

PCB溼製程槽液微粒子線上監測系統

Real-Time Microparticle Monitoring System for PCB Processing Baths

莊俊德 C. T. Chuang²、陳志仁 C. J. Chen³、王玉琳 Y. L. Wang²、
陳胤霖 Y. L. Chen¹、蔡詠安 Y. A. Tsai¹、林宗翰 T. H. Lin¹、
蔡秉修 B. S. Tsai¹、周明杰 M. C. Chou²

工研院(ITRI) 智慧感測與系統科技中心 ¹副工程師、²資深工程師、³正工程師

摘要/Abstract

隨著先進封裝(CoWoS、FOPLP)、ABF載板(HPC、B5G產品)溼製程精度提升,溼製程槽液中的微粒子若附著於線路上,將造成結瘤或短路等不良品。雖然國外大廠PMS/RION/Lighthouse研發了純水系統監測用的微粒子計數器(Liquid-borne Particle Counter),但鮮少用於線上溼製程槽液使用。主因是感測器對槽液成份與顏色有諸多限制,且不易於製程設備整合,大多只能用在實驗室檢測或後端清洗製程監測。因此,工研院開發PCB溼製程槽液微粒子線上監測系統,內建彈性化大範圍粒徑感測範圍(1~20 μm)、槽液成份色度補償以及微粒子圖譜辨識技術,提供正確的水中微粒子計數與粒徑分布。遵循ISO-21501-2的指引,本研究之微粒子線上監測系統採用標準粒徑與濃度微粒子試劑(NIST Traceable)進行出廠測試與校正,在10 ml/min的流量設定與粒子濃度調配為1,200 counts/ml的情況下,2~10 μm 粒子計數效率>90%,1 μm 及20 μm 的計數效率也有>75%,符合ISO-21501-2的規定。經實際布建於國內PCB廠商的ABF載板化鍍產線進行 β Site驗證,透過與參考儀器(RION品牌)的同步量測比對,線上微粒檢測數量器差介於0.23%~8.1%之間,可滿足廠商需求進行廣布,有機會將PCB廠的槽液檢測時間將由4小時(人工)縮短至3分鐘(線上自動),透過及早發現槽液異常,有機會減少不良品數量20%。

As the precision of wet processes increases for advanced packaging (CoWoS, FOPLP) and ABF substrates (HPC, B5G products), microparticles in the wet processing baths can adhere to circuits, leading to defects such as nodulation or short circuits. Although major foreign manufacturers like PMS, RION, and Lighthouse have developed liquid-borne particle counters for pure water system monitoring, these are rarely used online for wet processing baths. This is primarily because the sensors face numerous limitations regarding bath composition and color, and they are difficult to integrate into processing equipment. Consequently, they are mostly limited to laboratory testing or monitoring backend cleaning processes. To address this, ITRI has developed an Real-Time Microparticle Monitoring System for PCB Wet Processing Baths. The system features a built-in flexible and wide-range particle size detection capability (1–20 μm), bath composition and color compensation, and microparticle pattern recognition technology,

providing accurate counts and size distributions of microparticles in liquid. In accordance with the ISO-21501-2 guidelines, the online particle monitoring system developed in this study underwent factory testing and calibration using NIST-traceable standard particle size and concentration reagents. Under a flow rate setting of 10 ml/min and a particle concentration adjusted to 1,200 counts/ml, the counting efficiency for 2–10 μm particles exceeds 90%, while the counting efficiency for 1 μm and 20 μm particles also exceeds 75%, complying with the ISO-21501-2 standard. The system was deployed on an ABF substrate chemical plating line at a domestic PCB manufacturer for beta-site validation. Through synchronous measurement and comparison with a reference instrument (RION brand), the instrumental error in online particle count ranged between 0.23% and 8.1%, meeting the manufacturer's requirements for widespread deployment. This system has the potential to shorten the bath solution inspection time in PCB plants from 4 hours (manual) to 3 minutes (online automated). By detecting bath solution abnormalities early, it offers the potential to reduce the number of defective products by 20%.

關鍵字/Keywords

水中微粒子(Liquid-borne Particle)、計數(Counter)、溼製程(Wet Process)、潔淨度(Cleanliness)

前言

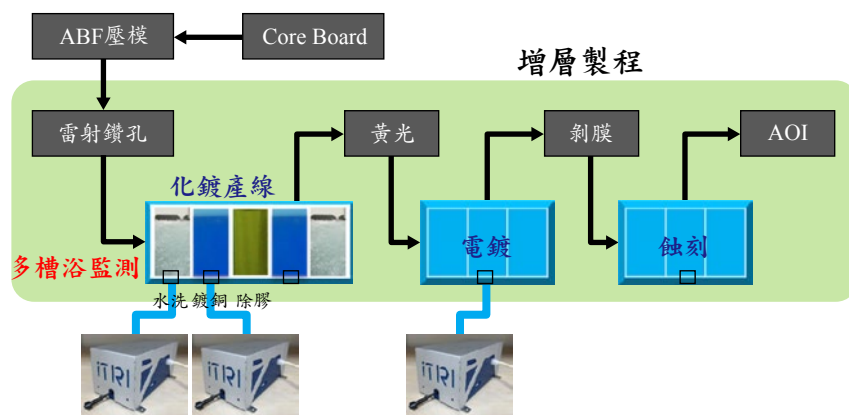
在AI伺服器的浪潮下，PCB的層數已從12~16層飆升至34~50層，內埋式載板的細線寬(L)與間距(S)比，將於2027年達4/4 μm 。在如此細的線路線距下，線路成型不良率關鍵為溼製程(Wet Process)的化鍍與電鍍，主因為化銅沾附及異物阻鍍，因此必須隨時監控槽液潔淨度以確保增層過程的良率。

台灣市售微粒計數(Counter)感測器(Liquid Particle Counter; LPC)設備(如PMS、RION、Lighthouse等)大都由國外進口，因維護不易且容易受溼製程槽液的成份、顏色及氣泡所干擾，導致粒徑大小與計數的誤差；且因控制介面開放程度不一，與產線製程設備整合不易，大都只安

裝在實驗室或後方清洗段，鮮少於化鍍/電鍍製程線上使用。

為了能提供可於產線廣布的水中微粒子(Liquid-borne Particle)感測器，並建立國內自主維護能量，工研院開發線上溼製程槽液微粒子計數器，包含高感度感測光學檢測技術提供次微米級粒子檢測、成份色度補償演算法補償光學吸收率導致的粒徑誤差，以及微粒訊號圖譜辨識技術濾除非粒子訊號的誤判等。最後採用ISO-21501-2標準進行出廠驗證，並於先進PCB ABF板廠與市售儀器進行實地驗證比對，證明本計畫研發之水中微粒子感測器可滿足溼製程電/化鍍及清洗等多種產線應用。

本文將分別介紹溼製程線上槽液潔淨度(Cleanliness)監控系統、光學式水中微粒子感測技術、微粒子圖譜辨識技術，以及



▲圖一 PCB溼製程槽液監控應用情境

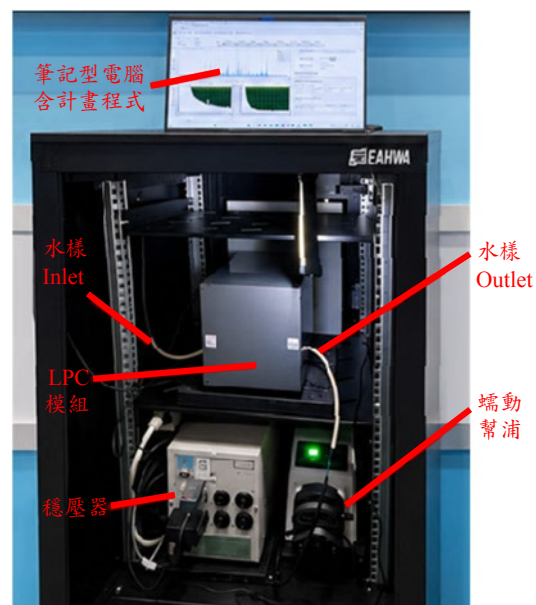
結論與其他相關應用。

溼製程槽液微粒子線上監測系統

為了滿足PCB溼製程電鍍、化鍍及清洗等多種槽液潔淨度線上監控，本計畫研發之水中微粒子線上監測系統直接裝設於產線槽體旁，透過蠕動幫浦與管材吸取槽液，進入微粒子感測模組內部量測微粒子高速光學散射訊號，即時分析計算微粒子粒徑分布與數量。當偵測到微粒子數量與粒徑分布異常時，即時提供警示讓人員及早介入，減少不良品產出機率與數量，應用情境如圖一所示，實機架設樣態如圖二所示。

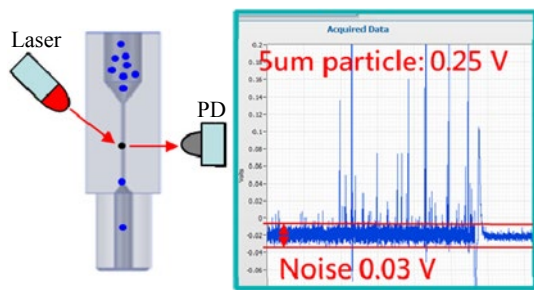
1. 微粒子高速光學散射感測模組

為獲得高訊雜比的微粒子散射訊號，工研院自主開發光機模組，包含先運用鞘流機構進行粒子排列後進行光學檢測區域，檢測區內採用雷射集中光束照射移動中的微粒子，並以光電二極體以每秒200K次的頻率接收微粒子的散射光學訊號。雷



▲圖二 溼製程線上槽液潔淨度監控系統

射光有打到微粒子時感測的散射訊號會較強，沒打到時感測的散射訊號會較弱，兩者的訊號強度比例（訊雜比）至少要大於2倍以上，後續微粒子訊號識別(Particle Identification)會較容易。工研院的光機模組



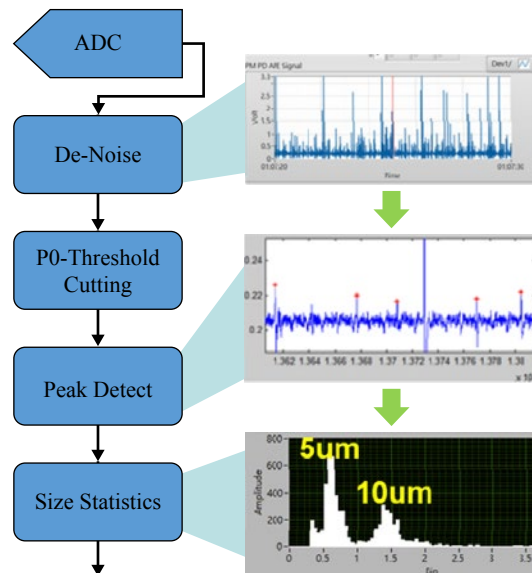
▲圖三 自主光機設計與粒子排列機構，訊雜比>8

採用5 μm 的標準粒子測試，微粒子感測訊號平均為0.25 V，背景雜訊（無粒子時）感測訊號為0.03 V，訊雜比(SNR)>8，微粒子很容易被識別出來，如圖三。

2. 微粒子訊號識別與圖譜辨識處理流程

由於感測訊號為高訊雜比，識別出微粒子的訊號處理流程就相對容易，基本流程為將原始電壓訊號先以低通濾波器處理，直接以閾值(Threshold)為判斷啟動偵測波峰，每個波峰識別為1顆微粒子，波峰電壓值後續以校正對照表判斷其粒徑大小，定時統計粒徑大小與數量（粒徑分布圖），整體訊號處理如圖四所示。

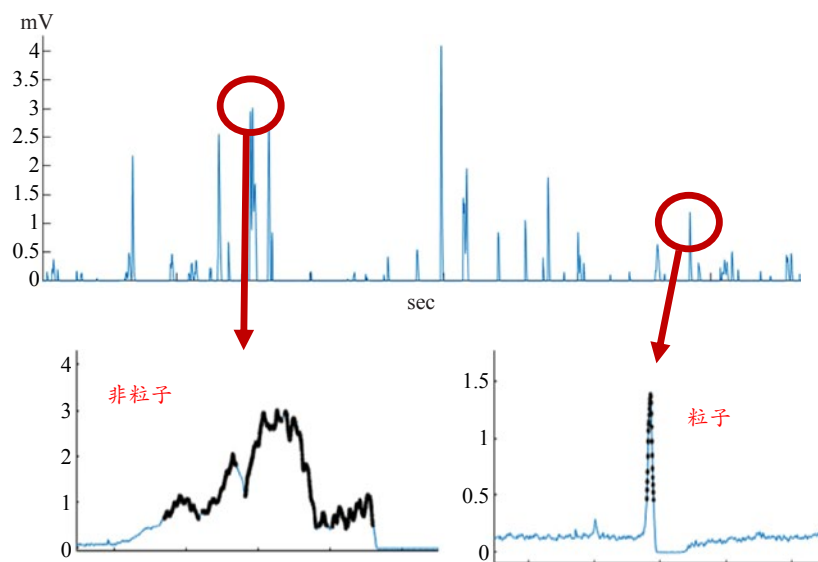
製程槽液中因多種化學品相互作用，常伴隨著大量微氣泡產生，經常被誤判為大量微粒子而引發人員擔憂。本研究運用圖譜辨識技術，在偵測波峰時也偵測寬度與多波峰形貌(Pattern)，將異常寬廣且多波峰的形貌識別為非粒子訊號，與窄高形的單一波峰做出區隔，有效減少氣泡干擾機率，如圖五。



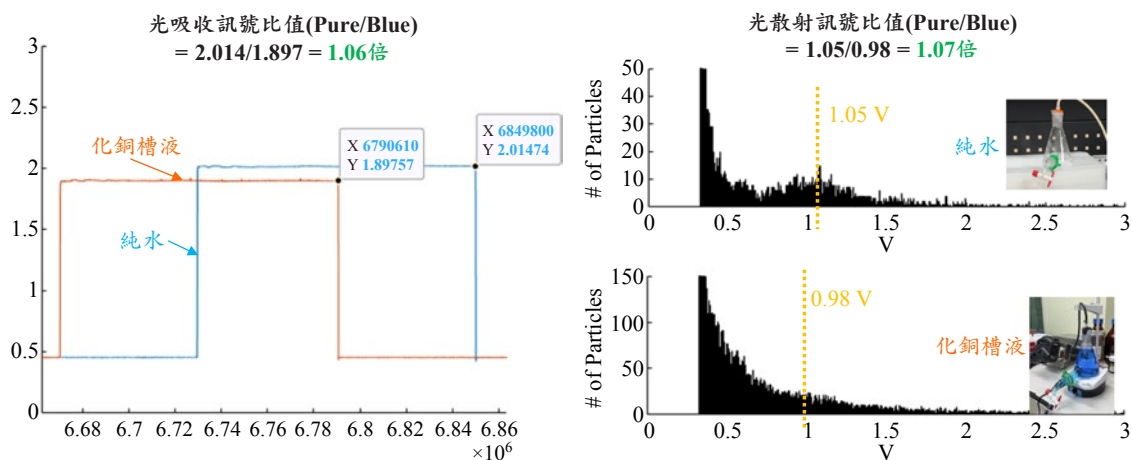
▲圖四 微粒子識別與統計的訊號處理流程

3. 色度補償技術

微粒子感測模組出廠校正時，所採用的NIST標準濃度粒子是以透明的純水調配，但在ABF載板化鍍製程中，化銅槽液會有深藍與淡藍色兩種，且隨著使用時間會有些微顏色變動，因為雷射通常採用紅光，通過槽液顏色的吸收率不同，造成感測訊號強度也改變，導致計數會有誤差。例如，分別以純水及化銅槽液加入定量NIST標準微粒子，光吸收訊號強度分別為2.014 V（純水）及1.897 V（化銅），比值為1.06；5 μm 粒子散射訊號強度分別為1.05 V（純水）及0.98 V（化銅），比值為1.07。由光電感測器量測到的吸收光強度可佐證補償槽液顏色所造成的訊號強度改變，如圖六所示。因此，本研究專利技術是透過同步量測的吸收光強度變化，依據純水校正時吸收光強度進行還原，可修正顏色變化



▲圖五 微粒特徵辨識演算去除非粒子訊號



▲圖六 色差補償技術去除多槽浴顏色干擾

造成的計數誤差。

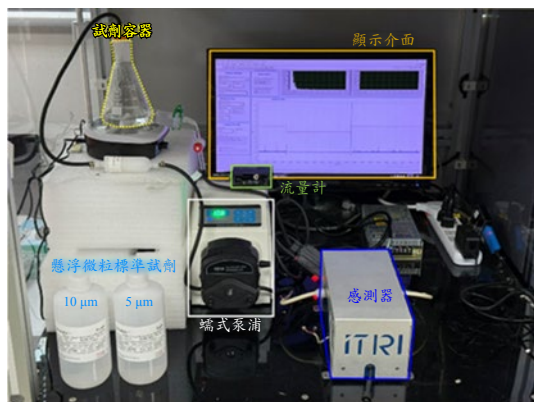
4. 計數效率驗證

遵循ISO-21501-2:2019的計數效率指引，最小可偵測粒徑的檢出率介於(50±

30)%，即20~80%之間；1.5~3倍的最小可偵測粒徑檢出率介於(100±30)%，即70~130%之間。意即若微粒子模組宣稱可偵測1 μm的粒子，採用1 μm標準粒子的檢出率就要到達20~80%之間，且需另採用1.5~3 μm標

▼表一 工研院微粒子感測模組計數效率

標準粒徑	計數效率					檢測結果
	1 μm	2 μm	5 μm	10 μm	20 μm	
LPC004	76.3%	93.9%	91.0%	97.5%	75.3%	合格



▲圖七 採用NIST標準粒子驗證實驗環境

準粒子達檢出率達70~130%之間，模組才能宣稱符合最小可偵測1 μm 微粒子。

ISO-21501-2: 2019 Counting Efficiency 定義：

- Minimum Detectable Size: (50 $\pm$ 30)%
→20~80%
- 1.5~3 x Times the Minimum Detectable Size: (100 $\pm$ 30)%
→70~130%

分別取1 μm 、2 μm 、5 μm 、10 μm 、20 μm 的標準粒徑與濃度微粒子試劑(NIST Traceable)，每瓶濃度為10,000 counts/ml，以純水配製為濃度1,200 counts/ml的測試液體，流量設定為10 ml/min，為微粒子感測模組進行出廠測試與校正，實驗環境設置如圖七所示，計數效率測試結果如表一

▼表二 工研院微粒子感測模組規格表

項目	規格
光源	660 nm Laser
可測量粒徑範圍	1~20 μm (可調整)
取樣率	200 kHz
檢測濃度範圍	≤ 1200 particles/mL
計數效率	70%~130%
與樣品接觸部份的材料	石英、鐵氟龍
量測流量	10~15 mL/min
數據更新率	1筆/min、1筆/sec
機殼尺寸	290 mm $\times$ 160 mm $\times$ 100 mm
傳輸介面	Modbus RTU
輸出資訊	粒徑電壓分布

所示。表一中最小可偵測徑徑1 μm 檢出率76.3%以及2 μm 檢測率93.9%，符合ISO-21501-2的計數效率規定。在5 μm 、10 μm 、20 μm 的粒子檢出率也都滿足70%~130%的檢出率，換言之，代號LPC004的微粒子感測模組可以提供1~20 μm 的微粒子檢測。

5. 微粒子感測模組規格

由上述測試結果，工研院微粒子感測模組規格詳列如表二，因光機模組為工研院自製，可測試量粒徑範圍具有調整彈性。

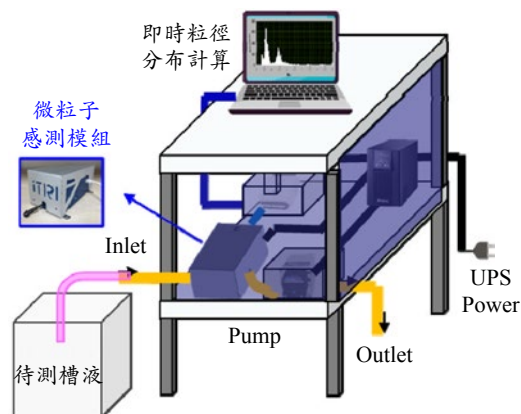
PCB廠ABF產線比對與實地應用

為了實地驗證PCB溼製程槽液微粒子線上監測系統於ABF載板產線的表現，本研究與國內廠商合作，在化鍍產線進行 β

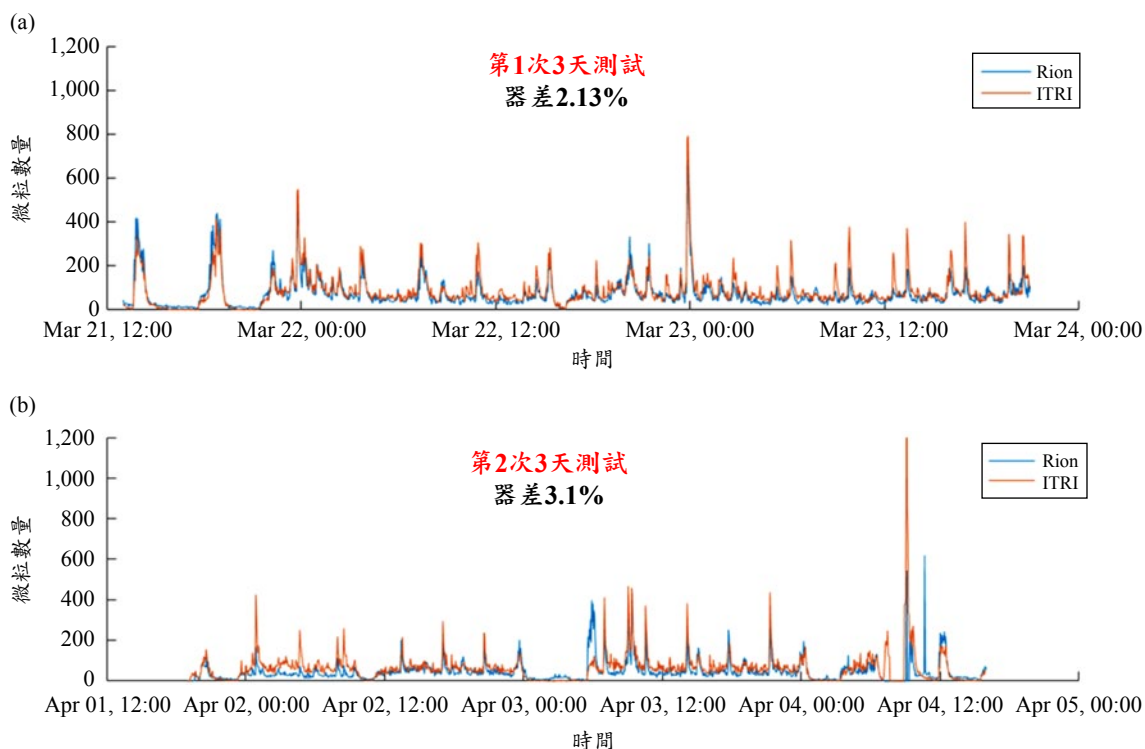
Site驗證。工研院將微粒子線上監測系統架設於化鍍產線旁，透過管材與幫浦即時抽取槽中溶液，進行每秒微粒子數量與粒徑計算，實驗設置環境如圖八所示。同時，也使用廠商實驗室的市售儀器（RION品牌）進行微粒子同步量測比對。

第1次的3天比對於產線保養後進行，如圖九(a)所示，其中橘線為工研院量測的微粒子數量變化，藍線則為比較對象RION量測的微粒子數量變化，經統計兩者之間器差為2.13%。第2次的3天比對如圖九(b)所示，工研院產品與市售產品的微粒子數量器差為3.1%。經由3個月的比對，工研院產品與RION儀器的器差介於0.23%~8.1%之間，

代表工研院的產品具有高度的量測可信賴性，可設定微粒子數量上限偵測，即時提供預警。將原本人工4小時檢測1次的頻率，縮



▲圖八 ABF板廠內比對架設圖



▲圖九 化鍍產線與市售儀器比對：(a)第1次3天比對，器差2.13%；(b)第2次3天比對，器差3.1%（彩圖請見材料世界網）

短為系統每3分鐘自動判斷1次，發現槽液異常的時間由4小時縮短為3分鐘且人員可及早介入處理，有機會減少不良品20%。

結 論

本研究結合可分離式流道光機結構與微粒特徵辨識與補償演算法，開發出可應用於ABF載板製程線上的水中微粒感測器與槽液，具備廣域佈建與即時精準偵測的能力，能有效量測槽液中微粒的粒徑與濃度變化，並提供異常濃度或數量的即時警示。此技術可顯著降低因微粒累積導致的短路或結瘤問題，進而減少產品報廢率與製程碳排放。同時，該模組亦符合國際大廠如Apple、AMD、Intel、Nvidia等對製程中微粒監控與紀錄的要求。目前本技術成果已與國內ABF載板業者於化鍍製程中驗

證，實現對槽液成分濃度與微粒數量的即時監測，有望進一步提升良率與營收。此外，因應半導體高階製程精密度需求，本技術未來更可擴散到超純水、顯影劑、蝕刻液等特用化學品日常檢測，確保各項水溶液的潔淨度。藉由上下游產業鏈的緊密串聯與降低技術導入門檻，有助於擴大技術推廣與整線導入的機會，進而帶動產業整體減碳效益，實現國產化自主供應鏈的具體落地與永續發展。🔗

參考文獻

1. ISO-21501-2: 2019 Light scattering liquid-borne particle counter.
2. 工研院產科國際所，展望2026全球PCB產業趨勢發展關鍵議題，台灣電路板協會，2026.01。
3. 欣興電子2024 永續報告書。
4. 景碩科技2024 永續報告書。