

# 全場即時同步應力應變 量測系統之研發

本研究基於即時加強曝光光彈理論 (Real-time Enhanced Exposure Theory of Photoelasticity; REEToP) 開發出創新的反射式即時低階應力量測理論 - 高等反射式加強曝光光彈理論 (Advanced Reflection-mode REEToP; AR-REEToP),並研發偏極與非偏極影像分離技術來使 AR-REEToP 和數位影像相關 (Digital Image Correlation; DIC) 法能整合於同一系統中,並進一步發展創新之光學量測方法 - 全場即時同步應力應變 (Full-field Real-time Simultaneous Stress and Strain; RSSS) 量測理論。此外本研究亦開發兩套模組化 RSSS 量測系統進行實際產業應用案例。

■ 温昱翔、郭瑋辰、吳意國、吳俊諭、吳峪貞、王偉中、宋泊錡

### **關鍵詞:**反射式即時加強曝光光彈理論、數位影像相關法、偏極與非偏極影像分離技術、非 破壞即時檢測、自動化量測模組設備

## 簡介

軟性混合電子 (Flexible Hybrid Electronics; FHE) 的製造技術能整合電子元 件與軟性材料基板,並達到半導體、顯示面 板、感測器、先進材料等跨領域產業技術之 整合,且因 FHE 具備易彎折、高延展性和 可撓曲的特性,加上消費市場需求劇增和長 照醫療議題發酵,使 FHE 為近年受到高度 重視的電子元件,其應用可涵蓋至車載顯示 系統、智慧穿戴裝置、電子紙與軟性顯示器 等,並被視為臺灣繼半導體和平面顯示器兩 大產業後的下一個明星產業,而 FHE 的發 展亦為 SEMICON Taiwan 2023 中討論全球 半導體產業最關注的四大科技發展前瞻趨勢 之一。然而,於 FHE 的整合結構中,各元 件具有不同的材料與結構特性,且依據 FHE 使用環境、穿戴方式及受碰撞力道之不同, 各元件承受的應力與應變也不盡相同,此將 使 FHE 產品的可靠度不易掌握,容易讓產 品造成難以預期之毀損,為解決此可靠度問 題並提供 FHE 及其應用載具適當的保護設 計,首要之務需先量化 FHE 於各環境下或 受各外力影響下之應力與應變分布,如此便 可能針對脆弱元件或結構處進行設計補強。

在眾多量測法中,光學方法具有全域 性、非接觸性、高準確性、可自動化與可即 時量測之優點與特性,被廣泛應用在結構與 元件之力學行為量測與分析。然而 FHE 涉 及不同材料與元件之結合,且在先進封裝材 料與晶圓製程材料之發展需求下,單依靠一 種光學量測方法進行材料與結構之力學分析 勢心不可行,因為單一種光學量測方法不可 能適用於所有的材料、元件或檢測條件, 且在數據處理分析的發展下,多種量測數據 的整合是有應用性和需求性,可做為產品缺 陷或結構損壞的重要分析資訊來源,此外, 材料機械性質分析亦同時需要應力與應變資 訊,尤其對於軟性基板或光學膠而言,其受

量測技術

負載下之應力應變值難以由負載試驗機中準 確得到,再者,當FHE 需進行動態負載或 破壞性測試時,若要同時得到應力與應變資 訊則應力與應變量測方法必須結合以同步進 行即時量測,因此,全場應力和應變即時且 同步的光學量測技術對FHE 的力學分析是 有研發之迫切與必要性。

在光學量測方法中,光彈法 (Photoelasticity)可用以量測具暫態雙折射性 (Temporary Birefringence)物體之應力資訊, 而數位影像相關(Digital Image Correlation, DIC)法可用於量測物體之位移與計算應 變資訊,本實驗室過去深知應力與應變量 測之重要性,故長期致力於光彈法和DIC 法之量測理論與系統之研發。圖一為目前 本實驗室所發展之光彈應力量測理論與架 設之專利布局,本實驗室過去透過結合多 項發明專利技術,包含穿透率極值光彈 理 論 (Transmissivity Extremities Theory of Photoelasticity; TEToP)(王等人, 2014)、加 強曝光光彈理論 (Enhanced Exposure Theory of Photoelasticity; EEToP)(王等人, 2018)和 高等反射式光彈理論 (Advanced Reflection Theory of Photoelasticity; ARToP)(王等人, 2018) 之理論與架設,成功研發出能夠即 時且高準確性量測試片之全場應力光彈理 論 - 多形式即時加強曝光光彈理論 (Multimode Real-time EEToP; Multi-mode REEToP) (王, 2021), 而 Multi-mode REEToP 亦榮獲 2022年致茂精密機械與量測技術論文獎銅 獎(郭等人,2022),其中,反射式即時加 強曝光光彈理論 (Reflection-mode Real-Time EEToP; R-REEToP) 為以反射式光路進行量 測,故可應用於量測空間與環境受限或當待 測物後表面具有塗層或鍍膜使光無法穿透等 情況。



圖一 本實驗室於應力量測專利技術之發展與佈局

DIC 法之優點為非接觸式量測且無 需複雜之光路,只需在實驗前於待測物體 表面製造特徵斑點,或待測物本身即具可 辨識之特徵,即可由相機直接拍攝物體變

7

量測技術

形前後之影像來計算待測物之即時應變分 布。DIC 法可分為二維數位影像相關 (Two-Dimensional DIC; 2D-DIC) 法和三維數位影 像相關 (Three-Dimensional DIC; 3D-DIC)法, 2D-DIC 法使用固定單臺相機擷取影像,僅 限於平面物體的變形量測,若待測物表面為 非平面或受載荷後發生三維變形,則必須使 用 3D-DIC 法, 3D-DIC 法係基於雙目立體 視覺原理,使用兩臺同步相機或單臺相機搭 配輔助分光設備以不同視角進行變形前後影 像之拍攝,可以準確量測平面與曲面的全場 三維變形和應變。目前本實驗室已獲證與 DIC 法相關之多國發明專利。

基於 R-REEToP 和 DIC 法,本研究 發展了創新之光測力學量測方法-全場 即時同步應力應變 (Full-field Real-time Simultaneous Stress and Strain; RSSS) 量測理 論,此檢測系統可以同步且即時地量測全 場應力和應變資訊,在理論方面,本研究 發展了創新之量測理論 - 高等反射式即時加 強曝光光彈理論 (Advanced R-REEToP; AR-REEToP) 來減少 R-REEToP 執行相位移時 需旋轉光學元件之數量,大幅簡化量測程 序,此外,本研究更發展了偏極與非偏極影 像分離技術使 AR-REEToP 與 DIC 能同步各 別擷取其所需之偏極影像與非偏極影像,如 此才能達到即時同步量測應力應變的目的。 本研究更進一步整合之光路系統、光學元件 與光學設備於同一機構中進行模組化設計, 研發出兩套模組化 RSSS 量測系統,一套為 結合 AR-REEToP 和 2D-DIC 的單高速相機 量測系統,可應用於高速之應力與應變即時 同步量測(王,2021),另一套為結合AR-REEToP 和 3D-DIC 的三相機量測系統,可 應用於曲面材料之應力與應變即時同步量

測,並於文中介紹此兩套 RSSS 量測系統之 實際量測案例結果。

## 研究方法與理論

#### 一、高等反射式即時加強曝光光彈理論

光彈法為利用具有暫態雙折射性之透 明材料於受負載時會產生雙折射現象之特 性,而可即時量測材料內部全場應力之光學 方法。當透明材料受到負載時,材料內部兩 主應力方向上出現不同之折射率,使穿透材 料之光線於材料內部分為速度不同且沿著兩 主應力方向傳遞之兩光分量,此即為雙折射 現象。兩道光分量因傳遞速度不同產生相位 差,相位差為建設性干涉時出現亮紋,若為 破壞性干涉則會出現暗紋,兩種條紋組合形 成明暗相間之光彈條紋,藉由光彈理論分析 光彈條紋即可求得材料內部之全場應力。

(一)反射式光彈法

圖二為反射式光彈儀的架設示意圖, 此為圓偏光儀之架設,主要包含光源、起 偏鏡 (Polarizer)、第一片 1/4 波板 (Quarter Waveplate)、第二片 1/4 波板、檢偏鏡 (Analyzer)與相機,利用偏光儀架設可透過 光彈法量測出沿著兩主應力方向傳遞之兩光 分量間之延遲量δ,接著再利用應力光學定 律 (Stress-optic Law)即可由延遲量δ得到材 料內主應力差值*S*,應用在反射式光彈法中 之應力光學定律可由式 (1)表示

$$S = \frac{\delta\lambda \,\cos\gamma}{4\pi\,hC_{\lambda}}\tag{1}$$

其中 $\lambda$ 為光源波長,h和 $C_{\lambda}$ 分別為 材料厚度和應力光學係數(Stress-optic Coefficient),S為平面內主應力差值,即  $\sigma_1 - \sigma_2$ , $\gamma$ 為反射式架設中光源入射角, 亦為相機取像角。



圖二 反射式光彈儀架設示意圖 (溫, 2023)

# (二)反射式即時加強曝光光彈理論(張, 2021)

在過去之量測方法ARToP 和 EEToP 中,皆必須透過四步相位移技術 (Four-step Phase-shifting Technique; FPT) 來旋轉偏振片 角度量測待測試片,故無法達到即時量測, 而 R-REEToP 即是結合了 ARToP、EEToP 及 TEToP 三專利技術之理論特點而開發出 之可即時且能夠量測出低階應力的一套創新 理論。R-REEToP 係利用反射式圓偏光儀架 設先對校正試片進行量測,利用 FPT 之角 度取得下列光強

$$I_{RI_{-}C} = \frac{1}{2} E^{2} r_{p}^{2} + I_{RB_{-}C} + \frac{1}{2} I_{RA_{-}C} \qquad (\alpha_{1} = 45^{\circ}, Q_{1} = 45^{\circ}, Q_{2} = 0^{\circ}, \beta_{1} = 0^{\circ}, t = \tau)$$

$$I_{R2_{-}C} = I_{RB_{-}C} \qquad (\alpha_{2} = 90^{\circ}, Q_{1} = 90^{\circ}, Q_{2} = 0^{\circ}, \beta_{2} = 0^{\circ}, t = \tau)$$

$$I_{R3_{-}C} = \frac{1}{2} E^{2} r_{s}^{2} + I_{RB_{-}C} + \frac{1}{2} I_{RA_{-}C} \qquad (\alpha_{3} = 135^{\circ}, Q_{1} = 135^{\circ}, Q_{2} = 0^{\circ}, \beta_{3} = 0^{\circ}, t = \tau)$$

$$I_{R4_{-}C} = \frac{1}{4} E^{2} (r_{p} + r_{s})^{2} I_{RB_{-}C} \qquad (\alpha_{4} = 135^{\circ}, Q_{1} = 135^{\circ}, Q_{2} = 45^{\circ}, \beta_{4} = 45^{\circ}, t = \tau)$$

$$(2)$$

其中  $I_{RB}$  及  $I_{RA}$  分別為反射式圓偏光儀 架設下之背景與振幅光強值, $\alpha$  及  $\beta$  分別為 起偏鏡與檢偏鏡之旋轉角度,Q<sub>1</sub> 及 Q<sub>2</sub> 分別 為兩片 1/4 波板之慢軸角度,t 表示相機曝 光時間,為一般曝光秒數,下標 R 代表反射 式架設下之數值, $r_p$  及  $r_s$  分別為菲涅耳方程 式 (Fresnel Equations) (Born et al., 1999) 中 *p* 偏振光及 s 偏振光的電場振幅反射比, *E* 為 入射光電場值。基於 TEToP 之量測理論與 菲涅耳方程式,於圓偏暗場架設下取得待測 試片與校正試片之光強可表示為

$$I_{R5\_E} = \frac{1}{4} E_E^2 (r_p - r_s)^2 + I_{RB\_E} + I_{RA\_E} \sin^2 \frac{\delta}{2} \qquad (\alpha_1 = 90^\circ, Q_1 = 45^\circ, Q_2 = 135^\circ, \beta_1 = 0^\circ, t = \tau_E)$$

$$I_{R5\_CE} = \frac{1}{4} E_E^2 (r_p - r_s)^2 + I_{RB\_CE} \qquad (\alpha_1 = 90^\circ, Q_1 = 45^\circ, Q_2 = 135^\circ, \beta_1 = 0^\circ, t = \tau_E)$$
(3)

其中下標 E 代表加強曝光後之數值。 由於增加曝光時間前後的振幅光強值會與曝 光時間呈等比關係,且入射光電場值亦會與 曝光時間呈等比關係,故若在  $I_{RB_E} = I_{RB_CE}$ 及  $I_{RA_E} = I_{RA_CE}$ 之條件下,透過聯立求解式 (2) 與式 (3),即可得出 $\delta$ 如下式所示

$$\delta = 2\sin^{-1} \sqrt{\frac{I_{RS_{-E}} - I_{RS_{-CE}}}{I_{RI_{-C}} + I_{R3_{-C}} - 2I_{R2_{-C}} - 4(I_{R4_{-C}} - I_{R2_{-C}}) \left(\frac{r_p}{r_p + r_s}\right)^2 \tau_E}}$$
(4)

由式(4)可知,若事先在校正試片上取得光 I<sub>5 E</sub> 值並將其代入式 (4) 和式 (1) 即可求得 S,可達成即時量測。試片要滿足  $I_{RBE} = I_{RB}$  $_{CE}$ 及 $I_{RA_E} = I_{RA_CE}$ 之條件代表此試片必須為 均質之素材料或背面均匀鍍膜之材料,而本 研究之待測試片即符合此條件,故可利用此 理論。

)測(技)(術

上述之 R-REEToP 理論中,使用到的 四步相位移需要轉動架設中每一片起偏鏡、

$$I_{R1_C} = \frac{1}{4} E^2 (r_p - r_s)^2 + I_{RB_C} \qquad (\alpha_1 = 90^\circ, Q_1 = 45^\circ, Q_2 = 135^\circ, Q_2 =$$

基於 TEToP 之量測理論與菲涅耳方程式, 於圓偏暗場架設下取得待測試片與校正試片

$$\alpha_{1} = 90^{\circ}, Q_{1} = 45^{\circ}, Q_{2} = 135^{\circ}, \beta_{1} = 0^{\circ}, t = \tau$$

$$\alpha_{2} = 90^{\circ}, Q_{1} = 45^{\circ}, Q_{2} = 90^{\circ}, \beta_{2} = 45^{\circ}, t = \tau$$
(5)

$$I_{R_{-E}} = \frac{1}{4} E_{E}^{2} (r_{p} - r_{s})^{2} + I_{RB_{-E}} + I_{RA_{-E}} \sin^{2} \frac{\delta}{2} \qquad (\alpha_{1} = 90^{\circ}, Q_{1} = 45^{\circ}, Q_{2} = 135^{\circ}, \beta_{1} = 0^{\circ}, t = \tau_{E})$$

$$I_{R1_{-CE}} = \frac{1}{4} E_{E}^{2} (r_{p} - r_{s})^{2} + I_{RB_{-CE}} \qquad (\alpha_{1} = 90^{\circ}, Q_{1} = 45^{\circ}, Q_{2} = 135^{\circ}, \beta_{1} = 0^{\circ}, t = \tau_{E})$$
(6)

由於增加曝光時間前後的振幅光強值會與曝 光時間呈等比關係,且入射光電場值亦會與 曝光時間呈等比關係,故若在 I<sub>RB E</sub> = I<sub>RB CE</sub> 及  $I_{RAE} = I_{RACE}$ 之條件下,透過聯立求解式 (5)與 式(6),即可得出δ如下式所示

$$\delta = 2\sin^{-1}\sqrt{\frac{I_{R_{-E}} - I_{R_{1}_{CE}}}{I_{RA_{-C}}}\frac{\tau}{\tau_{E}}}$$
(7)

由式(7)可知,若事先在校正試片上取得光 強資訊,在往後量測上僅需量測待測試片之  $I_{RE}$  值並將其代入式(7)和式(1)即可求得S, 可達成即時量測。試片要滿足 $I_{RBE} = I_{RBCE}$ 及 $I_{RAE} = I_{RACE}$ 之條件代表此試片必須為均 質之素材料或背面均匀鍍膜之材料,而本研 究之待測試片即符合此條件,故可利用此理 論。

#### 二、數位影像相關法

之光強可表示為

DIC 法的量測概念為比對待測試片於變 形前後由相機拍攝到之隨機特徵斑點灰階值 來計算物體變形的概念,並在特徵斑點在變 形前後的灰階值不變的條件下,藉由電腦軟 體分析待測試片之特徵斑點影像,以找出變 形前後特徵斑點的相關性,經過數值運算即 可得到物體變形後的力學資訊。

**圖三 (a)** 為 DIC 法變形前後子區域之變 形關係圖,假設物體變形前,選定表面子區 域之中心點為 (*x*<sub>0</sub>, *y*<sub>0</sub>),任一點為 (*x*, *y*),而 當物體變形後,此點之新座標為 (*x*', *y*')可表 示成

$$x' = x + u(x, y) y' = y + v(x, y)$$
(8)

其中 u(x, y) 和 v(x, y) 分別為物體變形 之水平與垂直方向位移。接著以中心點 (x<sub>0</sub>, y<sub>0</sub>) 為基礎對式 (8) 進行泰勒展開,並在子區 域夠小或物體為小變形的條件下,可忽略泰 勒展開式之高階項而得下式

$$x' = x + u_0 + (\partial u/\partial x)dx + (\partial u/\partial x)dy$$
  

$$y' = y + v_0 + (\partial v/\partial x)dx + (\partial v/\partial y)dy$$
(9)

其中 dx為點 (x, y) 到未變形子區域中 心點的水平距離 (即  $x - x_0$ );  $d_y$ 為點 (x, y)到未變形子區域中心點的垂直距離 (即  $y - y_0$ ),  $u_0 \\ v_0 \\ \partial u/\partial x \\ \partial u/\partial y \\ \partial u/\partial y \\ \partial v/\partial x \\ \mu \\ \partial v/\partial y \\ \partial u/\partial x \\ \psi \\ \partial u \\ \partial$  數則可得到物體之變形量,進一步計算得到 物體之應變值。

3D-DIC 法的發展克服了 2D-DIC 法無 法獲得的平面外資訊之限制。3D-DIC 法使 用兩臺相機在相同時間擷取待測試片表面之 特徵斑點影像,並藉由二維影像與空間立體 幾何關係,計算試片表面形貌與三維變形 量,圖三(b)為 3D-DIC 法之相機立體幾何 模型,假設其參考座標為(X<sub>R</sub>,Y<sub>R</sub>,Z<sub>R</sub>),相 機本身以鏡頭中心為原點之座標為(*x*,*y*,*z*)。 影像座標系統為座標(*x*',*y*'),即相機取得影 像後成像之平面,以影像中心為原點,平行 於相機座標系統之 *x* 軸與 *y* 軸,而鏡頭中心 至影像座標系統原點距離為鏡頭焦距 *f*,電 腦影像座標系統 (*h*,*v*)可表示如下

$$h = x' - d_x + C_x$$

$$v = \omega(y' - d_y) + C_y$$
(10)

其中 *d<sub>x</sub>* 與 *d<sub>y</sub>* 為畸變所造成之徑向偏移 量; *C<sub>x</sub>* 與 *C<sub>y</sub>* 分別為影像中心在電腦影像座 標系統下於 *x* 與 *y* 方向的位置,單位為像 素; ω 為影像之縱橫比。



圖三 DIC 影像與空間座標模型 (溫, 2023)

#### 三、偏極與非偏極影像分離技術

在 RSSS 量測系統中,應力與應變分

別採用上述之 AR-REEToP 與 DIC 法進行量 測,但因 AR-REEToP 需分析的影像為具偏 極態之偏極影像,而 3D-DIC 法則需要分析 非偏極態之非偏極影像,但使用一般相機取 像時勢必無法針對影像的偏極與否而進行選 擇性的拍攝或進行影像分離,故為了使 AR-REEToP 與 3D-DIC 法能結合於同一系統中 並達到即時同步各別取像,本研究進而研發 一偏極與非偏極影像分離技術。

基於 AR-REEToP 需使用經偏振的偏極 光源照射試片,以產生光彈條紋做為應力分 析要素,而 DIC 法需使用非偏極光源照射 試片,以利軟體進行相關性分析,因此本技 術便是由光源端進行分離,即同時使用可見 光頻譜兩端之紅光(中心波長 630 nm)與藍 光(中心波長 470 nm)波段做為試片照射光 源,其中紅光波段為非偏極光源,藍光波段 為偏極光源,如此即可形成一同時具備偏極 與非偏極照明之混色綜合影像,此混色之綜 合影像可由彩色相機內建之 RGB 分量彩色 濾波片即時分離,以同步得到位於 B 分量 之偏極影像與位於 R 分量之非偏極影像, 如此一來,AR-REEToP與DIC法分別需要的偏極影像和非偏極影像即可即時同步被擷取進相機並完全分離。

實驗架設與程序

# 一、高等反射式即時加強曝光光彈理論之實 驗架設與程序

本研究以承受徑向壓縮載荷玻璃圓盤 驗證 AR-REEToP,使用之玻璃圓盤試片 為 SCHOTT 公司生產之 B270i 白板玻璃試 片,為一種能夠在可見光之範圍內具備高 透光率之無色光學玻璃,玻璃圓盤試片之 直徑為 100 mm,厚度為 2 mm,折射率為 1.52,密度為 2560 kg/m<sup>3</sup>,應力光學係數為 2.89×10<sup>-12</sup> Pa<sup>-1</sup>。圖四顯示 AR-REEToP 之 實驗架設,本驗證實驗主要使用之設備對 應圖四中之指示編號分別為(1). 藍光 LED 陣列面型光源、(2). 起偏鏡、(3).1/4 波板、 (4). 徑向壓縮施載架、(5).1/4 波板、(6). 檢 偏鏡、(7). 高感光度 CCD 相機。



圖四 AR-REEToP 理論驗證之實驗架設實景圖 (溫, 2023)

圖五為 AR-REEToP 於實驗驗證下之量 測流程圖。首先,將無施加負載下之待測試 片做為校正試片,並置於徑向壓縮施載架 上,並取得所需之校正試片光強資訊。在拍 攝完所需的校正試片光強資訊後,即透過徑 向壓縮施載架對待測試片施加預期負載並進 行光強影像拍攝,在所有影像拍攝完畢後即 利用 MATLAB 數值分析軟體進行計算主應 力差,並與徑向壓縮之主應力差理論解進行 比對以驗證量測理論之可行性。 **軍**測 技術



圖五 AR-REEToP 理論驗證之實驗流程圖(溫, 2023)

## 二、偏極與非偏極影像分離技術之實驗架設 與程序

圖六為偏極與非偏極影像分離技術於實驗驗證下之量測流程圖。首先,以彩色相機分別拍攝單純僅以偏極藍光照射和單純僅以 非偏極紅光照射待測區域之彩色影像,並將兩張彩色影像分別進行 B 分量影像與 R 分 量影像之提取,將兩張提取出的 B 分量影 像疊加後,再與同時照射偏極藍光和非偏極 紅光所拍攝之混色綜合影像之 B 分量影像 進行比對,若兩者相同則可驗證本研究之分 離技術於該光路架設下之可行性,而 R 分 量之比對程序亦同。彩色影像各分量提取與 影像後處理部分皆利用 MATLAB 數值分析 軟體進行分析計算。



圖六 偏極光與非偏極光影像分離理論驗證之實驗流程圖(溫,2023)

## 實驗結果與討論

## 一、高等反射式即時加強曝光光彈理論之驗 證結果

圖七為沿玻璃圓盤試片中心線應力分佈

理論值與實驗值(以下簡稱圓盤試片應力值) 之比較,其中實驗值以紅色線標示,理論值 以藍色線標示,圖七(a)為使用 R-REEToP 於圓盤試片應力值之比較,其中實驗值與理 論值間之最大差異為 12.24 %,平均差異為 3.14 %。圖七(b)為使用 AR-REEToP 以相同 施載條件下於圓盤試片應力值之比較,其中 實驗值與理論值間之最大差異僅為 7.6 %, 平均差異僅為 2.5 %。由實驗結果可得知, AR-REEToP 的相位移技術不僅可簡化量測操 作步驟,更獲得了較低的最大差異百分比與 平均差異百分比,可以得出更精準之量測結 果。



圖七 徑向壓縮負載下 R-REEToP 與 AR-REEToP 之量測結果比較 (溫, 2023)

#### 二、偏極與非偏極影像分離技術之驗證結果

圖八 (a)~圖八 (h) 分別為對照圖六所 示之各光源照射下之分量影像,圖八 (a)~ 圖八 (d) 分別為僅照射偏極藍光、僅照射偏 極紅光、兩單光源結果相加與同時照射兩 光下之 B 分量影像,由圖八 (a)、圖八 (c) 和圖八 (d) 之結果可以看出,同時照射兩 光之 B 分量結果與單純照射偏極光之結果 和兩單光源 B 分量疊加之結果相同,R 分 量亦可由圖八(e)~圖八(h) 看出相同之結 果,由此可證明即使同時照射偏極與非偏 極光,其光強資訊仍可彼此被獨立分離, 且本系統所使用之彩色相機確實可正確進 行 R 分量和 B 分量之分光效果,而本技術 亦可用於不同光學檢測方法上。



圖八 偏極與非偏極影像分離技術驗證實驗中各光源照射下之各分量影像

模組化設備與實際應用案例

## 一、落球動態應力應變同步量測系統(王, 2021)

此落球態應力應變同步量測系統中 之 RSSS 量測系統為整合 AR-REEToP 和 2D-DIC 並搭配單一臺高速相機所建構之模 組化系統,實景圖如圖九(a)所示,系統中 所使用之光學設備主要包含:高速相機、外 同軸藍光 LED 光源、偏振片、1/4 波板、無 影紅光 LED 光源與光源電供與控制器。此 系統重要規格如下:1.全場應力應變即時同 步量測,2.量測範圍:95.2mm×95.2mm(at 4000fps),71.4mm×49.1mm(at 10000fps), 3.空間解析度:≤100 µm,4.量測重複性 ≥95%。此 RSSS 量測系統之光學模組亦可 外掛(Outfit)至任何產線或設備之相機上來 使設備立即具備即時同步應力與應變量測功 能,此 RSSS 量測系統可與本實驗室建構之 多角度落球衝擊試驗系統相結合成落球動態 應力應變同步量測系統,結合後之系統實景 圖如圖九 (b) 為所示,圖九 (b) 中的黃色虛 線方框標示處即為此 RSSS 量測系統,此結 合系統可高速同步量測落球衝擊下待測物之 應力和應變分布。本研究利用此結合系統進 行之即時同步應力應變量測實際案例之一為 量測智慧型穿戴裝置玻璃保護蓋於落球衝擊 下之應力與應變分布,圖九(c)和圖九(d) 分別為玻璃保護蓋於落球衝擊反彈當下時間 點之應力與應變量測結果,此結果有助於智 慧型穿戴裝置廠商對於其產品建立自己廠內 之檢測機制和準則,並評估玻璃保護蓋抗衝 擊程度,以此提高產品耐衝擊之可靠度。

測
技



圖九 RSSS 量測系統 - 落球動態應力應變同步量測系統與量測實例 (王, 2021)

#### 二、多維度光學檢測系統

本研究亦整合 AR-REEToP 與 3D-DIC 並搭配三臺高解析度相機建構一套 RSSS 量 測系統,此 RSSS 量測系統實景圖如圖+(a) 所示,系統中所使用之光學設備主要包含: 一臺用於 AR-REEToP 和兩臺用於 3D-DIC 之高解析度 CCD 相機、紅光 LED 線性光 源、紅光 LED 面型光源、外同軸藍光 LED 光源、偏振片、1/4 波板、光源電供與控制 器,此外可透過更換鏡頭來達到巨觀及微 觀檢測的轉換。搭配巨觀鏡頭下此系統重 要規格如下:1.全場應力應變即時同步量 測,2.應力量測精密度(對應延遲量): $\leq$ 1 nm,3.應變量測精密度: $\leq$ 1\*10<sup>2</sup> $\mu$ ε,4.量 測範圍: $\geq$ 300 mm × 300 mm,5.空間解 析度: $\leq$ 80  $\mu$ m,6.取像速度: $\geq$ 40 fps, 7.量測重複性 $\geq$ 95%;搭配微觀鏡頭下此 系統之量測範圍為 $\geq$ 70 mm × 70 mm,空 間解析度為 $\leq$ 15 $\mu$ m。此 RSSS量測系統目 前已搭載至XYZ 三維步進馬達上建構成一 多維度光學檢測系統,檢測系統實景圖如 圖十(b)所示,圖十(b)中的黃色虛線方框 標示處內部即為此 RSSS 量測系統設置處, 透過步進馬達移動 RSSS 量測系統和利用 圖像拼接技術可增加檢測系統量測範圍至≥ 600mm × 600mm,本研究利用此檢測系統 進行之即時同步應力應變量測實際案例之一 為量測面板銅膜玻璃基板於彎曲負載下之應 力與應變分布,圖+(c)和圖+(d)分別為 銅膜玻璃基板於之彎曲負載下之應力與應變 量測結果,此結果可幫助半導體產業檢測製 程所造成的應力集中或應變異常,促使製程 的改善減少缺陷的產生,以此提高產品的可 靠度。



圖十 RSSS 量測系統 - 多維度光學檢測系統

結論

本研究成功研發了創新的反射式低階應力量測理論 AR-REEToP,更藉由所開發之偏極與 非偏極影像分離技術成功將 AR-REEToP 和 DIC 進行整合,發展 RSSS 量測理論,並驗證了應 力應變即時同步量測之可行性與正確性,此外更研製了兩套 RSSS 量測系統,並分別對實際 產品進行量測,本研究中介紹的量測案例為可同時同步量測應力與應變之試片,但實際上此 些 RSSS 量測系統更可應用至其他不同材料試片之檢測,也正因 RSSS 量測系統是結合兩種光 學方法,故能應用的量測範圍更廣泛,在面對無法使用 AR-REEToP 量測之試片時仍可用 DIC 進行應變分析,反之,在無法噴漆或希望量測殘餘應力的試片情況下,便可用 AR-REEToP 來 彌補 DIC 的不足,在大部分的光學材料上,AR-REEToP 和 DIC 可同時進行即時同步量測,如 此可幫助產業針對材料進行更準確的機械性質和力學行為分析。 目前 RSSS 量測系統亦已針對 FHE 進行落球衝擊即時應變量測和軟性基板落球衝擊應力 即時量測(王,2021),量測結果將可作為廠商對於 FHE 之檢測準則,未來可期應用於廠內檢 測流程中使 RSSS 量測系統能快速篩檢 FHE。再者,透過 RSSS 量測系統,未來可建立不同 材料與不同元件結構之應力/應變結果資料庫,應用此資料庫之數據不但可建立各種 FHE 對 應之檢測準則,更可讓廠商藉由量測結果和檢測準則選擇更佳之材料或結構設計來改善產品。

而 RSSS 量測理論現已更進一步地朝以一臺相機進行 AR-REEToP 和 3D-DIC 的量測理論 和光路設計進行研發(温,2023),此設計不僅可以降低設備成本和縮小設備尺寸,更可避免 原先多臺相機所需的校正和同步等問題,且能輕易外掛 RSSS 光學模組至其他自動光學檢測 設備之相機上使設備能夠立刻進行 RSSS 量測技術,為一創新開發專利性技術。

#### 參考文獻

1.書籍

Born, M. & Wolf, E. (1999). Principles of Optics: Electromagnetic Theory of Propagation, Interference and Diffraction of Light. Cambridge University Press, New York, U.S.A.

- 2. 專利
  - (1) 王、黃吉宏、宋、陳維仁、賴冠廷(2014/09)。量化材料未知應力與殘餘應力之裝置及其方法/An Apparatus for Quantifying Unknown Stress and Residual Stress of a Material and a Method Thereof。中華民國發明專利,專利申請號:101109034,專利公開號:201339554,專利號: I457550,申請日期:2012/3/16,公開日期:2013/10/01,核准通知日期:2014/9/04。
  - (2) 王、宋、呂正雍、葉祐良、陳柏宇 (2018/04)。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:I619933,申請日期:2016/12/09,核准日期:2018/04/01。
- 3. 碩博士論文

(1) 張志皓 (2021)。多型式即時加強曝光光彈理論之研發〔碩士論文〕。本校本系。

(2)温(2023)。創新光測力學量測系統於光學膠機械性質之探討〔碩士論文初稿〕。本校本系。

- 4. 研究報告
  - (1) 王 (2021)。研發即時同步全場應力與應變量測系統於衝擊試驗力學行為之驗證 (MOST110-2221-E-007-087)。科技部專題研究計畫(一般研究計畫),工程司應力應變與成型,執行期限:2021/08/01~2022/07/31。
  - (2) 郭、張志皓 (2022)。多形式即時加強曝光光彈理論及其設備之研發。量測資訊, 204, 45-55。

### 一作者簡分

温昱翔 / 國立清華大學 動力機械工程學系
郭瑋辰 / 國立清華大學 動力機械工程學系
吳意國 / 國立清華大學 動力機械工程學系
吳俊諭 / 國立清華大學 動力機械工程學系
吳峪貞 / 國立清華大學 動力機械工程學系
王偉中 / 國立清華大學 動力機械工程學系 / 指導老師
宋泊錡 / 國立清華大學 動力機械工程學系 / 指導老師

<del>~~~</del>

測技術