

「國研盃 i-ONE 儀器科技創新獎」 得獎作品介紹 2021 年專上組首獎

巨微觀尺度應力自動化量測設備

Automatic Measurement Instrument for Macro- and Micro-scale Stresses

國立清華大學動力機械工程學系團隊

參與人員：周伊恩、陳佑瑄、王捷

指導老師：王偉中 教授、宋泊錡 博士

本研究以國立清華大學光測力學實驗室之全場應力量測專利技術—高等反射式光彈理論 (advanced reflection theory of photoelasticity, ARToP) 與反射式加強曝光光彈理論 (reflection-type enhanced exposure theory of photoelasticity, R-EEToP) 為基礎，不僅針對整體機構架設與光路進行設計來將各光學元件模組化和系統化，且透過 LabVIEW 軟體進行光源、相機與步進馬達之自動化控制與人機介面程式之開發，建立了一套兼具巨觀與微觀尺度應力自動化量測且可數位程控之模組系統，並探討此模組系統之量測可行性與精準度，此模組系統具備全場性、快速性、非破壞性、高精準性且可攜式自動化量測之特性。

一、目的

玻璃因具有良好光學特性、低熱膨脹係數、低導電度與高抗侵蝕性，故廣泛使用在半導體產業與光電產業中，例如薄膜電晶體液晶顯示器 (thin film transistor-liquid crystal display, TFT-LCD)、有機發光二極體 (organic light-emitting diode, OLED) 顯示器、軟性顯示器 (flexible display, FD)、智慧型手機、觸控面板、指紋感應器、相機晶片模組、IC 封裝與微型電池中⁽¹⁾，2017 年智慧型手機出貨量總計 14.4 億臺⁽²⁾，故 2017 年單就應用於手機之玻璃基板估計至少 28.8 億片，而 2019 年大尺寸面板出貨量估計成長達 8.1 億片⁽³⁾，故用於面板之大尺寸玻璃基板之產量估計至少 16.2 億片。隨著科技演進與市場需求，玻璃基板尺寸不僅朝向大面積化發展，更朝向輕薄化發展，且近年來軟性電子產業也大量在玻璃基板上進行產

品創新與使用，因此不僅玻璃本身可能存在殘餘應力之問題，玻璃基板之切割技術也面臨許多挑戰。雷射切割已逐漸成為目前玻璃基板精密切割技術之主流，然而，雷射切割玻璃基板之應力值大小將關鍵性地決定雷射切割品質，若雷射切割所產生的應力過大，將容易導致切割之玻璃基板之微裂痕於後續製程中持續成長進而造成無法預期之破裂，因此雷射切割玻璃基板在進行後續製程前必須進行檢測。目前市面上針對雷射切割玻璃基板之檢測方式多為透過破壞式之抽樣檢查，如此檢測方式將無法避免切割不良試片仍可能存在之風險，且需要耗費試片成本，因此國立清華大學光測力學實驗室(以下稱本實驗室)於2019年第十一屆國研盃*i-ONE*儀器科技創新獎之參賽作品「玻璃基板應力自動化量測模組之研發」中即研發出應用本實驗室發明專利技術—加強曝光光彈理論(enhanced exposure theory of photoelasticity, EEToP)⁽⁵⁻⁹⁾之穿透式光彈應力量測模組系統，該應力量測模組系統可非破壞式檢測玻璃基板切割應力與殘餘應力。

但由於玻璃基板之相關終端產品在製造過程中或是加工技術上的需要，必須在玻璃基板上進行塗層與鍍膜，導致穿透式光彈量測法並非易於適用。若能透過非破壞方式且是反射式光彈量測方式量測雷射切割玻璃基板之應力值並建立雷射切割玻璃基板應力值之檢測準則，不僅可以對試片進行全檢以排除不良試片存在之風險，同時也可以降低試片耗費之成本，更達到方便與快速因應大量產品產出的即時性量測之要求。因此本研究即利用本實驗室已發展領先國際之玻璃基板全場應力量測發明專利技術—高等反射式光彈理論(advanced reflection theory of photoelasticity, ARToP)⁽⁵⁻¹¹⁾與反射式加強曝光光彈理論(reflection-type enhanced exposure theory of photoelasticity, R-EEToP)^(5-10, 12)為基礎，搭配微距攝影術，進一步研發出自動化且兼具巨觀與微觀尺度應力量測之模組系統，此應力量測模組系統將可應用於目前產業上已正大量應用或研發出之新興產品，並針對各超薄玻璃基板與終端性消費電子產品於生產與加工時進行玻璃基板良品之自動化檢測或是產品良率判定。

然而過去本實驗室的ARToP與R-EEToP設備都是架設在光學桌上^(13, 14)，且需要透過人工手動調整光學元件與操作取像系統來完成整體量測，手動量測主要是透過三個主要元件的控制來進行，分別是步進馬達、光源及相機。整體流程上會先讓量測者透過步進馬達調整偏振片的角度，調整光源強度取得不同的曝光效果，以及相機取像後傳至電腦內進行分析。然而使用ARToP與R-EEToP量測時需要分別取得六張與八張不同偏振片角度與不同光強的影像，以及兩張校正試片之光強影像進行運算，且不同元件所需要的控制軟體不同，因此不管是在調整角度與光源的部分，或是使用不同程式的操作，需要耗時至少300秒/試片以上，且光學元件亦受限於須架設在光學桌上，故整體架設無法同步移動。此外，玻璃基板加工後微缺陷之應力量測亦為目前產業迫切需要之技術，過去R-EEToP在執行微觀應力量測時必需更換鏡頭成微觀鏡頭，但微觀鏡頭之景深淺，必須透過步進馬達來移動相機以準確對焦，導致微觀系統架設上較巨觀量測系統更加複雜，故過去R-EEToP微觀量測與巨觀量測是分別分開架設的兩套量測系統，並無整合在一起。有鑑於未來市場針對玻璃基板與終端產品品質檢測前景，本研究係利用ARToP與R-EEToP非破壞低階應力量測之優勢，進行整體的機構與光學模組設計，進而研發一套整合巨觀與微觀量測系統且適用於低階應力量測的自動化模組設備，並利用LabVIEW程式開發出一套數位程控系統，並以人機介面的方式清楚簡潔呈現可調參數及應力量測結果，進而達成準確、快速且可攜式之自動化分析玻璃基板之品質的目標。

二、背景介紹

由於深知玻璃基板應力量測之需求與重要性，本實驗室於 2017 年發展了國際首創之玻璃基板全場應力量測發明專利技術-ARToP⁽⁵⁻¹¹⁾ 與 R-EEToP^(5-10, 12) 來量測具鍍膜層玻璃平板與超薄玻璃基板之全場應力分布，ARToP 與 R-EEToP 之相關理論與架設目前已獲總數 4 件之中華民國、美國、日本與中國發明專利⁽⁵⁻⁸⁾，其中該中華民國專利⁽⁵⁾ 亦榮獲經濟部智財局 109 年國家發明創作獎銀獎⁽¹⁵⁾。

1. ARToP 與 R-EEToP 之介紹

圖 1 為反射式平面偏光儀之光路架設示意圖，主要包含光源、起偏鏡 (polarizer)、檢偏鏡 (analyzer) 與取像設備，且光源入射角等於相機取像角，ARToP 與 R-EEToP 皆為利用反射式平面偏光儀量測應力之創新理論。

ARToP 主要透過光學原理進行試片前表面光強之校正，故可針對試片後表面無反射層或無反射物或僅能部分反射的情況下進行應力量測，而一般之反射式光彈法僅能針對試片其後表面具有不可穿透且僅可反射之膜層或物體 (如反射鏡) 進行量測，故 ARToP 的應用範圍更為廣泛，在高科技產業中可應用在製程中之試片或終端產品之檢測上。

然而，ARToP 之理論無法針對較低階之應力進行量測，而 R-EEToP 則是結合 ARToP 之前表面光強之校正理論與 EEToP 之等色線強化理論所提出的創新低階應力量測理論，故 R-EEToP 不但可針對試片後表面無反射層或無反射物或僅能部分反射的情況下進行應力量測外，其量測解析度更可透過理論計算直接提升，過去之雷射干涉術^(16, 17) 和白光光彈法⁽¹⁸⁻²²⁾ 與及 Hinds 商品化低雙折射量測設備皆僅能透過提高硬體設備之規格，例如使用高數位解析度 (digital resolution) 之影像擷取設備或是額外增加硬體設備，例如使用鎖相放大器 (lock-in amplifier) 和光彈調變器 (photoelastic modulator) 來提升量測解析度，也就是說過去的技術在相同設備下量測解析度即固定而無法再提升，故對於應力較低之待測件將造成無法量測之窘境，而 R-EEToP 即使不提升硬體設備規格，量測解析度仍可透過理論計算來提升，故面對應力較低之待測件，R-EEToP 仍可進行量測。且 R-EEToP 的架設成本較低，量測樣本應力所需要的單位時間也遠低於過去之產品。

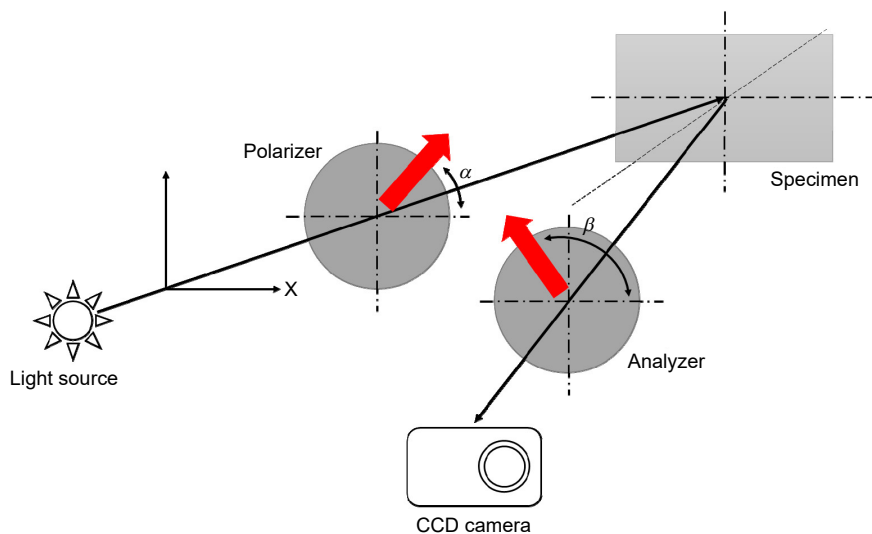


圖 1. 反射式平面偏光儀光路架設示意圖⁽¹⁴⁾。

文獻⁽¹¹⁾中以 ARToP 和一般反射式光彈法量測 6 mm 厚 100 mm 直徑玻璃圓盤受徑向壓縮負載 897 N 的徑向應力，由量測結果中得知 ARToP 的量測結果與理論解非常接近，平均差異百分比僅 1.7%，而一般反射式光彈法的量測結果與理論解之平均差異百分比為 36.3%，故 ARToP 確實可比一般反射式光彈法更準確地以反射式光彈儀架設量測試片內之應力。

文獻⁽¹⁴⁾中使用 R-EEToP 量測 2 mm 厚 100 mm 直徑玻璃圓盤受徑向壓縮負載 298 N 的徑向應力，由量測結果中可知 R-EEToP 量測結果與理論解趨勢相符，平均差異百分比僅 1.4%，故 R-EEToP 確實可準確地量測更薄試片且負載更低情況下的應力分布。

2. ARToP 與 R-EEToP 和相關量測系統文獻之比較

表 1 為將 ARToP 與 R-EEToP 和過去量測系統文獻之相關技術如雷射干涉術⁽¹⁶⁻¹⁷⁾、白光光彈法⁽¹⁸⁻²²⁾之比較。由表一可知，在量測解析度方面，雖然雷射干涉術較 ARToP 與 R-EEToP 皆來得高，但由於其理論限制與僅能單點量測，導致其量測時間與量測之空間解析度備受限制，且附加光學元件昂貴，而 R-EEToP 之量測解析度可透過理論計算直接提升，因此對於薄玻璃全場低階應力量測之技術，R-EEToP 較為合適。量測時間方面，R-EEToP 可透過加強光源強度來達到加強曝光之效果，量測時間亦可大幅縮短。

表 1. ARToP 與 R-EEToP 和相關量測系統文獻之比較。

特性 \ 方法	雷射干涉術 ⁽¹⁶⁻¹⁷⁾	白光光彈法 ⁽¹⁸⁻²²⁾	ARToP & R-EEToP ⁽⁵⁻¹²⁾
量測解析度	優	劣	中
應力值量測範圍	劣	中	優
量測時間	劣	優	中
全域性量測	劣	中	優
光學元件之需求	劣	中	優

三、作品實現之過程與步驟

1. 整體開發方面

此巨微觀尺度應力自動化量測設備為整合 ARToP & R-EEToP 量測模組、巨觀量測系統與微觀量測系統為一體，設備整體開發流程架構如圖 2 所示，首先本研究整理出巨微觀尺度應力自動化量測設備所需要設計的部分，主要可分成機構設計、光路設計與人機介面等三部分，再將此三部分進行小項目的概略細分，接著著手開始設計與改良。量測流程部分是透過步進馬達、相機及光源三個元件來操控，並使用 LabVIEW 軟體進行程控模組化的設計，以完成一自動化的光彈應力量測系統。其中，機構設計方面主要包含主架構設計、連動桿件設計、可拉伸外殼設計、連接板結構設計與此些結構之組裝；光路設計部分主要包含反射收光路徑設計、光源入射與出射角度訂定、光強程度設定與光源架設位置設計；程式和人機介面開發方面主要包含步進馬達位置控制、即時影像拍攝存取、全場應力顯示模組與校正運算參數模組。

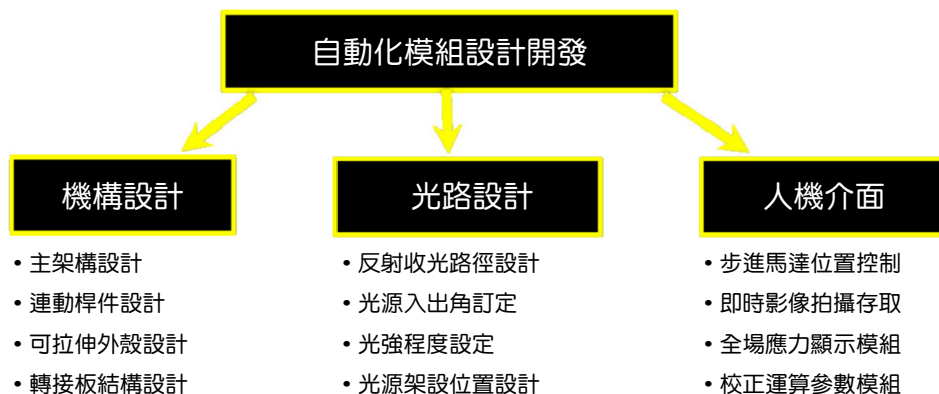


圖 2. 巨微觀尺度應力自動化量測設備開發流程圖。

2. 光路設計方面

由於要讓 ARToP & R-EEToP 量測模組具備巨觀與微觀量測之功能，故必須決定巨觀與微觀鏡頭之工作距離與規格，才能確切決定最終機構整體的尺寸與對應的設計，因此在開發過程中光路設計與機構設計是同時進行且互相牽連影響的，經過多次的設計修改，最終設計則使用 65 mm 工作距離 4X 之微觀鏡頭與 > 220 mm 工作距離之巨觀鏡頭，並透過移動相機位置來達到巨觀與微觀鏡頭對應之工作距離。

在確定完巨觀與微觀鏡頭之工作距離後，便依據各光學元件和電控元件之尺寸進行光路徑之設計，首先透過 Autodesk Inventor 繪製光學元件和電控元件之機構圖後並透過模擬組合方式來求得該架設尺寸下之極限入射與收光角度和對應之路徑，由於反射式架構理論上其入射角度越小越好，故必須不斷嘗試不同尺寸之機構來達到最佳之角度和路徑，嘗試之尺寸變異參數包含光源與旋轉步進馬達之架設位置和雙臂連動機構之臂長與高度。

3. 機構設計方面

首先必須確立應力量測系統所需各設備之規格與尺寸，包含相機規格與尺寸、鏡頭尺寸與工作距離、偏振片尺寸、步進馬達規格與尺寸、面型光源尺寸、各電子設備之電源供應器尺寸、步進馬達控制器尺寸等，在確立各設備規格與尺寸後則進行各元件設備之支撐與固定機構設計，執行上一樣以 Autodesk Inventor 繪製各元件和機構之模型並進行模擬組建。由於反射式架設入射角與取像角必須保持一致，故本研究亦設計了一雙臂連動機構使得入射臂(光源端)與取像臂(相機端)之角度將保持一致，有了此連動機構，僅需將光源、起偏鏡和步進馬達架設在入射臂上，並將相機、檢偏鏡和步進馬達架設在取像臂上即可確保入射角與取像角保持一致。圖 3 為此應力量測系統之機構設計圖，在此設計下，取像臂的元件可以移動而不會對入射臂的元件進行干涉，取像角為 30 度。

此外，亦設計一可垂直開合工作區域之壓克力外罩，如圖 3 中所示，並針對各光學元件和電控元件鎖固於雙臂上之轉接機構件進行設計，在完成初步設計(即圖 3 之設計)後再與光學廠商銓州光電股份有限公司⁽²³⁾(簡稱銓州光電)進行討論並修改，在完成最終設計後則由銓州光電進行各機構組件之製作發包，待各機構組件製作完成後則一同進行架設和組立，而機構之主架構皆由鋁擠型組建，各轉接機構件之材料則為鋁合金，如此可有效減輕重量。

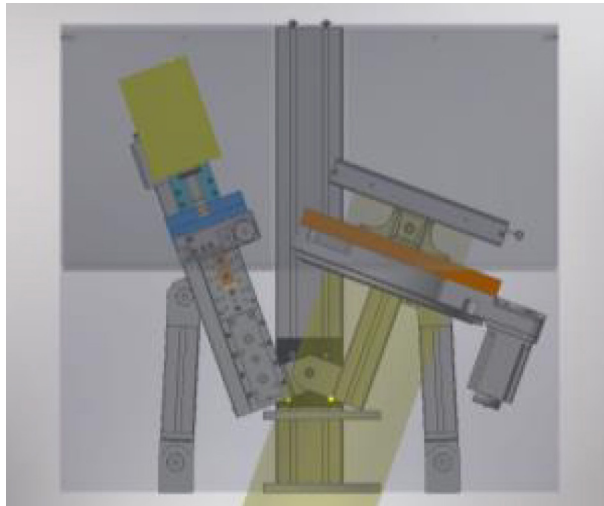


圖 3. 巨微觀尺度應力自動化量測設備之整體機構設計。

4. 程式開發與取像控制流程方面

本研究在 LabVIEW 程式開發上採用功能模組的應用方法，先分別針對馬達、相機及光源開發各自的功能模組 SubVI，完成後再透過整合各部元件的 SubVI 來製作更大架構的系統，而此種方法將能夠使開發者快速的調控系統地執行順序，以及偵測邏輯錯誤。

由於本研究是應用 ARToP 與 R-EEToP 來實現自動化的應力量測，因此旋轉步進馬達之旋轉角度與光源之亮度必須要滿足 ARToP 與 R-EEToP 量測技術中的取像需求，且為了使步進馬達旋轉之角度與行程控制在最小範圍以節省執行時間，取像順序則設計為旋轉步進馬達在到達下一張取像角度之旋轉行程皆不得超過 45 度，如此可達到步進馬達運行行程上之最佳化，ARToP 與 R-EEToP 量測上皆需校正影像，但因校正影像為在量測前即已擷取影像，故校正影像的運行行程與取像時間不會影響到待測試片之量測時間。此取像流程則一併納入程式控制，並且由 LabVIEW 軟體計算出結果，顯示於使用者介面上。

5. 量測流程之架構方面

依照前述 ARToP 與 R-EEToP 量測流程來進行系統架構的撰寫，量測流程之架構如圖 4 所示，為將系統設計為開機、待機、執行、計算及歸位重置等多種不同狀態來構成，使程式有序性的運行，同時為了增加系統的完備性，在待機部分加入了即時取像模組，以及儀器誤差補償模組，並且也透過同步處理的方式降低程式運行的時間，進一步地改良此光彈應力量測系統。

四、作品成果展現

本研究已開發出一套可攜式自動化應力量測模組設備，能夠自動執行 ARToP 與 R-EEToP 之量測步驟來達到自動化量測試片全場應力值，且可透過更換巨觀與微觀鏡頭達到巨觀與微觀尺度之應力量測，未來期待能夠實際運用在玻璃之生產製程中，透過快速非破壞式全場檢測之優勢以取代目前業界之單點接觸式檢測方式，達到快速全檢產品良率之用

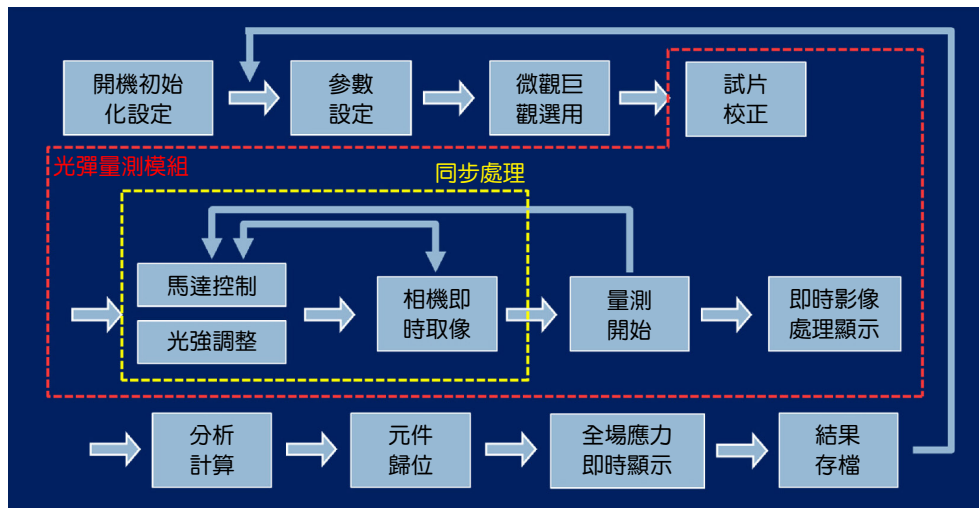


圖 4. 系統流程架構示意圖。

途。成果方面則分為模組設備、系統功能、量測結果、量測速度、人機介面與商品比較此七部分進行介紹。

1. 模組設備

此量測模組主要之光學元件包括一臺 CMOS 相機、兩片偏振片 (起偏鏡和檢偏鏡) 與兩臺旋轉步進馬達、一臺線性步進馬達及一組光源此四大部分。

1. CMOS 相機：拍攝不同光強與偏振片角度下之影像，亦即全場試片各點的灰階亮度，並透過 ARToP 或 R-EEToP 之量測理論將光強換算為應力值，該相機搭配巨觀鏡頭時可於 250 mm 之工作距離下拍攝 150 mm 長度之試片，空間解析度約 $73 \mu\text{m}$ ，搭配微觀鏡頭時可於工作距離 65 mm 之工作距離下拍攝 3 mm 長度之試片，空間解析度約 $1.5 \mu\text{m}$ 。
2. 偏振片與旋轉步進馬達：藉由步進馬達帶動偏振片旋轉至特定角度，以使試片之干涉光強存在不同的相位差。
3. 線性步進馬達：由於巨觀與微觀鏡頭之工作距離不同，且微觀鏡頭之工作距離精度必需達到 μm 等級，故藉由該線性步進馬達精準移動相機至巨觀或微觀鏡頭下對應之工作距離。
4. 光源：調整不同的光源強度，以藉由 R-EEToP 中之光源強度加強理論來達到量測時間縮短。

過去架設於光學桌上之 ARToP 與 R-EEToP 系統皆為採用手動且平面式架設，不僅量測和操作過程複雜、耗時 (約需 300 秒)，且架設所需面積與空間之需求大 (需 1500 mm 以上之長度與 1000 mm 以上之寬度)，並受限於必須架設在光學桌上，且巨觀與微觀量測系統必須為分開之兩架設，且實驗架設上入射角與取像角必須不斷微調才能達到角度一致。而本研究所開發出之應力自動化量測設備如圖 5 所示，本研究將平面式的架設調整為直立式架設，如此一來更能節省空間 (長寬高分別僅為 600 mm × 400 mm × 570 mm)，並達成可攜式的目標，且開發出 LabVIEW 程式控制三臺步進馬達、光源、相機取像，並對擷取之影像進行後續之 ARToP 或 R-EEToP 理論之運算，達成巨觀或微觀應力自動化量測的目標。

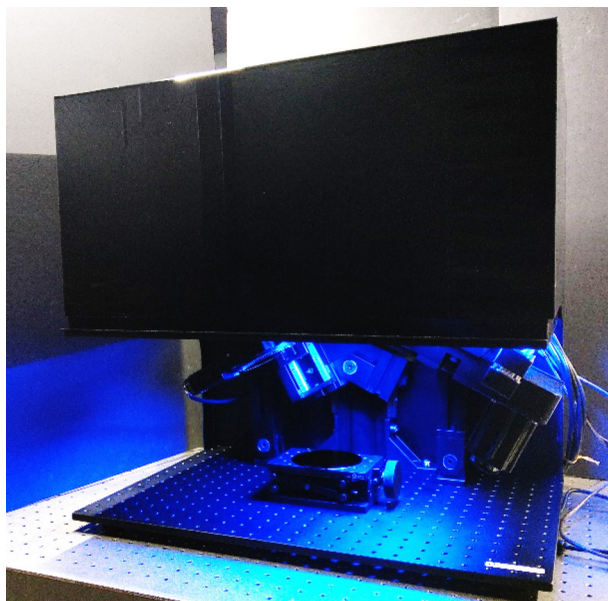


圖 5. 巨微觀尺度應力自動化量測設備之成品實景圖。

2. 系統功能

主要系統功能則列項詳述於下方：

1. 設備初始化流程與關機程序：儀器啟動時各元件的初始化設定，包含 USB 連接埠設定，相機狀態設定以及馬達位置校正，光源待機亮度設定等。
2. 元件、試片參數調整功能：將各元件的參數調整模組整合於使用者介面，搭配人機介面檢驗面板顯示即時更新元件參數。
3. 待機狀態的即時影像功能：提供即時監控檢測物狀態的即時取像功能，搭配人機介面的顯示狀態取得即時影像，方便待測物之放置。
4. ARToP 量測執行：包含馬達旋轉、相機取像及光源強度控制、各元件間序向式配合的設計與 ARToP 應力計算與應力換算，亦包含相機取像後的資料處理，存檔等流程，應用於較大延遲量的試片。
5. R-EEToP 量測執行：包含馬達旋轉、相機取像及光源強度控制、各元件間序向式配合的設計、R-EEToP 延遲量計算與應力換算，亦包含相機取像後的資料處理，存檔等流程，應用於較小延遲量的試片。
6. 存檔路徑設定：將量測結果傳送至使用者指定的存檔路徑，並輸出結果。
7. 顯示介面設計：包含應力、角度及延遲量三種顯示模式，量測結果可進行局部放大顯示，並具備可調整顯示數值範圍的功能，且將參數設定功能置於分頁結構中使人機介面更為簡潔。
8. 關機流程設計：完成工作後，自動解除與各元件間的連線並恢復初始值，確保下次儀器啟動的正確性。

3. 量測結果

圖 6 為自動化應力量測模組之量測結果，為使用 R-EEToP 量測以鑽石刀切割 $100\ \mu\text{m}$ 厚度超薄玻璃基板 (尺寸 $120\ \text{mm} \times 100\ \text{mm}$) 之邊緣應力量測結果，圖 6(a) 為利用巨觀鏡頭量

測之應力分布結果，其中黃色虛線框內標示的即為超薄玻璃基板試片，基於取像角故矩形試片於影像中呈現梯形外型，由圖 6(a) 的結果可看出玻璃基板內部絕大部分區域皆有殘餘應力分布，並可看到上下邊緣處有明顯較大的切割應力；圖 6(b) 為換上微觀鏡頭並聚焦在圖 6(a) 中紅色線框區域處之微觀應力量測結果，由結果中可以清楚地看到此區域有嚴重的邊緣缺陷，且部分微缺陷痕由邊緣延伸至玻璃內部，而缺陷之邊緣與區域皆有較大之應力分布，表示此區域將很可能是導致該片超薄玻璃基板強度不足並首先產生破裂之區域。此結果說明本研究之巨微觀尺度應力自動化量測模組除了可清楚量測試片全場與邊緣的殘餘應力與加工應力分布之外，更能清楚量測微小缺陷之破裂形貌與應力分布。

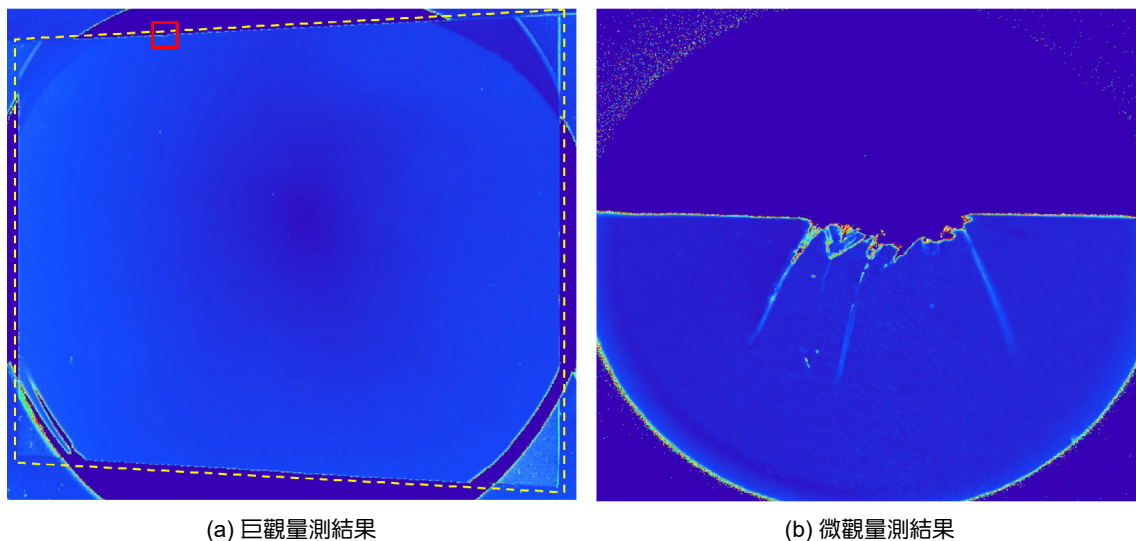


圖 6. 以自動化應力量測模組執行 R-EEToP 量測超薄玻璃基板之應力結果。

4. 量測速度

單一試片量測時間，包含步進馬達移動與光強調整、ARToP 或 R-EEToP 取像、結果計算與存檔，以及回復至待機狀態，僅需 12 秒。

5. 人機介面

人機介面之設計如圖 7 所示，本研究將應力量測所需要的參數調整功能整合於雙介面，方便使用者操作及大幅縮短設定時間。在進行量測時，使用者首先到參數介面輸入各種光學參數。其後便可直接轉換到主畫面按下想要執行的量測執行按鈕後便可開始量測。雙介面的設計讓畫面避免過多參數與按鈕，方便使用者輸入完參數後，透過主畫面即可選擇想要的功能，不再受到參數選項所干擾，而當量測結束後，可以選擇想要觀察的結果 (應力、角度與延遲量)，並可針對欲詳細觀察之區域進行放大或者是調整比例尺，方便詳細分析量測結果。同時結果顯示區也是即時影像的顯示介面，此人機介面設計可使非技術熟知者亦能輕鬆操作。

6. 市售商業化產品比較

本巨微觀尺度應力自動化量測模組與現今商品化的檢測儀器之規格比較如表 2 所示，

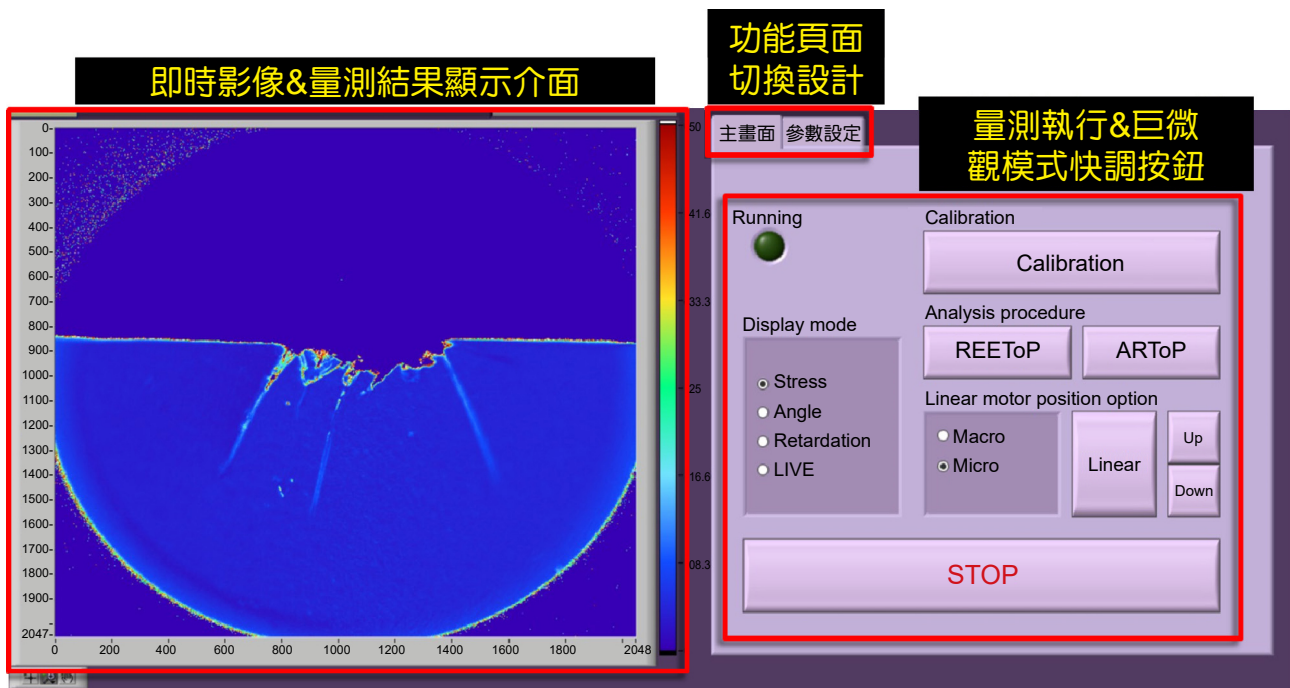


圖 7. 巨微觀尺度應力自動化量測模組之人機介面。

進行比較的市售商業化儀器包含日本廠商 LUCEO 之光彈儀-LSM9000LE⁽²⁴⁾、德國廠商 ilis 之光彈儀-StrainMaticM4⁽²⁵⁾、美國廠商 Stress Photonics 之光彈儀-GFP1000⁽²⁶⁾ 和美國廠商 HINDS 之光彈儀 Exicor® 150 AT⁽²⁷⁾，可以發現無論是在精密度、量測時間及使用之光學元件數量方面，本巨微觀尺度應力自動化量測設備皆有較佳之表現，同時只有本設備可量測表面無反射層或無反射物或僅能部分反射情況下之試片，更可進行微觀尺度缺陷與應力量測，是較適合用於薄玻璃全場低階應力量測、製程中試片應力量測或終端產品應力檢測之技術。

五、結論

本研究成功建構出一套可自動化執行 ARToP 與 R-EEToP 之應力量測模組系統，且搭配機構與光路設計，並利用 LabVIEW 進行元件控制與量測程式及人機介面設計，達成非破壞性、可攜式、全域性且自動化光彈應力量測的目標，此外透過更換成像鏡頭，搭配程控線性步進馬達調整工作距離，便可輕易達到巨觀與微觀尺度應力之量測。該應力自動化量測模組具備雙臂連動機構且可將巨微觀量測之機構整合於一機，整體系統尺寸僅 600 mm × 400 mm × 570 mm，並可達到 150 mm 直徑圓量測面積與 73 μm 空間解析度之巨觀量測和 3 mm 直徑圓量測面積與 1.5 μm 空間解析度之微觀量測，且量測僅需 12 秒，大幅縮短傳統手動量測所需要的時間，未來期許以此巨微觀尺度應力自動化量測設備達成 ARToP & R-EEToP 取代傳統破壞性檢測的目標，提升玻璃檢測的準確度及效率，提高產業競爭力。

如附件之獲獎證明所示，本研究榮幸獲得「109 年度科技部補助大專學生研究計畫」之補助，此外，本研究所開發之巨微觀尺度應力自動化量測設備由國立清華大學動力機械工程學系 37 組專題競賽隊伍中脫穎而出榮獲「2020 國立清華大學動力機械工程學系專題競賽—



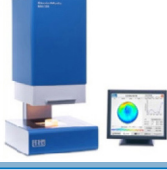
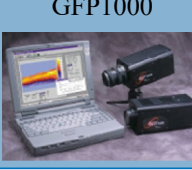

比較項目	Prototype of ARToP & R-EETOP (TW) 	LUCEO (JP)-LSM9000L 	Ilis (DE)-StrainMatic M4 	Stress Photonics (US) GFP1000 	HINDS (US)-Exicor@150AT 
量測理論	相位移法 & 加強曝光理論 & 反射式校正理論	相位移法 & 補償技術	相位移法 & 補償技術	相位移法 & 數位鎖相技術	光彈調變器 & 鎖相放大器
精密度	0.06 mm	1 nm	0.1 nm	5 nm	0.008 nm
量測之空間解析度	μm 尺度等級 (鏡頭與相機)	μm 尺度等級 (鏡頭與相機)	μm 尺度等級 (鏡頭與相機)	μm 尺度等級 (鏡頭與相機)	μm 尺度等級 (雷射光點大小)
全場量測時間	~12 s	20 s	60 s	10 s	> 1000 s
光學元件	少	多	多	多	多
透明物體之反射式量測	可	否	否	否	否
微觀缺陷與應力量測	可	否	否	否	否

表 2. 巨微觀尺度應力自動化量測模組與相關商品化儀器之比較。

佳作」，實為難得。

此巨微觀尺度應力自動化量測設備除可應用在玻璃產業外，亦可使用在其他不同產業上，如面板產業、半導體產業、機械工程、工業工程及生醫工程，並提供產業可靠度之檢測規範，以做為不良產品或結構缺陷之檢測，進而改善生產製程，達到產品良率提升以及產能增加之效益，並能提升產品品質與價值以及產品之競爭力與優勢，目前相關產業與學術界皆需要厚度量測技術，故此設備極具發展價值及應用價值。

由於 ARToP 與 R-EEToP 即是以反射式方式來量測試片應力，特別是針對有單面塗層或鍍膜層之試片，故此巨微觀尺度應力自動化量測設備可整合至本實驗室於 2020 年第十二屆國研盃 *i*-ONE 儀器科技創新獎得獎作品「光學平板即時全場厚度自動化量測模組設備」⁽²⁸⁾ 之架設中，達到鍍膜試片全場應力與厚度同時量測之目標。

六、未來展望

未來將持續針對此巨微觀尺度應力自動化量測設備下列各方面進行改良與最佳化：

1. 量測時間

目前之量測時間僅需 12 s，但預期可以更快，因執行量測時消耗較多時間之部份可能在

於馬達旋轉與光源強度調控部份，未來將尋找更快運行速度之步進馬達旋轉平臺和強度調控響應更靈敏之光源；程式設計上亦須要進行改良，可能需要考量更多同步處理之操作，並計算出各個元件作動完成所需之時間與進行下一次作動所需之間隔時間。

2. 人機介面功能

未來將新增任意線段或區域數值擷取與顯示功能，使此設備更人性化且符合大部分使用者之需求，更接近商業化儀器等級，並增加檢測準則來讓程式自動辨識試片之品質，達到自動化檢測之效果。

3. 重量

由於光源與相機皆是購買已模組化之設備，故有許多不必要之重量會增加其中，未來將希望能夠購買無模組化之設備來進行組裝，如此整個系統之支撐構件重量也能隨之減輕。

4. 建造成本

如上所述，由於光源與相機皆是購買已模組化之設備，故仍有許多不必要之成本納入其中，若購買無模組化之設備將能避免掉此些成本之花費。

經過上述之改良，相信能大幅增加此巨微觀尺度應力自動化量測設備之價值與競爭力。

參考文獻

1. Application Advantages, *SCHOTT Corporate*. Please refer to the website: http://www.us.schott.com/advanced_optics/english/products/wafers-and-thin-glass/
2. “2017 全球 10 大手機品牌 陸牌占 7 席”，中時電子報。Please refer to the website: <https://www.chinatimes.com/realtimenews/20180209004657-260410>
3. “2019年大尺寸面板規格再進化”，每日頭條。Please refer to the website: <https://kknews.cc/finance/522oy86.html>
4. 黃家俊, 張庭宇, 黃鈺程, 秦詩皓, “玻璃基板應力自動化量測模組之研發”, 歷屆得獎作品介紹, 國研盃 *i-ONE* 儀器科技創新獎, 國家實驗研究院臺灣儀器科技研究中心。Please refer to the website: <https://i-one.org.tw/Home/ListContents/102?ATimes=%E5%8D%81%E4%B8%80>
5. 王偉中, 宋泊錡, 呂正雍, 葉祐良, 陳柏宇, “光學材料應力量測方法及其系統/ A Stress Measurement Method of Optical Materials and System Thereof”, 中華民國發明專利, 專利申請號: 105140876, 專利號: 1619933, 申請日期: 2016/12/09, 核准日期: 2018/04/01.
6. W. C. Wang, P. C. Sung, Z. Y. Lu, Y. L. Yeh, and P. Y. Chen, “Stress Measurement Method and System for Optical Materials,” *United States Patent*, Patent Application Number: 15/618,145, Publication Number: US20180164169A1, Patent Number: 10067012, Application Date: 2017/6/09, Publication Date: 2018/6/14. Issued Date: 2018/09/04.
7. 王偉中, 宋泊錡, 呂正雍, 葉祐良, 陳柏宇, “光學材料應力量測系統/ A Stress Measurement System of Optical Materials”, 日本發明專利, 專利申請號: 2017-100569, 專利號: 6352495, 申請日期: 2017/05/22, 核准日期: 2018/06/15.
8. 王偉中, 宋泊錡, 呂正雍, 葉祐良, 陳柏宇, “光學材料應力量測系統/ A Stress Measurement System of Optical Materials”, 中國發明專利, 專利申請號: 201710279745.X, 專利號: CN108225630B, 證書號: 4098883, 申請日期: 2017/04/26, 核准日期: 2020/11/17.
9. W. C. Wang and P. C. Sung, “Advanced Photoelastic Methods for Stress Measurement of Glass Substrates,” (**Invited Talk**) *2020 SEM Annual Conference and Exposition on Experimental and Applied Mechanics (Virtual XIV International Congress)*, Paper No. 9362, 3 Pages, September 14-17, (2020).
10. W. C. Wang, P. C. Sung, M. C. Lin, Y. W. Kuo, and T. H. Hsu, “Reflection Photoelastic Micro Defect Inspection for Ultra-Thin Glass Plates,” (**Invited Talk**) *17th Asian Conference on Experimental Mechanics (ACEM2018)*, Xi'an Guangcheng Hotel, Xi'an, China, Paper No. 133, 2 Pages, October 11-15, (2018).
11. P. C. Sung, W. C. Wang, and Z. Y. Lu, “A Correction Theory of Stress Determination of Glass Plate in Reflection Photoelasticity,” (**Invited Talk**) *17th International Conference on Experimental Mechanics (ICEM17)*, Rodos Palace

- Hotel, Rhodes, Greece, Paper No. 308, 2 Pages, July 3-7, (2016).
12. P. C. Sung, W. C. Wang, M. C. Lin, Y. W. Kuo, and T. H. Hsu, "Micro-Scale Non-Destructive Stress Measurement for Ultra-Thin Glass Plates," *1st International Conference on Theoretical, Applied, Experimental Mechanics (ICTAEM1)*, Annabelle Hotel, Paphos, Cyprus, Paper No. 91, 4 Pages, June 17-20, (2018).
 13. 呂正雍, "反射式光彈法於玻璃基板應力量測之研究", 國立清華大學動力機械工程學系碩士論文, (2015).
 14. 張至皓, "超薄玻璃彎曲強度與邊緣應力非破壞檢測之研究", 國立清華大學動力機械工程學系碩士論文, (2020).
 15. 王偉中, 宋泊錡, 呂正雍, 葉祐良, 陳柏宇, "光學材料應力量測方法及其系統", 經濟部智財局 109 年國家發明創作獎銀獎, (2020). Please refer to the website: <https://www.tipo.gov.tw/tw/cp-920-892119-9b793-1.html>
 16. H. F. Chang, C. Chou, H. K. Teng, H. T. Wu, and H. F. Yau, *Optics Communications*, **260**, 420 (2006).
 17. H. J. Peng, S. P. Wong, Y. W. Lai, X. H. Liu, H. P. Ho, and S. Zhao, *Review of Scientific Instruments*, **74**, 4745 (2003).
 18. A. S. Redner, *Experimental Mechanics*, **25** (2), 148 (1985).
 19. A. Ajovalasit, S. Barone, and G. Petrucci, *Experimental Mechanics*, **35** (3), 193 (1995).
 20. A. Ajovalasit, S. Barone, and G. Petrucci, *Optics and Lasers in Engineering*, **45**, 596 (2007).
 21. K. Ramesh and S. S. Deshmukh, *Strain*, **32** (3), 79 (1996).
 22. K. R. Madhu and K. Ramesh, *Optics and Lasers in Engineering*, **45**, 175 (2007).
 23. 銓州光電股份有限公司. Please refer to the website: <https://www.onset-eo.com/>
 24. Fullauto StrainEye LSM-9000LE, LUCEO. Please refer to the website: <http://www.luceo.co.jp/en/product/?id=1395975407-711379>
 25. StrainScope[®], ilis. Please refer to the website: <https://www.ilis.de/en/strainscope.html>
 26. GFP 1000 - PSA, Stress Photonics. Please refer to the website: http://www.stressphotonics.com/PSA/PSA_Intro.html
 27. Exicor(r) 150 AT Birefringence Measurement System, HINDS. Please refer to the website: <https://reurl.cc/KAgWMy>
 28. 蔡任航, 楊崇賢, 鄭洪森, "光學平板即時全場厚度自動化量測模組設備", 歷屆得獎作品介紹, 國研盃 *i-ONE* 儀器科技創新獎, 國家實驗研究院臺灣儀器科技研究中心. Please refer to the website: <https://i-one.org.tw/Home/ListContents/112?ATimes=12>

作者簡介

周伊恩小姐現為國立清華大學動力機械工程學系碩士生。

Yi-En Chou is currently a M.S. student in Department of Power Mechanical Engineering at National Tsing Hua University.

陳佑瑄小姐現為國立陽明交通大學機器人碩士學位學程碩士生。

Yu-Hsuan Chen is currently a M.S. student in Graduate Degree Program of Robotics at National Yang Ming Chiao Tung University.

王捷小姐現為荷蘭台夫特理工大學微電子學系碩士生。

Chieh Wang is currently a M.S. student in Department of Microelectronics at Delft University of Technology.

王偉中先生為愛荷華州立大學工程力學博士，現為國立清華大學動力機械工程學系教授暨教務處印度中心主任。

Wei-Chung Wang received his Ph.D. in Engineering Mechanics from Iowa State University, USA. He is currently a Professor in Department of Power Mechanical Engineering and the Director of Center for India Studies at National Tsing Hua University.

宋泊錡先生為國立清華大學動力機械工程學博士，現為國立清華大學動力機械工程學系博士後研究員。

Po-Chi Sung received his Ph.D. in Power Mechanical Engineering from National Tsing Hua University. He is currently a Post-doctoral Researcher in Department of Power Mechanical Engineering at National Tsing Hua University.