

利用 Fabry-Pérot 雷射干涉儀實現線型馬達移動平台裝置之位移即時訊號補償回授控制

Real-time Signal Compensation Feedback Control for Linear Motor Stage Using Fabry-Pérot Laser Interferometer

林益呈、曾奕凱

Yi-Cheng Lin , Yi-Kai Tseng

隨著半導體晶圓尺寸的逐漸增大，對高精度、大範圍運動控制的需求也顯著提升。本文利用德國 attocube 公司所生產的 IDS3010 雷射干涉儀進行線型馬達移動平台裝置的位移即時訊號補償回授控制。IDS3010 是基於 Fabry-Pérot 干涉儀原理的高精度位移測量裝置，其利用本身儀器內的感測探頭第一次反射及目標複歸反射器的第二次反射來形成一個干涉腔體，在目標物的移動之下多次反射雷射光所產生的相位差來計算其位移量。在即時補償方面，IDS3010 具備有量測數據即時輸出之功能，提供 HSSL、AquadB、Sin-Cosine、Linear Analog 及 Biss-C 五種輸出格式可自行選擇，可與市售的伺服馬達驅動器進行匹配，同時更具備高達 25 MHz 的數據輸出頻率，具備亞納米級分辨率，並且能在極高動態範圍內提供穩定的測量數據。相較於裝設在移動平台上的增量式光學尺，實驗結果顯示，若使用 IDS3010 雷射干涉儀作為即時補償回饋訊號來源時，可顯著提升移動平台的重複定位精度和精準度，對於半導體製程中的精密定位至關重要。

As the size of semiconductor wafers continues to increase, the demand for high-precision, large-range motion control has also significantly risen. This paper utilizes the IDS3010 laser interferometer produced by the German company attocube for real-time signal compensation feedback control of a linear motor stage. The IDS3010 is a high-precision displacement measurement device based on the Fabry-Pérot interferometer principle. It uses the first reflection occurring within the sensor head and the second reflection from the target retroreflector to form an interference cavity. The phase difference generated by multiple reflections of the laser light due to the movement of the target is used to calculate the displacement. In terms of real-time compensation, the IDS3010 has the function of real-time output of measurement data, offering five

output formats: HSSL, AquadB, Sin-Cosine, Linear Analog, and Biss-C, which can be selected as needed. It can be matched with commercial servo motor drivers and has a data output frequency of up to 25 MHz, providing sub-nanometer resolution and stable measurement data over a very high dynamic range. Compared to incremental encoder installed on stages, experimental results show that using the IDS3010 laser interferometer as a real-time compensation feedback signal source can significantly improve the repeatability and accuracy of the stage's positioning, which is crucial for precise positioning in semiconductor processes.

一、前言

隨著現今台灣半導體產業持續邁向更高的量測精度、運作效率及系統整合控制，提升奈米級精準定位的需求變得日益迫切。在當今 EUV 和 E-beam 技術的快速發展下，實現晶圓、光罩、光學元件等設備是否可以達成奈米級精密定位成為關鍵挑戰。特別是在高速且大範圍的移動應用中，實現奈米級精度不僅要求卓越的運動控制系統，還需能在半導體製程中應對超高真空 (ultr-high vacuum, UHV)、高潔淨環境和高溫等苛刻條件。

隨著晶圓尺寸的逐漸增大，對高精度、大範圍運動控制的需求也顯著提升。為解決這些挑戰，德國 Attocube 公司所研發的 IDS3010 Fabry-Pérot 雷射干涉儀正是針對這些課題最佳的解方。基於 Fabry-Pérot 干涉原理，IDS3010 不僅具備皮米級解析度，能以奈米級準確度進行位移檢測，並提供即時訊號補償回授運動控制，更具備高達 25 MHz 的數據輸出頻率，能與市售驅動控制器的最高信號解析度相匹配，滿足精密控制的需求。

Thurner, K. (2013)⁽¹⁾ 使用不同配置的 Fabry-Pérot 腔的工作範圍和角度容許誤差進行了研究。通過使用包含準直器的特殊共焦雙通道排列，測量範圍可以擴展到至少 100 mm。圍繞預期的法線入射角的角度誤差隨位置變化，從最小距離的 ± 1 度到最大距離的約 ± 0.2 度。為了進一步將測量範圍擴展到 400 mm，可以使用高反射角立方體作為目標反射器，但在法線入射時對比度降低到約 0.4，這對於任何實際設備來說仍然足夠，並使用 Airy 公式與 Zemax 耦合效率計算模擬方法進行比對。實驗結果與模擬結果的一致性證明了其預測新感測頭配置光學響應的有效性。Thurner, K. (2015)⁽²⁾ 介紹了一種基於 Fabry-Pérot 腔的光纖雷射干涉位移感測器設計，該感測器在 20 mm 的工作距離下達到 0.44 nm 的重複性、1 pm 的解析度和 1 nm 的精度，這也是 IDS3010 儀器內 Fabry-Pérot 腔的設計原理雛形。Hirschmann, T 等人 (2021)⁽³⁾ 首次使用 attocube 的 IDS3010 干涉儀，進行針對半導體機台設備的即時補償實驗。他們設計了一套即時補償控制的 XY 平台系統，並結合偏擺旋轉校正功能，以提升半導體載台定位精度與直線移動穩定性。

本次實驗中，選用裝設有內建增量式光學尺的商用線型馬達移動平台，搭配驅動控制器，並架設 IDS3010 干涉儀進行移動平台外部量測。同時 IDS3010 干涉儀所量測到的位移數據將回授到驅動控制器進行即時回饋補償，以確保每次平台移動到定位時的精準度。

最後，依照 ISO230-2:2014 標準量測方法，分別對平台內建光學尺與 IDS3010 干涉儀進行定位精度的分析與比較，以驗證其性能優勢。

二、實驗硬體設備規格

本次實驗選用一般市售商用規格的線型馬達移動平台並協同均華精密工業股份有限公司技術開發合作線型馬達驅動控制方法來進行同步整合，量測部分除了移動平台內建裝設有增量式光學尺外，同時使用德國 attocube 公司所生產的 IDS3010 雷射干涉儀來進行平台位移量測及即時信號回饋補償輸出至控制器。

• IDS3010 Fabry-Pérot 雷射干涉儀規格

功率：8 W	感測探頭解析度：1 μm
測距雷射源：DFB Laser (class1)	感測探頭重複精度：2 nm
測距雷射功率：Max. 400 μW	目標移動最大速度：2 m/s
測距雷射波長：1530 nm	量測頻寬：10 MHz
量測距離：0—5 M	信號穩定性：0.11 nm
即時回饋信號輸出格式：Biss-C，HSSL，AquadB，Sins-Cosine，Linear Analog	



圖 1. IDS3010 Fabry-Pérot 雷射干涉儀外觀。

• IDS3010 Fabry-Pérot 雷射干涉儀感測探頭規格

尺寸：Ø 14 mm、長度 49.3 mm	光學模式：平行光
光束直徑：7.6 mm	焦距長度： ∞
接頭格式：FC/PC	有效量測距離：至 5000 mm
橫向容許誤差值： $\pm 2\text{mm}$	角度容許誤差值： $\pm 15^\circ$



圖 2. 平行光束感測探頭。

• IDS3010 Fabry-Pérot 雷射干涉儀環境補償器規格

環境量測準確度	
溫度	$\pm 0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ (0 – 50 $^{\circ}\text{C}$)
壓力	$\pm 1\text{ hPa}$ (300 – 1100 mbar)
濕度	$\pm 2\%$ (10 – 90%)
量測精度	$\pm 1.0\text{ ppm}$ (5 公尺內)
	$\pm 0.0\text{ ppm}$ (4.2 公尺內)



IDS ECU

圖 3. IDS3010 干涉儀專用環境補償器，使用 RJ12 線連接。

• 線型馬達移動平台規格

行程範圍：150 mm	最大移動速度：2 m/s
精度：標準值 $\pm 6\text{ }\mu\text{m}$	連續運動力：77.7 N
最小位移增量：5 nm	負載能力：45 kg
雙向重複精度： $\pm 0.4\text{ }\mu\text{m}$	材料：陽極鋁
水平直線度： $\pm 3\text{ }\mu\text{m}$	MTBF：20,000 小時
垂直直線度： $\pm 3\text{ }\mu\text{m}$	光學尺解析度： $0.1\text{ }\mu\text{m}$



圖 4. 線型馬達移動平台。

三、IDS3010 Fabry-Pérot 干涉儀原理及架構

IDS3010 的內部架構及干涉原理如圖 5 所示，此架構說明兩種正交檢測方案及三種不同反射率 (R) 的感測探頭配置 (a) (b) (c)。可調分佈回饋 (distributed feedback, DFB) 雷射經單模光纖 (single-mode fiber, SMF) 傳輸至第一個 2×2 光纖耦合器 (FC1)。若需同時追蹤多軸位移，可用 $1 \times n$ 光纖耦合器取代 FC1，其中 $n-1$ 代表可追蹤的軸數。第一輸出端連接至波長參考點，用於波長穩定；第二輸出端則連接至第二個光纖耦合器 (FC2)，遠距離連接感測探

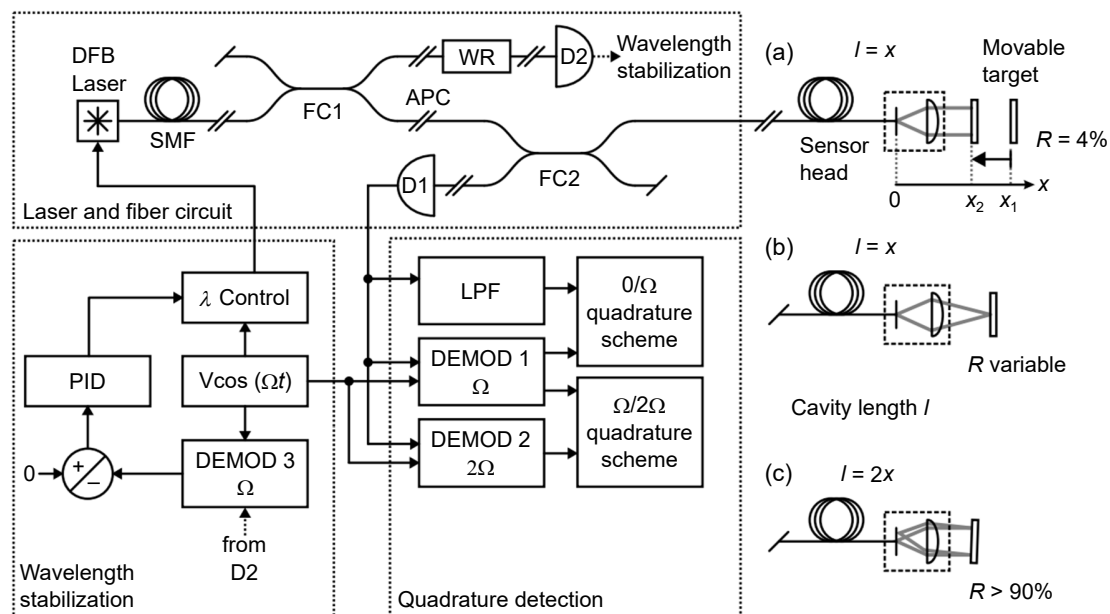


圖 5. IDS3010 Fabry-Pérot 干涉儀內部原理架構圖⁽²⁾。

頭與系統光纖電路。

單模光纖 (SMF) 電路包含兩個光電探測器 D1 和 D2、一個波長參考 WR、兩個光纖耦合器 FC1 和 FC2，以及一個可調分佈回饋 (DFB) 雷射。各元件透過 APC 連接器相連。正交檢測單元可選擇使用低通濾波器 (LPF) 和解調器 (DEMOMOD1) 的輸出，或同時使用兩個解調器 (DEMOMOD1 和 DEMOMOD2) 的輸出。波長穩定電路則包含一個回授迴路 (PID)、波長控制電路 (λ control)、振盪器 ($V \cos \Omega t$)，以及解調器 (DEMOMOD3)。

長距離光纖的末端為平面拋光端面 (在此使用 FC/PC 連接器)，反射部分進入的反射光約為 4%，並提供干涉儀的參考光束。因此，參考光束的長度為零 ($xr = 0$)，使得干涉儀不易受熱漂移的影響。其餘光線則以一定的錐角從光纖末端射出。此處， x 表示光纖與反射鏡之間的距離。光線被目標反射器反射後，部分光耦合回光纖並與參考光束重新結合。另一部分光則由光纖端面反射並再次通過腔體。這樣，便在單模光纖的拋光端面與反射器之間形成了一個長度為 l 的 FFabry-Pérot 腔。最終反射的光會產生一個干涉圖樣，並被 D1 偵測。當 Fabry-Pérot 鏡面具有相等的反射率時，即光纖端面反射的功率等於從腔體耦合回的功率，則可獲得最佳干涉信號對比度。通常，這類干涉儀在干涉圖樣的線性範圍內僅提供奈米級的短測量範圍，此時偵測器信號隨位置線性增加。超出干涉圖樣的線性範圍則需要使用正交檢測。隨著反射器距離的增加，干涉強度會因光纖發射光束的發散而快速下降，因此超過幾微米的測量範圍只能透過透鏡來塑造光束來實現。光束塑形對於目標的反射率至關重要，若要達到數米的長距離測量，光束必須準直，如圖 5(a) 所示，且背向反射光需減少到入射功率的約 4%。這可以透過使用相對於光束光軸偏移的平面玻璃目標或復歸反射器來實現，而此光束塑形就是使用由上一章節所介紹的平行光束感測探頭來進行。

平面玻璃目標要求精度公差為 ± 0.04 度，但允許同時測量物體的多個運動方向。相比之下，角反射立方體接受角度達數度，但僅限於單一維度的運動。當準直光束反射自高反射率平面目標時，會導致低干涉對比度，而如果目標未對焦，聚焦光束，如圖 5(b) 所示，則可在對比度和測量範圍之間取得平衡。因此，本干涉儀能夠應對具有各種反射率和表面粗糙度的目標。

四、即時補償輸出訊號

IDS3010 提供每個軸的即時位置補償信號輸出，而在此次實驗裡我們選用 AquadB 輸出格式與伺服馬達控制器進行匹配。其解析度大小的測量位置變化會導致 A 或 B 的狀態變化，這取決於變化方向。有時這也被稱為 X4-Encoding。AquadB 介面可以傳輸目標移動的位移和方向。圖 6 說明了如何根據 A/B 信號計算即時位置：在 A 領先 B 的情況下，位置需要增加；而在 B 領先 A 的情況下，位置需要減少。

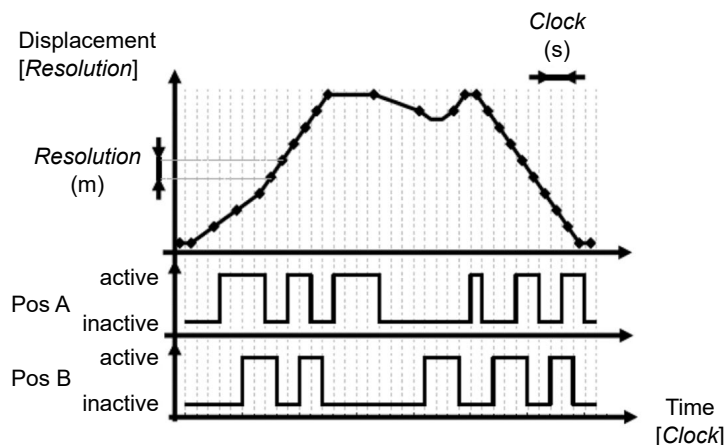


圖 6. AquadB 傳輸的信號模式。

在 IDS3010 干涉儀內的 AquadB 訊號輸出資料量及更新速率由解析度和 Clock 定義。解析度定義了即時定位解析度且是可調整的，範圍從 1 pm 到 64.93 nm (可編程為 2^n 步長，其中 n 為整數)。Clock 定義了正交信號增量可以輸出的最小週期，最快的 Clock 設置為 40 ns (25 MHz)，等於絕對距離累加器的更新間隔，最慢的設置為 10 240 ns (98 kHz)，匹配控制器的 Clock 數值可任意調整，單位為 40 ns 的整數倍。

五、量測設備架設

- (1) 將移動平台與伺服馬達驅動器進行連接，以驅動器指令控制平台的移動步進間隔與距離。
- (2) 將 IDS3010 雷射干涉儀專用的復歸反射器固定裝設在移動平台上，進行平台往復移動時的干涉儀信號反射來源。



圖 7. IDS3010 Fabry-Pérot 雷射干涉儀專用 1530 nm 復歸反射器。

- (3) 選用 IDS3010 干涉儀專用平行光束感測探頭，並且固定架設於移動平台外的任意位置，架設高度須與復歸反射器高度一致後，即可進行干涉儀雷射光的準直對位。

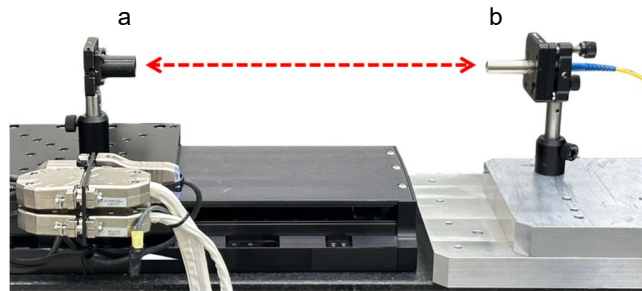


圖 8. 復歸反射器與感測探頭架設相關位置，a 點為固定架設於移動平台上之復歸反射器，須與平台外 b 點感測探頭高度一致。

- (4) 使用 26 pin HDR 信號連接器將 IDS3010 干涉儀主機上的即時補償回饋輸出孔位接至伺服馬達驅動器。



圖 9. IDS3010 干涉儀主機即時補償回饋輸出孔位。

- (5) 將 IDS3010 干涉儀補償輸出訊號設定為 AquadB (LVDS) 格式，在此實驗中我們選定解析度設定：10 nm 及 Clock：25 MHz。

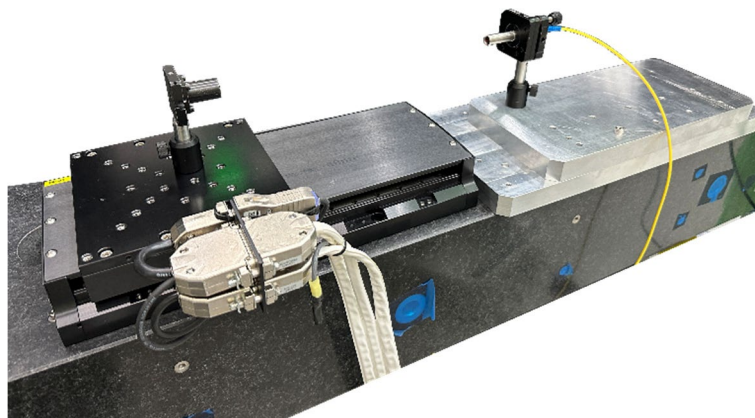


圖 10. 整體量測設備裝設於震動等級 VC-E 無塵室環境內。

(6) 量測時環境參數：

- 溫度：21.267 °C
- 相對溼度：53.5%
- 壓力：1003.37 hPa
- 量測折射率：1.000264

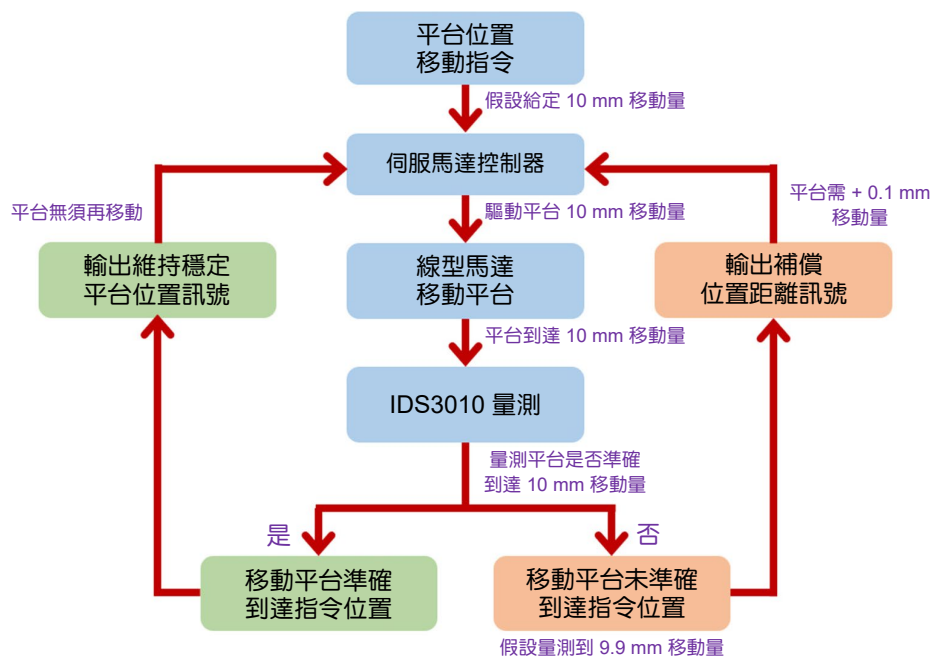


圖 11. 整體量測設備架構流程圖。

六、量測步驟

此量測實驗遵循 ISO230-2:2014 標準量測方法分別量測兩組數據進行對照，設定移動平台總行程為 150 mm，並以每 10 mm 步進累積量測點，

- 實驗 1：使用移動平台內建光學尺閉迴路補償訊號，並同時架設 IDS3010 輔助量測平台位移 ISO230-2:2014 數據。
- 實驗 2：關閉移動平台內建光學尺閉迴路補償訊號，使用 IDS3010 進行平台位移量測，同時由 IDS3010 的即時補償量測訊號來進行移動平台的位置補正。

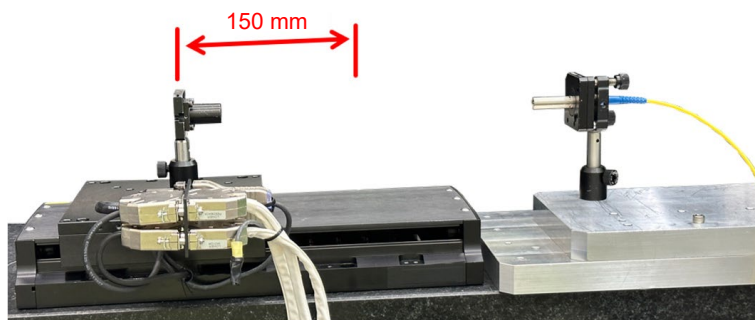


圖 12. 移動平台量測總行程。

七、量測結果

實驗 1

使用移動平台內建光學尺閉迴路補償訊號，架設 IDS3010 輔助量測平台位移，可以得到以下幾個主要參數數據 (單位： μm) 及位置偏差圖：

- Axis deviation : Bidirectional $\uparrow \downarrow$
- Reversal value B : 1.0329
- Mean reversal value : -0.7806
- Range mean bidirectional positional deviation M : 11.7130
- Systematic positional deviation E : 11.7631
- Repeatability of positioning R : 2.0086
- Accuracy A : 12.4628

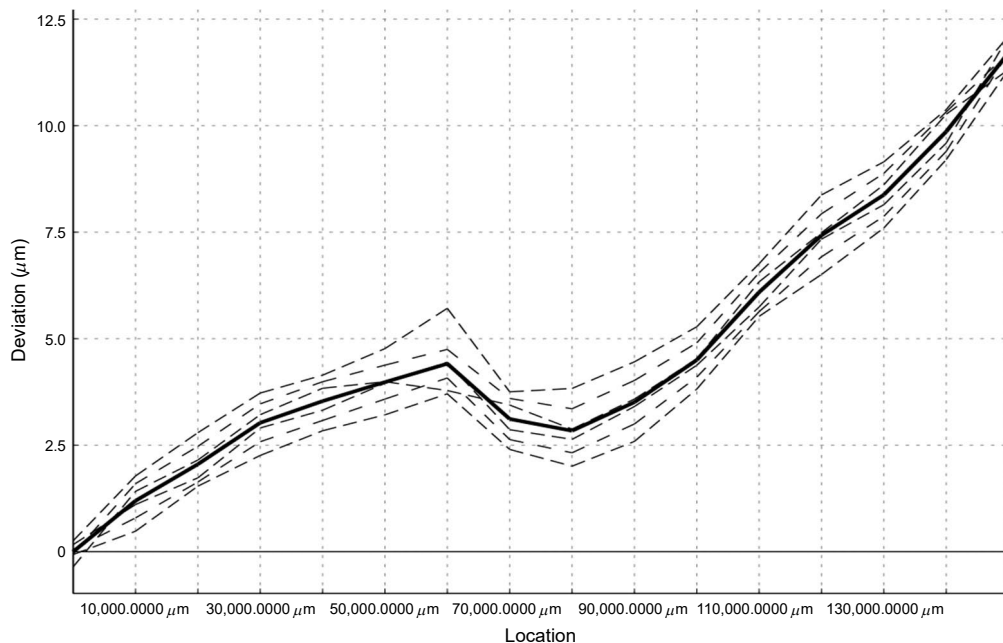


圖 13. 光學尺補償訊號量測之 ISO230-2:2014 位置偏移圖。

實驗 2

關閉移動平台內建光學尺閉迴路補償訊號，使用 IDS3010 進行平台位移量測，同時由 IDS3010 的即時補償量測訊號來進行移動平台的位置補正，可量測到主要參數數據 (單位： μm) 及位置偏差圖：

- Axis deviation : Bidirectional $\uparrow \downarrow$
- Reversal value B : 0.0426
- Mean reversal value : 0.0176
- Range mean bidirectional positional deviation M : 0.0234
- Systematic positional deviation E : 0.0532
- Repeatability of positioning R : 0.0951
- Accuracy A : 0.1177

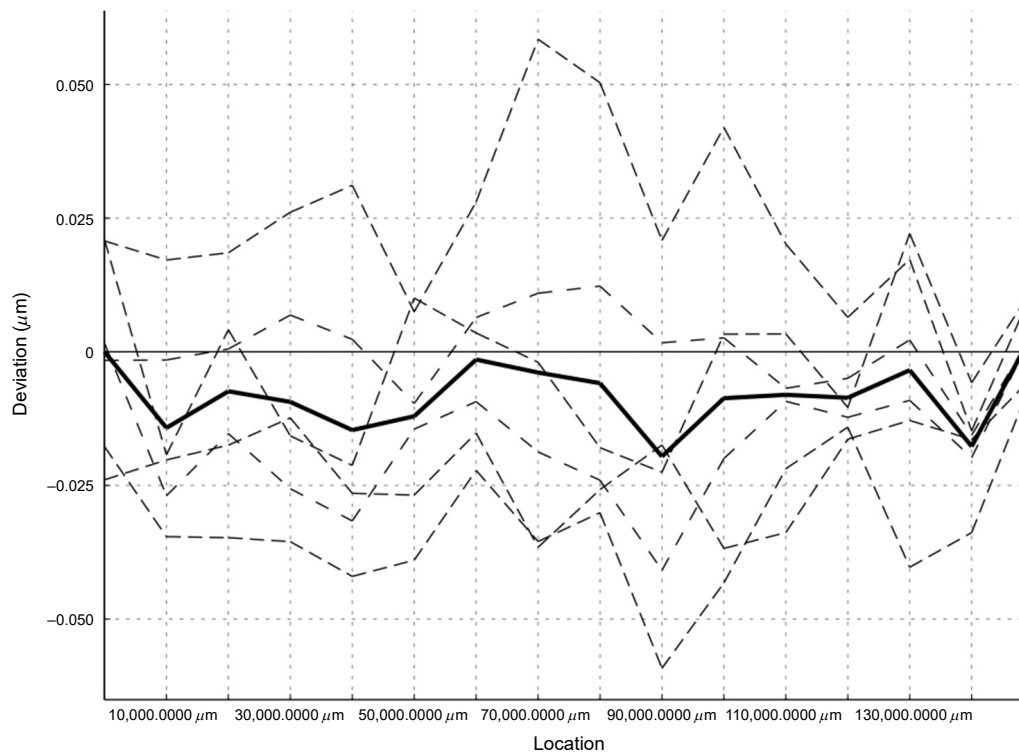


圖 14. IDS3010 即時補償訊號量測之 ISO230-2:2014 位置偏移圖。

表 1. 實驗 1 與實驗 2 量測數據比較，單位： μm 。

即時補償訊號來源	實驗 1 平台內建光學尺	實驗 2 IDS3010 即時補償
Axis deviation	Bidirectional $\uparrow \downarrow$	
Reversal value B	1.0329	0.0426
Mean reversal value	-0.7806	0.0176
Range mean bidirectional positional deviation M	11.7130	0.0234
Systematic positional deviation E	11.7631	0.0532
Repeatability of positioning R	2.0086	0.0951
Accuracy A	12.4628	0.1177

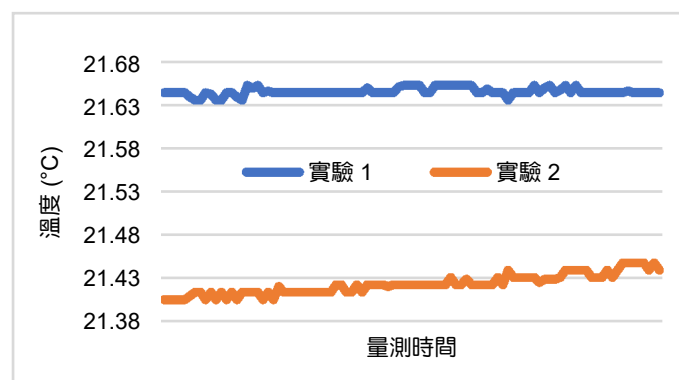


圖 15. 實驗 1 與實驗 2 量測時之環境溫度 $^{\circ}\text{C}$ 變化值。

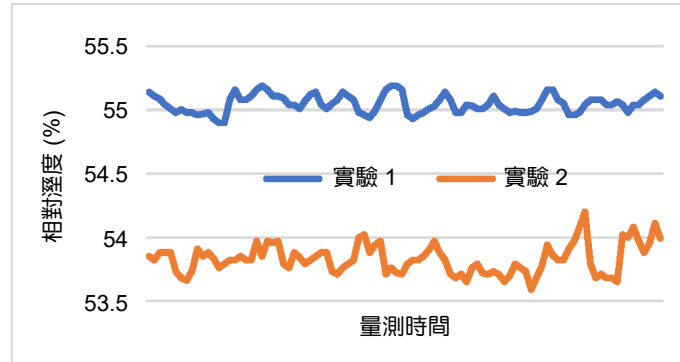


圖 16. 實驗 1 與實驗 2 量測時之環境相對溼度 % 變化值。

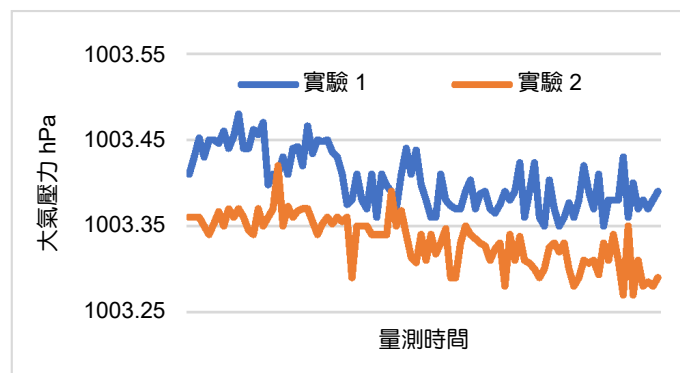


圖 17. 實驗 1 與實驗 2 量測時之大氣壓力 hPa 變化值。

八、結論

根據這兩組實驗的對比結果，顯著顯示出使用 attocube 公司生產的 IDS3010 雷射干涉儀作為系統的即時補償訊號來源，搭配與均華精密工業股份有限公司技術開發合作線型馬達驅動控制方法來進行同步整合，能大幅提升移動平台的重複定位精度 (repeatability of positioning) 和精準度 (accuracy)。

相較於移動平台內建的光學尺，IDS3010 可將重複定位精度從原本的 $2.0086\ \mu\text{m}$ 提升至 $0.0951\ \mu\text{m}$ ，而精準度則從 $12.4628\ \mu\text{m}$ 提升至 $0.1177\ \mu\text{m}$ ，顯著減少了定位誤差，使平台設備能更精確地達到設定位置。

這樣的性能提升，對於極度要求精密操作的應用，尤其是半導體機台的精密定位至關重要。IDS3010 不僅能大幅提高系統的可靠性，還有助於提升產品生產的一致性，進而提升整體製造效率與產品品質。

九、未來展望及延伸應用

本次實驗採用 IDS3010 雷射干涉儀搭配單軸感測訊號進行量測。IDS3010 主機具備同時量測三軸感測訊號的能力，基於 Fabry-Pérot 干涉原理，使用者可根據自身設備需求，自由靈活地設置感測探頭的位置。相較於傳統的邁可森 (Michelson) 干涉儀系統，IDS3010 不僅擺脫了架設位置的限制，還顯著提升了應用上的靈活性和即時補償精度，讓使用者在複雜環

境下仍能維持高效的測量操作，在自由度上加大優化了實驗配置與結果的可靠性，未來可將此特色及優點運用在其他設備裝置下使用。

• 半導體製程晶圓載台的移動及偏擺檢測

在半導體製程中，晶圓載台的精密位移量測至關重要。由於晶圓上的電路結構極其微小，載台的每一次微小位移都直接影響製程的精度和品質。精確的位移控制能確保各層電路的對準，減少誤差，提高生產良率，並確保製造出的晶片性能穩定可靠。如圖 18 所示，在一晶圓載台上分別於 a、b、c 三個位置裝設感測探頭，a 位置探頭用來進行平台 X 軸方向之即時位置補償回饋，b 與 c 位置探頭用來量測平台移動時所產生的 Y 方向移動量及利用 b 與 c 兩軸可以計算出平台移動時產生之旋轉偏擺量。

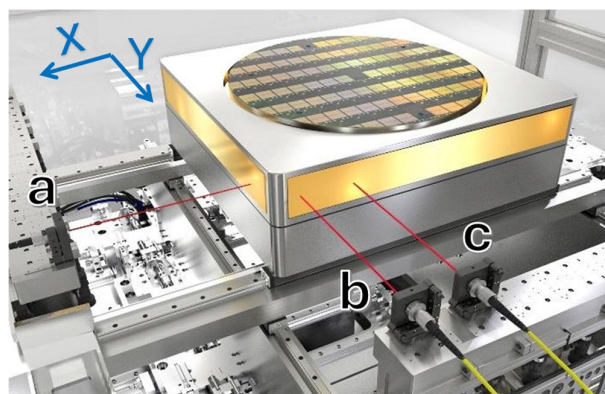


圖 18. 於晶圓載台 a、b、c 三個位置架設 IDS3010 干涉儀感測探頭。

• 工具機機台系統移動檢測

在工具機系統中，每個移動軸都配備有驅動馬達，依據加工需求進行精密移動。特別是龍門系統，行架兩端需要在穩定且等速的條件下同步移動，其兩端之準確度更是需要特別重視。如圖 19 所示，透過兩台 IDS3010 干涉儀共搭配四個感測探頭及復歸反射器，可以分別量測行架兩端的移動是否完全一致，其中 a_1 及 a_2 為感測探頭裝設位置， b_1 及 b_2 為復歸反射器，進行龍門行架於 X 軸移動之即時監測，更進一步在 Y 軸 a_3 - b_3 及 Z 軸 a_4 - b_4 上亦可同時裝設，確保機台所有移動軸之高精度的同步性。

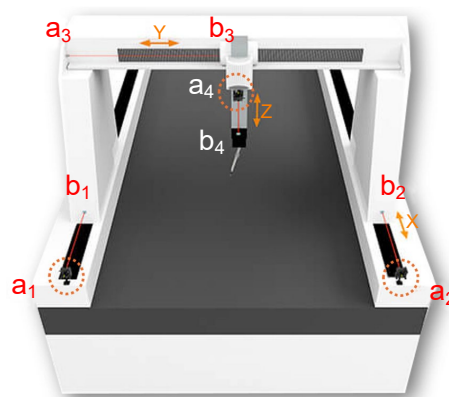


圖 19. 三次元量測機台。

• 半導體曝光機或視覺檢測相關機台

在半導體製程的曝光階段，為了精確控制光罩與晶圓之間的相對位置並即時監控曝光過程，大多使用精密的疊層對準 (overlay alignment) 系統。這一系統可確保每層電路圖案的正確位置。在此過程中可使用多台 IDS3010 干涉儀串聯，增加測量的自由度，達到 3 倍於干涉儀數量的自由度增長。如圖 20 所示，使用兩台 IDS3010 干涉儀，則可配置 6 個感測探頭，實現對光罩與鏡頭位置的高精度測量與控制。

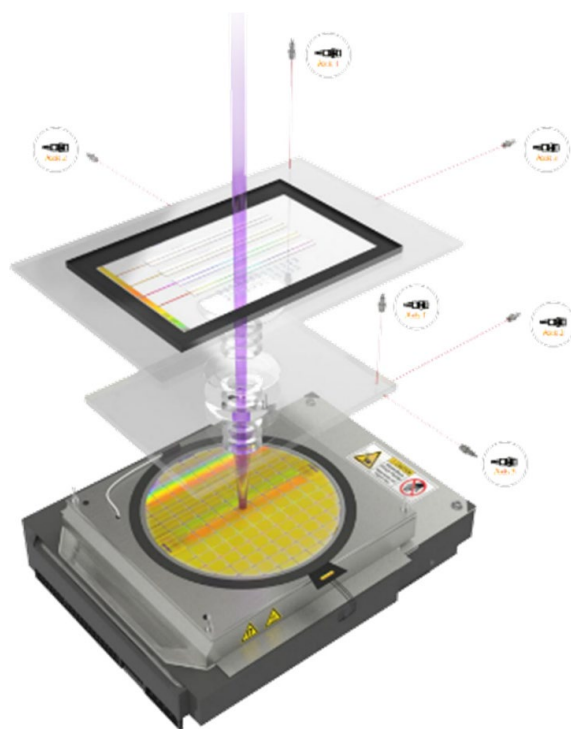


圖 20. 半導體曝光機裝設六個感測探頭。

• 角度變化量測

IDS3010 干涉儀除了量測目標物的直線位移量之外，可搭配專為角度量測所設計之 L 型三探頭 L 型製具及 L 型復歸反射器，可同時量測位移、俯仰 (pitch) 及偏擺 (yaw)。

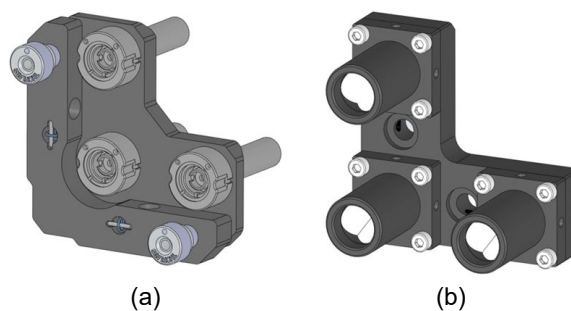


圖 21. (a) 為三探頭 L 型製具，(b) 為三探頭 L 型復歸反射器。

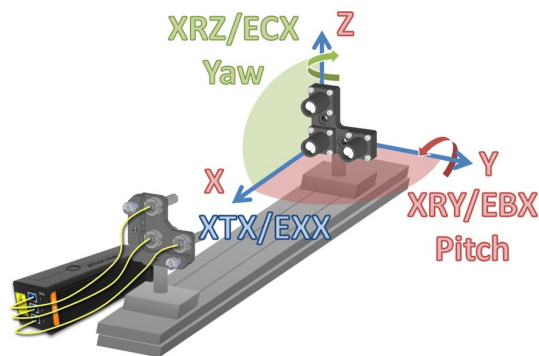


圖 22. L 型角度量測配件之移動誤差與旋轉誤差示意圖。

參考文獻

1. Klaus Thurner; Pierre-Francois Braun; Khaled Karrai, *Review of Scientific Instruments*, **84**, 095005 (2013).
2. Klaus Thurner, Francesca Paola Quacquarelli, Pierre-Francois Braun, Claudio Dal Savio, Khaled Karrai, *Applied Optics*, **54** (10), 3051 (2015).
3. Thomas Hirschmann, Gregor Schindler, Isabel Greisberger, Mark Braun, and Domagoj Radonic, *Application Note: Motion & Sensing* 37, (2021).
4. Zech, M., & Thurner, K. U., Interferometric displacement sensor for integration into machine tools and semiconductor lithography systems (U.S. Patent No. 10,260,863 B2). U.S. Patent and Trademark Office, (2019).
5. Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB). IDS 3010 Calibration Certificate: Calibration of Laser Interferometer According to DIN EN ISO/IEC 17025. National Metrology Institute of Germany, (2016).

作者簡介

林益呈先生為國立成功大學系統及船舶機電工程學系碩士，現為阜拓科技股份有限公司專案經理。
Yi-Cheng Lin received his M.S. in the Department of Systems and Naval Mechatronic Engineering at National Cheng Kung University. He is currently a Account Manager at Forter Technology Co., Ltd.

曾奕凱先生為國立台北科技大學電機工程學系碩士，現為均華精密工業股份有限公司高級專員。
Yi-Kai Zeng received his M.S. in the Department of Electrical Engineering at National Taipei University of Technology. He is currently a Senior Specialist at Gallant Micro. Machining Co., Ltd.