. The research results have far-reaching influence and outstanding contributions to the global advanced packaging industry.

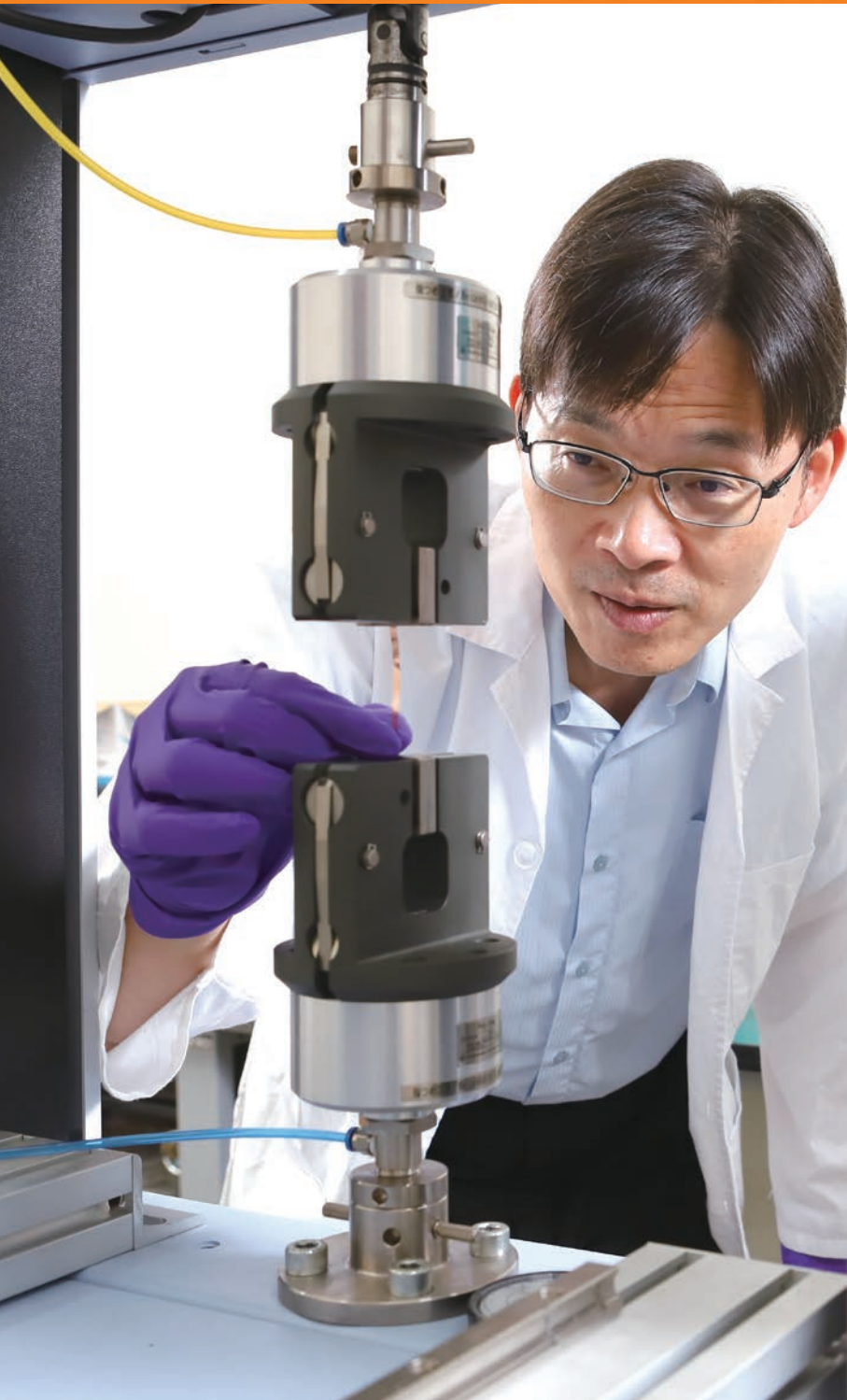
得獎感言

首先謝謝東元基金會的肯定。感謝神的恩典，讓我在祂所創造的材料世界中研究科學與應用。謝謝國科會過去二十二年在經費上的支持。這一路走來，我特別要感謝我的父親陳村及母親歐雲琴對我的栽培，他們在生活上省吃儉用，但就在我大一向他們提出國深造的計畫時，他們毫不猶豫的答應資助我龐大的留學費用，不僅如此，在我成長的過程中更是一直付出關心。我也要感謝我的內人鍾麗珍的鼓勵、體諒、關心與支持，她總是那麼有智慧的提供我許多寶貴的見解及建議，是我在各方面最好的幫手。另外，我也很高興能收到許多很優秀又認真做研究的學生，常常有新的發現，而且讓我覺得與他們討論實驗結果是件很令人興奮的事。也非常感謝我的博士指導教授 UCLA 杜經寧院士，感謝他以身教開啟我對研究的熱忱。最後感謝兩位推薦人：台積電余振華副總與添鴻鍾時俊總經理。



電鍍奈米雙晶銅先驅， 對台灣 IC 封裝的世界領先地位貢獻卓著

採訪撰稿 / 陶曉嫻
攝影 / 欣傳媒



當全球科技經濟政治賽局進入矽時代，晶片島台灣站在關鍵位置上，引以自豪之最，莫過於半導體產業鏈，從上游的 IC 設計與代工、中游的 IC 製造及晶圓製造，到下游的 IC 封裝與測試產業，尤其是高階封裝與異質整合技術，產業規模不只是世界第一，相關技術更是遙遙領先。在世界競逐的舞台上，產業要與競爭夥伴拉開差距，學界的紮實研究是非常重要的基礎。學術生涯聚焦在先進封裝材料研究，推動銅與銅異質接合、研發出電鍍奈米雙晶銅材料的國立陽明交通大學材料科學與工程學系講座教授陳智，回顧 2000 年返台任教時，台灣封裝業雖然是全球規模最大，但在基礎科學和技術研發上卻有隨時可能會被其他國家超車之勢。出身農家的陳智教授，懷抱著促進台灣產業升級的大志，以家傳的勤奮態度，展開長達二十三年研究與教學的長跑生涯。

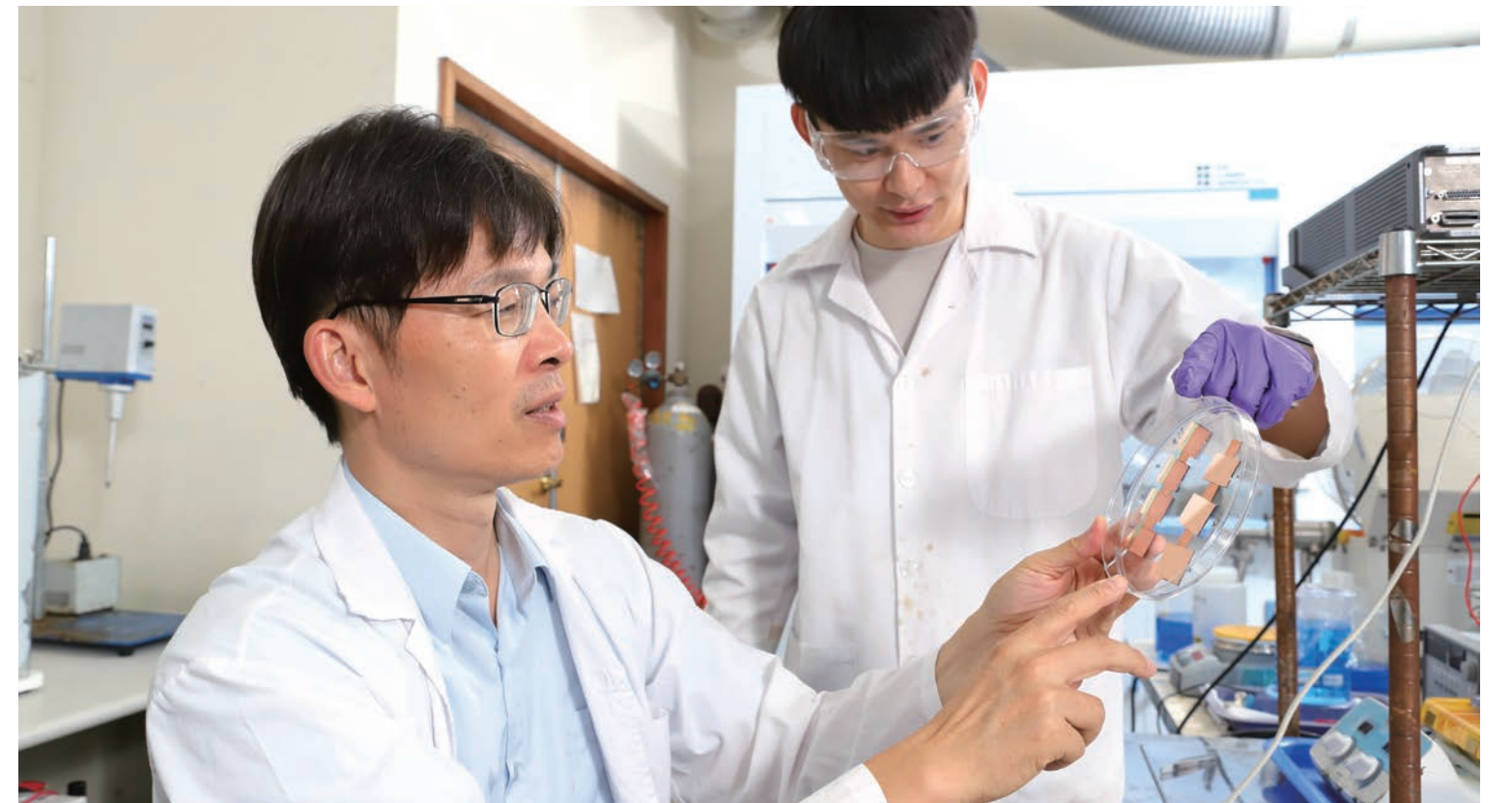
農家生活鍛鍊心志，務農父母恩同再造

陳智是典型的農家子弟，兒時全家住在台中縣大肚鄉頂街村（現海線 1 號省道附近），栽種稻米、西瓜、花生等農作物。當年剛盛行在都市廚房裡的瓦斯爐，在頂街的鄉下，卻是完全沒見過的奢侈品。務農且家裡環境辛苦的孩子走在路上看見樹枝木材，都知道要撿回家當柴燒，煮飯燒水全靠撿來的柴火來勉強湊合。1970 年代農家生活靠天吃飯清苦是日常，因為春末幾天的梅雨、夏秋期間一個又一個的颱風，都有可能摧毀一年的期盼。讀書翻轉人生，自是「書還讀得來的農家子弟」之首要選擇。兒時歷練過跟隨父母親下田、鋤草、割稻、曬穀、挑西瓜、採花生的

苦日子，這樣的成長歷程，鍛鍊出堅毅不拔的性格，對應在陳智教授的科研路上，自是一番氣象。兩老全年無休地勞動，從來不喊累，以身教展現勤勞且不怕吃苦的美德，勞動的背影正是孩子的典範。陳智充滿感激地回憶說：「我爸媽很愛小孩，他們自己省吃儉用，卻總給我們最好的東西。當年一副使用德國蔡司（Zeiss）鏡片的近視眼鏡，要價新台幣四千多元，這筆支出對我家來說是大數目，而且

每過一兩年，就需要重新驗光更換鏡片，稍微計算一下就會覺得眼鏡不需要配那麼好，但爸媽堅持看清楚比什麼都重要。」

求學路上，陳智一開始並不是名列前茅的學生，但是學習歷程中幸運地遇到許多很照顧學生的好老師，總是提供額外的資源，激發他的學習動力與興趣。國中的班導師陳燕擔心陳智寫字不漂亮，在作文得分上會吃虧，所以特





地送了書法字帖讓他臨摹；數學老師陳圓送陳智數學測驗卷，他帶回家寫，越寫越有興趣。特別是國中的導師黃文央上課認真，關心學生，放學後還免費為學生補習，或許老師們會認為這是教學生涯中的小事情，但對年少的陳智而言，卻啟動了學習的引擎，不僅學習成就卓越，且一直以與恩師們保持關懷互動，來回饋恩師們的提攜與恩情。

1980年代中期升學資訊仍不發達，陳智升上台中一中，對大學該選什麼主修懵懵懂懂。當年台灣機械加工業興盛，最熱門的理組學系是物理系與機械系，會知道材料系，是清華大學材料科學工程學系的學長姐來學校進行系所介紹，帶著材料科技的結晶「晶片」給我們傳閱，宣傳「做晶片

有前（錢）途」。陳智將這番話放在心上，1988年應屆錄取清華大學材料系。

「兩分地」造就「世界電鍍奈米雙晶銅的先驅」

數鈔票登大位的未來太遙遠，讓陳智真正迷上這個學門的是材料科學導論，畢業於伊利諾大學香檳校區的彭宗平教授把這門課教得非常生動有趣。大一大二建構起知識基礎後，如同廚師研讀食譜後要下廚房，大三則要進實驗室做專題研究，他很感謝周卓輝教授在專題時的指導，陳智發現自己對於實驗室動手做的研究樂在其中，而且對電子材料格外感興趣，在清大愉快的學習經驗，令他更加堅

定往學術研究領域發展的志向。陳智在清大的導師是周卓輝教授，經常邀請學生到家裡作客，周教授在美國密西根大學高分子科學工程研究所取得博士學位，喜歡與學生分享異國見聞。美國社會尊重生命、汽車禮讓行人、國家公園等自然環境的規劃與保護措施完備專業……等，這些進步國家的文明象徵，都令陳智對美國產生很大的憧憬，在大一下學期便決定要出國深造，但他擔心高額的學費與生活費會造成家庭負擔，可是周卓輝教授鼓勵他「想做研究就早點出國」，且父母當下義無反顧的以賣掉兩分地的決心湊足出國學費，支持他直接出國完成學業。對一生務農的雙親而言，賣地是大事，既是忍痛，又是不捨，但是這個痛與捨，卻幫台灣造就「世界電鍍奈米雙晶銅的先驅」。深訪至此，我們不得不敬佩陳家兩老的遠見、成就孩子的偉大心念，與透過孩子實現的國際影響力。

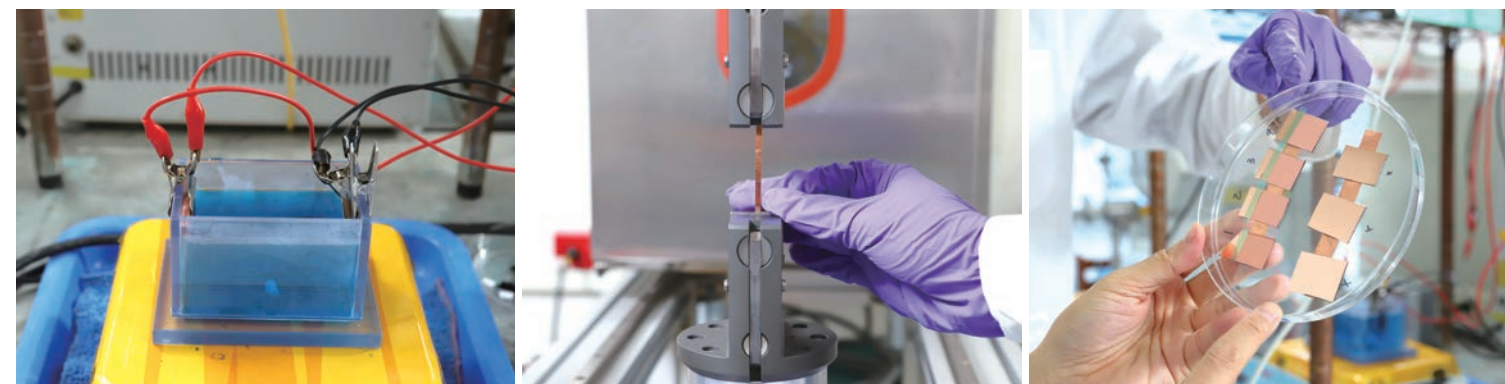
峰迴路轉 在美受杜經寧院士啟發開眼界

1994年陳智服完兵役，前往加州大學洛杉磯分校材料所留學，因為當時沒有網路，「實地到 UCLA 註冊前，我對這間學校毫無概念，只知道它的籃球隊很強！」陳智笑稱自己第一次出國，看什麼都新鮮，而研究生的當務之急不只是適應當地生活環境，還必須盡快找到論文指導教授。

在 UCLA 擔任教授的中研院院士杜經寧擁有輝煌的學術與產業經歷，1968年在哈佛大學取得應用物理博士學位後，前往國際商業機器公司（IBM）華生研究中心擔任研究員，並以材料科學部門三級主管的身分退休，是當年 IBM 高階主管中極少數的華裔面孔。杜經寧在 IBM 工作期間受到許多國際一流學府延攬，曾在美國康乃爾大學擔任客座教授、以訪問學者身分駐英國劍橋大學，嗣後在 UCLA 任教迄今，陳智屢次拜託杜經寧指導自己，前兩回被婉拒，但他不屈不撓第三次登門請託，終於讓杜經寧點頭收徒。

談起「三顧茅廬」找指導教授的經驗，陳智分析原因，美國大學的教授必須自籌經費，去寫計畫書申請研究款項來經營實驗室、支付學生研究助理費及昂貴的學費。當時 UCLA 每名博士生的一學年度人力成本就超過新台幣一百萬元，可謂所費不貲，教授收學生必然得思考再三，檢視學經歷以及學生的能力與潛力。知名教授即使不缺錢和計畫案，心力時間終究有限，在有很多學生爭相來拜名師、求指導的情況下，當然必須量力而為。

徒尋師難，為師者要找有心向道的學生也是大不易，所以陳智有感而發：「每次聽到學生被想跟隨的教授拒絕，我都告訴他們不要氣餒，過一段時間再去問，向教授展現你的誠意和潛力，結果就有可能峰迴路轉。」

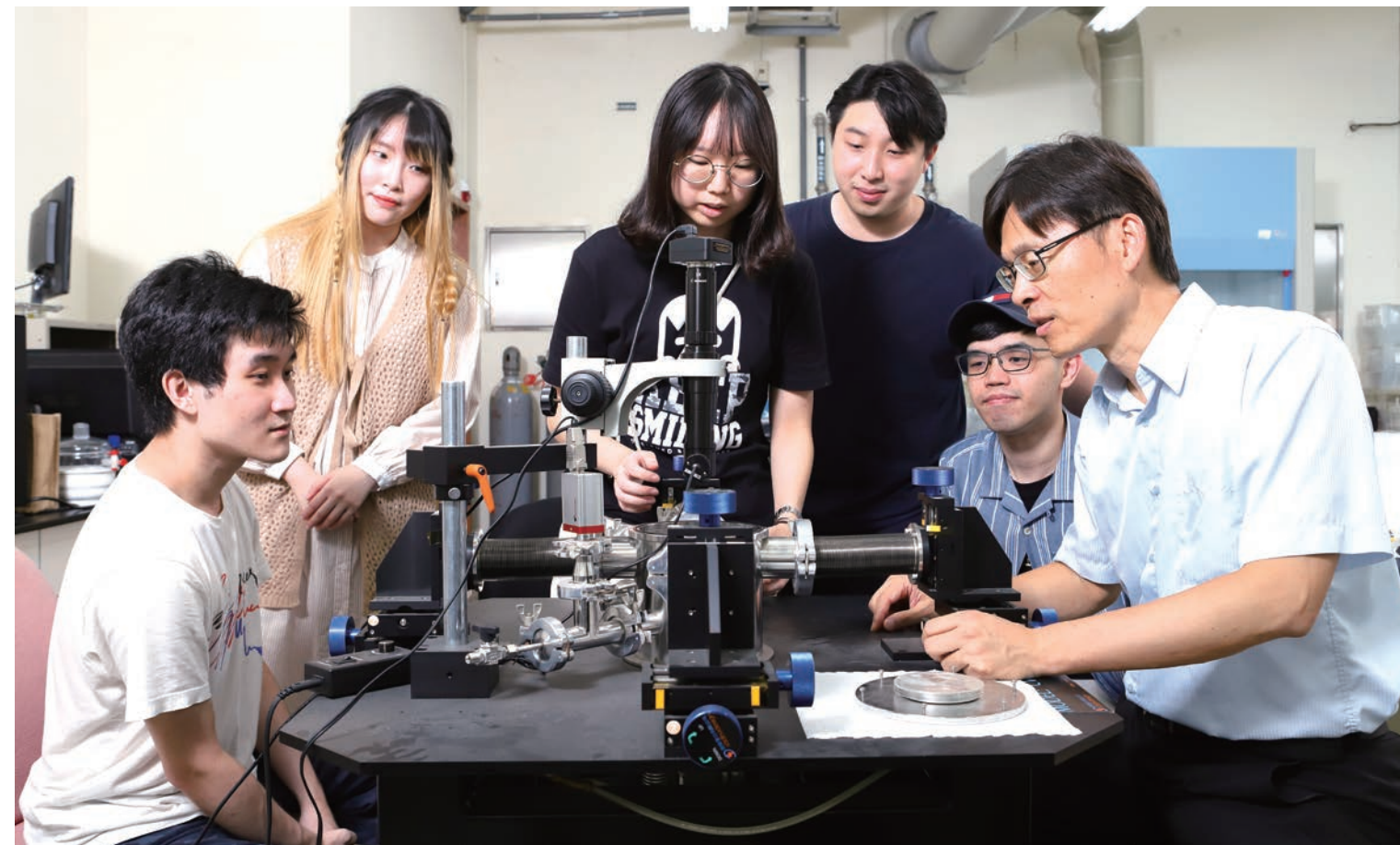


許多人認為做研究是枯燥的苦差事，而杜經寧不只很會抓重點，總是積極正向樂觀，工作時的口頭禪是「Wonderful（太棒了）、Amazing（好驚奇）」，恩師治學的態度深深影響了陳智。有一回實驗不太成功，蝕刻完應該呈現亮面的材料，最後卻是霧面，陳智覺得沮喪，但杜經寧毫不責難，反倒開心熱切地推敲是什麼原因導致霧面的結果，最後他的博士班研究題目就是從那次失敗的結果延伸出來的，這讓陳智深感「做研究很有趣」。而杜經寧院士在研究之外，也會在感恩節或是聖誕節邀請學生到他家聚餐，關心學生，師母很會做菜也很關心學生。

以「教學」傳道，回台發現奈米雙晶銅

1999年陳智取得博士學位，許多前輩建議他先在美國工作幾年、累積業界資歷再做打算。陳智投履歷到業界，一間位於西岸奧勒岡州小鎮的公司發給他聘書。但實地走訪後他驚覺該地又寒冷又荒涼，與溫暖熱鬧的大都會洛杉磯完全不同，於是回到 UCLA 找恩師杜經寧，在擔任博士後研究員的同時積極尋找教職。

世界上高等教育學府何其多，要把履歷投到哪裡、去哪個國家地區謀職才能兼顧個人志趣幸福，並且為人類文明做出貢獻，是所有研究者的人生大哉問。在陳智參與的



洛杉磯教會與神學院中，在一次聚會中，聽到一名讀醫科的牧師決定立志以醫療傳道，他的抉擇啟發了陳智，「古人認為老師的職責是傳道、授業、解惑，其中有『傳道』這一環。既然教友用醫療傳道，我也可以用教學傳道。」

時值台灣因應「四一〇教改」，在1996到2000年之間廣設高中大學，國立交通大學材料科學與工程學系開出一個缺額，共有數十人角逐，其中不乏有多年授課及研究經驗的學術中堅世代。能夠在白熱化的競爭中脫穎而出，陳智謙稱是運氣，因為當年系上希望找一位年輕的助理教授，且特別感謝恩師杜經寧，為他寫了一封絕佳的推薦信。

無論是研究生還是教職員，只要待在學術界，永恆的難題就是「新發現」。至2012年，電鍍銅技術已累積四、五十年的發展，成為一門相當成熟的技術。因此，陳智最初著重於研究覆晶錫鉛錒錫中的電遷移、熱遷移以及冶金反應。簡單地說，研究如何利用加熱的錒錫合金來焊接不同的材料。之後，陳智轉向研究新材料-奈米雙晶銅，卻是始於一次意外的發現：當他的一位研究生完成電鍍銅與錒錫的接合實驗後，在電子顯微鏡下觀察，卻發現銅晶粒內呈現出極其規律平行線的結構。最初，研究生懷疑是顯微鏡的問題，但經過陳智的詳細檢查後，確認了這一全新的研究方向。

看到奈米雙晶銅的潛力，陳智帶領研究團隊全力研發。他們的成果在頂尖期刊《SCIENCE》上發表，獲得廣泛認可。後續，該技術取得多項專利，並與台灣添鴻科技公司合作，挑戰過去被外商主宰的電鍍銅添加劑市場。

應用於先進封裝技術，超越摩爾定律

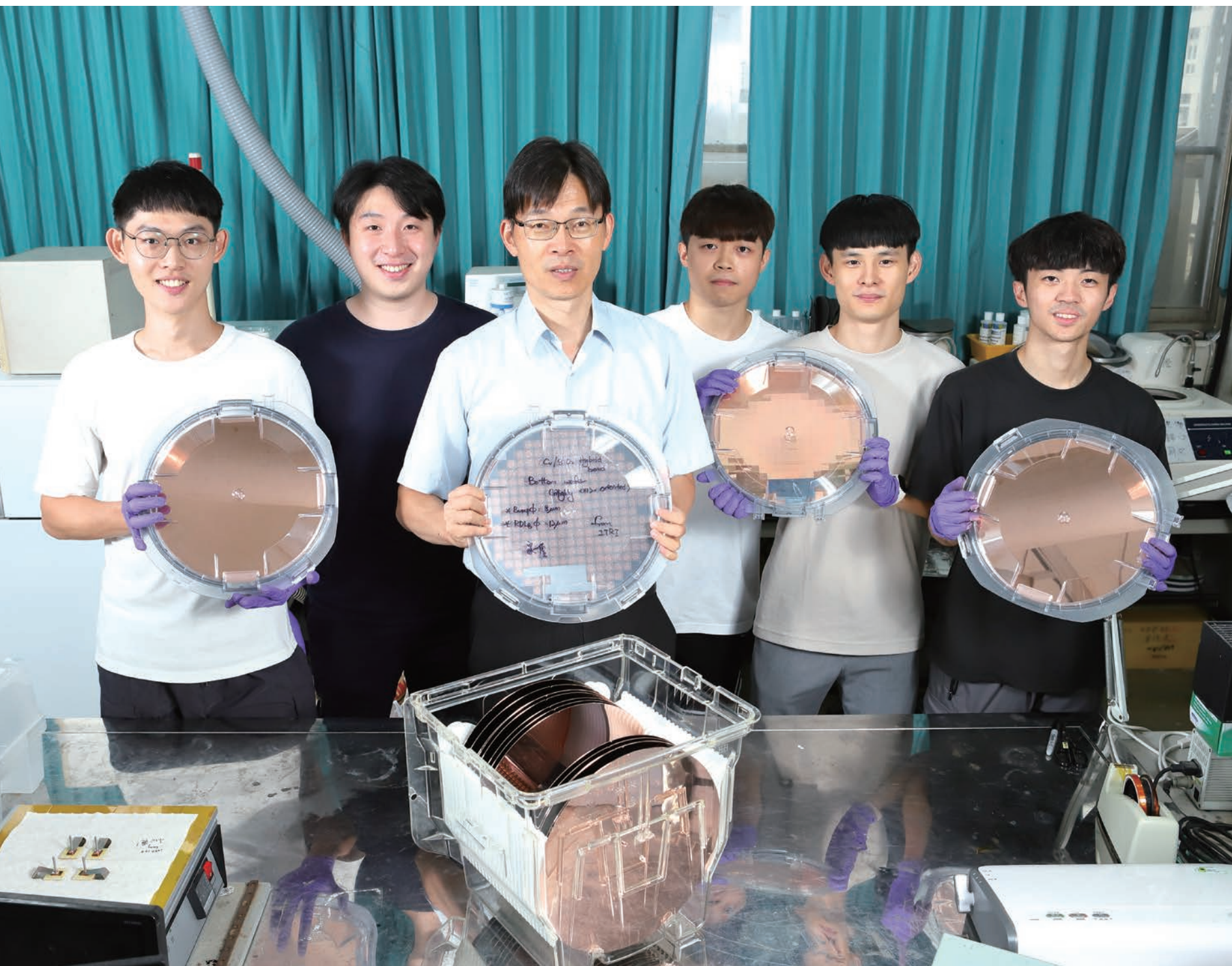
銅因其高熔點、出色的導電和導熱特性，成為半導體封裝的首選材料。當要銲接不同的銅材料時，必須確保接合處能夠承受高電流、有良好的氧化抵抗性和高溫性能。



目前一般製程要在適當真空 300°C 至 400°C 環境中，或是超高真空下利用表面活化才能穩固接合，研究快速的銅—銅直接接合接點對於大量生產非常重要，且接合成本不宜過高，因此低溫接合尤為理想。

2012年陳智及其團隊發現以直流電鍍方式產製出奈米雙晶銅，團隊於2019年進一步將奈米雙晶結構備製成銅凸塊，在10秒內即可以完成接點的接合，並且確保了接點強度，將其稱為瞬時接合，可以大幅減少接合時間成本。陳智團隊更於2021年成功達成奈米雙晶銅/SiO₂混合鍵合，控制溫度在200°C下完成接合，並且擁有超低的介面接觸電阻。

在半導體業界奉為圭臬的摩爾定律指出：在同樣尺寸的晶片中，所容納的電晶體數量每十八到二十四個月會增加一倍。但晶片上能乘載的電晶體數量有物理極限，因此效能不可能無窮盡地提高。當摩爾定律發展到頂，產業界認為必須改進晶片的堆疊方式來提升效能，也就是從先進封裝（2.5D/3D異質整合封裝製程）著手。目前把銅-銅接點用於封裝上，已實證能省下三分之一的電能消耗，極具發展潛力。



促進台灣成為培育後起之秀的搖籃 期盼台灣半導體封裝技術持續保持世界第一

陳智站在奈米雙晶銅研發的最前沿，曾與國內十數家企業進行產學合作，甚至協助過美國科林研發、美光等國外公司進行研發專案。擁有致力於讓台灣半導體封裝技術保持世界第一的傲人成果之外，陳智認為研究生涯中最有成就感的，莫過於在學術殿堂「得天下英才而教育之」。目前陳智在陽明交通大學實驗室的碩博士生高達二十多位，他期盼麾下學生都擁有光明的未來之外，也期許自己像陳圓、黃文央、彭宗平、周卓輝與杜經寧等恩師一樣，透過分享與關懷，豐富後進人文思維。甚至是以最先進最卓越的科研成果，讓台灣成為吸引先進材料研究者培育更多後起之秀的搖籃。

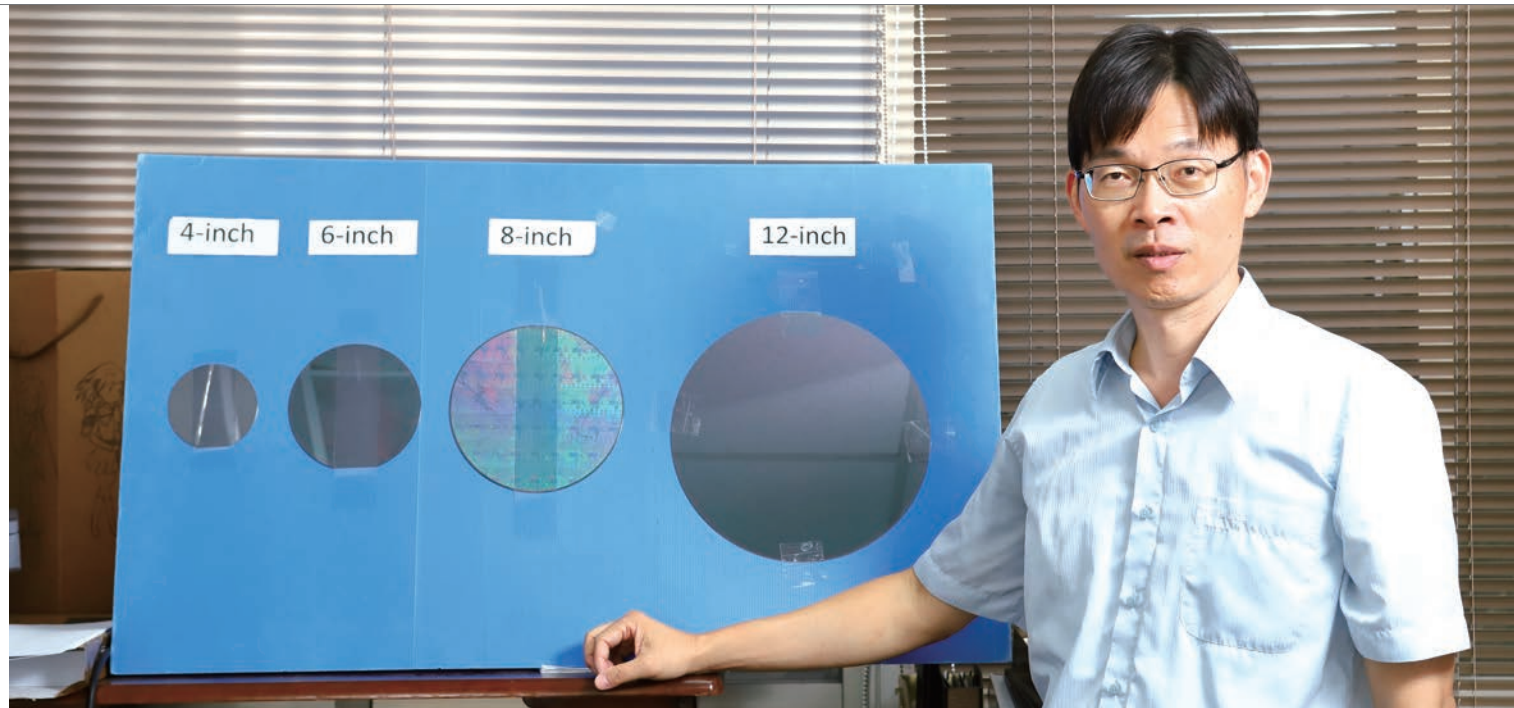
對「東元獎」的期望

非常感謝東元集團能慷慨捐助，設立東元科技文教基金會，能針對從事產業應用研究人員，有傑出貢獻者給予獎勵。因此，能有別於大部分的學術獎項，獲得「東元獎」，即代表該研究人員的研發成果，對台灣的科技研發有特殊貢獻，因此，能夠獲得「東元獎」，對從事產學應用的研究者，是一項很高的榮譽。近幾年台灣也意識到產學應用研究對台灣科技產業的重要，因此也更重視應用研究。東元科技文教基金會不僅能夠注重科技，也藉由人文類獎項，倡導科技人文均衡發展，促進人文生活的調適。另外，在申請的過程中會收到東元科技文教基金會的來信與電話溫馨提醒繳交申請所需的文件，讓申請者感受到東元基金會對科技人才的重視與關懷，令人敬佩。高科技的突破，仰賴材料的改質與合成新材料；謝謝東元集團重視新材料研發對高科技的貢獻，且每年在化工 / 材料科技領域皆有一到兩位得獎人。「東元獎」至今已舉辦三十屆，歷屆獲獎者，皆是一時之選。期望這個鼓勵台灣從事材料科研的研究者投入產學應用領域的獎項，能永續的設置。



成就歷程

後學主要是在先進封裝領域有重要且持續的貢獻。從2000年回到台灣時，選擇研究覆晶錫鉛錐錫中的電遷移、熱遷移以及冶金反應研究，主要原因是台灣的封裝產業是世界第一大，但當時對這些基礎的科學並不清楚，希望對台灣的先進封裝產業有所貢獻。後來演進到無鉛覆晶錐錐、微縮到無鉛微凸塊，都需要研究以上這些可靠度議題。約在2014年察覺銅-銅異質接合可能是下一代高階 / 高密度封裝的主流，就把主力放在銅-銅異質接合主題上，目前在此領域是世界學術界領先研究室之一。後學是發現電鍍(111)奈米雙晶銅的先驅，能夠直流電鍍出含有高密度 / 高規則性奈米雙晶且具有極高(111)優選方向的銅膜，幾乎100%的表面銅晶粒都沿著[111]方向排列，晶體排列規則性僅次於單晶，有很高的創新，於2012年發表在《SCIENCE》336, 1007. 此發現也有很高的應用價值。



具體貢獻事蹟

我們於 2016 年初與添鴻科技簽訂技轉合約，將 (111) 奈米雙晶銅添加劑商品化，幫助台灣本土公司能進入微電子業關鍵的電鍍銅添加劑市場，添鴻科技已經將我們技轉給他們的技術商品化。該公司網頁已經有列出「(111) 奈米雙晶銅電鍍液」商品。也與多家公司正在共同研發各式的應用。2019 年添鴻買斷我們的三個專利，幫助添鴻的專利佈局。研究生涯以產學合作方式幫助過的公司包含台積電、聯發科、矽品、閎康、添鴻、長春石化、欣興電子、宏齊科技、先豐通訊(臻鼎)、飛信半導體、工研院、美國科林研發、美國 Apple、美國 Micron。2022 也獲得美國 Semiconductor Research Corporation (SRC) 三年的合作計畫。對於台灣與世界先進封裝產業有傑出的貢獻。

- 低溫、低界面電阻銅 - 銅 /SiO₂ 異質接點應用於 3D IC 高密度封裝

銅 - 銅直接接合技術所製作的銅 - 銅 /SiO₂ 異質接點

已經是下一代可以取代 3D IC 中的微凸塊錒錫接點。Sony 已經將銅 - 銅 /SiO₂ 異質接點應用於手機 CMOS image sensors；台積電也已將銅 - 銅 /SiO₂ 異質接點製作在 AMD 高階的筆電 processor, Ryzen 7 5800X3D，比起使用錒錫 microbumps，銅 - 銅 /SiO₂ 異質接點能提升 200 倍的接點密度，而且讓每個訊號傳遞所需的能量降至三分之一以下，非常令人驚艷。但目前的接合溫度都在 300°C 左右，對於有些元件，例如記憶體，需要將接合溫度降低至 230°C 以下。我們於 2022 年也完成 8 μm 奈米雙晶銅 - 銅 /SiO₂ 異質接合，接合溫度僅需 200°C 且壓力約 1MPa，量測到的界面接觸電阻是 1.2x10⁻⁹ Ω·cm²，此數值是文獻中，接合溫度 300°C 以下最低的數值。因此，很有潛力應用於需要低熱預算銅與銅 /SiO₂ 低溫異質接點。

- 電鍍奈米雙晶銅箔，具備高強度 (>700MPa) 以及低電阻率 (>80%IACS)，可以應用於電子產品的 connectors 以及鋰電池銅箔。

藉由產學合作，幫助半導體及封裝業界對銅接點及錒

錒接點的製程與可靠度議題有更深入了解。合作公司包含台積電 (3D IC 電遷移計畫 2009-2012、Grand Challenge 計畫 2015-2018，以及台積電顧問 2010-2012)。聯發科 AI Chip Packaging 計畫 2018-2020。美國 Lam Research(科林研發) Unlock Ideas 奈米雙晶銅計畫 2018/2019。美國電子大廠 Apple Inc 2021-2023 奈米雙晶銅、長春化工合作開發電動車鋰電池銅箔 2020、矽品精密科技錒錫接點電遷移 2015-2016、研院建教合作及顧問。工研院 5 個計畫：覆晶封裝低溫固晶材料研究 / 電遷移實驗計畫 / 高電流晶粒軟膜設計發包及相關量測軟體撰寫 / COG 與 OLB 模擬與量測 / 電遷移效應模擬分析通電破壞檢測 / 晶圓級內埋模組之超細線路電遷移現象研究 / 微凸塊之熱遷移與電遷移現象探討。

研究展望

後學對於應用研究很有興趣，特別是能希望能研發出新的材料，幫助台灣產業升級與提升國際競爭力。之前就聽說發現一個新的材料後，若要應用到實際產品，通常需要約十年的時間。後學於 2012 年發現新的高優選方向的 (111) 奈米雙晶銅，後續持續鑽研其特別的性質，目前很有希望應用於兩個產品，第一個是高強度 / 高韌性銅箔應用於電子產品的連接器 (Connectors)；另一個是先進三維積體電路封裝的銅 - 銅異質接合。兩者目前都有與業界合作，持續提升該材料的性能與研究其可靠度。期望在近年內能夠達成目標。另一方面，在從事研究的過程中，能同時培育更多的高階研究人才，能對台灣的半導體封裝產業貢獻一份心力。



Prospective of “TECO Award”

I would like to express my sincere gratitude to the TECO Electric & Machinery Co., Ltd. for their generous donation in establishing the TECO Technology Foundation. This foundation provides recognition and rewards for outstanding contributors among researchers engaged in industrial applied research. The “TECO Award,” which sets it apart from most academic awards, represents the special contributions of these researchers’ R&D achievements to the advancement of technology in Taiwan. Therefore, receiving the “TECO Award” is a prestigious honor for researchers dedicated to applied research.

History of Achievements

I have made prominent and continuous contributions primarily in the advanced packaging field. When I returned to Taiwan in 2000, I chose to research topics related to electromigration, thermal migration, and metallurgical reactions in lead-based solder for flip-chip packaging. The main reason for this choice was that Taiwan’s packaging industry was the world’s largest at that time, but there was limited understanding of these fundamental scientific aspects. I hoped to contribute to Taiwan’s advanced packaging industry.

Later on, my research expanded to lead-free solder for flip-chip packaging and further scaled down to lead-free solder microbumps, all of which required more comprehension of reliability. Around 2014, it became evident that copper-copper hybrid bonding might become the mainstream technology for the next generation of advanced/high-density packaging.

Consequently, I shifted my focus to this topic, and my research laboratory has become one of the world’s leading research centers in this field.

One of my significant discoveries was related to the electroplating of (111)-oriented nanotwinned copper. We pioneered the direct current electroplating of copper films with high-density and highly ordered nanotwin structures, exhibiting an extremely high (111) preferred orientation. Nearly 100% of the surface copper grains aligned along the [111] direction, approaching the regularity of single crystals. This innovation was published in “SCIENCE (336, 1007)” in 2012 and holds considerable application value.

Technical Contributions

In early 2016, we signed a technology transfer contract with Chemleader Corporation, Taiwan, to commercialize (111)-oriented nanotwinned copper additives, assisting domestic companies in Taiwan to enter the crucial electroplating copper additive market in the microelectronics industry. Afterwards, Chemleader Corporation has successfully commercialized the technology we transferred to them. Their website now lists the product “(111)-oriented nanotwinned copper electrolyte,” and they are collaborating with several companies on various applications. In 2019, Chemleader Corporation purchased three of our patents outright to enhance their patent portfolio. Throughout our research career, we have collaborated with companies such as TSMC, MediaTek, Siliconware Precision Industries, MA-tek, Chemleader, Chang Chun Petrochemical, Unimicron Technology,

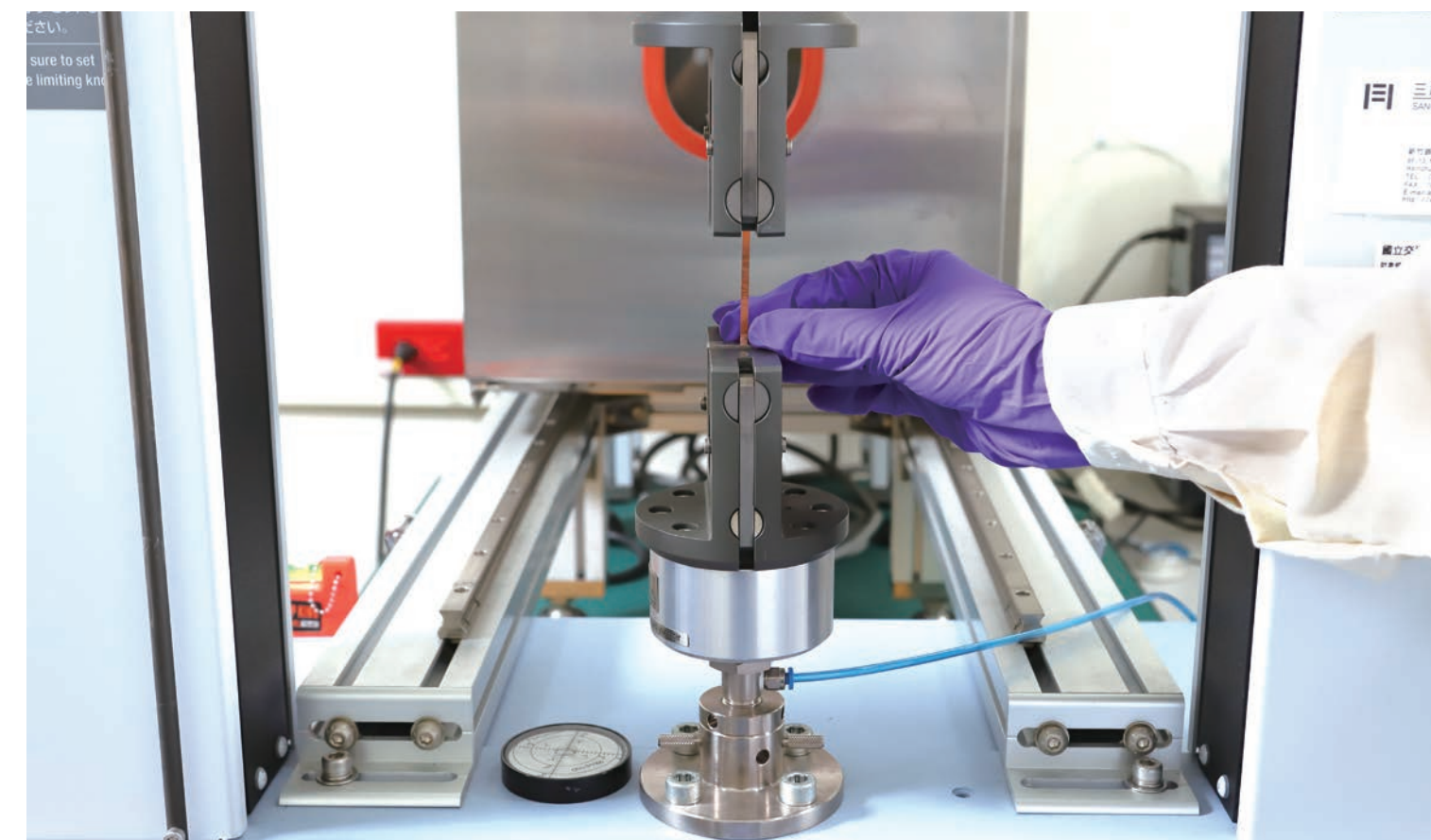
Harvatek, Boardtek Electronic (Zhen Ding Tech.), International Semiconductor Technology, ITRI, Lam Research, Apple, and Micron Technology.

In 2022, we also acquired a three-year collaboration project with the Semiconductor Research Corporation (SRC) in the United States

Our works make significant contributions to Taiwan’s and the global advanced packaging industry.

- **Low Temperature Cu/SiO₂ Hybrid Bonding with Low Contact Resistance for high I/O density 3D IC packaging**

The Cu/SiO₂ hybrid junctions by using copper-copper direct bonding technology have replaced solder microbumps in the next generation of 3D ICs. Sony has already applied Cu/SiO₂ hybrid junctions in mobile CMOS image sensors, while TSMC has incorporated them into AMD’s high-end laptop processor, the Ryzen 7 5800X3D. Compared to solder microbumps, Cu/SiO₂ hybrid junctions can achieve a 200-fold increase in connection density and reduce the energy required for each signal transmission to less than one-third, which is truly remarkable.





However, the current bonding temperatures are around 300°C, which is too high for some electronic components like memory, where bonding temperatures need to be lowered to below 230°C. In 2022, we successfully achieved 8 μm nanotwinned Cu-Cu/SiO₂ hybrid bonding with a bonding temperature of only 200°C and a pressure of approximately 1 MPa. The measured specific contact resistance was 1.2x10⁻⁹ Ω·cm², which is the lowest reported value for bonding temperatures below 300°C in the literature. Therefore, this technology holds great potential for applications requiring low thermal budget Cu/SiO₂ hybrid junctions.

● **Nanotwinned Cu Foils with High Strength (>700MPa) and Low Electrical Resistivity (>80%IACS) for electrical connectors and lithium batteries**

Through industry-academic collaboration, we have provided more insight for the semiconductor and packaging industries in

deeper understanding of process and reliability issues related to Cu-Cu and solder joints. Our collaborative projects have involved various companies and research institutes, including:

1. TSMC:
 - 3D IC Electromigration Project (2009-2012)
 - Grand Challenge Project (2015-2018)
 - TSMC Consultant (2010-2012)
2. MediaTek:
 - AI Chip Packaging Project (2018-2020)
3. Lam Research:
 - Unlock Ideas Nanotwinned Copper Project (2018, 2019)
4. Apple Inc.:
 - Nanotwinned Copper Project (2021-2023)
5. Chang Chun Petrochemical:
 - Development of Copper Foil for Electric Vehicle Lithium Batteries (2020)
6. Siliconware Precision Industries:
 - Solder Joint Electromigration Project (2015-2016)
7. Industrial Technology Research Institute (ITRI):
 - Low-Temperature Die Attachment via Flip Chip Packaging
 - Electromigration Research Project
 - COG and OLB Simulation and Measurement
 - Simulation of Electromigration Effect and Analysis for Current-Induced Breakdown Testing
 - Electromigration Analysis in Ultra-Fine Line Circuits of Wafer-Level Embedded Modules
 - Thermal and Electromigration Phenomena Investigation in Solder Microbumps

Future Prospects of Research

I have a keen interest in applied research, particularly with the aspiration to develop new materials that can contribute to the advancement of Taiwan's industries and bolster its international competitiveness. I've once heard that it takes approximately ten years to transition a new material from the development to its practical application in products. In 2012, I discovered a new material, highly (111)-orientated nanotwinned copper, and have been dedicated to exploring its distinctive properties since. Currently, there is great potential for its application in two

specific areas: firstly, high-strength/high-toughness copper foils for connectors in electronic products, and secondly, copper-to-copper hybrid bonding for advanced 3D IC packaging. Both are now in collaboration with industry partners, focused on enhancing the performance of the material and investigating its reliability. It is our hope to achieve these goals in the coming years. On another front, through the research process, it's also possible to cultivate more high-level research talents, enriching Taiwan's talent pool to meet the requirements of the semiconductor packaging industry and making a further contribution to Taiwan's technology industry.

