

216

2024

量測資訊

MEASUREMENT INFORMATION

特別報導

企業淨零-計量帶動半導體供應鏈- 數位轉型與永續升級
氫能革命：推動可再生能源的未來



工業技術研究院
Industrial Technology
Research Institute



國家度量衡標準實驗室
NATIONAL MEASUREMENT LABORATORY R.O.C.
(經濟部標準檢驗局委辦)

以可靠技術實現創新的每一步

致茂電子以量測及智動化全方位解決方案引領新興科技實現創新，確保客戶產品的性能、品質與成功。我們專注於高規測試，步步舞動未來科技。

Behind every breakthrough in



green energy



semiconductor



optics



smart automation



致茂電子
info@chromaate.com
www.chromaate.com



USA | Germany | The Netherlands
China | Japan | Korea | SE Asia | Taiwan



關於致茂

光伏電池與模組 IV曲線分析儀

SOLAR IV
ANALYZER

最大功率瓦特值(Wp)是現行太陽光電產業的貿易計價基礎及產品研究發展標的，其可靠性及量測不確定度具有關鍵重要性，準確的IV曲線分析量測則是實驗室最具代表性的重要工具。

版權所有©2018 工業技術研究院 量測中心



高速

可適用於閃光型太陽光模擬器，在0.01秒內完成量測。

簡易

即時顯示分析結果、圖表，減少數據處理及製圖人工作業。

輕巧

設計輕薄，方便攜帶。

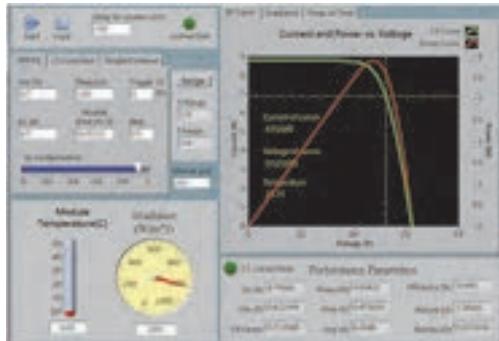
標準配備



產品特色

- 簡易人機介面操作
- 電流 / 電壓 / 照度同步擷取
- 適用高效率模組(PERC、HJT)
- 適用閃光型模擬器(Flash type)

人機介面軟體



一般規格

- 重量 : <2.5 kg
- 尺寸 : (95*265*230) mm (H*W*D)
- 介面 : USB 1.1 / 2.0 / 3.0
- 電壓 : (100~240) VAC

技術規格

- 電壓範圍 : 1 V / 3 V / 6 V / 12 V / 60 V / 90 V
- 電流範圍 : 3 A / 6 A / 12 A / 16 A
- 照度量測範圍 : (0~1500) W/m²
- 解析度 : 12bit, 3頻道同步取樣
- 準確度 : <0.1 %
- 溫度量測 : K-type熱電偶

業務服務窗口

施仁親 工程師

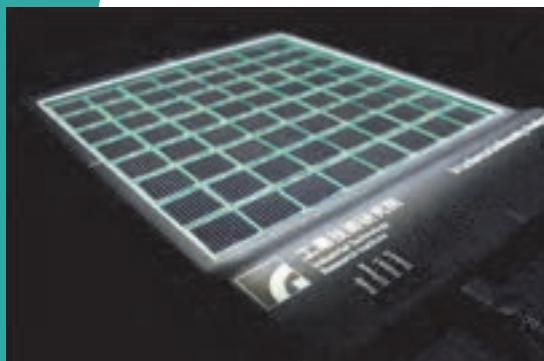
電話 : 03-5911027

電子郵件 : renchin@etri.org.tw

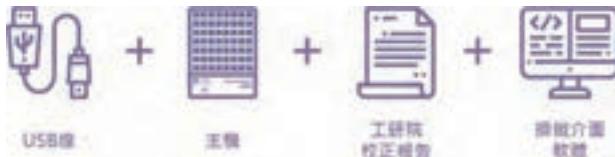
太陽光模擬器品質 分析儀 IRRADIANCE UNIFORMITY ANALYZER (6-inch)

對於高品質的太陽光模擬器而言，均勻度與穩定度的評估是相當重要的工作，但是均勻度的量測並非簡單的工作。利用本產品進行量測，可以極短時間內完成均勻度與穩定度的量測。

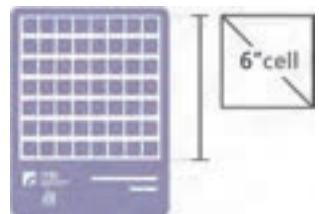
版權所有©2018 工業技術研究院 量測中心



○ 標準配備



○ 適用6吋太陽光模擬器



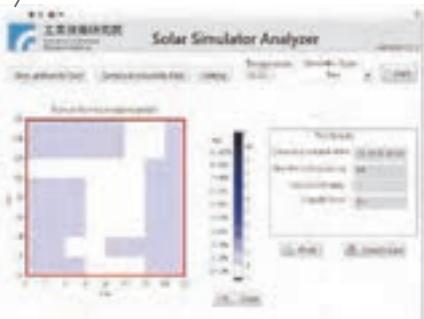
技術規格

- 感測器數 : 8 × 8 (64)
- 測試面積 : 16 cm × 16 cm
- 量測解析度 : 0.2 W/m²
- 通訊介面 : USB 2.0 / 3.0
- 最大主體尺寸 : 23.7 mm × 18.0 mm × 1.8 mm

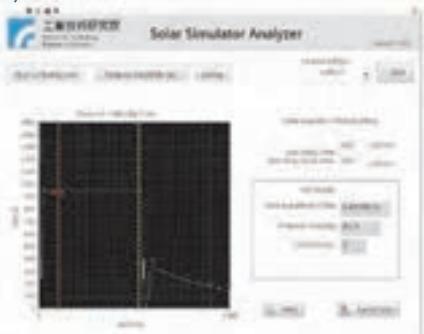
符合IEC 60904-9規範要求

級別	光譜符合度	光幅照之不均勻度	光幅照之不穩定度
A ⁺	0.875 - 1.125	1 %	1 %
B	0.6 - 1.4	5 %	5 %
C	0.4 - 2.0	10 %	10 %

○ 均勻度分布分析



○ 穩穩定度分析



業務服務窗口

施仁親 工程師

電話 : 03-5911027

電子郵件 : renchin@etri.org.tw

日照計校正服務

CALIBRATION OF PYRANOMETER

日照計為評估太陽光電系統發電量的重要設備，定期校正日照計是必要的。

本實驗室已通過財團法人全國認證基金會(TAF)認證，可提供日照計校正服務。

本系統經評估各項不確定度來源後，其日照計靈敏度之擴充不確定度最小可達 $0.13 \mu\text{V}/\text{Wm}^{-2}$ 。

版權所有©2018 工業技術研究院 量測中心



By rotating the turntable, the positions of these two can be precisely interchanged.

校正方法係依據ISO 9847:1992(E) "Solar energy - Calibration of field pyranometers by comparison to a reference pyranometer"的Annex A.3"Calibration devices using artificial sources"。以比對方式校正日照計，相較於戶外校正方法，可大幅縮短校正時間，且不受天候影響。

技術規格

- 光源 : Metal-Halide light source
- 參考日曬計 : ISO 9060 Secondary Standard, 追溯至PMOD/WRC
- 數位電表 : $6\frac{1}{2}$ digits of resolution (min : $0.1 \mu\text{V}$)
- 校正方法 : ISO 9847:1992(E) / CNS 15066, 室內校正

技術特色

- 日照計靈敏度項目校正
- 校正時程短且不受天候影響
- ISO 9847:1992(E), 參考件比對校正方法
- 參考日曬計為ISO 9060 Secondary Standard等級
- 參考日曬計追溯至PMOD/WRC
- 最小不確定度 $0.13 \mu\text{V}/\text{Wm}^{-2}$
- TAF認可實驗室，認證編號0016



業務服務窗口

楊小姐

電話 : 03-5911026

電子郵件 : h201@itri.org.tw



醫材法規資源系統

Regulatory Resource Planning (R²P)

為協助教學研究機構之醫療器材研發團隊了解醫療器材法規、品質管理系統標準以及產品安全性與功效性之評估流程。量測中心醫療器材驗證室特別開發一套教育訓練工具「醫材法規資源系統」，本系統可協助研發團隊了解設計管制之規定，依照ISO 13485:2003、FDA QSR有關設計管制要求以及風險管理(ISO 14971:2007)之規定，建立電子化管理系統，研發團隊可藉由「醫材法規資源系統」學習醫療器材設計管制之步驟，管理開發過程之文件紀錄，建立必備之法規專業知能。



R²P網址:<https://r2p.itri.org.tw/Shared/Login.aspx>

項目	學術研究用R ² P (Cloud-based)			學術研究用R ² P (On-premises)		R ² P相關訓練	
	購買前之試用 (30天)	R ² P 專案/30天	R ² P 專案/365天	R ² P 系統(含設計 管制與風險管理)	R ² P 法規 擴充模組	R ² P 導入訓練/ (每六小時)	法規教育訓練 (每六小時)
費用(新台幣 元未稅)	0	370	4,000	300,000	100,000	80,000	80,000

● 備註:

「醫材法規資源系統」為非營利目的，所收取之費用將使用於本系統之開發、維護與改善。

● 費用說明:

- 學術研究用R²P(Cloud-based)帳號開通後即開始計費，計算之最小單位為30天。
- 學術研究用R²P(On-premises)含一年保固，在保固期滿後如需保固服務須簽訂「軟體維護合約」，「軟體維護合約」含系統除錯與使用介面操作問題解答。
- 學術研究用R²P(On-premises)含專案20個、帳號30個，可另外加購專案與帳號。專案加購價每個4000元(未稅)，帳號加購價每個2000元(未稅)。
- 學術研究用R²P(Cloud-based)與學術研究用R²P(On-premises)資料移轉處理費每次3000元(未稅)

● 免責聲明:

本系統為教育用途，本系統及所含之其他資訊依「現況」提供，工業技術研究院對於使用本系統所獲得之效能或結果不作任何保證。工業技術研究院就任何事宜，包括(但不限於)不侵犯任何一方之權利、可銷性、整合、滿意品質或特殊用途之可適性，不論依成文法、普通法、習俗、使用慣例或其他規範，概不作出任何明示或默示性之擔保、條件、聲明或條款。工業技術研究院不為使用本系統所獲得之醫療器材法規符合性背書。



量測中心醫療器材 檢測驗證平台

目的

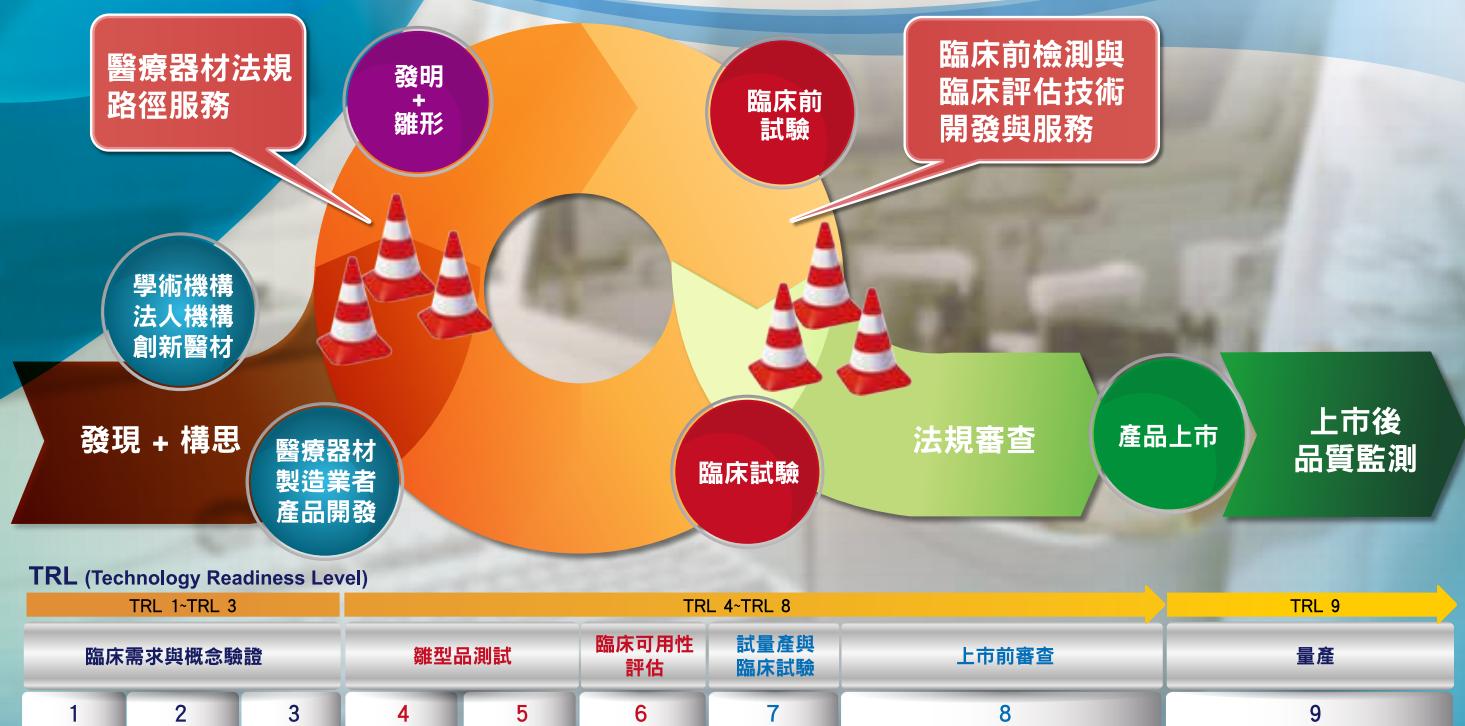
解決國內缺乏完整醫療器材檢測及評估技術問題，加速創新醫材商品化進展，跨越產品開發法規障礙，提高醫材產業發展動能。

符合法規要求

醫療器材在進入市場之前，需通過上市前評估，包括嚴謹的材料組件檢測、臨床前測試評估、臨床評估以及法規審查等，以確保產品安全性及功效性，符合臨床醫療對醫療器材的品質需求。

通過檢測驗證

醫材研發團隊常缺乏對醫材法規、檢測、臨床使用條件的瞭解，國內尚無公正獨立且完整之檢測驗證實驗室，以致中小型企業與新創事業團隊無從規劃與執行檢測驗證，經常半途而廢，無法順利上市，或上市後未能有效進入醫療市場，難以注入我國醫材產業轉型發展所需之動能。





目的

量測中心醫療器材人因/可用性工程實驗室，為亞洲第一個獨立及公開使用之醫材人因/可用性工程實驗室，作為研發團隊與臨床專業人士跨領域合作的平台，協助研發團隊於產品設計開發掌握使用者需求，讓醫材通過嚴謹的人因/可用性工程測試，提昇產品安全使用效率、安全性、功效性及市場競爭力。

設計管制要求

根據美國FDA統計，人因為醫療器材傷害事故的主因。醫材品質系統內之設計管制亦要求人因/可用性工程為設計輸入(design input)、設計查證(design verification)、設計確認(design validation)的必要要素。



廣告索引

玫茂電子形象廣告
光伏電池與模組IV曲線分析儀
太陽光模擬器品質分析儀
日照計校正服務
醫材法規資源系統
量測中心醫療器材檢測驗證平台
醫療器材人因 / 可用性工程實驗室



刊 名	量測資訊
出 版 者	工業技術研究院量測技術發展中心
發 行 人	林增耀
地 址	新竹市光復路二段321號
刊 期 頻 率	季刊
創 刊 日 期	中華民國七十六年十月十日
出 版 日 期	中華民國一一三年六月
編 輯 顧 問	陳怡鈴、賴俊杰、王石城
本期審稿委員	黎宇泰、林高祺、吳榮辰、宋信謬、顧逸霞、卓嘉弘、韓宙勳、陳士芳、 馮筠、孫郁傑
主 編	蔡佳玲
執 行 編 輯	劉純秀
電 話	(03) 5732285
傳 真	(03) 5724635
出 版 執 照	(行政院新聞局出版事業登記證 局版台誌第6144號)
網 址	https://www.nml.org.tw (本刊承經濟部標準檢驗局經費支持出版)

特別報導

- 1 企業淨零-計量帶動半導體供應鏈- 數位轉型與永續升級
- 4 氢能革命：推動可再生能源的未來

量測技術

- 8 次兆赫光電通訊元件之頻譜特性檢測技術
- 19 大尺寸模組及金屬組件溫濕環境腐蝕試驗研究
- 28 機器學習應用於半導體先進製程三維多參數結構量測
- 40 反射式光譜干涉技術應用於先進半導體蝕刻製程結構均勻性量測
- 52 直流電度表型式認證技術規範研究
- 58 天然氣分析-線上熱值分析儀量測品保實務應用

企業淨零

計量帶動半導體供應鏈-數位轉型與永續升級

在全球氣候變遷和環保意識日益提高的背景下，企業責任逐漸成為各界關注的焦點。特別是在高科技產業，如何在追求經濟效益的同時實現可持續發展，成為企業經營的一大挑戰。在2024年5月17日舉行的世界計量日「計量支持產業經濟永續發展」研討會中，日月光控股汪渡村行政長以「企業淨零：計量帶動半導體供應鏈數位轉型與永續升級」為題，深入探討了計量技術在企業實現淨零排放和數位轉型中的重要作用。

全球趨勢與挑戰

隨著《巴黎協定》的簽署和各國對碳中和目標的承諾，減碳已成為企業不可迴避的責任。半導體產業作為高能耗、高污染的行業，在實現淨零排放的過程中面臨巨大挑戰。汪渡村行政長指出，半導體產業的特性使其在生產過程中耗費大量能源，排放大量溫室氣體。因此，如何通過先進的計量技術來精確監控和管理能源消耗，成為實現淨零排放的關鍵。

計量技術的應用

計量技術在能源管理和排放控制中具有重要作用。汪渡村行政長強調，通過精確的計量，企業可以實時監控能源消耗，找出能源浪費的環節，並進行針對性的改進。例如，在製程中使用先進的感測器和智能計量儀表，可以即時捕捉數據，進行能源效率分析和優化。

此外，計量技術還能夠幫助企業建立透明的碳足跡管理系統。透過精確的數據收集和分析，企業可以全面了解自身的碳排放狀況，制定具體的減排目標和路徑。這不僅有助於提升企業的環保形象，還能夠應對越來越嚴格的環保法規和市場需求。

數位轉型與永續發展

計量技術在推動企業數位轉型方面同樣具有重要作用。汪渡村行政長指出，數位化是實現企業可持續發展的重要途徑。通過數位技術，企業可以實現生產過程的自動化和智能化，提升生產效率，降低能耗和污染。

在半導體產業中，數位轉型主要體現在智能製造和數據驅動的決策上。通過建立數字化生產線和智能工廠，企業可以實時監控生產過程中的每一個環節，實現全程數據可視化管理。這不僅能夠提升生產效率，還能夠及時發現和解決生產中的問題，降低資源浪費和環境污染。

供應鏈的數位化轉型

汪渡村行政長進一步強調，實現淨零排放和可持續發展，不僅需要企業自身的努力，還需要整個供應鏈的共同參與。半導體產業的供應鏈涉及眾多環節，從原材料供應到製造、生產再到最終產品的分銷，每一個環節都可能對環境產生影響。因此，供應鏈的數位化轉型是實現整體可持續發展的關鍵。

通過數位化技術，企業可以實現供應鏈的全面監控和管理。例如，利用區塊鏈技術，可以實現供應鏈的透明化管理，確保每一個環節的環保數據真實可靠，避免數據造假和綠色洗白現象。再如，通過物聯網技術，可以實現供應鏈各環節的實時數據共享和協同作業，提高供應鏈的運營效率和環保水平。

案例分享：日月光的實踐

在研討會上，汪渡村行政長還分享了日月光在實現淨零排放和數位轉型方面的成功經驗。作為全球領先的半導體封裝測試企業，日月光在節能減排和環保方面積極探索，並取得了顯著成效。

首先，日月光通過引入先進的計量技術，實現了能源管理的精確化。在生產車間中安裝智能感測器和計量儀表，實時監控能源消耗情況，並根據數據進行分析和優化，極大地提升了能源使用效率。

其次，日月光積極推動數位轉型，打造智能製造系統。通過建立數字化生產線和智能工廠，實現生產過程的全程數據可視化管理。這不僅提升了生產效率，還能夠及時發現和解決生產中的問題，降低資源浪費和環境污染。

此外，日月光還積極推動供應鏈的數位化轉型。通過與供應商合作，建立數位化的供應鏈管理系統，實現供應鏈的全面監控和管理，確保每一個環節的環保數據真實可靠。

結論

在全球推動碳中和的背景下，企業要實現淨零排放和可持續發展，計量技術和數位轉型是關鍵。半導體產業作為高能耗、高污染的行業，應當積極引入先進的計量技術，實現能源管理的精確化，並通過數位化技術提升生產效率，降低能耗和污染。

汪渡村行政長在研討會中的講題，為我們提供了一條可行的路徑。通過計量技術和數位轉型，不僅能夠實現企業自身的可持續發展，還能夠推動整個供應鏈的綠色轉型，最終實現全行業的環保目標。這不僅有助於提升企業的競爭力，還能夠為全球的環保事業做出貢獻。

致謝

本文由量測資訊編輯部依汪渡村行政長於 113 年 5 月 17 日 世界計量日「計量支持產業經濟永續發展」研討會中之「企業淨零：計量帶動半導體供應鏈數位轉型與永續升級」專題演講內容編撰，經演講者同意刊登，特此致謝。

—編撰作者—

劉純秀 / 工業技術研究院 量測技術發展中心 產業策略推動部 / 副管理師

—專家介紹—

汪渡村 / 日月光控股 / 行政長



氫能革命： 推動可再生能源的未來

在2024年5月17日舉行的世界計量日「計量支持產業經濟永續發展」研討會中，聯華林德氫氣動能苗華山（Christine Miao）總監以「氫能革命：推動可再生能源的未來」為題，發表了一篇引人注目的講題。此次研討會重點探討了氫能在未來能源轉型中的關鍵角色，並深入分析了其技術創新、應用前景及挑戰。本文將全面回顧苗總監的演講內容，並結合當前氫能產業的發展現狀，探討氫能革命對全球能源結構的深遠影響。

氫能的背景與現狀

氫能是一種清潔、高效的能源形式，氫氣（H₂）燃燒時只生成水（H₂O），不會產生二氧化碳等溫室氣體，具有潛力成為未來能源結構中的重要組成部分。氫能可通過多種方式生產，包括水電解、天然氣重整、生物質轉化等，這使其在能源供應上具有靈活性。

近年來，隨著全球對可再生能源需求的增加以及碳中和目標的推進，氫能產業呈現出快速發展的態勢。根據國際能源署（IEA）數據，氫能技術的研發投入和產業化進程顯著加速，許多國家已將氫能作為能源轉型戰略的重要組成部分。尤其是在交通運輸、工業製造及儲能領域，氫能的應用前景被普遍看好。

聯華林德的氫能技術創新

偕同合資夥伴林德，聯華林德（又稱聯華氣體）獲取國際先進技能。苗華山總監在演講中分享了林德在氫能技術研發方面的領先地位，在氫氣生產、儲存、運輸及應用技術上取得了多項突破，聯華林德已經達到了國際先進水平。

氫燃料電池是一種將氫氣和氧氣直接轉化為電能的裝置，其能量轉換效率高達60%以上。氫能的儲存與運輸是其大規模應用的一大挑戰。苗華山總監介紹了聯華林德，以及國外合作夥

伴林德在這方面的最新進展：研發了多種氫氣儲存技術，包括高壓氣態儲存、液態氫儲存，這些技術能夠根據不同應用需求靈活選擇。特別是液態氫儲存技術，由於其高能量密度和低儲存成本，具有廣泛的應用前景。

在氫氣運輸方面，聯華林德開發了高效、安全的運輸方案，包括專用氫氣運輸管道，國外則有符合當地需求的液氫運輸槽車，這些技術能夠有效降低氫氣運輸過程中的損耗和風險，確保氫氣能夠安全、穩定地送達客戶端。

氢能的應用前景

氫能在交通運輸領域的應用是最具潛力的方向之一。氫燃料電池汽車（FCEV）具有零排放、高續航和快速加氫等優勢，逐漸成為汽車產業的重要發展方向。苗華山總監提到，聯華林德積極和汽車廠商合作，共同推動氫燃料電池車的台灣市場化進程。

目前，全球已有多個國家和地區開始建設氫燃料加氫站，預計未來幾年內，氫燃料電池汽車將迎來大規模發展。此外，氫能還可應用於巴士、火車、船舶等大型交通工具，為實現交通運輸的全面脫碳提供了可能。

在工業製造領域，氫能的應用同樣具有廣闊的前景。傳統工業生產過程中大量使用化石燃料，導致碳排放居高不下。氫能可以作為清潔能源替代傳統能源，特別是在鋼鐵、化工及水泥等高耗能行業，氫能的應用將顯著減少碳排放。

苗華山總監指出，聯華林德已在多個工業領域展開氫能應用的實驗和示範項目，並取得了積極成效。未來，隨著氫能技術的不斷進步，工業製造領域的氫能應用將進一步擴展，為實現工業領域的綠色轉型提供強大動力。

此外，氫能在儲能和電力系統中的應用也是研討會的重要議題之一。隨著可再生能源比例的提高，電力系統的波動性問題日益突出。氫能作為儲能介質，可以有效解決這一問題。將富餘的可再生能源轉化為氫氣儲存起來，在需求高峰期再通過氫燃料電池發電，實現能源的高效利用和平衡。

聯華林德在這方面也進行了大量探索，苗華山總監分享了一些成功案例。例如，合資夥伴林德在德國建設的氫能儲能電站，已經實現了可再生能源的高效利用和電力系統的平衡調節，為其他地區提供了寶貴經驗。

氢能發展的挑戰與對策

儘管氢能能在多個領域展現了廣闊的應用前景，但其發展仍面臨諸多挑戰。技術上，氢能的生產、儲存和運輸仍需不斷創新和優化；成本上，氢能相較於傳統能源仍較高，如何進一步降低氫氣生產和應用成本，是推動氢能大規模應用的關鍵。

苗華山總監強調，聯華林德將繼續加大對氢能技術的研發投入，並通過規模化生產和技術進步，不斷降低成本。同時，公司也積極尋求與其他企業、科研機構和政府部門的合作，共同推動氢能產業的健康發展。

氢能的發展離不開政策和市場的支持。政府應制定有利的政策環境，提供資金和稅收優惠，鼓勵企業進行氢能技術研發和應用。市場方面，需要通過示範項目和市場推廣，提升公眾對氢能的認知和接受度。

聯華林德積極參與國內外氢能政策制定和行業標準的制定，並與多個地方政府和企業合作，推動氢能示範項目的實施。苗華山總監呼籲，各界應攜手合作，共同推動氢能產業的快速發展，為實現全球能源轉型和可持續發展貢獻力量。

結語

氢能革命正在全球範圍內迅速展開，其作為清潔、高效的能源形式，將在未來能源結構中發揮越來越重要的作用。通過技術創新、政策支持和市場推廣，氢能有望在交通運輸、工業製造及儲能等多個領域實現大規模應用，推動全球能源轉型和可持續發展。

聯華林德公司作為氢能技術的領軍企業，將繼續引領氢能技術創新和應用，為氢能革命的推進貢獻力量。相信在各方的共同努力下，氢能將成為未來能源格局中的重要一環，為人類社會的綠色發展帶來新的機遇和挑戰。

致謝

本文由量測資訊編輯部依苗華山總監於 113 年 5 月 17 日世界計量日「計量支持產業經濟永續發展」研討會中之「氢能革命：推動可再生能源的未來」專題演講內容編撰，經演講者同意刊登，特此致謝。

編 撰 作 者

劉純秀 / 工業技術研究院 量測技術發展中心 產業策略推動部 / 副管理師

專 家 介 紹

苗華山 / 聯華林德 氢氣動能 / 總監



次兆赫光電通訊元件之頻譜特性檢測技術

劉子安 / 林高祺 / 吳俊斌 / 湯士源 / 黎宇泰

下世代高速通訊相關元件開發過程中，需要合適的檢測技術。在高速矽光子光電轉換元件方面，說明目前利用電子式與光學式頻寬量測方式，預期可達到 $>200\text{ Gb/s}$ 的量測頻寬。在通訊材料與電磁波空間分布量測方面，開發以兆赫時域頻譜分析系統搭配可量測穿透與不同反射角的架構，以0度入射角為例，接收反射角度從14度到90度；以90度入射角為例，接收反射角度從-76度到90度，解析度1度，可量測上述水平角在0.1 THz ~ 1 THz間之兆赫波強度。實際量測四氟乙烯、 $\epsilon\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 等高頻材料的介電與磁導常數頻譜，以及十字型重複性金屬結構的繞射空間頻譜分布。

一、 簡介

下世代資通訊產業應用將朝向6G行動寬頻、物聯網(internet of things; IoT)、運用機器學習之人工智慧(artificial intelligence; AI)、生醫感測、量子運算、運用光達(LiDAR)之自駕車等領域。日本6G技術發展以2020年12月成立的「Beyond 5G新經營戰略中心」主導，關鍵技術的研發主要為兆赫波(terahertz wave)、傳送媒介轉換(如光與兆赫波)、全光子網路(all photonics network)...等，具體內容包括富士通(Fujitsu)主導的「使用兆赫茲波的光束控制通訊系統的研發」、KDDI主導的「具經濟性與傳送性的分區多工光網路基礎技術的研發」等^[1]。

因此利用高頻通訊用矽光子之共同封裝、6G兆赫波通訊，例如可重構智慧表面(reconfigurable intelligent surface; RIS)元件等相關技術，利於優化訊號的傳輸速率與傳播特性。在矽光子部分，為解決高速/高效能需求帶來之技術瓶頸，目前開發的過程中，廠商開發低耗損光電載板及超高速光電訊號相關元件技術，需要相關頻寬量測技術，滿足資料中心伺服器高速傳輸需求。

在6G兆赫波的自由空間傳播方式上，韓國三星公司於2022年5月發表6G頻譜白皮書，說明(92~300) GHz的次兆赫(sub-THz)頻段可提供超高速數據傳輸。兆赫波頻率上可用的豐富頻譜資源可以顯著提高無線通訊

的資料速率^{【2】}。然而由於6G頻段對於空氣的損耗大，使傳播距離短。為了解決6G通訊的電磁波覆蓋率不佳問題，目前迫切需要一種能夠將兆赫波訊號偏轉到所需方向的波束形成技術，以補償兆赫波的嚴重路徑損耗，提高指向性。因此，隨著下一代無線通訊的發展，對智慧波束形成和電磁訊號處理的需求日益增長^{【3】}。新興的可重構智慧表面(RIS)為透過控制其元件的複雜反射係數來重建電磁波傳播環境提供了一個有前景的訊號中繼傳輸解決方案^{【4】}。RIS是由大量的被動反射元件組成，可快速且準確的預估通訊頻道，並可藉由調整各個元件的相位，將入射的電磁波訊號通過反射、折射、聚焦等組合調整入射電磁波訊號至特定方位；透過調整RIS接收與發射角度可提升 sub-THz 覆蓋範圍，適合安裝在大量建築物、公共汽車、火車甚至採礦隧道中。RIS近幾年備受關注，被視為未來無線通訊架構下極具潛力的節能技術，也是實現6G情境中相當重要的關鍵組件。目前5G高頻通訊頻段在10 GHz以下，6G通訊標準或產品尚未出來，國外相關少數單位已有RIS產品開發，國內並無寬頻與簡便的量測技術，可快速優化製程參數，使這些元件能工作在符合相關規格，降低開發成本。

在通訊用高速、高容量矽光子相關光電

轉換元件之頻寬檢測方面，目前超高頻元件的頻寬量測相當困難，相關元件的頻寬檢測顯得日益重要，利用電子式儀器檢測矽光子光電轉換元件的頻寬可達100 GHz，日後勢必會有更高頻的需求，這時就需要用到光學式的量測方式，本文將簡單說明目前與未來可能的頻寬量測方式。

而在6G材料開發之材料特性頻寬與空間分布量測方面，本文將介紹利用兆赫茲（或簡稱兆赫）時域頻譜分析法(terahertz time domain spectroscopy; TDS)，對6G高頻磁性材料進行介電與磁導相關參數的檢測與數據處理方法。兆赫波為0.1 THz~10 THz的非游離輻射電磁波，同時具有對樣品的高穿透性與光譜分析等優點，主要用於非破壞性檢測。由於下世代智慧型手機等元件間的間距變小，使晶片與晶片、晶片與天線間的輻射干擾日益嚴重^{【5】}。為抑制此干擾現象，電磁干擾(electromagnetic interference; EMI)屏蔽膜將派上用場，因此相關材料的開發相當重要，鐵磁性材料對於高頻電磁波具良好的吸收特性，在開發過程中需要知道其介電或磁導率等參數，以提供調整材料製程參數(recipe)方向的依據。

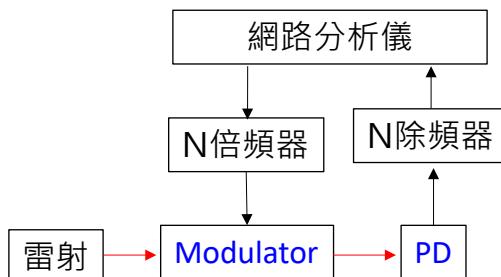
而6G兆赫波通訊最主要問題為較高的電磁波傳輸損耗，目前利用可重構智慧表面可將其傳播到不同方向以利於提高傳輸能量，

已有相關廠商進行開發，需要進行精確的頻譜與空間分布的量測。業界有相關電子式的檢測技術，利用光學法是一種提高檢測頻寬的方法。本文以類似RIS的週期性結構為樣品，利用合適的架構設計，建構兆赫波空間分布量測架構，達到二維(2D)空間電磁波分布的量測目的，以利於未來拓展到RIS的相關應用。

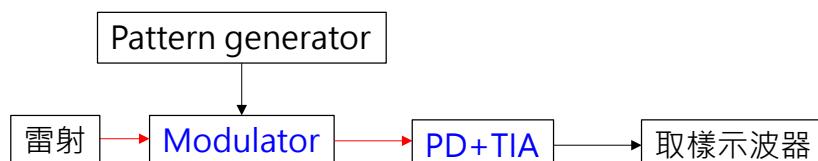
二、高頻光電通訊元件之頻譜檢測原理

通訊用矽光子元件中與頻寬有關最重要的元件是電光調制器與光偵測器，元件頻寬

以類比式的量測為主，如圖一所示。利用雷射打入矽光子晶片內的高速電光調制器，而電光調制器的電訊號輸入部分，以網路分析儀輸出高頻訊號或倍頻產生更高頻的訊號來進行調制，因此雷射經過此電光調制器後會產生載有高頻訊號的雷射，打入高速光偵測器後，經過除頻器降頻由網路分析儀所接收，若頻率太高可與內部高頻訊號混頻產生中頻訊號以利於接收。當待測物為電光調制器時，需要有經校正後的高頻光電偵測器，以反推其頻寬，反之亦然。



圖一 電子式的矽光子光電轉換元件類比(元件)頻寬量測法



圖二 電子式的矽光子光電轉換元件數位(系統)頻寬量測法

在矽光子的系統面上，以量測數位傳輸的眼圖情形，從而得知其是否可傳遞夠高數

據率(data rate)，意即所謂的數位頻寬的量測法，如圖二所示。以波形產生器產生一組

只包含0和1的偽隨機二進制序列(pseudo-random binary sequence; PRBS) , 輸入到電光調制器 , 將雷射進行被動式調制 , 輸出的光載PRBS訊號打入光偵測器 , 經轉阻放大器(transimpedance amplifier; TIA)將電流訊號放大並轉為電壓訊號 , 以利取樣示波器進行眼圖分析。

為了克服電子式的訊號產生器頻寬極限 , 可採用光學式的高頻訊號產生方式 , 利用雙波長雷射拍頻的方式產生連續波兆赫波作為高頻電訊號產生器 , 並可利用高頻探針將訊號耦合到矽光子的電光調制器 , 將光載微波訊號經光譜儀得到調制後的光譜旁模 , 並藉由調整雙波長差改變調製頻率 , 進而得到量測頻寬 ; 或與本地震盪器混頻得到中頻訊號 , 最後以電子式頻譜儀量得頻寬^{【6】}。而在系統面的數位頻寬量測方面 , 可利用光學式的邏輯數位閘^{【7-9】} , 產生多倍頻的PRBS訊號 , 後端搭配高速取樣示波器分析眼圖 , 達到數

位頻寬的分析 , 預期可達到>200 Gb/s的量測頻寬。

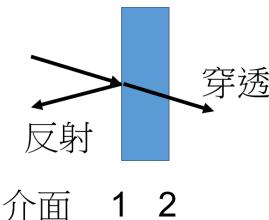
三、次兆赫頻段屏蔽材料的介電常數與磁導常數特性量測

1. 電性與磁性分析

如圖三所示 , 脈衝式兆赫波經過材料後可量到反射與穿透波 , 介面的穿透係數 t_1 、 t_2 與反射係數 r_1 分別為:

$$t_1 = t_2 = \frac{2\sqrt{z}}{z+1} \quad (1)$$

$$r_1 = \frac{z-1}{z+1} \quad (2)$$



圖三 兆赫波經過樣品的穿透與反射之示意圖

其中 z 為材料的電磁波阻抗。因此 , 最低階(第一個脈衝)的穿透係數與反射係數分別為

$$t(f) = |t(f)|e^{i\phi} = t_1(f) * t_2(f) = \frac{4z}{(z+1)^2} e^{2\pi i(n-1)fd/c} \quad (3)$$

$$r(f) = \frac{z-1}{z+1} \quad (4)$$

其中 n 為材料折射率 , 因為一般材料反射後與入射波的相位差可假設為 180 度 ,

令 $n=n_r+in_i$, 代入上式後可以化簡為

$$n_r = 1 + \frac{\varphi c}{2\pi f d} \quad (5)$$

$$n_i = -c \times \ln \frac{|t(f)|}{[1 - r^2(f)] \times 2\pi f d} \quad (6)$$

其中 ϕ 為經過樣品前後的兆赫波相位差， c 為光速， f 為頻率， d 為樣品厚度。另知折

射率或阻抗皆與介電常數 $\epsilon(f)$ 與磁導常數 $\mu(f)$ 有關

$$n = \sqrt{\epsilon\mu} \quad (7)$$

$$z = \sqrt{\mu/\epsilon} \quad (8)$$

將上式代入後可得到而材料的介電常數 $\epsilon(f)$ 與磁導常數 $\mu(f)$ ：

$$\mu_r = n_r \times \frac{1+r}{1-r} = n_r \times \frac{1-|r|}{1+|r|} \quad (9)$$

$$\mu_i = n_i \times \frac{1+r}{1-r} = n_i \times \frac{1-|r|}{1+|r|} \quad (10)$$

$$\epsilon_r = n_r \times \frac{1-r}{1+r} = n_r \times \frac{1+|r|}{1-|r|} \quad (11)$$

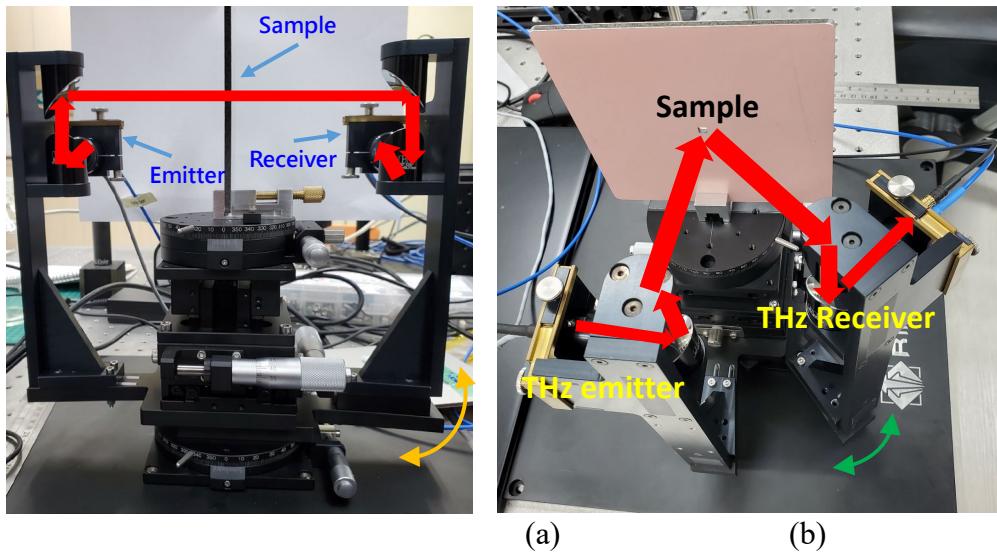
$$\epsilon_i = n_i \times \frac{1-r}{1+r} = n_i \times \frac{1+|r|}{1-|r|} \quad (12)$$

2. THz-TDS量測系統

針對 RIS 的檢測需要空間分布的量測，建立具有偵測臂可旋轉的光纖耦合兆赫時域頻譜系統，以利於分析兆赫波束轉向的性能，使此系統可同時量測樣品的穿透率與反射率。本文以商品化的 THz-TDS 系統(Toptica Photonics 公司的 TaraFlash Pro)做為材料特性量測模組。圖四為利用此系統進行高頻通訊吸收材料或波束轉向元件之(a)穿透式與(b)反射式等檢測方式，樣品置放平台為四維(直角坐標之三維加平面一維旋轉)移動的樣品系統，使樣品除了可三維移動外，另可旋轉 360 度，以最佳化樣品置放的位置，並固

令 $\epsilon=\epsilon_r+i\epsilon_i$ ； $\mu=\mu_r+i\mu_i$ ，則

定在旋轉台的中心。從兆赫波發射器產生的線偏極化兆赫波經一對拋物面鏡聚焦到樣品上，聚焦大小約 5 mm，並以可變入射角($0^\circ \sim 90^\circ$)的方式打到樣品上，穿透或反射樣品後，經過另一對拋物面鏡將帶有樣品資訊的兆赫波導入固定在旋轉台臂另一端的光導偵測器，並經由後端擷取時域波形，由程式自動轉換為兆赫波的振幅與相位頻譜。由於天線模組與機械架構限制，以 0 度入射角為例，可接收反射角度從 14 度到 90 度；以 90 度入射角為例，可接收反射角度從 -76 度到 90 度，解析度 1 度，可量測每個方向在 $0.1 \text{ THz} \sim 1 \text{ THz}$ 間之全譜強度響應。



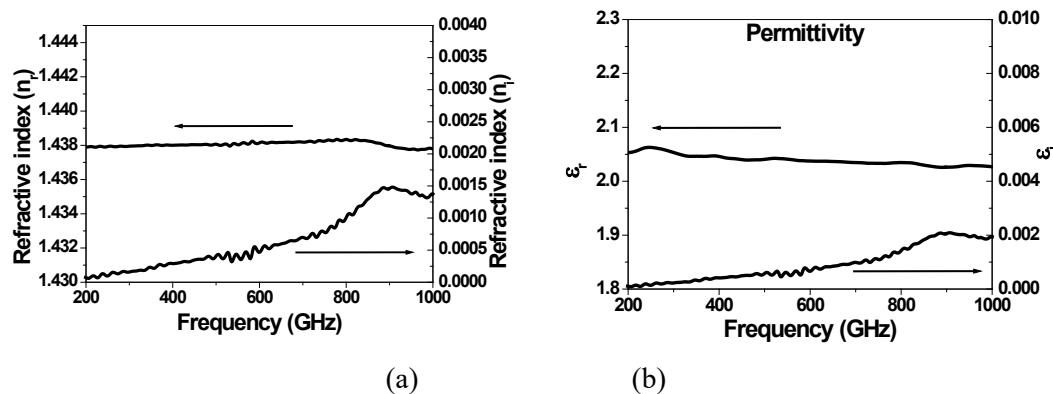
圖四 兆赫波脈衝時域頻譜分析系統搭配波束轉向量測架構之(a)穿透式與(b)反射式量測實體圖

3.量測結果與分析

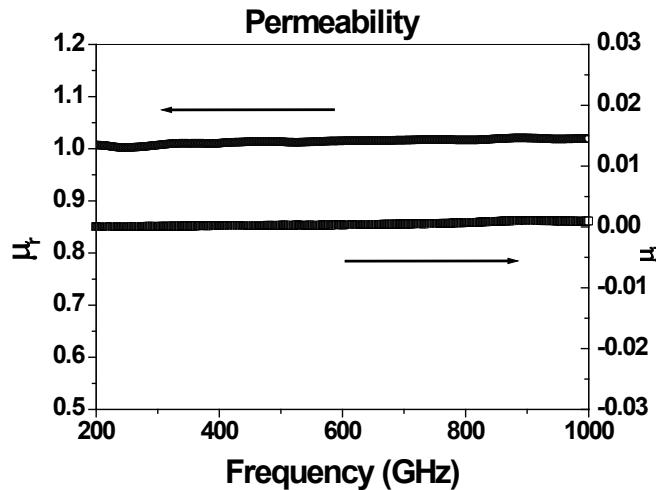
(1)PTFE 標準材料特性量測

為了測試系統量測材料的能力，以一般做為微波材料量測標準之低損耗聚四氟乙烯(polytetrafluoroethylene; PTFE)樣品(厚度約 10 mm)，搭配上述系統進行量測。圖五(a)與(b)分別為將量測出來的兆赫波穿透率

與反射率頻譜經過上述公式推導出來的折射率與介電常數(permittivity)等之實部與虛部頻譜，與之前單純用穿透式量測結果吻合。圖六為計算其磁導常數(permeability)實部與虛部，由於其為非磁性材料，因此與理論值接近(i.e. $\mu_r \sim 1$ ， $\mu_i \sim 0$)。



圖五 10 mm 厚 PTFE 樣品之(a)折射率與(b)介電常數之實部與虛部頻譜圖

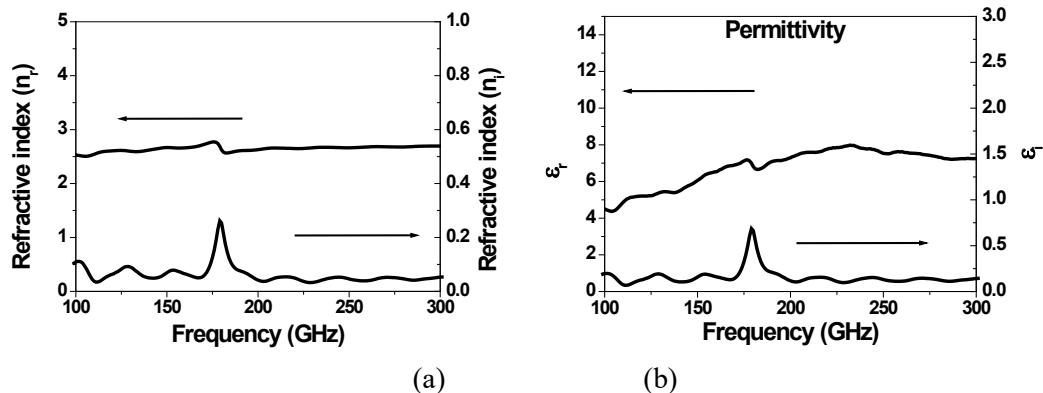


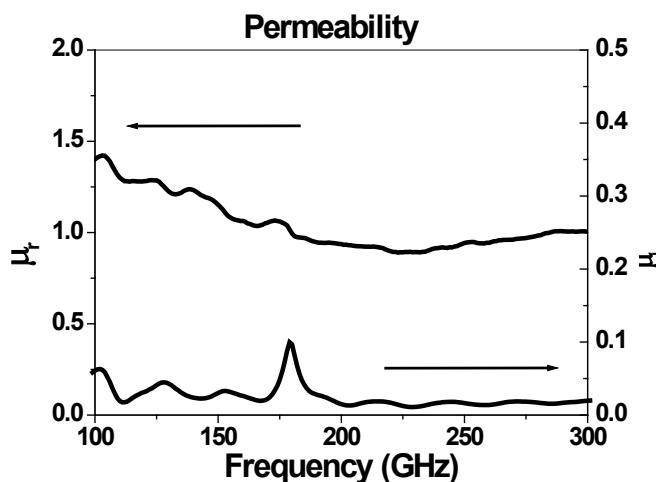
圖六 10 mm厚PTFE樣品之磁導常數之實部與虛部頻譜圖

(2) ϵ -Fe₂O₃ 磁性材料特性量測

以一般做為高頻 EMI 屏蔽材料 ϵ -Fe₂O₃ 材料(厚度約 0.87 mm)進行量測。圖七(a)與(b)分別為折射率與介電常數(permittivity)等之實部與虛部頻譜，可看到在 180 GHz 的吸

收區有明顯的非正常色散與尖峰現象，與之前單純用穿透式量測結果吻合。圖八為計算其磁導常數(permeability)實部與虛部，在 EMI 屏蔽區的 μ_r 並非趨近 1， μ_i 也非趨近 0。

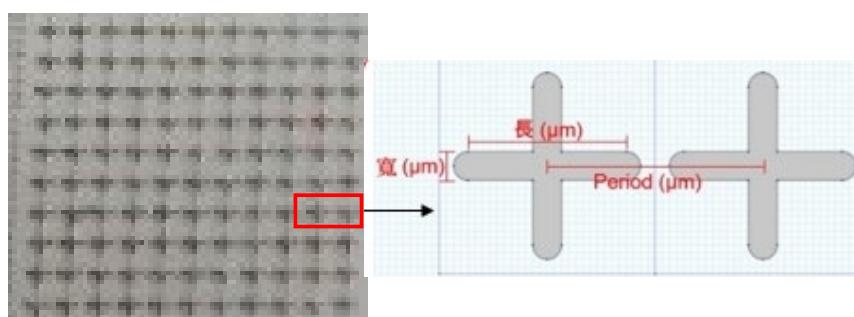
圖七 0.87 mm 厚 ϵ -Fe₂O₃ 樣品之(a)折射率與(b)介電常數之實部與虛部頻譜圖

圖八 0.87 mm 厚 ε -Fe₂O₃樣品之磁導常數實部與虛部頻譜圖

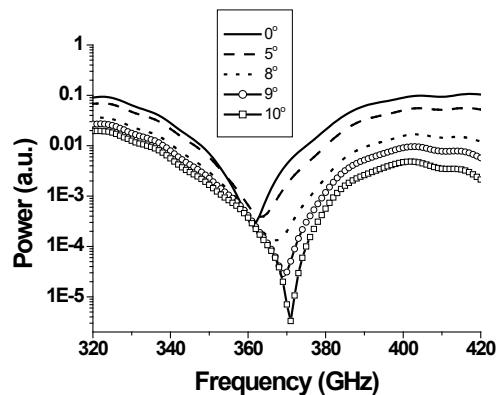
(3)週期性結構材料

為了測試系統量測週期性結構材料的能力，以十字型的重複性金屬結構做在 PP 塑膠基板上，如圖九所示，十字之長、寬與週期(period)分別約為 265 μm、50 μm 與 400 μm。這種結構除了具有共振吸收峰，可利

用不同附在上面的材料改變峰值的位置，做為一般生醫樣品的成分檢測外，其週期性結構也會有類似光柵的繞射效應，在不同角度看到不同頻率響應。圖十為量測其穿透頻譜，並改變接收角所看到的頻偏效果，確認機械架構進行高解析角度量測的可行。



圖九 PP塑膠基板上的十字型重複性金屬結構實體圖



圖十 改變不同接收角所看到元件吸收頻譜改變的效果

結論

本文提出說明未來可利用雙波長拍頻方式可產生高頻訊號，並利用光譜儀或頻譜儀量測矽光子光電轉換元件的類比頻寬，並可搭配光學式的數位邏輯閘產生高頻數位訊號，藉由高速示波器的眼圖分析，得到系統的數位頻寬資訊。此技術未來可推廣於高速矽光子製程與頻寬檢測等相關廠商。

工業技術研究院建立了具有旋轉與升降功能的光纖耦合兆赫時域頻譜系統，除了可分析鐵磁性材料的EMI屏蔽材的介電與磁導常數外，也可分析樣品轉折或繞射兆赫波束的空間分布與頻譜特性，藉由拋物面鏡將兆赫波聚焦到樣品上，底部具旋轉台除了可以從穿透式改為反射式外，搭配樣品旋轉台可同時具有選擇入射角與反射角的功能。量測具有週期性結構的兆赫波束轉折樣品，可接收兆赫波反射角度從-76度到 90度，角度解析度1度，並可量測每個方向在0.1 THz ~ 1 THz間之全譜強度分布，以利於快速回饋相關產業進行製程修正。完成快速且全域式6G RIS相關元件之空間與頻域特性量測技術，可降低國內產、學、研相關元件開發與測試的成本與時間，並推廣於6G高頻通訊用介電、屏蔽、半導體材料等之生產或檢測廠商。

參考文獻

- 胡儀芳，日本官民齊力投入6G關鍵技術研發 以戰略性取得核心專利與標準為目標，台北，電子時報，2021，網址：
https://www.digitimes.com.tw/tech/rpt/rpt_show.asp?CnID=3&v=20211029-

253&n=1。日期：2021-10-29

2. S. Koenig, D. Lopez-Diaz, J. Antes, F. Boes, R. Henneberger, A. Leuther, A. Tessmann, R. Schmogrow, D. Hillerkuss, R. Palmer, T. Zwick, C. Koos, W. Freude, O. Ambacher, J. Leuthold, I. Kallfass, Wireless sub-THz communication system with high data rate. *Nat. Photonics* 7, 977–981 (2013).
3. S. Dang, O. Amin, B. Shihada, M.-S. Alouini, What should 6G be? *Nat. Electron.* 3, 20–29 (2020).
4. S. Hu, F. Rusek, O. Edfors, Beyond massive MIMO: The potential of data transmission with large intelligent surfaces. *IEEE Trans. Signal Process.* 66, 2746–2758 (2018).
5. 陳靖函，軟板訊號傳輸之抗干擾材料，新竹，IEK 產業情報網，2019，網址：https://ieknet.iek.org.tw/iekrpt/rpt_more.aspx?actiontype=rpt&indu_idno=2&domain=10&rpt_idno=498413229。日期：2019-12-16
6. Burla, M., Hoessbacher, C., Heni, W., Haffner, C., Fedoryshyn, Y., Werner, D., ... & Leuthold, J. 500 GHz plasmonic Mach-Zehnder modulator enabling sub-THz microwave photonics. *APL Photonics*, Vol. 4, pp. 056106-1~056106-1-11166, 2019.
7. Kouloumentas, C., Stamatiadis, C., Zakynthinos, P., & Avramopoulos, H., Repetition rate multiplication of pseudorandom bit sequences. *IEEE Photonics Technology Letters*, Vol. 21, No. 7, pp. 456-458, 2009.
8. Hossain, M., Rakshit, J. K., & Zoiros, K. E. (2022). Microring resonator-based all-optical parallel pseudo random binary sequence generator for rate multiplication. *Optical and Quantum Electronics*, 54(8), 525.
9. He, L., Zhang, F., Zhang, H., Kong, L. J., Zhang, W., Xu, X., & Zhang, X. (2022). Topology-Optimized ultracompact all-optical logic devices on silicon photonic platforms. *ACS Photonics*, 9(2), 597-604.

— (作)者 (簡)介 —

劉子安 / 工業技術研究院 量測技術發展中心 淨零碳智慧計量儀器實驗室 / 資深研究員

林高祺 / 工業技術研究院 量測技術發展中心 淨零碳智慧計量儀器實驗室 / 研究員

吳俊斌 / 工業技術研究院 材料與化工研究所 電磁材料元件研究室 / 研究員

湯士源 / 工業技術研究院 材料與化工研究所 電磁材料元件研究室 / 經理

黎宇泰 / 工業技術研究院 量測技術發展中心 淨零碳智慧計量儀器實驗室 / 經理

○○○

大尺寸模組及金屬組件溫濕環境腐蝕 試驗研究

丁三宇 / 楊維綸 / 盧冠伍 / 蔡閔安 / 謝卓帆

本研究聚焦於大尺寸太陽能模組及金屬組件，深入探討模組放大對可靠度的影響。選用M6、M10單晶太陽能模組和建築整合 (Building-integrated photovoltaic; BIPV) 鋼板G12光電模組，關切太陽能光電模組設計材料的變革。同時考察太陽能系統的耐用性，尤其是金屬組件在台灣亞熱帶氣候的挑戰，透過四種金屬鎖扣件進行可靠度試驗，模擬金屬接觸可能的腐蝕現象。參考IEC 61730-2:2023及IEC 61215-2:2021標準，結合溫溼度可靠度試驗，包括低溫、乾熱和濕冷凍，提升對太陽能模組的要求，通過這些測試，評估大尺寸模組及金屬組件在極端環境下的可靠性，確保其能抵抗腐蝕和水氣膨脹所帶來的損害。

一、前言

近年來，太陽能發電逐漸普及，模組尺寸也隨之放大以提高發電效率，然而，模組尺寸增加可能會對可靠度造成影響，因此有必要深入探討其影響因素。本研究選用了三種面積大於 2.1 m^2 的大尺寸太陽能電池模組，包括M6和M10單晶太陽能模組以及建築整合 (Building-integrated photovoltaic, BIPV) 鋼板G12光電模組。透過這三種型式的選擇，探討了模組大小逐漸放大對可靠度的可能影響。此外，太陽能發電系統的耐用

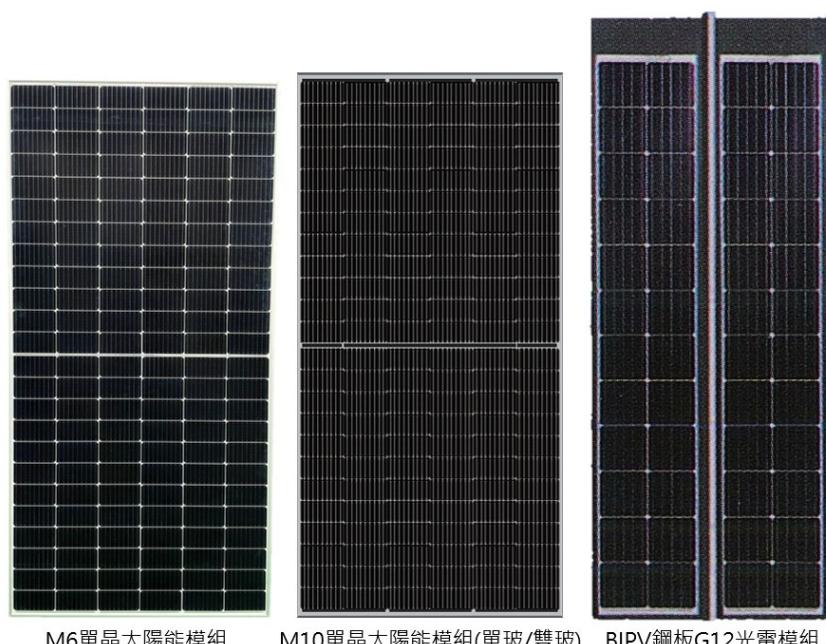
性不僅取決於太陽能模組本身，還需考慮搭配的金屬組件；台灣亞熱帶氣候中，強風、高濕度和溫度變化對金屬組件造成影響，為了模擬實際情境，選用了四種常見金屬鎖扣件進行可靠度試驗，測試部分主要參考了最新國際標準IEC 61730-2:2023及IEC 61215-2:2021進行設計，該標準對大尺寸太陽能系統品質提出了更高的要求。本研究將標準內三項較為嚴苛的溫溼度可靠度測試進行結合，分別為低溫試驗、乾熱試驗及濕冷凍試驗。藉由上述低溫、高溫及高濕度的循環測試，可以試驗大尺寸太陽能模組及金屬組件是否

足夠抵抗腐蝕傷害和水氣膨脹擴大材料分子的影響。

二、研究實驗設計

隨著近年來太陽能電池片逐漸放大，新型大尺寸太陽能電池模組面積大小已超越2.1 m²以上，為了能針對各種型態之大尺寸太陽能電池模組，進行有效且準確的大尺寸模組及組件可靠度評估試驗，本研究選用了三種型式面積大於2.1 m²以上的大尺寸太陽能電池模組，其分別為M6單晶太陽能模組、M10單晶太陽能模組及建築整合(Building-integrated photovoltaic; BIPV) 鋼板G12光

電模組，如圖一所示。選用此三種型式除了可探究當電池及模組大小逐漸放大的情況下，其可靠度是否也會因此受到影響。而除了模組尺寸大小的變化之外，太陽光電模組本身設計材料變化也是必須考慮的要點，為了提升國內太陽能建置量，國內廠商研發出與建築整合的太陽能BIPV新型大尺寸鋼板光電模組，相較一般鋁框太陽能模組，BIPV大尺寸鋼板光電模組具有輕量化、易安裝及低成本等優點，預計將會成為未來國內太陽能市場主力之一，因此將此型式納入本研究，可進行大尺寸模組材料變化對於其可靠度的影響。



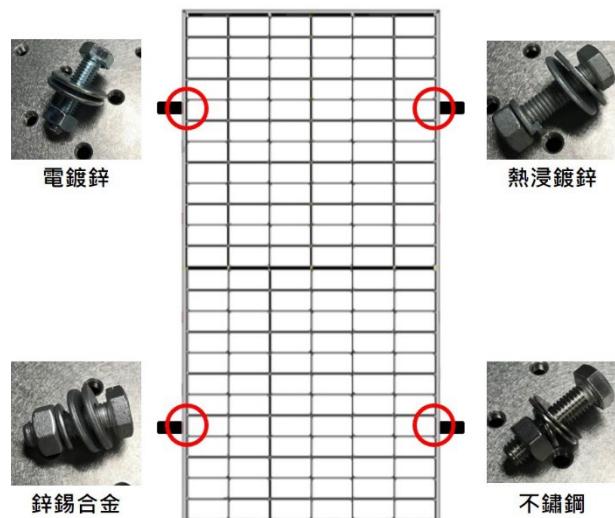
圖一 各式大尺寸太陽能電池模組

然而，談及太陽能發電系統的可靠性和耐用性時，除了考慮大尺寸太陽能模組條件外，配套的金屬組件也會對其可靠性產生影響。台

灣四周環海的環境，造就夏季高溫高濕和冬季低溫高濕等嚴苛的氣候條件。在太陽光電案場實際應用中，金屬組件與太陽能模組的連接部

分，以及與不同金屬直接接觸的螺栓孔等地方，都是需要考慮的重要因素。不同金屬相接觸時，由於標準電極電位存在差異，會產生電流，在受環境影響較強的一側，金屬可能會發生腐蝕。腐蝕後，材料表面可能出現孔洞，進而導致連接部位強度降低等問題，如果遭受強風襲擊，

還可能導致太陽能電池板掉落等事故。因此，為了評估大尺寸太陽能模組及其配套金屬組件的可靠性，研究中選擇了四種常用的金屬鎖扣件，如圖二所示，模擬實際情況將其鎖固於模組和支架上，並進行可靠度試驗測試。



圖二 大尺寸模組及金屬組件架設圖

選定進行研究之大尺寸模組及金屬組件後，針對大尺寸模組及組件可靠度評估試驗平台部分，主要參考了最新國際標準IEC 61730-2:2023及IEC 61215-2:2021進行設計，這兩份標準是太陽能產業最重要的基礎標準之一，對

於太陽能模組安全結構與測試要求可靠度鑒定，對大尺寸太陽能模組品質提出了更高的要求；本研究將標準內三項較為嚴苛的溫溼度可靠度測試進行結合，分別為低溫試驗、乾熱試驗及濕冷凍試驗，其測試條件如下表一。

表一 大尺寸模組及組件可靠度評估試驗條件

試驗名稱	試驗條件	試驗時程
低溫試驗	溫度： $-40 \pm 3^\circ\text{C}$	48 小時
乾熱試驗	溫度： $105 \pm 5^\circ\text{C}$	200 小時
濕冷凍試驗	溫度 85°C / 濕度 85% R.H. 溫度 -40°C / 濕度 85% R.H.	高溫20小時 低溫4小時 循環10 cycles

備註: R.H.為相對溼度

藉由上述低溫、高溫及高濕度的循環測試，藉此可以試驗大尺寸太陽能模組及金屬組件是否足夠抵抗腐蝕傷害和水氣膨脹擴大材料

分子的影響，大尺寸模組及組件可靠度評估試驗流程如圖三。



圖三 大尺寸模組及組件可靠度評估試驗流程圖

三、研究執行情況

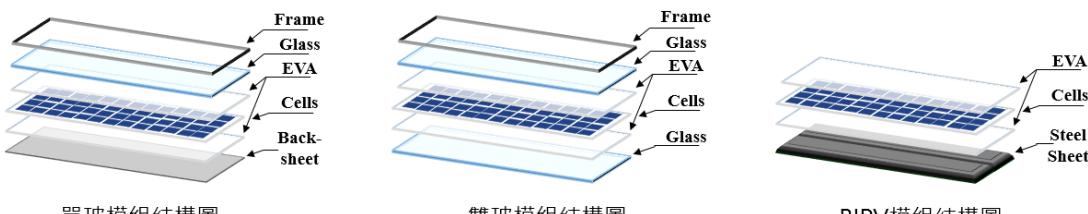
近年來在太陽能系統的應用中，因大尺寸模組具有更大的表面積和更高的功率輸出，能夠更有效地收集和轉換太陽能，在太陽能系統中扮演著重要的角色，而金屬鎖固件則是大尺寸模組安裝過程中不可或缺的組件。為了確保這些系統的可靠性和穩定性，針對大尺寸模組以及太陽能系

統常見的金屬鎖固件材料做了準備工作。模組方面，選用M6單晶太陽能模組、M10單晶太陽能模組以及BIPV新型G12大尺寸鋼板光電模組，為了確保測試前後的數據比較，首先進行了相應的前置準備工作，包含目視檢查、STC狀態最大功率量測、乾絕緣測試及濕漏電測試，模組結構及初始功率量測結果如表二及圖四所示。

表二 大尺寸太陽能模組初始功率量測結果

樣品編號	太陽電池尺寸 (mm)	太陽模組尺寸 (mm)	測試條件	P_{max} (W)	FF(%)
ITRI-M6單玻-01	M6 (166 × 166)	2,095 × 1,039 × 40	Initial	454.0	80.02
ITRI-M10單玻-02	M10 (200 × 200)	2,277 × 1,133 × 40	Initial	535.7	78.30
ITRI-M10雙玻-03	M10 (200 × 200)	2,277 × 1,133 × 40	Initial	543.8	78.84
ITRI-G12 BIPV-04	G12 (210 × 210)	2,660 × 550 × 20	Initial	206.9	72.06

備註: FF為填充因子 (Fill factor)。



圖四大尺寸太陽能模組結構

金屬鎖固件材料方面，實驗室與國內金屬材料業者合作，在選用目前現行普遍四種商用材料，分別為電鍍鋅、熱浸鍍鋅、鋅錫合金以及不鏽鋼，支架部分則是選用太陽能系統廠常用的兩種材料，分別為鎂鋁鋅合金以及鎂鋁鋅合金新日鋼，將不同金屬材料結合之螺絲、扣件及支架為組合，

與大尺寸太陽能模組架設安裝，一併進行圖三大尺寸模組及組件可靠度評估試驗測試，以模擬實際戶外太陽能系統的架設情況，在進行大尺寸模組及組件可靠度評估試驗，更能有效驗證其性能和老化情況。

四、研究執行結果

完成大尺寸模組及組件可靠度評估試驗

後，我們首先檢視大尺寸太陽能模組是否受到環境溫濕、腐蝕或水氣膨脹擴大材料分子等因素的影響。我們對M6單晶太陽能模組、M10單晶太陽能模組以及BIPV新型G12大尺寸鋼板光電模組進行了模組後測試，包含目視檢查、STC最大功率測試、乾絕緣測試和濕漏電流測試等。在目視檢查中，我們發

現M6單晶太陽能模組、M10單晶太陽能模組以及BIPV新型G12大尺寸鋼板光電模組的外觀部分並未出現腐蝕或損壞的情況。乾絕緣測試和濕漏電流測試的結果也顯示，這些模組的性能與初始值相比差異不大。然而，值得注意的是，最為明顯的差異出現在測試前後的功率部分。

表三 大尺寸模組測試前、後功率量測結果

樣品編號	太陽電池尺寸 (mm)	太陽模組尺寸 (mm)	測試條件	P_{max} (W)	功率衰減 (%)
ITRI-M6單玻-01	M6 (166 × 166)	2,095 × 1,039 × 40	Final	440.1	3.06
ITRI-M10單玻-02	M10 (200 × 200)	2,277 × 1,133 × 40	Final	516.9	3.51
ITRI-M10雙玻-03	M10 (200 × 200)	2,277 × 1,133 × 40	Final	536.1	1.42
ITRI-G12 BIPV-04	G12 (210 × 210)	2,660 × 550 × 20	Final	129.9	37.22

如表三所示，經過大尺寸模組及組件可靠度評估試驗流程後，我們首先觀察M6單晶太陽能模組和M10單晶太陽能模組的功率衰減，均未超過5 %。然而，實驗發現M10單晶的功率衰減較M6單晶更明顯，推測原因可能是由於M10單晶模組的表面積較大，在高低溫循環中，溫度效應可能對太陽能電池的性能產生更大的影響，進而影響其效能和壽命。同樣是M10單晶大小的大尺寸模組中，一般背板大尺寸矽晶太陽模組的功率衰減較雙面玻璃大尺寸矽晶太陽模組更為明顯。這可能是因為單面模組在高低溫循環時，內部元件受到環境溫度變化的影響較大，容易出現微小損傷或老化，進而影響功率輸出，而雙面模組由於有正反面玻璃保護層，具有

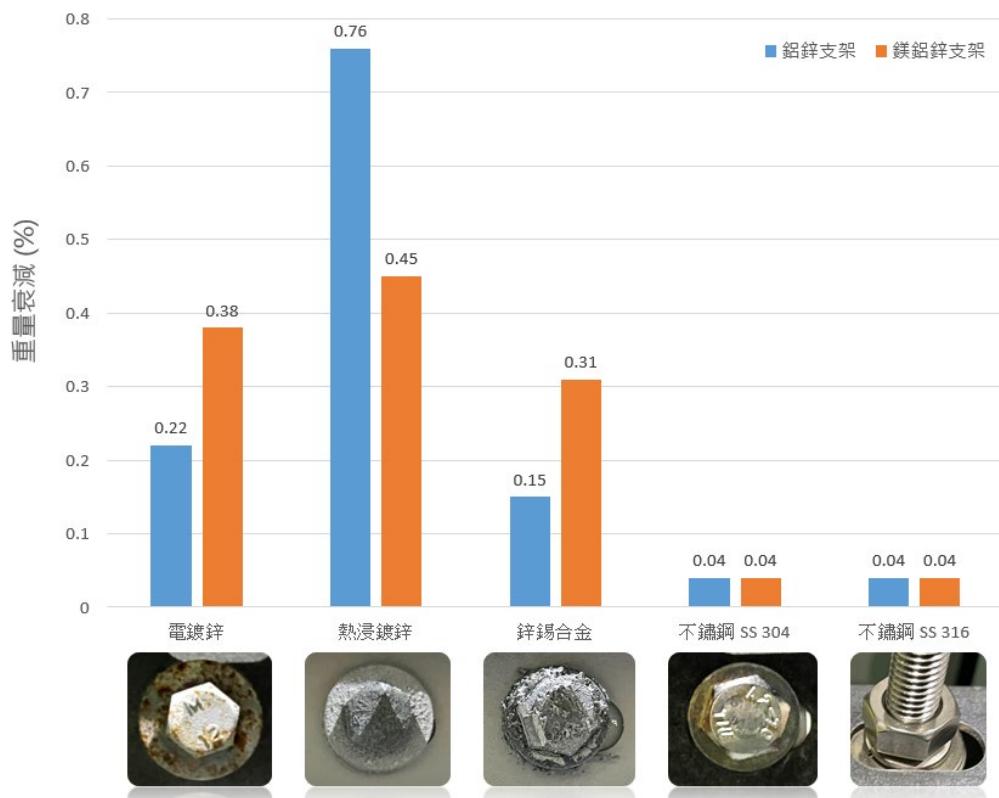
更高的耐候性。

此外，大尺寸BIPV太陽模組的測試後功率衰減超過35 %，主要原因可能來自其模組結構。由於搭配大尺寸電池，模組體積增大，表面增加強化玻璃，使得安裝上的困難度增加。為減輕重量，模組正面沒有玻璃保護矽晶電池，使得太陽能電池更容易受到外部環境的影響。這強調了玻璃封裝對於電池保護的重要性，可提供業界在製造大尺寸矽晶模組或BIPV太陽模組時的參考。

除了模組功率電性量測外，此試驗還對市面上常用金屬組件進行了可靠度評估試驗，研究測試前後的老化腐蝕程度。根據CNS 14122標準，使用機械處理的方式，在持續流動的水中以軟毛刷進行樣品清洗，清除腐

蝕生成物，並對電鍍鋅扣件、熱浸鍍鋅扣件、鋅錫合金扣件、不鏽鋼SS 304扣件及不鏽鋼SS 316扣件等進行了測試前後重量量測比較。

結果如圖五所示，這些常用金屬扣件經過可靠性評估試驗後，金屬重量均有下降。



圖五 常用金屬扣件戶外測試前、後重量比較

可以發現不同金屬扣件其重量減少程度不同，其中又以鍍上金屬後之螺絲，如鍍鋅及熱浸鍍鋅，其腐蝕程度較為嚴重，在經過高溫低溫濕度循環測試之後，可能會發生鏽蝕的原因是多種因素的綜合作用。首先，化學反應在高溫、濕度的環境中更容易發生，導致螺絲表面產生氧化物，進而形成鏽蝕；其次，水分與氧氣是鐵鏽蝕的主要元兇，而

高溫低溫的變化可能使水分滲透到微小裂縫中，使得氧氣更容易接觸螺絲表面，從而引發鏽蝕。除此之外，熱膨脹與收縮現象也參與其中，高溫和低溫的變化可能加速微小裂縫的形成或擴大，進一步促進水分滲透，加速鏽蝕的過程。另外從上述結果來看，螺絲的材料也是影響其耐腐蝕性的重要因素，不鏽鋼、合金等金屬相對於一般鋼材有更強的

抗腐蝕性，因此在惡劣環境中使用螺絲時，選擇合適的材料至關重要。藉由高溫低溫濕度循環之可靠度評估試驗，模擬金屬扣件長期處於極端環境中，可能破壞螺絲表面的保

護層，使其更容易受到腐蝕，在這樣的條件下，為了確保螺絲的耐用性，除了選擇抗腐蝕性較強的材料外，還應考慮採取其他保護措施，以延長其使用壽命。

結論

本研究針對大尺寸太陽能模組及金屬組件進行可靠度評估試驗，以探討模組放大對可靠度的影響。試驗結果顯示，大尺寸模組的功率衰減與模組尺寸、設計材料和組裝等因素有關。在模組尺寸方面，M6及M10單晶太陽能模組功率衰減未超過5%，M10單晶較明顯，或因其表面積大，溫度變化影響較大。M10單晶大尺寸模組中，背板矽晶模組功率衰減較雙面玻璃模組明顯，單面模組在高低溫循環易受環境變化影響。在設計材料方面，大尺寸BIPV模組後測功率衰減超過35%，可能因模組結構增大，安裝困難度提高，正面無保護矽晶層，易受外部影響。強調了玻璃保護層對電池保護的重要性。在組裝方面，試驗也評估了市面上金屬組件，如電鍍鋅、熱浸鍍鋅、鋅錫合金、不鏽鋼SS 304和SS 316扣件，測試前後重量比較，結果顯示金屬扣件經評估試驗後均有下降，腐蝕程度與材料選擇有關，利用高溫低溫濕度循環試驗模擬極端環境，可破壞扣件表面保護層，選擇耐腐蝕材料及採取保護措施，有助於提升扣件使用壽命。基於上述研究結果，在模組設計方面，應考慮模組尺寸對功率衰減的影響，並採取措施減緩功率衰減，例如，採用雙面玻璃模組或在模組背面加裝保護層；在組裝方面，應使用耐腐蝕材料或採取保護措施，延長金屬組件的使用壽命。例如，使用不鏽鋼或鍍鋅材料，並在金屬組件表面塗覆防腐塗層。本研究成果可為太陽能模組和金屬組件的設計、製造和應用提供參考。

誌謝

本論文由於能源署的支持，以及緻揚實業股份有限公司合作提供金屬試驗樣品，使本研究得以順利進行，特此致上感謝之意。

參考文獻

1. 經濟部能源科技研究發展 112 年度計畫。
2. IEC 61730-2:2023, Photovoltaic (PV) module safety qualification – Part 2: Requirements for testing.
3. IEC 61215-2:2021, Terrestrial photovoltaic (PV) modules - Design qualification and type approval - Part 2: Test procedures.
4. CNS 14122, 金屬及合金之腐蝕-大氣腐蝕-試片腐蝕生成物清除法

—◎作者簡介—

丁三宇 / 量測中心 綠能測試驗證實驗室 / 工程師

楊維綸 / 量測中心 綠能測試驗證實驗室 / 副工程師

盧冠伍 / 量測中心 綠能測試驗證實驗室 / 工程師

蔡閔安 / 量測中心 綠能測試驗證實驗室 / 資深研究員

謝卓帆 / 量測中心 綠能測試驗證實驗室 / 正研究員

○○○

機器學習應用於半導體先進製程

三維多參數結構量測

周柏文/顧逸霞

由於電晶體尺寸逐漸接近物理極限，因此近年來發展晶片立體堆疊設計，並採用矽通孔(TSV, through silicon via)核心製程技術成為延續摩爾定律的重要方法。本研究建立了多參數物理模型以進行量測光譜擬合，可用來分析矽通孔三維形貌參數，並已經由掃描式電子顯微鏡(Scanning Electron Microscope, SEM)切片影像驗證為非破壞性、高準確度的量測方法。但由於多參數擬合須多次迴圈逼近相對耗時，因此本研究結合機器學習方法，實驗結果顯示各參數的決定係數(Coefficient of determination ; R^2)高達0.99，且量測分析時間 ≤ 10 毫秒。本研究證實機器學習的導入大幅提升量測速度，未來可應用在先進封裝製程三維結構的多參數量測。

一、 前言

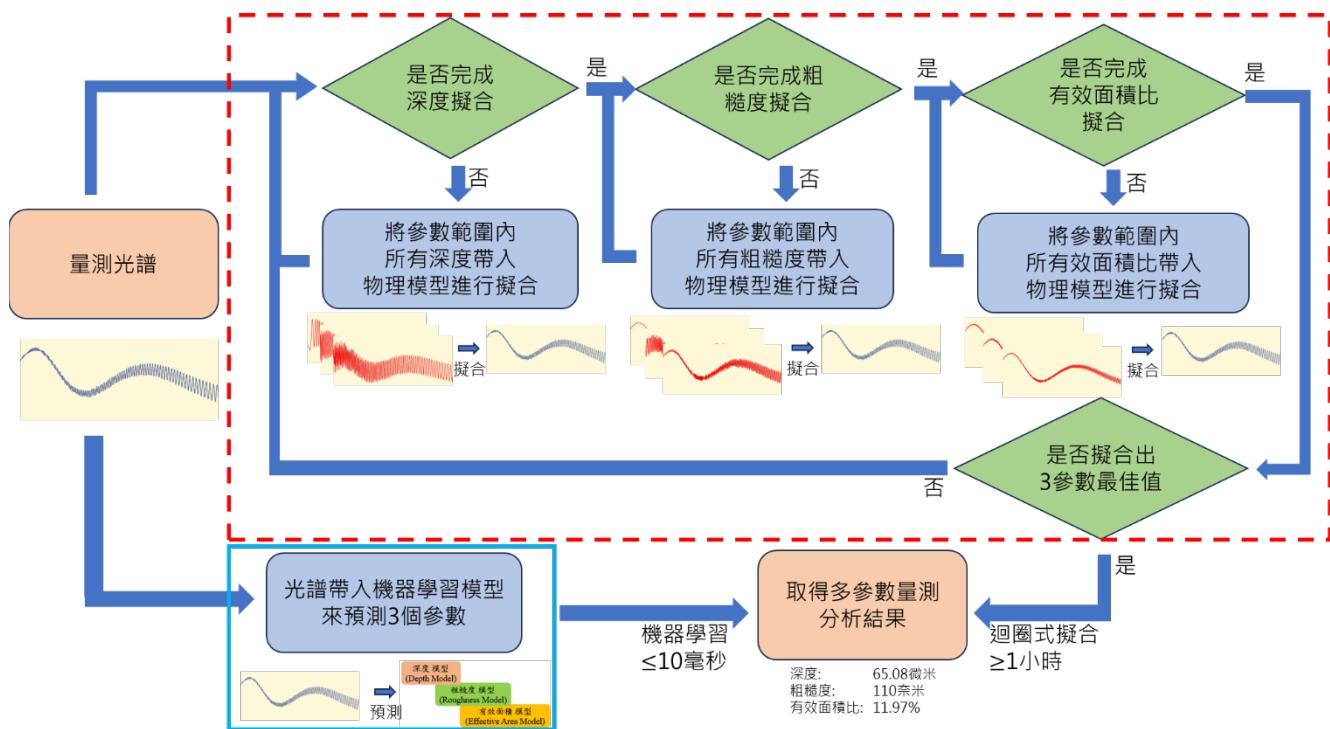
(1) 研究緣起

摩爾定律是由 Intel 公司的 Gordon Moore 所提出，其核心是預測每單位面積上的電晶體數量倍增所需的時間。然而近年來由於電晶體尺寸逐漸接近物理極限，縮小電晶體的難度越來越高，因此開發晶片立體堆疊設計，並採用矽通孔核心製程技術成為延續摩爾定律的重要方法。由於矽通孔的高深寬比三維結構參數，包含孔深(depth)、孔底曲率(curvature)及粗糙度(roughness)，

是影響後續填銅後形成立體導線的長度及電子訊號傳輸效能的關鍵，過去多採用掃描式電子顯微鏡進行矽通孔剖面檢測，昂貴、耗時且為破壞性。本研究近期建立了多參數物理模型來進行矽通孔量測光譜擬合分析，可用以分析矽通孔三維形貌參數，流程圖如圖一虛線所示。但由於建立多個物理模型較為複雜耗時，且由於各個參數對反射光譜波形特徵的影響具高度相關性，因此演算分析流程須進行多次迴圈式擬合，才能逐漸逼近最佳分析結果，約需耗時1-2小時。本研究期望開發一種快速、高準確度、非接觸性的量

測方法，可實際應用在複雜立體元件的多參

數量測分析。



圖一 迴圈式擬合與機器學習流程圖

(2) 研究目的

本研究目的是使用非破壞性的光學量測方法，搭配機器學習訓練模型來還原矽通孔三維形貌，並且提出優化模型超參數的方式，從而達到提升量測準確度與縮短模型訓練時間。首先本研究將矽通孔結構的三維參數，包含深度、粗糙度、有效面積比(effective area)，帶入物理模型計算出不同量測波長所對應的干涉光譜強度(intensity)，並且利用光譜強度標準化的作法將其換算成反射率，以取得大量可靠的數據用以發展機器學習模型，最終可應用訓練完成模型，用來即時預測矽通孔量測樣本微結構的深度、粗糙度、

有效面積比三個參數，流程圖如圖一實線所示，並接著還原出三維立體結構形貌。本研究結合了原有光學量測方法，而由機器學習模型取代原本較為繁複耗時的擬合演算流程，加速得到多參數量測結果，使其能夠與先進的立體封裝製程整合，具備高準確度，又能即時回饋量測數據並優化製程的目的。

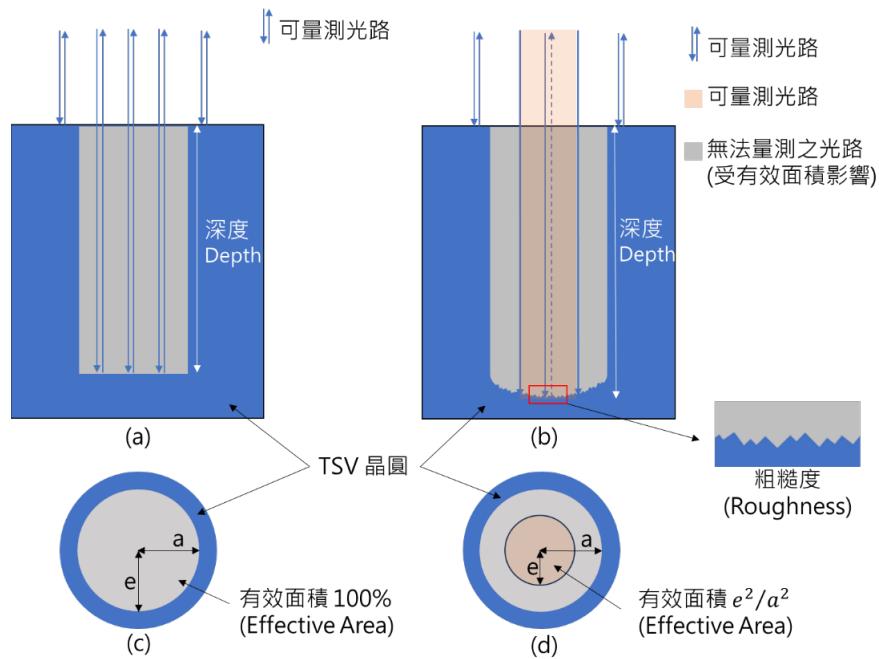
二、研究方法

(1) 矽通孔物理模型與參數影響

理想的矽通孔量測光路如圖二 (a)，孔底理想的反射有效面積比如圖二 (c)。但實際在量測矽通孔時受到三維多參數結構的影響，如圖二 (b)，由於矽通孔底部曲率的影

響，實際孔底可反射光面積如圖二 (d)。通常對光譜造成劇烈影響的有三個主要參數，

分別是矽通孔的深度、粗糙度、有效面積比。



圖二 (a) 理想矽通孔剖面圖。(b) 實際矽通孔剖面圖。
(c) 理想矽通孔底部俯視圖。(d) 實際矽通孔底部俯視圖

$$E_{via} = \left(\frac{e}{a}\right) \sqrt{(1 - \alpha)} e^{[-(4r_q\pi)^2/\lambda^2]} E_0 r_{si}^+ e^{[i2\pi(\frac{2d}{\lambda})]} \quad (1)$$

孔深會使反射光譜震盪訊號的頻率改變，底部粗糙度會導致光譜訊號衰減，尤其是在短波長衰減更加嚴重，底部有效面積會使光譜訊號在整個量測光譜範圍整體縮減。公式如式(1)所示，其中 E_{via} 為孔底反射電場， e , a 分別為孔底有效半徑與孔洞半徑。 α 與 $1 - \alpha$ 分別為照射光點內晶圓表面以及孔洞所占面積比。 r_q 為粗糙度，定義為表面高

度與平均表面高度的均方根偏差 (root-mean-square deviation ; RMSD)。 λ 代表量測波長， E_0 為入射光的電場， r_{si}^+ 為當材料為矽晶圓 (silicon) 時的菲涅耳 (Fresnel) 反射係數， d 為矽通孔的深度^[1]。

矽通孔結構量測理論模型是由晶圓表面反射訊號與矽通孔底部有效面積反射訊號所形成的干涉光譜訊號所組成，如圖二(b)所

示。干涉光譜強度的模擬模型公式如式(2)所示，本研究帶入不同範圍的深度、粗糙度與有效面積比數值，面積比 α ，波長 λ ，以及電

場 E_0 可計算出光譜中對應波長的光強數值，據此將可為機器學習模型建立大量的訓練數據集。

$$I = \alpha(r_{si}^+ E_0)^2 + (1 - \alpha)e^{[-(4r_q\pi)^2/\lambda^2]}(r_{si}^+ E_0)^2 \left(\frac{e}{a}\right)^2 + 2\sqrt{\alpha(1 - \alpha)e^{[(4r_q\pi)^2/\lambda^2]}}(r_{si}^+ E_0)^2 \left(\frac{e}{a}\right) \cos(2\pi(2d/\lambda^2)) \quad (2)$$

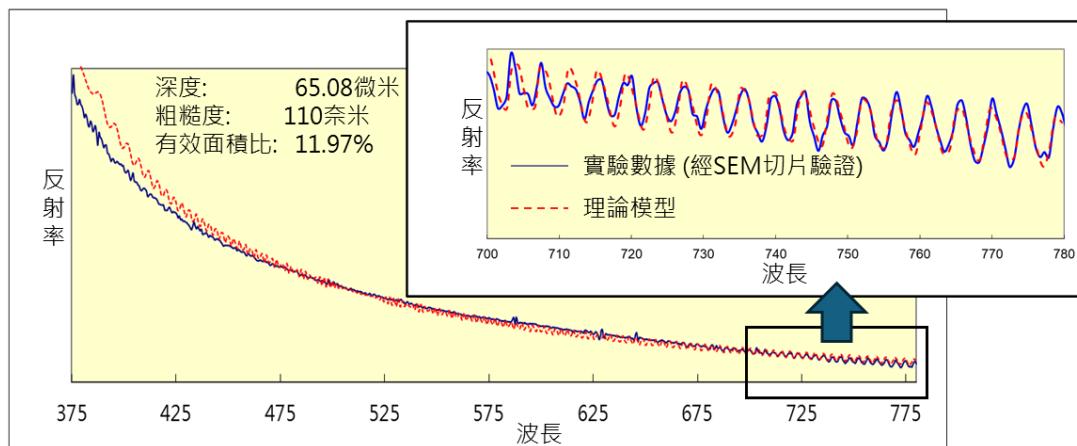
由於實際量測時每一次入射光所產生的電場數值 E_0 並不相同，因此本研究將光譜訊號進行正規化(normalization)的前處理^[2]，正規化如式(3)所示，其中 E_{exp} 為量測到的孔

底反射與表面反射干涉能量， E_d 為暗電流(dark current)能量， E_{ref} 為晶圓表面時反射能量。

$$R = \frac{E_{exp} - E_d}{E_{ref} - E_d} \quad (3)$$

本研究的量測光譜與理論模型光譜比較如圖三所示，所量測的矽通孔孔徑約為5微米，週距(pitch)約為10微米，面積比 α 約為81%，其中實線光譜為實際量測到的反射率光譜，虛線光譜則為理論模型擬合所產生的反射率光譜。經由理論模型擬合可以得到深度約為65.08微米，粗糙度約為110奈米，有效面積為11.97%。過去採用掃描式電子顯

微鏡切片影像驗證，可直接比對深度與粗糙度的結果，底部的有效面積則可透過橢圓模型理論來推算，如式(4)及式(5)推導。其中 (e^2/a^2) 為有效面積。 Δd_{via} 為深度解析度， d_{via} 為矽通孔深度， $\Delta\lambda$ 為CCD的像素解析度， $\bar{\lambda}$ 為平均波長， a 為矽通孔底部橢圓形貌的長軸， b 為孔底橢圓形貌的短軸^[1]。



圖三 理論模型套用實際參數與量測模組量測之波長與反射率比較圖

$$\Delta d_{via} = \frac{d_{via} * \Delta \lambda}{\bar{\lambda}} \quad (4)$$

$$\frac{e^2}{a^2} + \frac{(-b + \Delta d_{via})^2}{b^2} = 1 \quad (5)$$

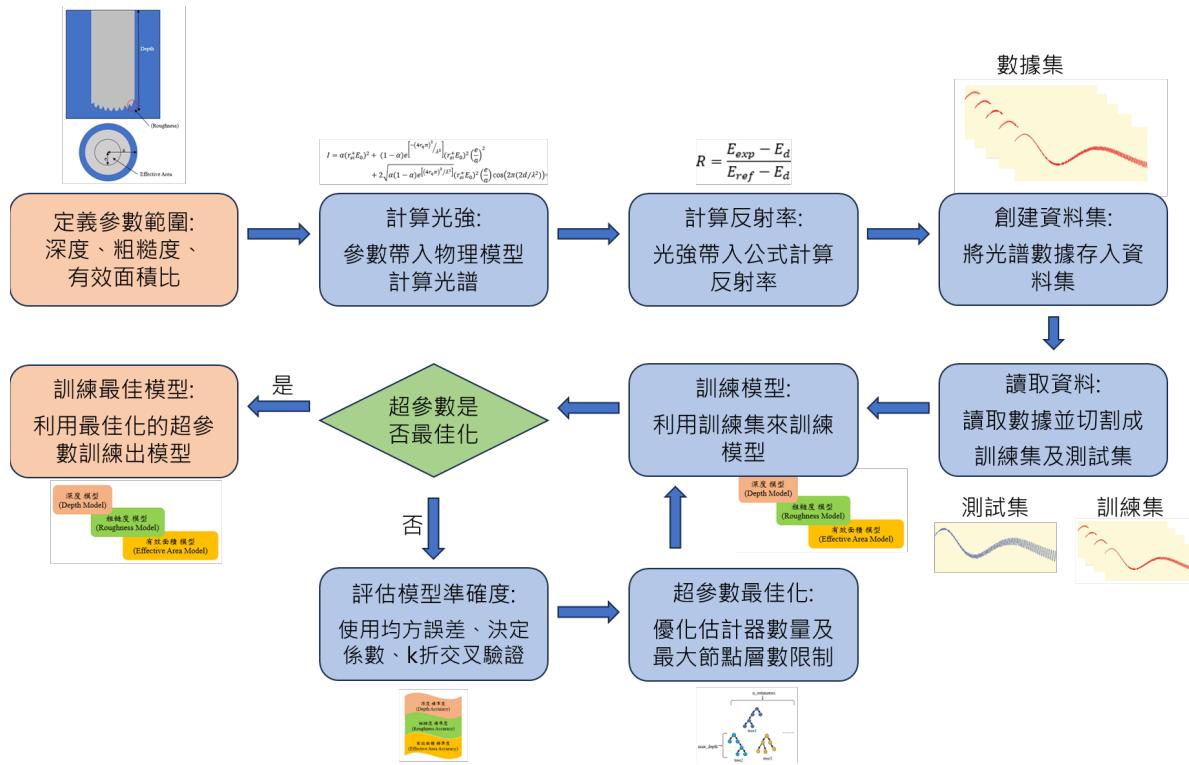
(1) 反射式光譜量測

我們使用商用的薄膜量測儀^[3]來量測對矽通孔樣本來進行量測，以實際量測的結果來驗證使用理論模型數據所完成的機器學習模型。矽通孔樣本所取得的干涉光譜通常會呈現在直流訊號上存在著規律性的振幅振盪。

(2) 機器學習架構介紹

本研究建構機器學習模型訓練的整體架構如圖四所示，由數據前處理及模型訓練過程兩個部分所構成，使用的程式語言為 python 3.10.9，模型為隨機森林回歸

(random forest regressor)，此模型是由複數決策樹(decision tree)所組成，當數據輸入模型時每一個決策樹會輸出一個預測的數值，最後由這些數值的平均值來決定模型輸出值。而選擇隨機森林回歸主要有以下優勢：第一，模型較簡易，相較於神經網路而言架構上較簡單。第二，訓練速度快，單一訓練模型時間只要 ≤ 700 秒。第三，預測速度快，單一樣品的預測只需用時 ≤ 10 毫秒。第四，透過結合許多決策樹的結果，使其具備抗過擬合(anti-overfitting)的能力。



圖四 機器學習模型流程圖

(3.1) 數據前處理

(1) 定義參數範圍

第一步是藉由式(2)來產生特定合理範圍的數據，由於在計算時只要給定深度、粗糙度、有效面積比、波長 λ 及光斑下孔洞與晶圓表面面積比 α ，入射表面電場 E_0 即可算出光強，因此可透過六大參數來產生數據。

(2) 模擬理論光譜

由於本文著重三維結構，因此模型輸出主要為深度、粗糙度、有效面積比三參數，而其餘參數可作為輸入特徵。因此會選定合理範圍的深度、粗糙度、有效面積比，並透過量測模組來確定其餘參數，便可產生機器

學習的數據。

(3) 計算反射率

考量到不同量測模組所使用的照射光源、量測干涉光譜的光譜儀、及各項光路元件會有機差，在這一步驟會將模擬光譜從能量利用式(3)轉換成反射率，這樣一來即使使用不同量測模組也不會影響準確度。

(4) 創建資料集

在產生大量的數據後，需要將該數據的波長與反射率之關係圖以特徵的形式以及對應的深度、粗糙度、有效面積比以輸出的形式存儲下來，在實驗中將數據以資料庫的方式將其儲存下來。經過實驗證實，存入約

200,000筆數據時只需花費約16分鐘，讀取
數據只花費約半分鐘。

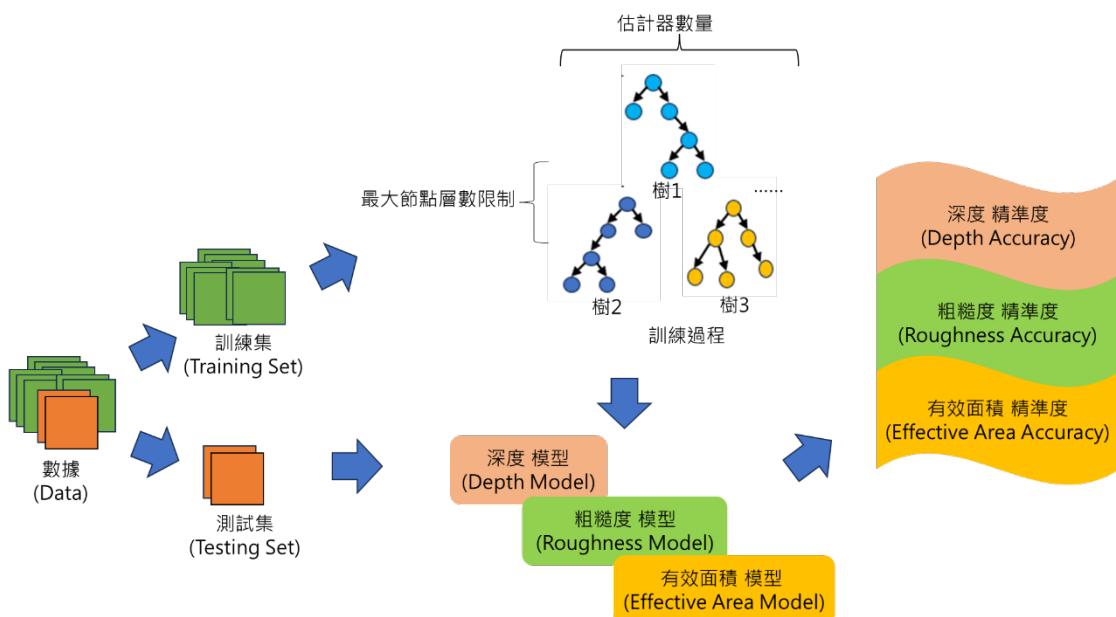
(3.2) 模型訓練過程

(1) 讀取資料

從資料庫中讀取反射率光譜、深度、粗糙度、有效面積比四個參數，並將數據切割成訓練集及測試集，比例為8:2。

(2) 訓練模型

機器學習的系統架構如圖五所示。由於輸出為3種不同的參數，因此在訓練時就會為3個參數各訓練一個模型。模型的輸入特徵將會是反射率光譜，輸出參數是深度、粗糙度、有效面積比其中之一。最終會產生3個不同的模型分別預測3個輸出參數，並透過測試集計算3個模型的準確度。



圖五 機器學習的系統架構

(3) 評估模型準確度

為了增加模型的可靠性，採用3種不同
的方式來評估模型的準確度。

A. 均方誤差 (mean squared error, MSE)

均方誤差的功能是計算模型的預測輸出與測

試集數據的誤差。公式如式(6)所示，其中 n 為樣本數， y_i 為第*i*個測試集上的數據實際值， \hat{y}_i 為對應第*i*個數據的預測值。MSE越小代表輸出越接近測試集數據，即模型準確度越高。

$$MSE = \frac{1}{n} \sum (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (6)$$

B. 決定係數

R^2 的功能是比較訓練出來的模型與直接使用平均值當作模型的準確度。 R^2 公式如式(7)所示，其中 \bar{y}_i 為測試集上的數據其輸出平均

$$R^2 = 1 - \frac{\sum(y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum(y_i - \bar{y})^2} \quad (7)$$

C. K 折交叉驗證(k-fold cross-validation)

本方法會將整個數據集切割成k個相同大小的子數據集，接下來會訓練出k個模型，每次訓練會讓其中一個子數據集作為測試集，剩下的則會作為訓練集，直到所有的子數據集都輪流作為測試集後，會將所有模型的MSE與 R^2 記錄下來，最後計算出其平均值。使用k折交叉驗證後能更全面的評估模型的準確度，減少因隨機分割數據造成的偏差。

(4) 超參數最佳化

隨機森林模型中有兩個超參數的數值是影響模型準確度最大的因素，其中一個超參數是估計器數量(n_estimators)，代表的是訓練模型的過程中會產生多少決策樹來計算結果。另一個是超參數是最大節點層數限制(max_depth)，該參數會決定決策樹最多具有多少層節點。由於超參數是在訓練模型完成前給定的數值，而每一種模型其最優數值都不相同，因此必須針對模型優化超參數的

值。通常 R^2 會介於0到1之間， $R^2 = 1$ 代表訓練出來的模型的輸出誤差為0，因此目的是使模型 R^2 的數值盡量接近1。

設定。其中可靠性最高的做法是使用窮舉法，但時間及計算成本過於龐大，因此在實驗中使用了貪婪演算法(greedy algorithm)來優化這兩個超參數。

本研究實驗中，首先將估計器數量設定為10，最大節點層數限制設定範圍10~200，再逐一訓練模組找出可以訓練出 R^2 最高的10個最大節點層數限制。接著將最大節點層數限制設定為10，以同樣方式找出 R^2 最高的10個估計器數量。最後將10個結果最好的估計器數量與最大節點層數限制共100個組合，以5折交叉驗證的方式來訓練出最好的模型。經過實驗，使用貪婪法花費的時間相較窮舉法快了41倍以上，節省了大量的時間成本。

表一為實驗最佳化後的模型參數，在物理模型參數上，雖然量測模組擷取的光譜範圍為375奈米到780奈米，但訓練模型時僅納入光譜範圍在450奈米到750奈米之間，這是由於該波長段的反射率較大的緣故。在

決定深度的範圍時，因為量測的樣本其深寬比約為 9~12，且實驗中量測的矽通孔主要為孔徑 5 微米，所以將模型的深度設定在 45 微米到 70 微米之間。而粗糙度與有效面積在設定時參照過去掃描式電子顯微鏡切片分析的數值約為 110 奈米與 11.97 %，因此將粗糙度範圍設定在 110 ± 40 奈米[4]，且有效面積範圍設定在 $12 \pm 7\%$ 。由此決定了物

理模型的輸入光譜範圍與輸出參數範圍。而在優化隨機森林的超參數時，透過使用貪婪法與 5 折交叉驗證，將深度、粗糙度、有效面積比模型的估計器數量分別設定在 199、161 與 184，且將最大節點層數限制分別設定在 34、80 與 144 時的模型的精確度最高，由此決定了最佳化模型的超參數。

表一 最佳化參數設定

物理模型參數				
	波長 (奈米)	深度 (微米)	粗糙度 (奈米)	有效面積比 (%)
實際值	450	45	70	5
預測值	750	70	150	19
間距值	1	0.1	1	1
數據量	301 * 406620			
隨機森林超參數				
超參數	深度	粗糙度	有效面積比	
估計器數量	199	161	184	
最大節點層數限制	34	80	144	

三、 結果與討論

(1) 模型參數設定與對理論數據的實驗結果

表二為實驗中測試集套用最佳化模型的結果，在實驗中訓練集為 325,296 筆數據，

而測試集為 81,324 筆數據。其中深度測試集 MSE 為 5.22， R^2 為 0.91，粗糙度測試集的 MSE 為 56.05， R^2 為 0.9，而有效面積比測試集的 MSE 約為 0.06， R^2 為 0.99。

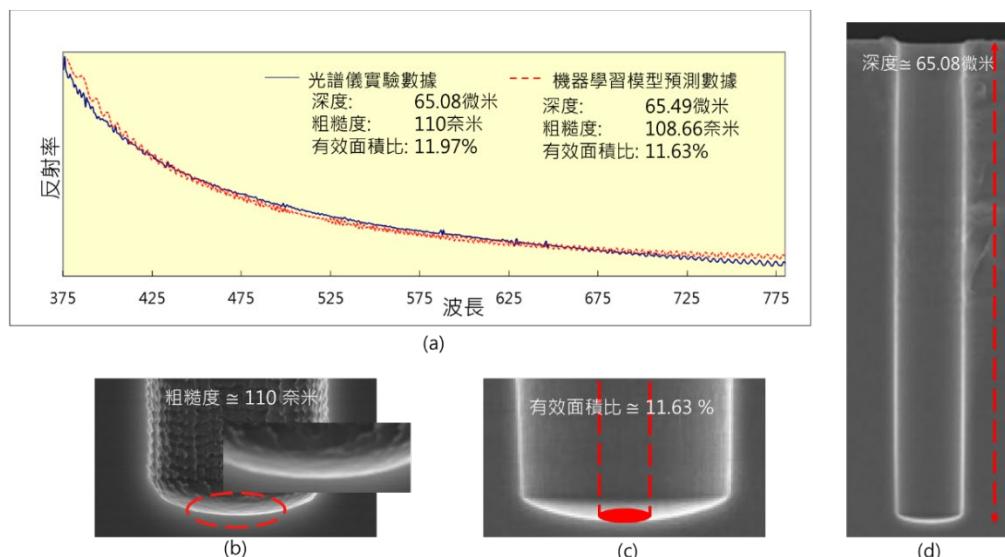
表二 機器學習對測試集模型參數與結果

	深度	粗糙度	有效面積比
MSE	5.22	56.05	0.06
R^2	0.91	0.9	0.99

(2) 量測模組套用機器學習模型之預測結果

將實際量測矽通孔時得到的光譜套用至機器學習訓練出來的模型並分別進行3個參數的驗證，表三為實驗中的一組代表性量測結果。圖六(a)為實際光譜與模型預測結果之光譜比較圖。量測孔徑約為5微米，pitch約為10微米，面積比 α 約為0.31。經掃描式電子顯微鏡切片驗證的深度實際值為65.08微

米，如圖六(d)所示，模型預測的數值為65.49微米，誤差值為-0.41微米。粗糙度經掃描式電子顯微鏡切片驗證的實際數值為110奈米，如圖六(b)所示，模型預測的數值為108.66奈米，誤差值為1.34 nm。有效面積實際數值經掃描式電子顯微鏡切片為11.97%，如圖六(c)所示，模型預測的數值為11.63%，誤差值為0.34%。



圖六 (a) 矽通孔實際量測結果與模型預測結果之光譜比較圖。

(b) (c) (d) 矽通孔經掃描式電子顯微鏡切片後粗糙度、有效面積比、深度量測結果。

表三 量測光譜套用機器學習模型之預測結果

	深度 (微米)	粗糙度 (奈米)	有效面積比 (%)
實際值	65.08	110	11.97
預測值	65.49	108.66	11.63
誤差值	-0.41	1.34	0.34

結論

本研究證實機器學習模型導入反射式光譜干涉量測應用，除了在矽通孔三維結構多參數量測時有非常高的準確度，同時取代了傳統理論模型迴圈式擬合演算法，更排除了多參數之間交互影響的痛點，大幅提升量測速度。由於現在製程複雜度越來越高，建構物理模型的成本技術與越來越高，而審慎訓練完成所建立的機器學習模型，就能在不需複雜演算流程的情況下，藉由機器學習一步到位快速獲得量測結果，大幅降低了開發及維護成本。機器學習除了矽通孔三維形貌量測的成功案例之外，亦可應用於先進製程複雜多參數的各種元件量測。未來會在訓練模型發展的同時，加入一定程度的雜訊及環境變因，使得模型更可以適用於多樣大量的實驗條件。

參考文獻

1. Ku, Y.-S. (2014). Spectral reflectometry for metrology of three-dimensional through-silicon vias. *Journal of Micro/Nanolithography, MEMS, and MOEMS*, 13(1), 011209. <https://doi.org/10.1117/1.jmm.13.1.011209>
2. Cheng, X., Tang, Y., Yang, K., & Han, C. (2022). Deep learning for thin film thickness measurement in spectroscopic reflectometry. *IEEE Photonics Technology Letters*, 34(18), 969–972. <https://doi.org/10.1109/lpt.2022.3195997>
3. Ku, Y.-S., & Yang, F. S. (2010). Reflectometer-based metrology for high-aspect ratio via measurement. *Optics Express*, 18(7), 7269. <https://doi.org/10.1364/oe.18.007269>

4. Ku, Y.-S., Huang, K. C., & Hsu, W. (2011). Characterization of high density through silicon vias with spectral reflectometry. *Optics Express*, 19(7), 5993.
<https://doi.org/10.1364/oe.19.005993>



周柏文 / 量測中心

顧逸霞 / 量測中心 / 資深正研究員



反射式光譜干涉技術應用於先進半導體 蝕刻製程結構均勻性量測

謝文淇 /顧逸霞

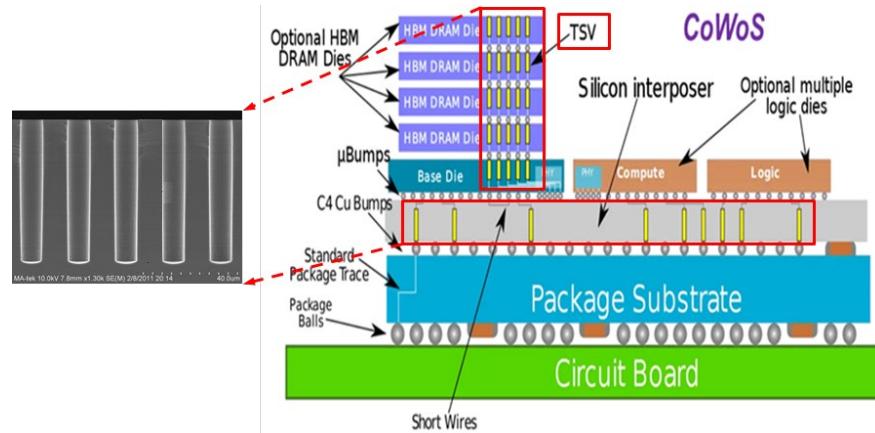
由於電晶體關鍵尺寸的逐年縮小已面臨物理極限，因此全球積極朝向提高單位面積立體堆疊元件數量的設計方向發展，開發3D IC封裝製程成為延續摩爾定律(Moore's Law)最重要的方法。隨著量產製造過程產能及良率要求增加，使得開發非破壞性、快速、可即時回饋、優化製程的量測方法至關重要。本研究研發反射式光譜干涉量測技術，可整合在晶圓製程做為線上即時量測工具。實驗證實應用在高深寬比蝕刻製程的矽通孔(TSV, Through Silicon Via)結構深度量測，具備單點量測及分析時間 $< 0.5\text{ s}$ 等優勢，並根據量測模組的即時回饋數據，給予製程端調整反應性離子蝕刻條件參數，可逐步有效地提升整片晶圓蝕刻深度均勻度 $\leq 2.47\%$ 。

1. 前言

(1) 研究緣起

歷年以來，摩爾定律的預測推動了半導體技術，在晶片的製造和性能上都得到極大的改善與發展，進而驅動了電子業相關產品蓬勃發展。但隨著電晶體製造尺寸微縮到一定程度時，材料的物理和化學性能將會達到極限，並且面臨了散熱不易、功耗增加以及訊號傳輸速度受限等問題。

先進封裝技術提供了一種解決方案，這項新興技術是將多個晶片以立體堆疊的設計方式，來提高單位面積的元件數量，並已成為延續摩爾定律最重要的方法。而製程所採用的矽通孔技術是促使金屬導線縮短，提升電子訊號傳輸速度及效能的一個關鍵技術。圖一為台積電第五代CoWoS封裝製程示意圖，即是採用全新TSV製程技術，透過異質整合提升高速運算及省電效能等優點。



圖二 CoWoS 封裝製程示意圖 (Source: tsmc 2022)

(2) 研究目的

由於TSV製程技術是實現三維晶圓封裝和提升積體電路密度的重要技術，其製程良率是影響終端元件產品性能的關鍵。然而，TSV製程的難度在於其高深寬比結構，通孔深度與直徑比 $\geq 10:1$ ，所面臨的蝕刻技術與量測挑戰。因此本研究研發一種非破壞性、快速的光學量測方法，可與製程機台整合，即時將TSV結構的量測資訊回饋給蝕刻製程機台，以進行參數的調整，最終達到優化TSV製程、提升良率的目的。

本研究運用雙光路干涉原理及光學模組優化設計，開發反射式光譜干涉量測模組，著重在高深寬比(10:1)、高密度(孔徑:孔距=1:1)、小孔徑($\leq 5 \mu\text{m}$)的TSV製程量測研究。包含整片晶圓所分布的TSV深度的均勻性、孔徑大小的差異以及晶圓翹曲度等。

2. 測試樣本與實驗模組架構

(1) TSV樣本說明

本研究樣本包含不同孔徑的TSV樣本：

1. 圓孔TSV陣列：孔徑尺寸(CD, critical dimension)為 $5 \mu\text{m}$ 、間距(pitch)為 $10 \mu\text{m}$ 和深寬比(AR, aspect ratio)為10
2. 方孔TSV陣列：孔徑尺寸為 $5 \mu\text{m}$ 、間距為 $10 \mu\text{m}$ 和深寬比為10

(2) 實驗模組架構

本研究採用商用薄膜量測機台進行TSV結構深度量測，其組成有寬頻鹵素燈、低倍率物鏡及光譜儀等。光經過分光鏡及物鏡後聚焦到TSV樣本上，隨後光譜儀擷取干涉光譜，再由DFT(discrete Fourier transform)演算法分析TSV樣本深度，目前測試結果單點量測時間 $< 0.5 \text{ s}$ 。本研究選擇低倍率(4x)

和0.1低數值孔徑的顯微物鏡，以能夠讓入射光接近於垂直方向入射TSV樣本，並盡可能獲得最多來自於高深寬比TSV結構孔底和表面的干涉訊號。TSV樣本所取得的干涉光譜，通常在量測波長範圍內會呈現規律性的振幅振盪。

3. 研究方法

(1) 研究原理

(1.1) 光的干涉

光是一種電磁波，其能量是以波動的形式傳播，帶有特定的振幅與相位。當兩個或多個光波在空間中作用時，會產生振幅與相位疊加，這種現象被稱為干涉。根據電磁波理論，總電場是由這些波的向量電場疊加後的總和。在方程式(1)中， u 代表兩個波向量電場的總和， U_1 和 U_2 分別代表電場分量的振幅， φ_1 和 φ_2 則是代表其各別的相位。透過方程式(2)，可以得到光的總干涉強度 I 是兩道光的各別反射光強度和，再加上一個跟相位差 $\Delta\varphi$ 相關的干涉項。

$$u = u_1 + u_2 = U_1 e^{i\varphi_1} + U_2 e^{i\varphi_2} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} I &= |u|^2 = |u_1 + u_2|^2 = U_1^2 + U_2^2 + 2U_1 U_2 \cos(\varphi_1 - \varphi_2) \\ &= I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \Delta\varphi \end{aligned} \quad (2)$$

(1.2) 菲涅耳方程式 (Fresnel Equation)

當光從一種介質入射到另一種介質時，在這兩種介質的交界處 (interface) 會發生反射和折射。此方程式描述了電磁波的入射、反射和折射時電磁場的大小關係。由於偏振

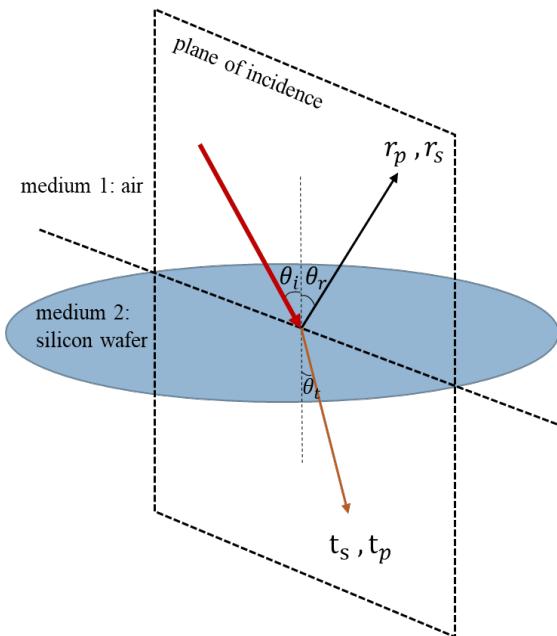
態可分成兩個正交線偏振波的組合，分別是入射光與入射平面(plane of incidence) 垂直的s偏振波以及入射光與入射平面平行的p偏振波。因此，在s偏振波以及p偏振波的電場下會有各自的反射係數與穿透係數，分別是：

$$r_s = \frac{E_r}{E_i} = \frac{n_1 \cos \theta_i - n_2 \cos \theta_t}{n_1 \cos \theta_i + n_2 \cos \theta_t} \quad (3)$$

$$t_s = \frac{E_t}{E_i} = \frac{2n_1 \cos \theta_i}{n_1 \cos \theta_i + n_2 \cos \theta_t} \quad (4)$$

$$r_p = \frac{E_r}{E_i} = \frac{n_2 \cos \theta_i - n_1 \cos \theta_t}{n_2 \cos \theta_i + n_1 \cos \theta_t} \quad (5)$$

$$t_p = \frac{E_t}{E_i} = \frac{2n_1 \cos \theta_i}{n_2 \cos \theta_i + n_1 \cos \theta_t} \quad (6)$$



圖三 入射面與入射、折射、反射光在空間中之關係

(2) 理論模型

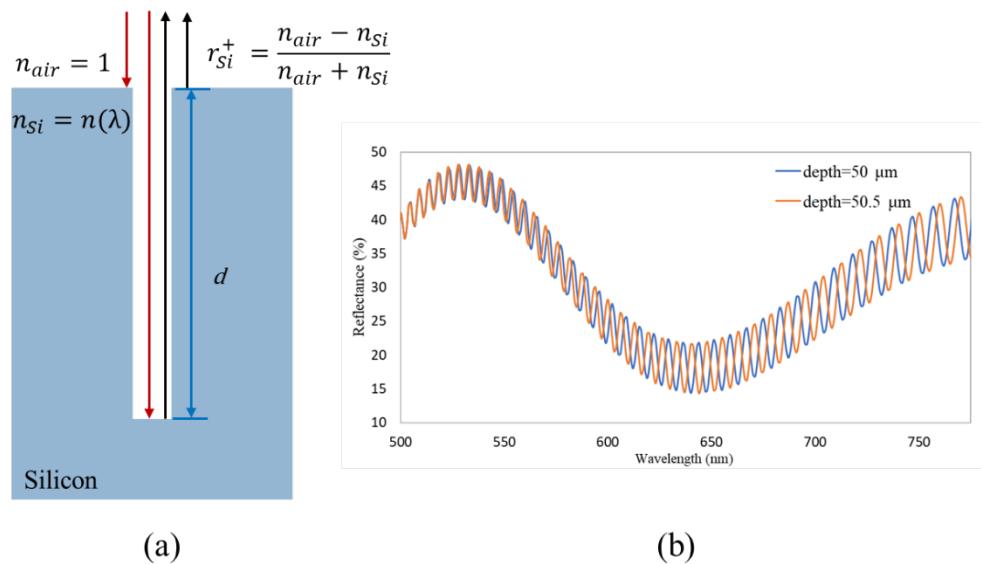
(2.1) TSV結構的干涉理論模型

圖四 (a) 顯示光線垂直入射至TSV的表面及底部的光路示意圖。本研究使用一個直徑為25 μm的光斑照射在CD為5 μm的週期性TSV結構上。對於高密度的週期性TSV陣列結構，矽晶圓表面的照射區域與照射到的CD之間的比例是維持固定不變的，僅取決於開口形狀和間距。假設光線照射在矽表面和通孔底部(即CD)的面積分別為係數 $1 - \alpha$ 和 α 。 E_0 是入射矽表面和通孔底部的電場。

d 為TSV通孔深度，而 λ 是波長。方程式(7)描述了反射光強度 I 是矽表面和通孔底部反射兩道光的總和。根據Fresnel方程式，光線從空氣入射矽表面反射時會發生180°的相位偏移，其電場反射率會受到反射係數 r_{si}^+ 的影響。經過乘以反射係數後的反射光強度如方程式(8)所示^[1]。**圖五 (b)**展示了TSV深度為50 μm及50.5 μm時的模擬光譜，可看出兩者具有極明顯的干涉光譜特徵差異，這是由於方程式(8)中的餘弦干涉項 $\cos[2\pi(\frac{2d}{\lambda})]$ ，與深度 d 具有關聯性。

$$\bar{I} = \text{Const} \left| \alpha E_0^2 + (1 - \alpha) E_0^2 + 2\sqrt{\alpha(1 - \alpha)} E_0^2 \cos \left[2\pi \left(\frac{2d}{\lambda} \right) \right] \right| \quad (7)$$

$$\bar{I} = \text{Const} \left| \alpha (r_{Si}^+ E_0)^2 + (1 - \alpha) (r_{Si}^+ E_0)^2 + 2\sqrt{\alpha(1 - \alpha)} (r_{Si}^+ E_0)^2 \cos \left[2\pi \left(\frac{2d}{\lambda} \right) \right] \right| \quad (8)$$



圖六 (a)光線垂直入射高深寬比TSV之光路示意圖;

(b)TSV深度為50 μm 及50.5 μm 之干涉光譜圖

(2.2) 離散傅立葉轉換分析演算法

離散傅立葉轉換是一種訊號分析的數學工具，適用於處理離散訊號，因此應用它做為分析通孔深度的演算法。但由於實驗上所收集到的原始光譜是時域上的離散數據點，須將原始光譜數據先進行重整處理，以符合

DFT將時域的光譜訊號轉換成頻域的光譜訊號所需條件，進而得到TSV深度分析結果。假設光譜儀的接收波長範圍是 λ_{min} 和 λ_{max} ，當 λ_{min} 和 λ_{max} 的波長間隔剛好符合一個完整波形時，可以推算出DFT可量測解析的最小深度 d_{min} (式9)。

$$d_{min} = \frac{1}{2n \left(\frac{1}{\lambda_{min}} - \frac{1}{\lambda_{max}} \right)} \quad (9)$$

由於光譜儀有 N 個像素， λ_{min} 和 λ_{max} 的波長間隔最多可量測解析 $N/2$ 個完整波形。

因此可推算的最大量測深度 d_{max} 為

$$d_{max} = \frac{N/2}{2n\left(\frac{1}{\lambda_{min}} - \frac{1}{\lambda_{max}}\right)} = \frac{N}{2} d_{min} \quad (10)$$

本研究使用的光譜儀所取樣的波長範圍是430 nm~820 nm，取樣個數 $N=1024$ 。根據方程式(9)和(10)，可估算出 d_{min} 和 d_{max} 分別是0.45 μm和231.5 μm，這也說明了量測模組的TSV深度量測範圍。DFT分析

演算法的具體執行流程如圖七所示。先將根據波長(λ)分布所表示的光譜轉換成以波數($\nu=1/\lambda$)分布表示的光譜，並使用內插法將數據的個數補足到2的冪次方個，數據間隔為 $\Delta\nu$ 。

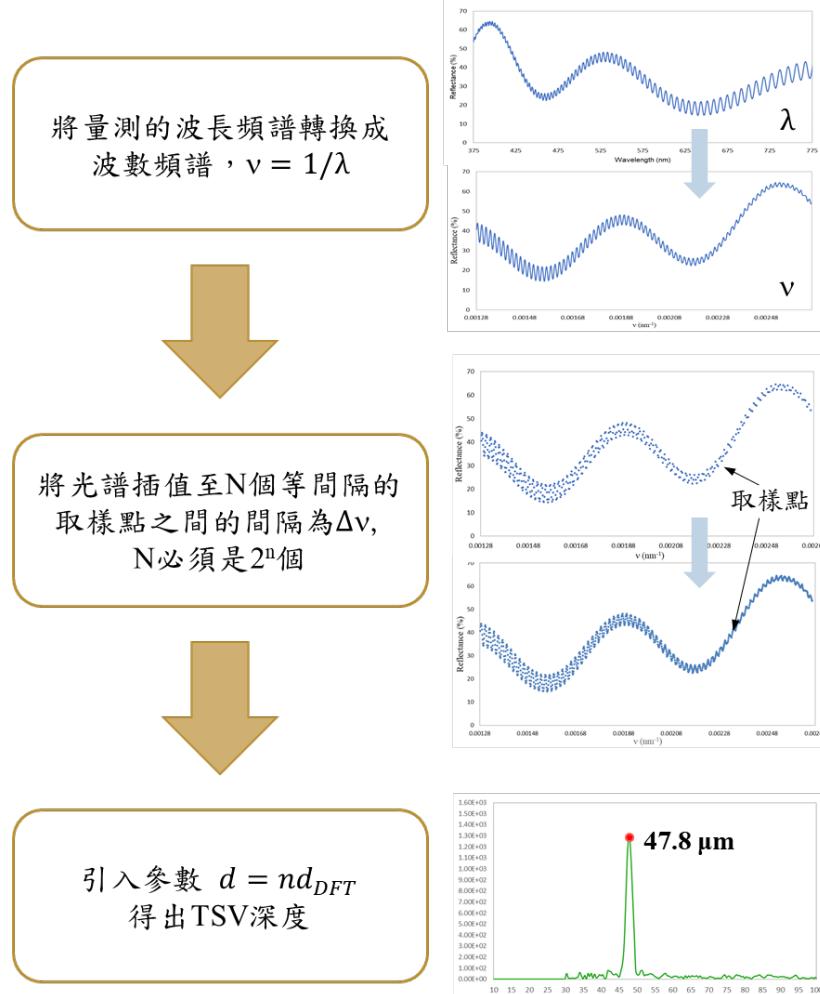
$$\Delta\nu = \frac{\nu_{max} - \nu_{min}}{N} \quad (11)$$

接著引入參數 $d_{DFT} = n d$ 作為TSV深度，其中介質折射率 n 為1。透過DFT運算，可從方程式(12)獲得一系列的複數傅立葉係數

C_1, C_2, C_3, \dots 。在這係數當中，存有一個最大值的係數(C_m)。最後再透過方程式(13)計算出TSV的深度^[2]。

$$R(t) = C_0 + \sum_{j=1}^{N-1} C_j \exp[i(j\Delta\nu \cdot d_{DFT})] \quad (12)$$

$$d = \frac{d_{DFT}}{n} = \frac{m}{2(\nu_{max} - \nu_{min})} \quad (13)$$



錯誤! 找不到參考來源。DFT分析演算流程圖

4. 結果與討論

本研究採用的次TSV晶圓樣本，是使用 AMAT Centura Etch反應式離子蝕刻 (RIE) 機型製作，具備內、外雙線圈電漿源 (dual coils plasma source)。本實驗的量測點從晶圓最靠近下緣處die 1橫跨中心區域至晶圓上緣處的die 13。Ra表示外/內線圈的電流比

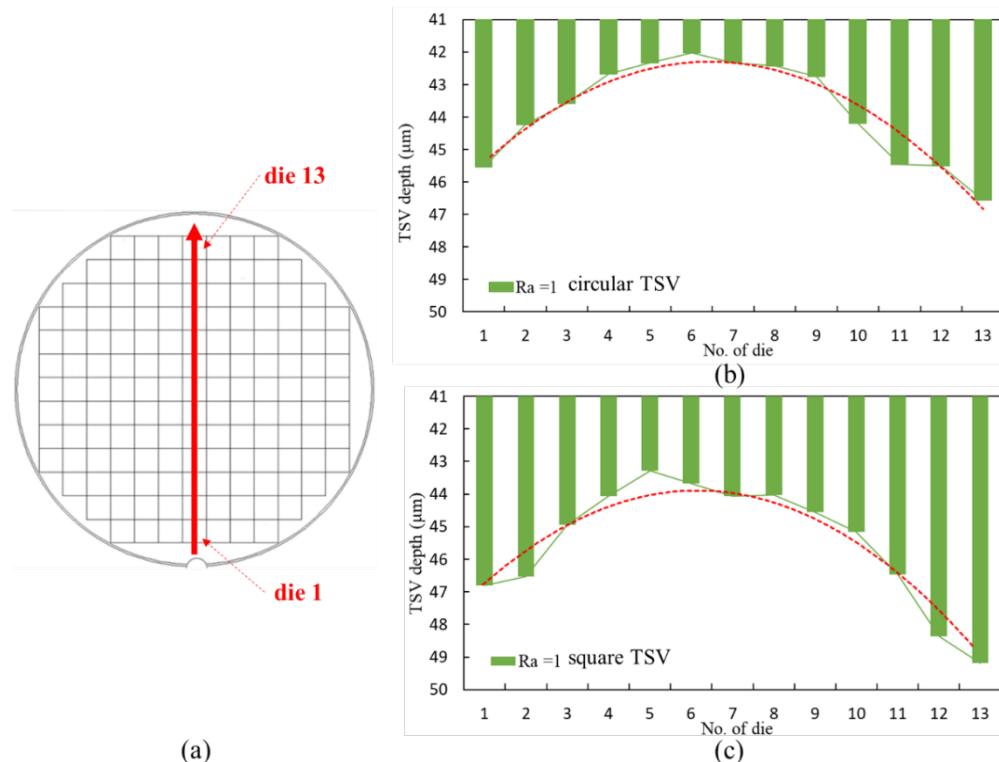
(outer/inner coil current ratio)。Ra最初的設定值為1，這表示內、外線圈施加相同的電流。圖八為TSV深度量測結果，可以觀察到從晶圓上的TSV深度分布曲線呈現外側較深、中間較淺的現象，圓孔TSV陣列的均勻度 (uniformity) 為5.18 %；而方孔TSV陣列的均勻度則是6.49 %，均勻度數據整理在表一。TSV深度的均勻度定義為

$$\text{Uniformity} \pm 100\% = \frac{\text{depth}_{\max} - \text{depth}_{\min}}{2 \text{ depth}_{\text{average}}} \times 100\% \quad (14)$$

由於在蝕刻製程中，諸多參數對蝕刻結果產生關鍵影響，包括溫度、壓力、反應物流速、電流比等。這裡推測即使外線圈和內線圈施加相同電流，但其所產生的電漿密度分布，與晶圓蝕刻速率並不一致，因此造成晶圓外側的TSV深度會較晶圓中心處深。之前的研究指出，化學勢的不連續性會在晶圓上產生濃度梯度。由於在晶圓中心相對於邊緣反應物消耗和副產物排放速率的變化不一

樣，或是蝕刻腔體內溫度差異都有可能引起濃度梯度，最後導致晶圓邊緣的TSV深度較深^[3]。

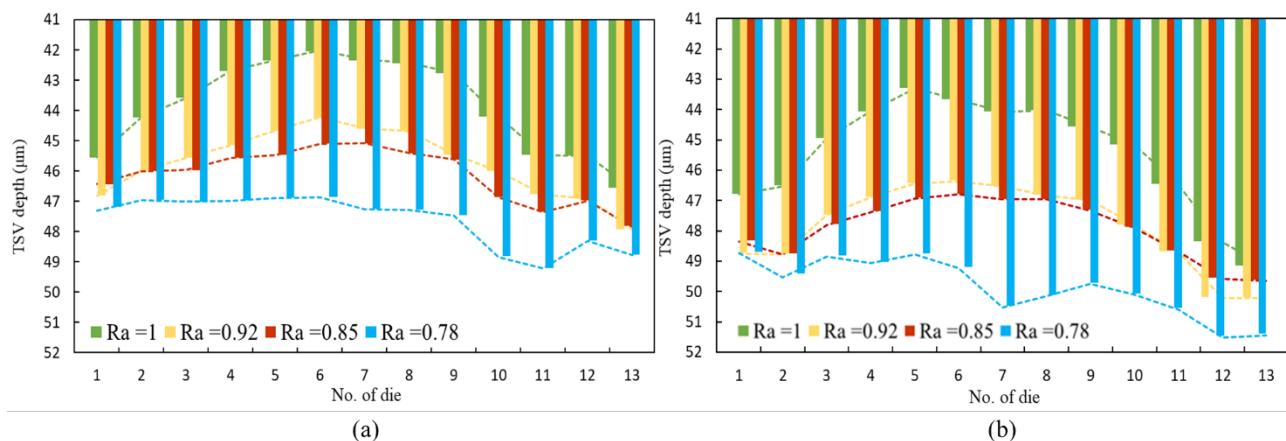
受到目前所使用的蝕刻機型其可調參數限制，選擇從最可能影響蝕刻深度均勻性的關鍵參數Ra，即外/內線圈電流比，進行優化調整實驗。在接下來的實驗研究中，將會深入探討不同Ra對蝕刻TSV深度、孔徑大小、晶圓翹曲度等的影響。



圖九 TSV晶圓(12") die-to-die蝕刻深度分布圖(Ra=1)：(a)量測點在晶圓上的位置；
(b)孔徑5 μm圓孔TSV；(c)孔徑5 μm方孔TSV

為了改善TSV蝕刻深度間的均勻性，在隨後的實驗嘗試逐次調降Ra值，由0.92、0.85到0.78，並即時量測觀察Ra對於TSV深度的影響。根據本研究快速量測分析的結果顯示，透過降低Ra值，即增加內線圈的電流量可調整雙線圈所產生的電漿離子密度分布，大幅的補償了溫度、壓力、反應物流速不均等因素對蝕刻深度的綜合影響如圖十所示，進而改善整片晶圓TSV蝕刻深度的均勻性。從表一可以得出Ra值從1調整到0.92、0.85、

0.78，圓孔TSV的均勻度從5.18 %一路提升至2.47 %；而方孔TSV的均勻度也從原本的6.49 %提升至2.8 %。另外可以從圖十一觀察到無論是圓孔TSV或是方孔TSV，TSV深度最大值都落在晶圓die 13邊緣區域，判斷這是因為在蝕刻腔體內的渦輪分子幫浦(turbo pump)抽氣口，剛好位於晶圓die 13這一側，因此造成了反應物和副產物的抽除速率在該側較大，這也間接增加此側蝕刻速率，進而增加TSV的蝕刻深度。



圖十二 不同參數Ra所蝕刻的TSV深度分布圖：(a)孔徑5 μm 圓孔TSV；

(b)孔徑5 μm 方孔TSV

由於方形孔徑的面積較大，蝕刻過程中反應物較容易往下進行蝕刻。因此經過相同時間的蝕刻後，方形通孔TSV深度整體上

會比圓形通孔更深。在圖十三(a)(b)即可觀察到方孔TSV的深度相對的都大於圓孔。

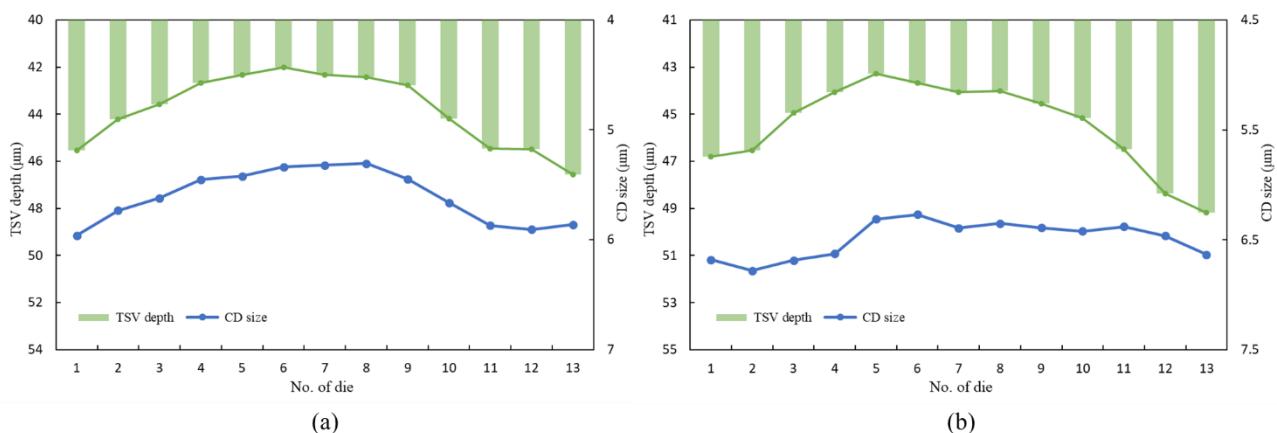
表一 不同Ra值的TSV深度及均匀度

Circular TSV															
Ra\No. of die	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	Ave.	Uniformity (%)
Depth(μm)	46.6	45.5	45.5	44.2	42.8	42.4	42.3	42.0	42.3	42.7	43.6	44.2	45.5	43.81	5.18
1	46.6	45.5	45.5	44.2	42.8	42.4	42.3	42.0	42.3	42.7	43.6	44.2	45.5	43.81	5.18
0.92	47.9	46.9	46.8	46.0	45.5	44.7	44.6	44.2	44.7	45.1	45.6	46.0	46.8	45.75	4.06
0.85	47.8	47.0	47.3	46.9	45.6	45.4	45.1	45.1	45.5	45.6	46.0	46.0	46.4	46.13	2.97
0.78	48.8	48.3	49.2	48.8	47.5	47.3	47.3	46.9	46.9	47.0	47.0	47.0	47.3	47.63	2.47

Square TSV															
Ra\No. of die	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	Ave.	Uniformity (%)
Depth(μm)	49.2	48.4	46.5	45.2	44.6	44.0	44.1	43.7	43.3	44.1	44.9	46.5	46.8	45.47	6.49
1	49.2	48.4	46.5	45.2	44.6	44.0	44.1	43.7	43.3	44.1	44.9	46.5	46.8	45.47	6.49
0.92	50.2	50.2	48.7	47.8	47.0	46.8	46.5	46.4	46.4	46.9	47.5	48.8	48.8	47.85	4.04
0.85	49.7	49.6	48.7	47.9	47.3	47.0	47.0	46.8	46.9	47.4	47.8	48.8	48.4	47.93	2.99
0.78	51.4	51.5	50.6	50.1	49.7	50.2	50.5	49.2	48.8	49.1	48.8	49.5	48.7	49.86	2.80

另外在量測干涉光譜的同時也進行了孔徑大小2D影像的量測分析，並將孔徑大小數據加至TSV深度分布圖的副座標軸上如圖十四所示，可以明顯看出TSV的深度與孔徑變化之間存在正相關性，無論是圓孔TSV或方孔TSV，當深度較深時，其孔徑也相對較大。可以推斷RIE雖是一種非等向性蝕刻(anisotropic etching)技術，這種技術的特

點在於電漿在轟擊材料的過程中，垂直方向的蝕刻速率遠高於側向，也因此能夠有效製作出高深寬比的結構。然而，值得注意的是，在蝕刻的過程當中，即使它是非等向性的，側向仍然存在著一個較小的蝕刻速率。這也說明當蝕刻深度增加時，還是會導致相對較大的孔徑。

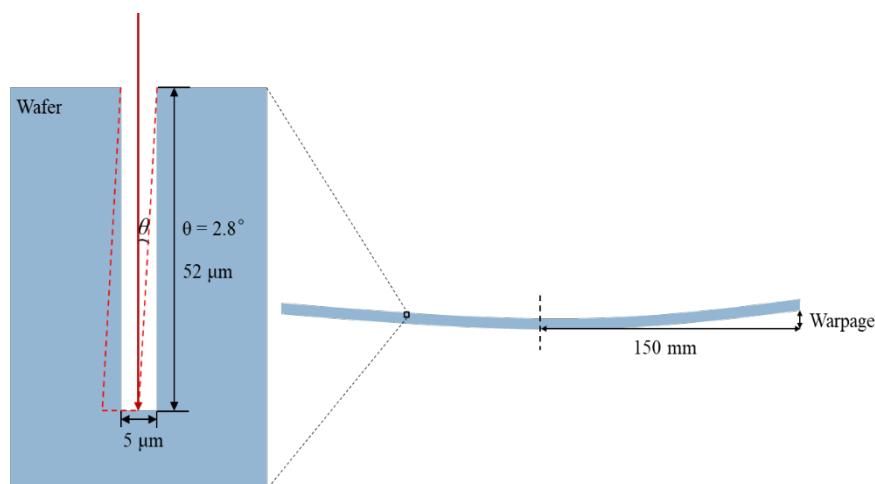


圖十五 TSV深度與孔徑CD分布圖：(a) 孔徑5 μm圓孔TSV；(b) 孔徑5 μm方孔TSV

在半導體製程中，晶圓會受到多種環境條件的影響，像是溫度的變化。由於每種材料具有不同的熱膨脹係數，當溫度有變化時，熱膨脹係數的不匹配導致不同材料會以不同的速度膨脹或收縮，造成晶圓變形，最終導致晶圓翹曲 (warpage)。此外，晶圓在不同製程中受到機械應力的作用。當晶圓受到應力時，晶格結構會變形，這些不均勻的變形也會導致晶圓翹曲。

如圖八所示，當晶圓有翹曲時，原本垂直的TSV會稍微傾斜(紅色虛線)。光線垂直

入射至傾斜的TSV底部存在一個極限角度 θ ，當傾斜角度大於 θ 時，就沒有來自TSV底部反射光訊號。假設有一TSV其孔徑為5 μm ，深度為52 μm ，經由簡單幾何方法推算最大容許的翹曲量為7.2 mm。這表示當晶圓翹曲量超過7.2 mm時，就無法量測其深度。由於TSV製程晶圓的翹曲程度經實際量測都約在數十微米以內，僅為容許翹曲量的千分之一，因此其對TSV深度的量測影響即可忽略。



圖八 晶圓翹曲示意圖

結論

本研究展示了使用反射式光譜干涉量測模組進行高深寬比TSV深度量測，並探討蝕刻製程TSV深度的均勻性。由於本實驗模組是一種高準確度、非破壞性且快速的量測模組，單點的量測時間 < 0.5 s，有利於與先進製程整合，即時監測並回饋量測結果以調整機台參數並優化製程。

研究結果顯示外線圈和內線圈的電流比對於TSV深度的均勻性有著極大的影響。透過調整外/內線圈的電流比 (Ra)，降低Ra值有效地改善整片晶圓蝕刻深度的均勻性，圓孔TSV深度的均勻度 $\leq 2.47\%$ ；方孔TSV深度的均勻度則是 $\leq 2.8\%$ 。此外亦觀察到TSV的深度與孔徑之間存在相

關性，當TSV深度較深時，其孔徑也相對較大。在本實驗中也確認了晶圓的翹曲程度皆在數十微米以內，遠小於反射式量測模組對晶圓翹曲度的容許範圍。因此，這些TSV晶圓的翹曲程度對於精確量測並無影響。

反射式光譜干涉技術未來的應用相當廣泛，我們未來也將改良原有的可見光量測光路設計，擴充至紅外光波段量測能量，從而進行薄化晶圓製程線上厚度量測與製程優化，以及導入機器學習模型從事多層膜厚快速量測等應用研究。

參考文獻

1. Ku, Y.-S.,(2014) Spectral reflectometry for metrology of three-dimensional through-silicon vias. *Journal of Micro/Nanolithography, MEMS, and MOEMS*, 13(1): p. 011209-011209.
2. Quinten, M.,(2012). A practical guide to optical metrology for thin films. John Wiley & Sons.
3. Hwang, S. and K. Kanarik, (2016). Evolution of across-wafer uniformity control in plasma etch. *Solid State Technology*, 59(5): p. 16-20

作者簡介

謝文淇 / 量測中心

顧逸霞 / 量測中心 / 資深正研究員



直流電度表型式認證技術規範研究

何宗翰/徐瑞偉

世界各國政府都在制定行動計畫，來因應複雜且長期的二氧化碳減少排放挑戰。正因如此，使得電動車、電動車充電站、儲能系統和可再生能源系統等相關技術為近年全球熱門產業，其中，電動車充電樁內部使用之電度表為使用者繳納電費的依據，其準確度與否對確保公平交易扮演著非常重要的角色。本文針對直流電度表型式認證，列出一經產官學界討論後之型式認證技術規範草案之試驗項目，提供經濟部標準檢驗局於未來制定全國性直流電度表型式認證技術規範之依據，以確保計量的一致性和準確性。

一、 前言

在電動車充電產業中，直流電度表扮演著至關重要的角色。作為電動車充電樁內部的核心組件，直流電度表主要為準確記錄用戶所使用之直流電力消耗，成為用戶支付電費的依據。然而，直流電度表的準確度和可靠性直接關係到充電過程中的公平交易，對於確保用戶和供應商的權益平等至關重要。因此，針對直流電度表的型式認證至關重要。此認證不僅是一項技術規範，更是對直流電度表性能和品質的評估。本文提出直流電度表型式認證技術規範研究，包含一系列經產官學界討論後確定之試驗項目。這些項目旨在從多個方面評估直流電度表的性能，如準確度、穩定性、響應速度等，以確保其符合

國際標準，並且能夠滿足實際應用中的需求。日後經濟部標準檢驗局將得以參考此技術規範，制定全國性的直流電度表型式認證技術規範。這將為直流電度表的生產和應用提供一統一標準，有助於推動電動車充電產業的標準化和發展。

二、 國外之直流電度表現行規範

鑑於國際上許多先進國家針對直流電度表之相關規範尚在發展階段，本研究蒐集並研讀日本(JIS C 1216-2電力量計系列標準)、韓國(電表技術標準)與中國大陸(JJF 1779:2019電子式直流電能表型式評價大綱、JJG 842:2017電子式直流電能表檢定規程)之直流電度表型式認證標準，其檢測項目均包含：公差、電器性能、機械性能、絕緣性能、

耐候性等項目如表一。

表一 韓國、中國大陸與日本直流電度表規範彙整

國家/ 地區	韓國	中國大陸	日本
型式 認證	고시 전력량계 기술기준 시행:2021 (電表技術標準-參考 IEC 62053-41) 韓國 2021 年 1 月 實施型式認證 (含檢定檢查)	JJF 1779:2019 电子式直流电能表 型式评价大纲 中國大陸 2020 年 3 月 實施型式認證	JIS C 1216-2:2014 電力量計 (变成器付計器) 日本 2015 年 實施型式認證
檢定 檢查	NA	JJG 842:2017 电子式直流电能表 检定规程 中國大陸 2018 年 3 月 實施型式認證	JIS C 1216-2:2017 電力量計 (变成器付計器) 日本 2022 年 4 月 實施計量檢定
項目	公差、電器性能、機 械性能、絕緣性能、 耐候性等項目	公差、電器性能、機 械性能、絕緣性能、 耐候性等項目	公差、電器性能、機 械性能、絕緣性能、 耐候性等項目

三、試驗項目建議

本文以國際法定計量組織(OIML)之國際建議規範R46「Active electrical energy meters」要求之項目架構為基礎，並參考國際電工委員會(IEC)規範 62053電氣量測設備系列標準「Electricity metering equipment - Particular requirements」、日本產業標準

準調查會(JIS)、國家標準CNS 14607「電子式電度表」及相關標準，在兼顧法定計量執行公信力及臺灣電度表產業現況下，本研究給予型式認證技術規範之建議，主要分為四項性能種類，包含：準確度性能(9項)、電性能(3項)、機械性能(5項)及耐候性能(4項)，相關內容如表二所示。

表二 直流電度表型式認證建議試驗項目

種類	試驗名稱	註解(參考標準)
準確度性能	潛動(無載特性)	電流開路/空載情況下，不得產生超過一個脈衝輸出(IEC 62053-41、IEC 62052-11、JIS C 1216-2、CNS 14607)
	始動電流	開始連續計量之最小電流(IEC 62053-41、CNS 14607)
	誤差容許限度	參考條件下，試驗計量誤差(IEC 62053-41、JIS C 1216-2、CNS 14607)
	電流特性	電流變動而產生之誤差偏差(JIS C 1216-2、IEC 62053-41、CNS 14607)
	電壓變動之影響	電壓變動而產生之誤差偏差(JIS C 1216-2、IEC 62053-41、IEC 62052-11、CNS 14607)
	射頻場感應之傳導擾動抗擾度試驗	試驗期間，設備應不受干擾(IEC 62053-41、CNS 14607)
	外部磁場之影響	施加同頻率外部磁場而產生之誤差偏差(IEC 62053-41)
	周圍溫度變化之影響	每變化10 °C所產生之誤差偏差(JIS C 1216-2、CNS 14607)
	電度表常數	電度表試驗輸出及顯示器上指示間之關係(IEC 62053-41、IEC 62052-11、CNS 14607)
電性能	功率損失	各電流電路的S loss 各電壓電路的P loss / S loss (IEC 62053-41、CNS 14607)
	絕緣	絕緣電阻與交流耐電壓試驗(JIS C 1216-2、CNS 14607)
	自己發熱之影響	長時間施加Imax而產生的誤差偏差(IEC 62053-41、IEC 62052-11、CNS 14607)
機械性能	彈簧鏈試驗	電度表外殼之機械強度係使用彈簧鏈試驗(JIS C 1216-2、CNS 14607)
	機械性衝擊之影響	經施加機械性衝擊後之電度表不得出現毀損(IEC 62053-41、IEC 62052-11、CNS 14607)
	機械性振動之影響	經施加機械性振動後之電度表不得出現毀損(IEC 62053-41、IEC 62052-11、CNS 14607)
	耐燃性能	試驗後端子組、端子蓋及外殼等試驗樣品不得產生自燃或引燃(JIS C 1216-2、CNS 14607)
	防止塵埃及水分入侵的保護	任何進入的塵埃及水量須不影響電度表功能及其介電強度(IEC 62053-41、IEC 62052-31、CNS 14607)

種類	試驗名稱	註解(參考標準)
耐候性能	耐熱試驗	試驗後電度表不得出現損傷或量測資訊產生變化，而須能正常運轉(IEC 62053-41、IEC 62052-11、CNS 14607)
	耐寒試驗	試驗後電度表不得出現損傷或量測資訊產生變化，而須能正常運轉(IEC 62053-41、IEC 62052-11、CNS 14607)
	溫濕度循環試驗	試驗後須檢查電度表有無影響功能的腐蝕現象(IEC 62053-41、IEC 62052-11、JIS C 1216-2、CNS 14607)
	太陽光(日照)輻射試驗	試驗後銘牌標示不得褪色、電度表不得出現損傷或量測資訊產生變化，而須能正常運轉(IEC 62053-41、IEC 62052-11、CNS 14607)

四、專家座談會會議摘要

工業技術研究院量測技術發展中心於112年9月7日召開「直流電度表型式認證技術規範草案訂定專家座談會」，與會單位包含主管機關、試驗相關單位、學界專家及電表製造商。會議中依擬定之型式認證試驗項

目(共21項)進行討論，包含試驗內容及相關限制值等。與會單位於會議中針對各個型式認證試驗項目逐一交流與討論。最終，會議中與會人員針對目前擬定之21項型式認證試驗項目皆可接受與認同，會議相關問題與回覆如表三。

表三 會議提問與回覆

與會單位提問	回覆
V2G(Vehicle-to-grid)應用是否適用於此技術規範？	本技術規範已明確說明車輛本體之相關直流儀表並不適用。
潛動試驗規範試驗時間為20分鐘，考量其測試時間過長，是否可彈性下修？	草案中訂定潛動試驗時間要求為20分鐘係參考國際規範(IEC 62053-41、IEC 62052-11、JIS C 1216-2、CNS 14607)所擬定，目前為技術規範為研擬階段，以最嚴謹要求為考量原則，建議維持原內容。
電流特性所規範之容許偏差與6.1.3之誤差容許限度限制值有牴觸。(例如：	經討論後將規定0.5級之2 %容許偏差修正為

與會單位提問	回覆
0.5級直流電度表，假設容許偏差0.5 %與-0.5%，最大也僅在1%之容許偏差，原則上不會超過6.1.4所規定之2%容許偏差)。	1%容許偏差。
頻率變動影響項目中，輔助電源之頻率變動基本上不會影響直流電度表準確度，且規範訂定之限制值過大，需再作確認。	參考JIS C 1216-2之頻率變動影響項目，但經與廠商討論後認為輔助電源之頻率變動不會影響直流電能模組的量測，故本項予以刪除。
射頻場感應之傳導擾動抗擾度試驗係針對含有通訊模組之直流電度表才有影響。對於單純的直流電度表本體而言，並無影響且無實質意義。	經討論後，射頻場感應之傳導擾動抗擾度試驗將刪除誤差百分比容許偏差要求，僅要求在試驗結束後，設備須正常不受干擾。
外部磁場之影響試驗，據瞭解國內目前僅中山大學有此測試能量，惟並無TAF認證。	目前為技術規範草案研擬階段，須以最嚴謹要求為考量，且國際標準亦有要求，建議先維持原內容，待實施前會再盤點國內測試能量，屆時再評估是否納入本測試項目。
交流耐電壓試驗中，應加入洩漏電流限制。	參考CNS 14607，新增洩漏電流限制值5 mA，並將電壓限制值修訂為2.5 kV。
機械性衝擊之影響以及機械性振動之影響規範內容是否有相關測試細節。	機械性衝擊及機械性振動可參考CNS 11234、CNS 3629，該等標準內容有相關測試細節，包含：測試時間、振動頻率、運動方向等條件要求。

結論

為了統一全國度量衡標準，並確保正確實施，以保證計量的一致性和準確性，維持社會公平交易秩序，制定全國性直流電度表型式認證技術規範係有其必要性。本研究團隊於112年針對國際上主流之電度表技術建議，以國際法定計量組織(OIML)國際建議規範R46「Active electrical energy meters」為基礎，並參考國際電工委員會(IEC)規範62053電氣量測設備系列標準「Electricity metering equipment - Particular requirements」、日本產業標準調查會(JIS)、

國家標準CNS 14607「電子式電度表」及相關標準，在兼顧法定計量執行公信力及臺灣電度表產業現況下，完成直流電度表型式認證技術規範制定之必要性評估研究。此外，研究團隊亦完成盤點國內電度表主要檢測單位(例如：經濟部標準檢驗局、台灣電力公司、台灣大電力研究試驗中心)及型式試驗相關單位(例如：台灣商品檢測驗證中心)之型式認證技術能力，並研擬直流電度表型式認證技術規範修訂建議。未來，相關主管機關可以此為參考，確保國內引用標準與國際一致，擬訂合乎國內民情之技術規範草案，作為未來直流電度表型式認證之參考依據。

—◎作者簡介—

何宗翰 / 量測中心電磁與通訊計量研究室 / 工程師

徐瑞偉 / 量測中心電磁與通訊計量研究室 / 副工程師

—○—○—○—

天然氣分析-線上熱值分析儀量測

品保實務應用

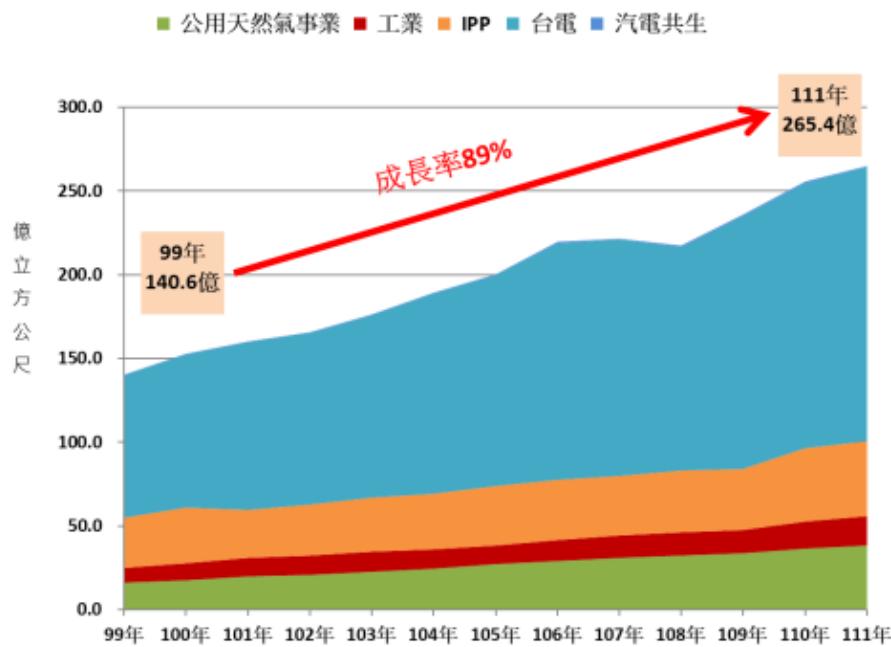
陳伊瑄

近年來國際政經情勢在極端氣候、後疫情時代與國際地緣政治衝突之下，環保、能源情勢有了劇烈變化，全球面臨能源轉型，我國自105年務實推動能源轉型，在「展綠、增氣、減煤、非核」之方向建構重點方案，藉以逐步落實能源轉型政策。根據110年能源白皮書顯示，液化天然氣占進口能源比例18 %^[1]，在買賣交易上金額龐大，因此，建立天然氣相關量測品保計量技術是非常重要的，可有助於提升其交易之公平性與準確度，避免交易上的糾紛。本文介紹天然氣成分及熱值分析，並分享量測品保於實務上之案例。

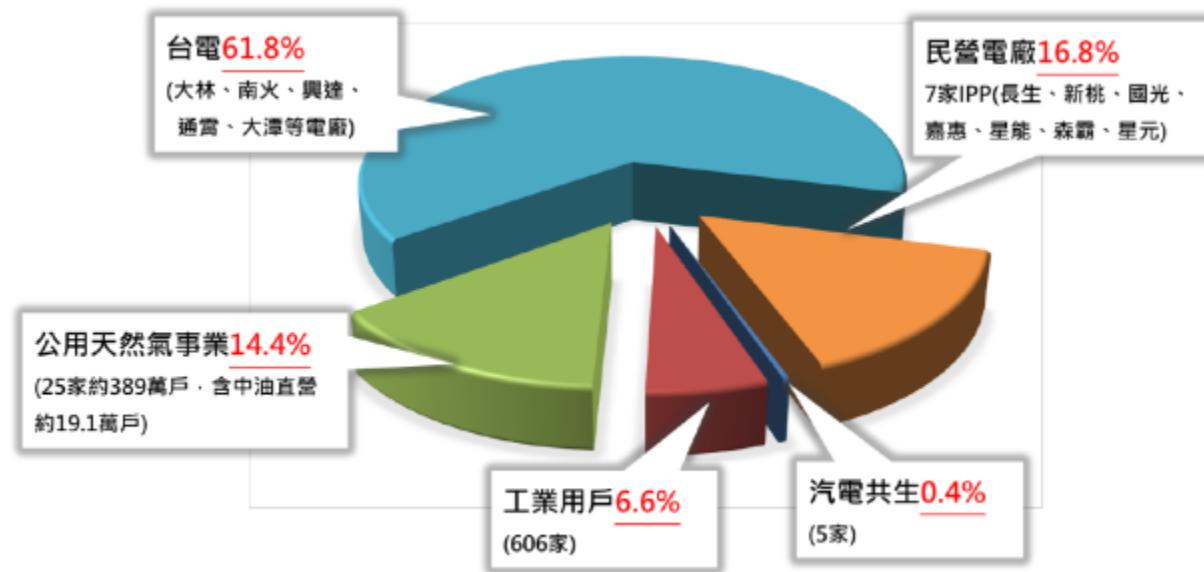
一、前言

天然氣為國內重要的乾淨能源之一，而台灣中油公司為國內的主要供應者。依據台灣中油天然氣事業部統計，民國99年之天然氣銷售量為140.6億立方公尺，民國111年銷售量為265.4億立方公尺，天然氣交易金額達3,000億元以上，成長率為89 % (圖一)，其中又以電廠為大宗，台電占比61.8 %，民營電廠占比16.8 % (圖二)；因應政府能源轉型政策，2025年燃氣發電占比將達50 %，

估計全國天然氣需求量於2025年將增加至2,490萬噸^[2]。天然氣之計價方式為，用氣量與熱值之乘積作為交易金額，其中，用氣量以天然氣消費流量作為計量基準，熱值以天然氣成分分析作為熱值計量基礎，要達到天然氣計價正確，必須維持交易過程中所使用之流量與成分分析兩計量設備具有良好的校正追溯系統^[2]。因此，建立天然氣相關計量技術的品質查核及驗證系統，可有助於提升其交易之公平性、客觀性與準確度，避免交易糾紛的重要基礎。



圖一 國內天然氣銷售量統計^[2]



圖二 國內天然氣銷售情形^[2]

二、天然氣成分分析

天然氣的組成，主要以甲烷和乙烷為主，佔約90 %以上，而其他成分包含丙烷及丁烷以上的烷類、氮氣、含硫化物及水。天然氣的成分分析一般以氣相層析法（Gas Chromatography）為主，使用設計的樣品注入系統、特定的化學成分分離管柱，在控制的溫度、流量或壓力下進行分析。

以氣相層析法做天然氣分析相關的國際

標準方法有很多種^[3]，如表一，國內有CNS 13275標準（天然氣成分試驗法 - 氣相層析法），標準方法的選擇並無唯一性，由於天然氣組成成分會因為不同產地而有所變異，使用者可依據需求來選擇不同的標準方法進行天然氣的成分分析及濃度驗證。系統設備所需具備之基本條件分別有兩種：（1）分析範圍涵蓋所欲分析探討的樣品成份；（2）在系統效能部分，系統所能分析的成份濃度範圍必須大於待測樣品的濃度範圍^[4]。

表一 天然氣分析標準方法^[3]

參考方法	名稱	現行版本年 度
ISO 6974-4	Natural gas - Determination of composition with defined uncertainty by gas chromatography Part 4: Determination of nitrogen, carbon dioxide and C1 to C5 and C6+ hydrocarbons for a laboratory and on-line measuring system using two columns	2000
ISO 6974-5	Part 5: Isothermal method for nitrogen, carbon dioxide, C1 to C5 hydrocarbons and C6+ hydrocarbons	2014
ISO 6974-6	Part 6: Determination of hydrogen, helium, oxygen, nitrogen, carbon dioxide and C1 to C8 hydrocarbons using three capillary columns	2002
ISO 6975	Natural gas - Extended analysis: gas-chromatographic method	1997

參考方法	名稱	現行版本年 度
ISO 10723	Natural gas - Performance evaluation for analytical systems	2012
ASTM D1945	Standard test method for analysis of natural gas by gas chromatography	2019
ASTM D7164	Standard practice for on-line/at-line heating value determination of gaseous fuels by gas chromatography	2021
GPA 2261	Analysis for natural gas and similar gaseous mixtures by gas chromatography	2020

在天然氣熱值計算標準部分，國際上有 ISO 6976、ASTM D3588及GPA 2145參考方法，詳見表二，國內則有CNS 14675（氣體燃料與熱值壓縮因子及相對密度計算法），

使用者可以依需求來選用不同之熱值計算規範，獲得不同成分理想氣體熱值、加總因子、莫耳質量比值等參數計算天然氣於基準溫度與壓力之熱值。

表二 天然氣熱值計算標準方法

參 考 方 法	名 稱	現 行 版 本 年 度
ISO 6976	Natural gas - Calculation of calorific values, density, relative density and Wobbe index from composition	2016
ASTM D3588	Standard practice for calculating heat value, compressibility factor, and relative density of gaseous fuels	1998

參 考 方 法	名 稱	現 行 版 本 年 度
GPA 2145	Table of physical properties for hydrocarbons and other compounds of interest to natural gas and natural gas liquids industries	2016

三、熱值分析儀量測品保工作

在天然氣成分分析與熱值計量方面，中油公司已於全台相關供氣站及轉輸中心裝設至少20台以上的線上熱值分析儀，來即時監控天然氣管路內的組成成分。為了使國內天然氣熱值計量工作更具完整性且具追溯性與量測準確度，台灣中油公司與工研院合作「線上熱值分析儀量測品保暨校驗工作」，此工作參考CNS 13275、ASTM D7164、ISO 10723，協助中油公司建立熱值分析儀之量測品保與校驗制度。

在各供氣站線上熱值分析儀使用之校正

用參考標準氣體成分濃度計量追溯上，國家度量衡標準實驗室(National Measurement Laboratory; NML)已建立低碳能源氣體濃度量測系統，並且取得財團法人全國認證基金會(Taiwan Accreditation Foundation; TAF)的ISO/IEC 17025校正實驗室認證，其中之合成天然氣校正服務可以滿足計量追溯上的需求，透過此標準傳遞與追溯，台灣中油公司在各供氣站之線上熱值分析儀，使用的校正用參考標準氣體成分濃度可追溯至國家(國際)標準，系統之服務能量及相對擴充不確定度參考表三^[5]

表三 合成天然氣成分濃度校正服務能量^[5]

成 分	濃 度 (cmol/mol)	相對擴充不確定度 (%)
CH ₄	30至95	0.06
C ₂ H ₆	0.1至10	0.33
C ₃ H ₈	0.1至10	0.71
iso-C ₄ H ₁₀	0.01至1.0	0.51

n-C ₄ H ₁₀	0.01至1.0	0.51
neo-C ₅ H ₁₂	0.01 至 1.0	0.94
iso-C ₅ H ₁₂	0.01 至 1.0	0.60
n-C ₅ H ₁₂	0.01至1.0	0.60
n-C ₆ H ₁₄	0.01至1.0	0.60
N ₂	0.01至50	0.32
CO ₂	0.01至50	0.24
O ₂	0.01至2.0	1.29

除了校正用標準氣體的追溯外，系統查核可使天然氣量測品保工作更為完備，也是對量測準確度進行再確認的步驟；就天然氣交易而言，此工作的完成可使交易雙方對於彼此的技術能力產生互信互賴，進而對於天然氣熱值的估算達成共識，避免爭議的產生。系統查核方式可分為兩種：(1)將現場天然氣取樣回實驗室進行分析，再將分析結果與線上分析系統的結果進行比較，目前各供氣站每月執行一次取樣分析至台灣中油實驗室內分析；(2)以驗證過具追溯性的標準氣體 (high grade in-house reference material) 進行線上分析系統的查核，再將分析結果與標準氣體本身的標示驗證值 (certified value) 進行比較，目前各供氣站配合熱值分析儀校正頻率執行本項系統查核。

由於現場實際樣品容易摻雜較多不明成

份，樣品穩定度也較人工配製的標準氣體差，所以後者的作法是目前國際上認為普行性較高的系統查核方式 (P.S. transfer of reference gases is preferable than transfer of real samples)。以荷蘭計量研究院 (Dutch Metrology Institute; VSL) 為例，其對於天然氣線上分析系統的查核即採取上述之第二種方式，以避免頻繁的實際樣品分析工作對於實驗室分析系統產生污染，造成系統使用壽命的減損。

利用所選定的校正標準氣體建立標準化分析程序及測試系統的穩定度，再搭配不定期的系統查核與實驗室分析能力測試與比對工作，即能確保量測結果的準確度。

四、影響熱值分析儀量測準確度之因素

線上熱值分析儀量測之準確度會影響天然氣之計價，那要如何判定機台之準確度狀

況？實務上我們採用經濃度驗證的參考標準氣體作為模擬樣品，進行熱值分析儀系統性能確效，執行方法為使用一支濃度接近管路天然氣成份配比的標準氣體作為比對件，於設備校正週期間進行查核測試，藉以確認線上熱值分析儀於校正週期間熱值監測運作是否異常，並適時排除與矯正。以下整理幾點影響機台準確度之因素：

(1) 載氣品質不佳

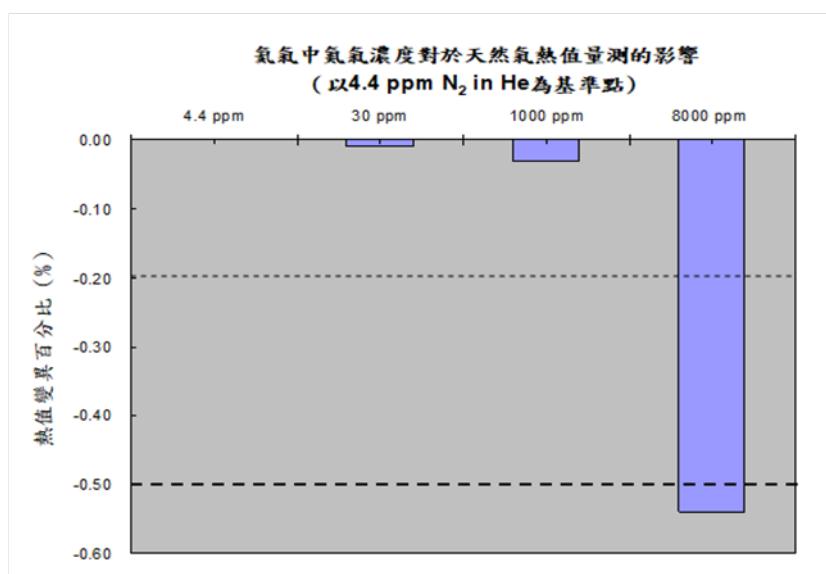
線上熱值分析儀使用之載氣(carrier gas)則是一個影響熱值分析準確度的重要因子，線上熱值分析儀透過載氣將樣品於分析系統中運送，不同物種經過化學層析管柱達到分離效果，最後再依序通過熱導式偵測器(thermal conductivity detector ; TCD)量測。載氣如果含有待測氣體成分，將會影響該成分支定量量測的準確度，進而影響熱值計算。

以不同純度He分析中油供氣站校正用標準氣體所得熱值為基準，與不同純度He分析所得熱值進行比較。結果顯示：若更換

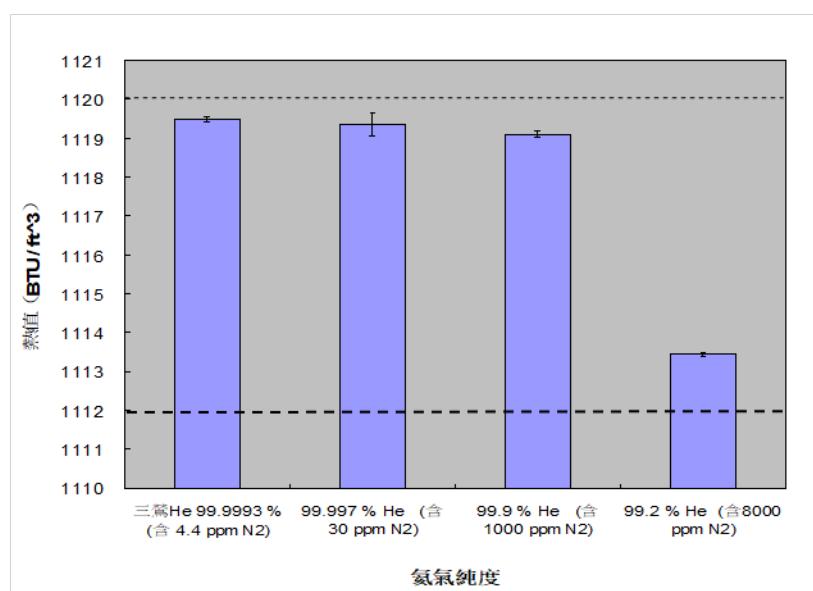
載氣後未執行系統重新校正，則高純度載氣分析樣品所得樣品熱值較高。圖三為不同載氣純度，的確會影響同一樣品所量測之熱值，且當載氣純度高於99.9 %時，量測所得熱值相對差異小於0.03 %。當載氣純度是99.2 %時，樣品分析所得熱值與純度高之載氣分析所得熱值即有明顯差異（與載氣純度是99.9993 %比較時，熱值相對差異達0.54 %），如圖四。

(2) 校正用標準氣體濃度與管路天然氣的濃度配比有顯著差異

依據CNS 13275及ASTM D7164-10規範，系統量測準確度執行單點校正時，建議校正用參考氣體之主要成分濃度，須介於管路天然氣主要成分濃度1/2至2倍之間，唯有盡量減少標準品與待測樣品之間的濃度差異，才能確保樣品濃度推估值的準確性。若使用之校正用標準氣體與線上量測氣體差距太大時，將影響其準確度表現，如表四。



圖三 不同載氣純度對同一樣品所量測之熱值影響^[6]



圖四 氦氣純度對熱值之影響^[6]

表四 校正用標準氣體濃度與線上量測氣體不匹配案例

氣瓶編號 ASE075	查核氣體 濃度	線上熱值儀 分析值	濃度差	校正用標準氣體 AL160688
成分	%mol/mol			
n-C ₆ H ₁₄	0.0412	0.0275	-0.0137	0.05114
C ₃ H ₈	0.2948	0.2892	-0.0056	0.9982
i-C ₄ H ₁₀	0.0469	0.0460	-0.0009	0.3984
n-C ₄ H ₁₀	0.0455	0.0444	-0.0011	0.4001
neo-C ₅ H ₁₂	0.0000	0.0000	0.0000	0.1023
i-C ₅ H ₁₂	0.0205	0.0200	-0.0005	0.1515
n-C ₅ H ₁₂	0.0104	0.0097	-0.0007	0.1524
N ₂	0.407	0.4232	0.0162	2.507
CH ₄	88.09	88.17	0.08	88.69
CO ₂	5.036	5.033	-0.003	3.033
C ₂ H ₆	6.012	5.941	-0.071	3.511
熱值 (kcal/m ³)	9029.36	9016.82		9189.85

(3)儀器設定之系統偏差

儀器設定之系統偏差為使用之校正標準氣體與管路天然氣的成分配比雖然有匹配（排除上述第二點所述問題），但濃度計算之參數未妥當設定，造成機台之準確度偏差

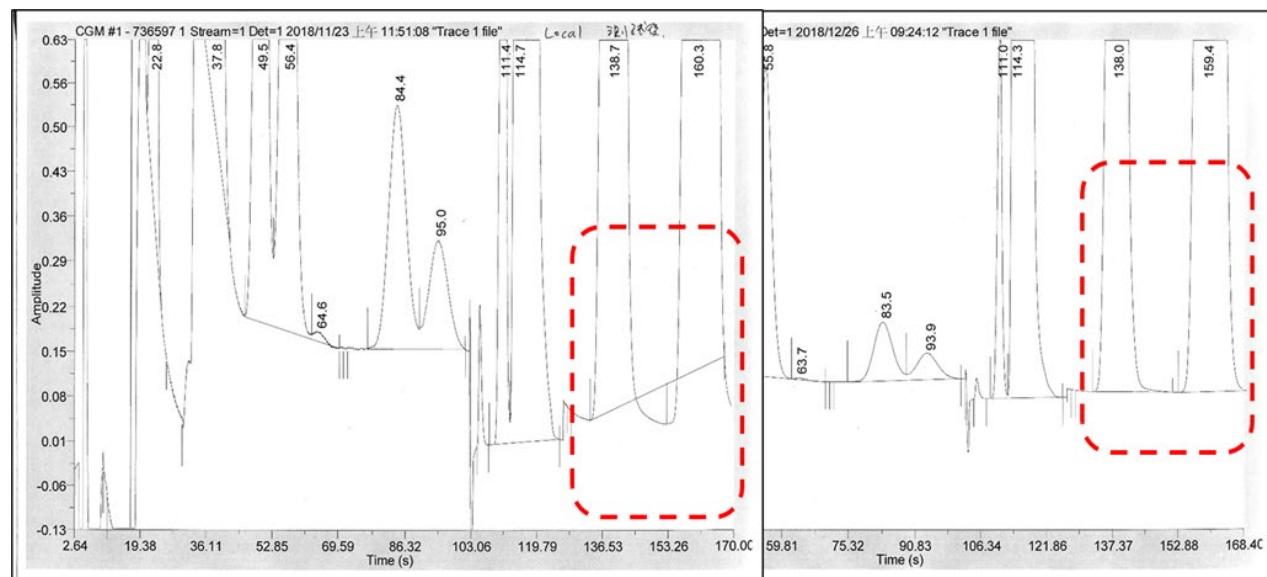
狀況。圖五為某站甲烷無法正常量測（無數值），主要原因為線上熱值儀機型需針對每成分設定積分時間，甲烷未正確設定積分時間參數，而造成量測異常。

Component	Normalized %	Setup	Calculation Settings	Contract Settings	Component Configuration	Component Splits	Limits
Propane	3.80774						
Hydrogen Sulfide	0						
IsoButane	1.27272						
Butane	1.26417						
NeoPentane	0						
IsoPentane	0.49616						
Pentane	0.50488						
Hexane+	0.27149						
Nitrogen	11.30741						
Methane	0						
CarbonDioxide	0.59101						
Ethane	80.48441						
Hexane	0.27149						

圖五 積分時間參數未正確設定

層析圖譜的積分條件未正確設定亦會對量測準確度造成影響，圖六(A)為積分條件參數未正確設定之圖譜，積分線未完全將該

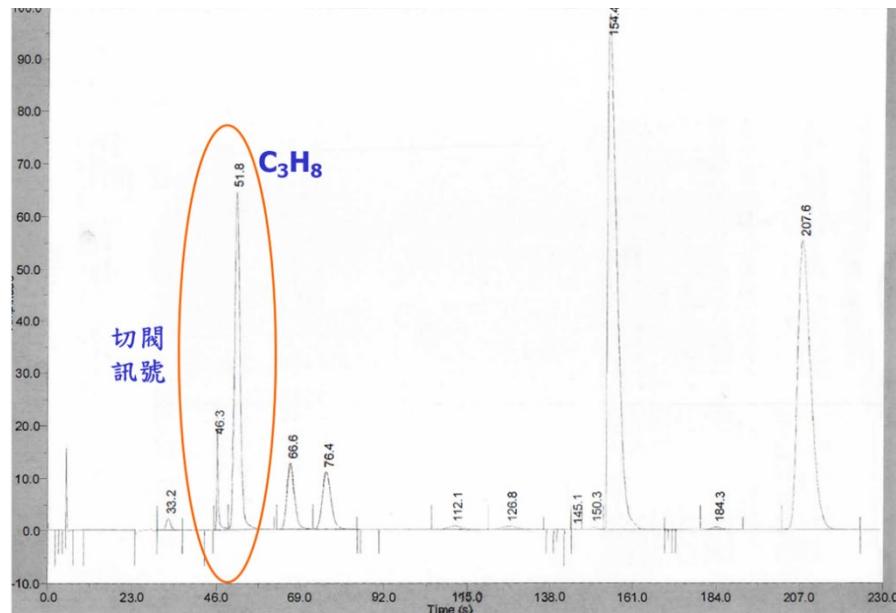
二成分完全積分，造成濃度被低估，進而影響熱值計算；正常之積分圖譜如圖六(B)



圖六 (A)積分面積參數未正確設定 (B)正常積分圖譜

線上熱值分析儀通常要在限定的時間內(通常為數分鐘內)分析出一筆數據，其組成為多個層析管柱及閥件，透過轉動閥件將特定分析物流入層析管柱依序分析，圖七為某

站切閥訊號干擾 C_3H_8 積分，造成 C_3H_8 成分濃度量測不穩定，此情況可透過系統設定切閥時間，以利抑制切閥訊號。



圖七 切閥訊號干擾圖譜

(4)未正確執行校正程序

線上熱值分析儀每次校正的目的為重新建立機台標準氣體之各成分濃度與線上熱值儀分析所得訊號的相關性，訊號一般以積分面積表示，該相關性代表每一個單位的成分訊號值所代表的氣體濃度(簡稱為resp fact)。管路天然氣的成分濃度測試，即是以不同成分測試所得的訊號值乘以resp fact，即可準確計算出管路天然氣的各成分濃度，若未正確與定期執行校正程序，後續之量測就可能

會產生問題。ASTM D7164-10規範中提到，確保「量測準確度與一致性」的系統保養是至關重要的，而保養程序依據設備商的指引設計，並不受限於此。

(5)機台硬體或耗材損壞

機台硬體或耗材損壞如層析管柱老化、偵測器損壞及六向閥膜片或其他閥件損壞，亦會對準確度結果造成影響，通常此類狀況會對量測結果有顯著差異，若為此類狀況則需請機台維護廠商檢修排除故障原因。

結語

天然氣每年之交易金額達3,000億元以上，且多數用於發電與能源產業中，提升天然氣交易上計量的準確度及其追溯性，可減少交易糾紛及維持交易之公平性。在供氣站標準氣體的計量追溯上，國家度量衡標準實驗室可以提供天然氣濃度校正的服務；而熱值分析儀的系統準確度確認，則可以利用與天然氣管線內相近成分的標準氣體，比對熱值分析儀分析結果與標準氣體本身的標示驗證值，藉以判定機台量測狀況，並且做相對應之處置動作。

參考文獻

1. 能源轉型白皮書，110 年度執行報告，<https://energywhitepaper.tw/#/report>
2. 台灣中油公司全球資訊網，天然氣服務專區，<https://www.cpc.com.tw/cl.aspx?n=78>
3. 天然氣濃度以及硫化物分析技術於產業應用現況，量測資訊 183 期，2018 年 9 月，黃炯坤。
4. 110 至 112 年度線上熱值分析儀量測品保暨校驗工作綜合報告，2023 年 12 月，陳伊瑄、柯雅文、林采吟。
5. 天然氣成分濃度校正系統評估報告，07-3-A1-0034，四版，工研院量測技術發展中心，2020 年，黃炯坤。
6. 氣體純度鑑識技術之應用，量測資訊 198 期，2021 年 3 月，陳伊瑄、黃炯坤、林采吟。



陳伊瑄 / 量測中心 氣體化學與潔淨環境計量研究室 / 副研究員

