

多功能式極紫外光微影元件檢測服務平台

Multi-functional Extreme Ultraviolet Lithography Component Inspection Platform

卓文浩、吳品鈞、李建霖、黃羿誌、李昭德、蔡坤諭、李佳翰

Wen-Hao Cho, Pin-Jiun Wu, Chien-Lin Lee, I-Chih Huang, Chao-Te Lee, Kuen-Yu Tsai, Jia-Han Li

先進半導體製程已由 193 nm ArF 光源邁入 13.5 nm 極紫外光 (EUV) 時代，伴隨而來的是光學系統、光罩材料、光阻等全面革新。為因應此一技術轉型，本團隊建置了「多功能式極紫外光微影元件檢測服務平台」，提供光罩、光阻、反射鏡等關鍵元件的檢測服務。藉由極紫外光檢測技術之開發，以協助國內半導體產業克服 EUV 製程中材料與製程挑戰，加速先進製程技術開發。

Advanced semiconductor manufacturing has transitioned from the 193 nm ArF light source to the 13.5 nm extreme ultraviolet (EUV) era, which has been accompanied by comprehensive changes in optical systems, mask materials, photoresists. In response to this technological transformation, our team has established an extreme ultraviolet lithography component inspection platform to provide inspection services for key components such as masks, resists, and mirrors. Through the development of extreme ultraviolet inspection technologies, we aim to assist the domestic semiconductor industry in overcoming material and process challenges in EUV manufacturing, accelerating the development of advanced process technologies.

一、前言

半導體微影技術的發展從早期的 G-line (436 nm)、I-line (365 nm) 發展至 ArF (193 nm)，因為半導體製程所需的線寬越來越小，ArF 微影技術發展已逐漸慢慢接近其物理極限無法滿足現況需求，ArF 搭配浸潤式顯影與多重曝光技術，僅可使用至 7 nm 製程，隨著製程尺寸的不斷縮小，傳統的光學微影技術逐漸面臨極限，極紫外光 (extreme ultraviolet, EUV) 微影技術應運而生⁽¹⁾，先進製程與摩爾定律得以持續發展與推進。2019 年 10 月台積電宣布其領先業界導入 EUV 微影技術之 7 奈米強效版 (N7+) 製程，代表著 EUV 微影世代已經來臨。相

較於 ArF 微影技術 EUV 光波長更短，能夠製造出更精細的電路圖案，生產更先進的晶片。然而進入 EUV 微影技術不僅僅是替換光源而已，EUV 波長為 13.5 nm 已接近 soft x-ray 波段，而此波段的光很容易被大部分物質與空氣所吸收⁽²⁾，所以曝光環境只能在高真空進行，同理也無法像 ArF 193 nm 微影一樣使用穿透式光學元件，利用折射聚焦等進行光路設計，必須以反射式光學元件進行光路設計。此外，根據光學原理，1/4 波長的光程差就會產生干涉現象⁽³⁾，對於波長 13.5 nm 的光而言，其 1/4 波長等於 3.375 nm，因此光學元件平坦度要求變得十分嚴苛，只要有 1/4 波長的平坦度差就會因干涉現象造成微影結果的錯誤，同時表面粗糙度的影響也因光源的波長變短而增加。由此可知 EUV 微影是一個全面性的改變，在光源功率、環境、光學設計、光阻、光罩、光罩護膜等都是新的難題。

二、EUV 微影元件檢測服務平台

EUV 曝光機內光學元件由一系列的透鏡改為一系列的反射鏡，光罩的型態也由原先的穿透式改為反射式，使得原本的透射式光罩的製程以及檢測設備無法適用，要達成反射式 EUV 光罩首先必須針對 13.5 nm 波長進行高反射多層膜製作，最後才在最外層製作電路圖案的吸收層，因此 EUV 光罩缺陷除了傳統穿透式光罩的缺陷種類外，還有多層膜製作中產生的缺陷需要檢測，例如圖 1 所示⁽⁴⁾。

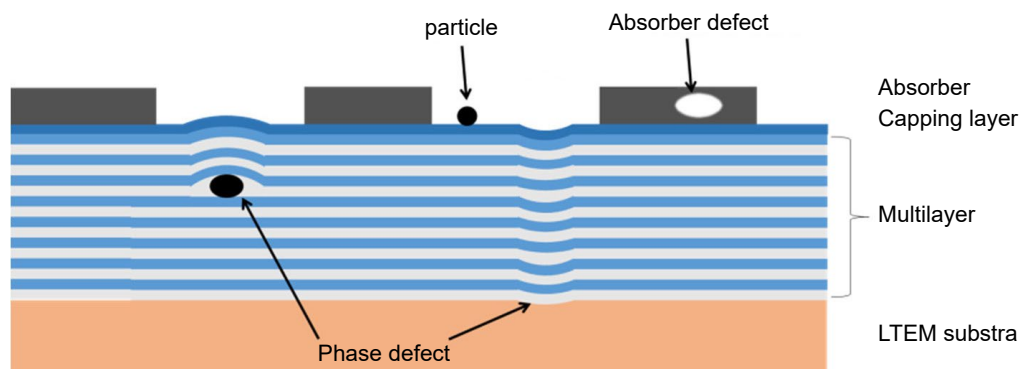


圖 1. EUV 光罩結構與可能之缺陷。

EUV 光罩的反射率越高，表示越多的 EUV 光能夠被反射到晶圓上，從而提高 EUV 曝光的效率。空白光罩是指未製作吸收層之前，具有高反射多層膜的光罩基板，EUV 高反射膜通常以 Mo/Si 多層膜方式製作，藉由每層薄膜厚度控制在 1/4 波長使多層膜堆產生建設性干涉，達到特定波長與特定角度具有高反射率，Mo/Si 多層膜理論反射率最高可達約 75%⁽⁵⁾，EUV 波長為 13.5 nm，故多層膜每層厚度介於 3–4 nm 之間，因此薄膜製程厚度與粗糙度控制極為重要，些許的厚度誤差將造成反射率快速的下降或反射率峰值偏移，此外，多層膜間的交互擴散在此厚度等級所造成的反射率下降也十分巨大⁽⁶⁾，因此反射率為空白光罩重要性能指標之一，此外，由反射率量測結果，搭配軟體分析了解多層膜厚度變化以及材料光學特性⁽⁷⁾，有助如反射膜製作與開發，唯有薄膜厚度準確與粗糙度降低才能使其反射率越接近理論值。

EUV 光罩為以反射鏡為基底於上覆蓋吸收層，並於吸收層上繪製出所需之圖案，故除光罩圖案正確性以外，多層膜鍍製時所產生的缺陷 (phase defect)、表面缺陷、顆粒等，皆會影響後續曝光之正確性。EUV 光罩檢測方式有：電子束檢測⁽⁸⁾、AFM 探針掃描⁽⁹⁾、光學檢測⁽¹⁰⁾ 等方式，其中電子束與 AFM 檢測雖解析度高，但檢測速度過慢，且僅能進行光罩表面缺陷檢測，難以深入多層膜檢測結構深層缺陷，由光罩之光學缺陷檢測技術發展來看，強度足夠的 EUV 光源取得不易，通常以 266 nm 光源進行檢測，因其光學物理極限僅可滿足半間距 32 nm 之檢測，若採用 EUV 光源，可進一步提升解析度，以檢測長波長無法偵測之缺陷。本系統採用光學檢測方式，使用同步輻射 EUV 光源，以期達到速度、解析度皆佳之光罩分析，並可檢測多層膜缺陷等功能。

EUV 光阻材料的發展是 EUV 微影技術的重要材料，其性能直接影響了 EUV 曝光的精度和效率。相較於傳統曝光，EUV 光源強度低曝光時間較久，EUV 光阻需提高感光度以提高曝光效率。此外，EUV 光源波長短，散射與繞射對 EUV 光阻影響更為嚴重^(11, 12)，散射與繞射使 EUV 光在光阻中擴散產生額外曝光，導致曝光圖像邊緣模糊，解析度降低甚至線條變形等缺陷。因此 EUV 光阻必須具有更高的分辨率，以獲得更精細的曝光圖案。故本系統利用干涉微影方式進行 EUV 光阻曝光，藉由實際曝光以評估以下之光阻特性：

- 靈敏度：EUV 光阻對 EUV 光的敏感度，通常用感光曲線 (sensitivity curve) 表示。感光曲線的斜率越大，表示 EUV 光阻的靈敏度越高。
- 分辨率：EUV 光阻能夠再現的最小圖案尺寸。
- 曝光寬度：EUV 光阻能夠曝光出的圖案尺寸範圍。
- 邊緣粗糙度 (line edge roughness)：EUV 光阻曝光後的圖案邊緣的粗糙程度。邊緣粗糙度會影響圖案的尺寸精度和線寬均勻性。
- 側壁粗糙度 (sidewall roughness)：EUV 光阻曝光後的圖案側壁的粗糙程度。側壁粗糙度會影響圖案的導電性。
- 缺陷密度 (defect density)：EUV 光阻曝光後的圖案中缺陷的密度。缺陷會影響圖案的良率。

三、系統設計

本系統架設於同步輻射 TLS 加速器，利用同步輻射光源 EUV 波段進行反射率、光罩檢測以及光阻干涉微影製程，系統外觀如圖 2。本系統分為四個部分：壓差抽氣系統 (differential pumping)、檢測腔體、傳輸腔體、防震調整機架。壓差抽氣系統配置於檢測腔體前端，以波紋管及五通真空管件構成，波紋管銜接同步輻射實驗站，壓差抽氣系統以渦輪分子幫浦作為高真空幫浦，透過腔體烘烤使真空度達到 10^{-9} torr，與檢測腔體銜接部分設置直徑 1 mm 孔洞，使得光束線可以通過孔洞進入檢測腔體，同時可降低檢測腔體真空度需求，藉由壓差抽氣系統設置，檢測腔體真空度只需達到 10^{-6} torr，即可開啟光束線閘閥而不影響同步輻射光束線真空度。

檢測腔體內載台為六軸高真空移動平台 (圖 3)，方向分別為 X、Y、Z 軸以及分別沿著三軸的旋轉：Pitch、Roll、Yaw 軸，並配有超高真空絕對式光學尺，各軸行程與解析度如表 1，藉此可完成光罩檢測與干涉微影之 XY mapping 與多角度反射率量測，樣品載台為 6 吋靜電吸盤，可確保樣品平整性，提高量測穩定度。光罩檢測與光阻曝光用之干涉微影模組安裝於側開門上，並安裝於線性傳輸桿不同位置 (圖 4)，可於需要使用該項檢測功能時，將檢測模

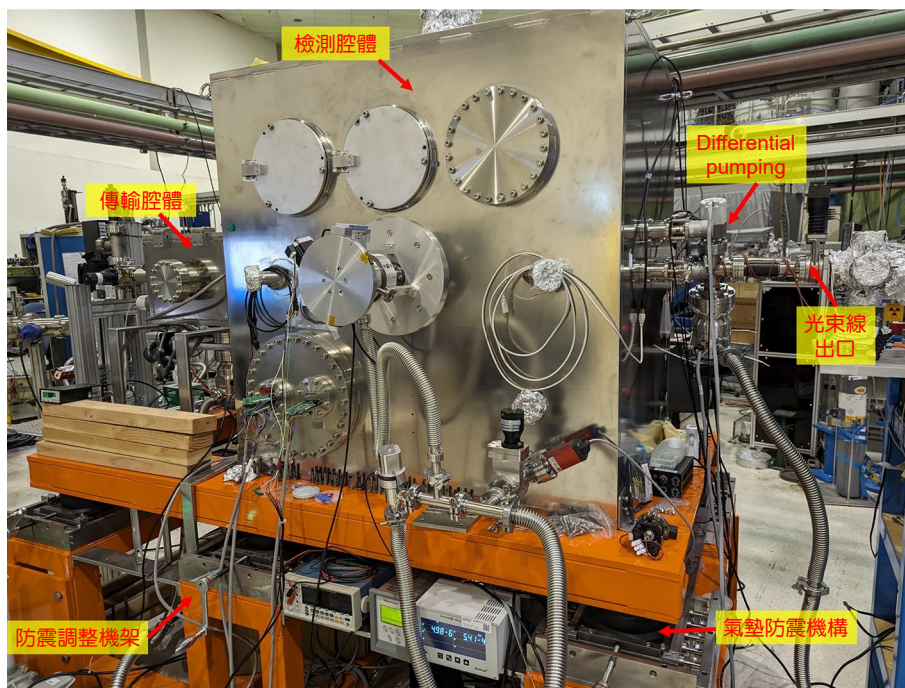


圖 2. 多功能式 EUV 微影元件檢測設備發展實驗站。

組推入置於光束線光路上，藉由線性傳輸桿將模組推入不同位置以切換不同檢測功能。傳輸腔體與檢測腔體以閘閥隔開，取放樣品可於傳輸腔體進行，抽至高真空再開啟閘閥將樣品送至檢測腔體。防震調整機架於前中後共設置六個左右調整機構，四個角落設置螺旋升降機構，可使系統與光束線銜接後進行腔體與光束線平行度微調，六個左右調整機構上方氣壓防震墊以承載傳輸與檢測腔體，單一氣壓防震墊荷重可達 800 公斤，自然頻率約 2.5—6 Hz。

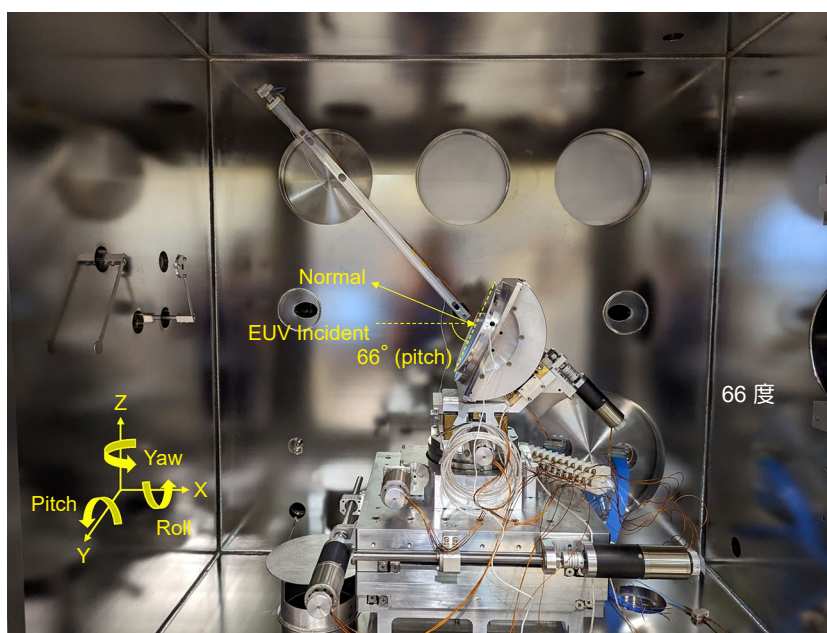


圖 3. 檢測腔體內載台為六軸高真空移動平台，Pitch 軸旋轉至 66 度，detector 旋轉至反射角 132 度時。

表 1. 六軸高真空移動平台規格。

軸向	行程／解析度
Pitch	行程 $-2 \sim +92^\circ$ ，解析度 $< 0.001^\circ$
Roll	行程 $\pm 3^\circ$ ，解析度 $< 0.001^\circ$
Yaw	行程 $+100^\circ \sim -10^\circ$ ，解析度 $< 0.01^\circ$
X	行程 $\pm 100 \text{ mm}$ ，解析度 $< 0.1 \mu\text{m}$
Y	行程 $\pm 100 \text{ mm}$ ，解析度 $< 0.1 \mu\text{m}$
Z	行程 $\pm 25 \text{ mm}$ ，解析度 $< 0.05 \mu\text{m}$

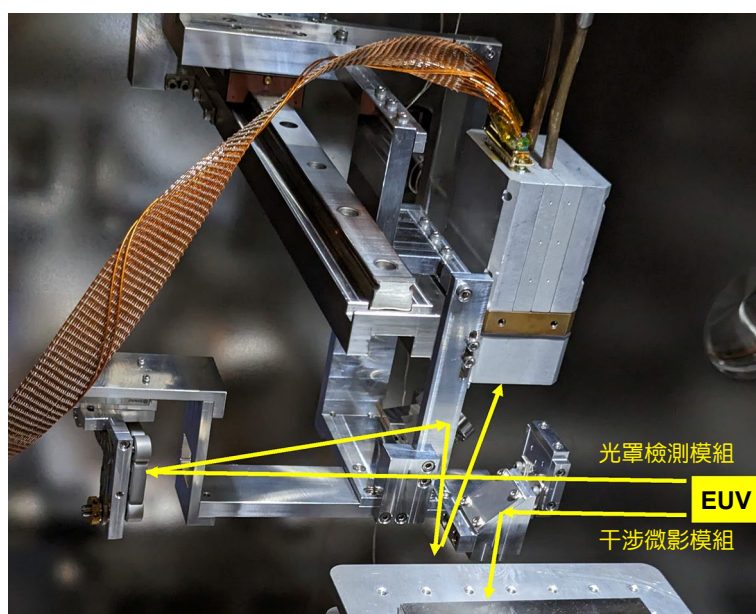


圖 4. 光罩檢測與光阻曝光用干涉微影模組之整合光路構造。

四、反射率檢測

反射率檢測部分其中 EUV 光強度以光電二極體 (Opto Diode Corp, AXUV100G) 照光產生之光電流大小作為光強度判斷，AXUV100 光電二極體 EUV-UV 響應如圖 5⁽¹³⁾。光電流訊號以高精度之 KEITHLEY 6485 picoammeter 進行量測。圖 6 為以該系統量測 6° EUV 高反射鏡在氬氣環境下 300°C 熱處理前後之多角度反射率圖。藉由反射率量測可發現熱處理後反射光譜波形之飄移與反射率值下降，其原因推測為多層膜間交互擴散造成，可進一步利用 TEM 分析確認。此外，EUV 微影技術中，光罩為其不可或缺的光學元件，然而斜入射的 EUV 光、吸收層厚度和入射角不均勻的鏡面反射等因素結合在一起，會產生光罩所引發的成像像差，即光罩三維 (mask 3D, M3D) 效應⁽¹⁴⁾。在 EUV 二元強度光罩 (binary intensity mask, BIM) 中，使用高消光係數 k 和折射係數 n 接近 1 的高光罩吸收材料為緩解 M3D 效應的方法之一。新型 EUV 吸收材料主要是根據其在 EUV 波長範圍內的光學特性來選擇的，此項特性則可由複折射率來描述。虛部 k 或消光係數決定衰減程度，實部 n 或折射係數則決定了相位速度。為減少光罩吸收層高度相關的 M3D 效應，需要一種能吸收更多 EUV 且 k 值較高的材料⁽¹⁴⁾。最佳焦距偏移是由真空和吸收層界面上折射係數 n 不匹配導致的相位

失真所引起，因此 n 接近於 1 的材料是首選⁽¹⁵⁾。由於在 EUV 波段下許多材料的光學常數仍未知，使用精確的實驗方式以決定光學常數顯得格外重要。波長相依性的光學常數與半經驗法所決定的原子散射因數 (atomic scattering factor) 具有相關聯性，其關係方程式如下所描述^(16, 17)，而其中的重要材料參數 3/4 密度，則可利用反射率實驗來決定。

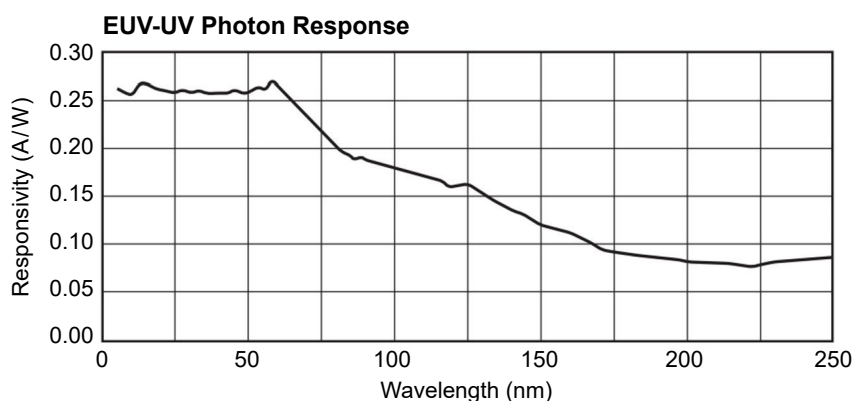


圖 5. Opto Diode Corp AXUV100 光電二極體 EUV-UV 響應頻譜。

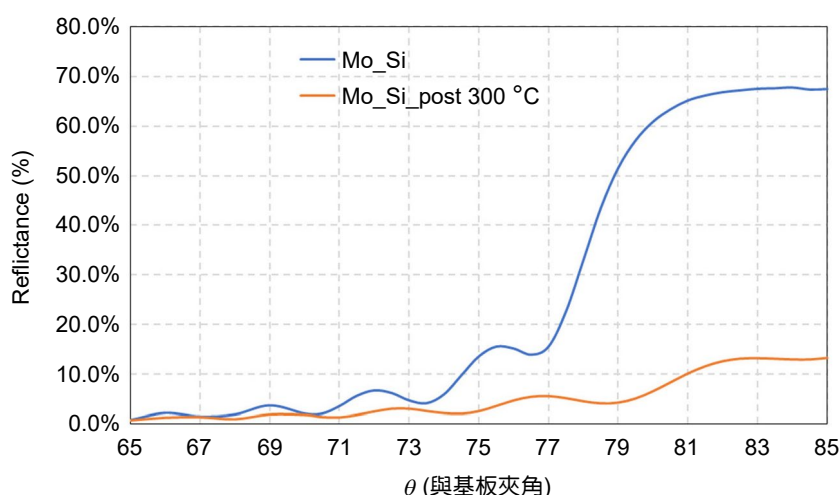


圖 6. EUV 高反射鏡在氬氣環境下 300 °C 熱處理前後之多角度反射率。

$$\tilde{n}(\lambda) = n(\lambda) - ik(\lambda) = 1 - \frac{r_0}{2\pi} \lambda^2 N_A \sum_j \frac{w_j}{M_j} \rho_m [f_{1,j}(\lambda) - if_{2,j}(\lambda)]$$

其中 r_0 為古典電子半徑， λ 為波長， N_A 為亞佛加厥常數 (Avogadro constant)， ρ_m 為材料密度， w_j 與 M_j 分別為第 j 元素的重量百分比和莫耳質量， $f_{1,j}$ 和 $f_{2,j}$ 分別為第 j 元素的前向原子散射因數 (forward atomic scattering factor) 之實部和虛部項。透過建立層狀結構模型並經由該關係式的計算與 EUV 反射率圖譜進行擬合，由此可決定吸收層的光學常數。以 RuTa 合金的吸收層為例⁽¹⁸⁾，如圖 7，顯示在 EUV 波段的光反射率實驗與計算擬合圖譜，提高 Ta 的含量則可使 n 值提高至更接近 1，而同時亦有效地增加 k 值。因此，光罩吸收層開發者能透過 EUV 反射率量測方法找到一種既能減少 EUV 相位失真，又能在減少吸收層厚度的情況下保持良好成像對比度的材料。

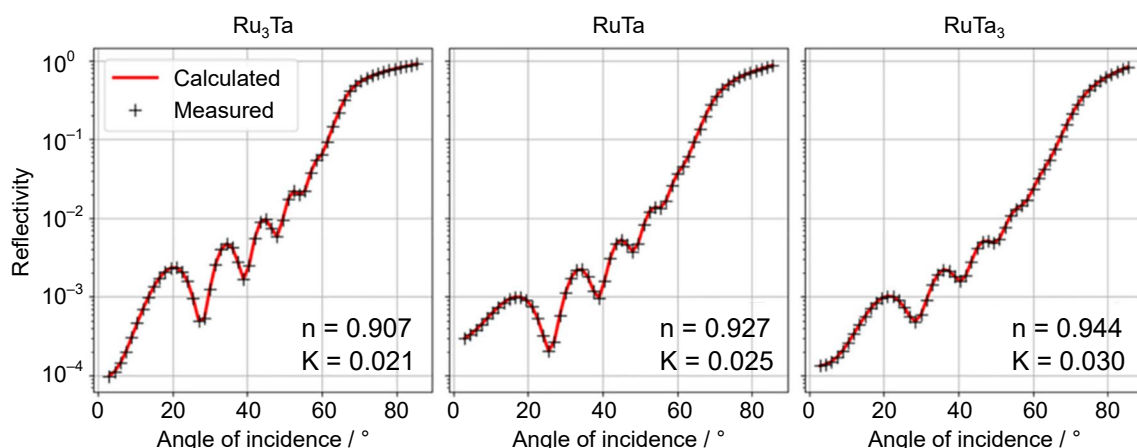


圖 7. 三種不同的 RuTa 比例合金於 EUV 波段下的光反射率圖譜與計算擬合圖⁽¹⁸⁾，其中入射角為相對於樣品法線方向的角度。

五、光罩檢測

圖案光罩檢測則採用非成像式極紫外光散射顯微鏡 (coherent EUV scatterometry microscope, CSM) 技術進行量測⁽¹⁹⁾，系統架構如圖 4，該架構各組件示意圖如圖 8，包含針孔、EUV 多層膜凹面鏡、EUV 多層膜平面鏡以及 CCD 影像感測器(teledyne princeton instruments PI-MTE3 2048B)，EUV 光源首先通過一個針孔，以減小其直徑，接著透過凹面鏡進一步聚焦，之後通過平面鏡以 6 度角入射到光罩上，此入射角度可以提高繞射效率並減少由於吸收層高度所引起的影子效應。最後，在用 CCD 接收光罩上的周期性及非周期性圖案的同調繞射訊號，並透過結合輸入與輸出的演算法進行影像重建。此算法利用傅利葉光學分析將 CCD 所收集的同調繞射訊號轉化成光罩上的圖案。假如光罩的線寬存在缺陷，這些缺陷會通過繞射訊號顯示出來。在沒有缺陷的情況下，CCD 接收到的是清晰的繞射圖案；相反，如果有缺陷存在，將會接收到由缺陷引起的額外雜訊，如圖 9，此檢測系統與傳統的透鏡成像顯微鏡不同，同調散射顯微鏡使用了反射鏡來設計光路，並直接透過感光元件來接收繞射信號。此設計有效地避免了像差，因此提升了影像清晰度。因為光柵屬於多狹縫繞射，這些平行的狹縫各自作為獨立光源，對入射光進行繞射。這些狹縫發出的繞射波在屏幕上彼此相遇，產生互相干涉，形成明亮與暗淡相間的條紋。這種繞射和干涉的結合作用使得屏幕上呈現出一系列的繞射圖案。以下為其公式：

$$d(\sin \theta_m + \sin \theta_i) = p\lambda$$

d 是光柵週期長度， θ_m 為繞射角度， θ_i 為入射光的角度， p 為繞射級數， λ 為光源的波長。

在多狹縫繞射中，屏幕中央的明亮條紋 (也就是零階繞射訊號) 通常是最亮的，而隨著條紋階數增加，其亮度逐漸降低。因此多狹縫繞射的原理對於光罩缺陷檢測相當重要，因為它能夠分析光罩上微小結構的尺寸，藉此提供對微結構缺陷的詳細資訊。

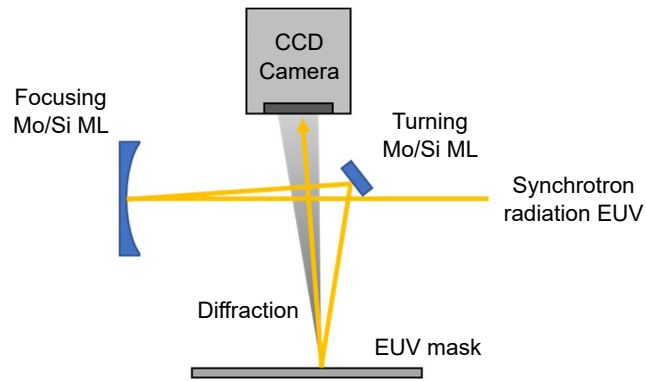


圖 8. 光罩檢測模組光路示意圖。

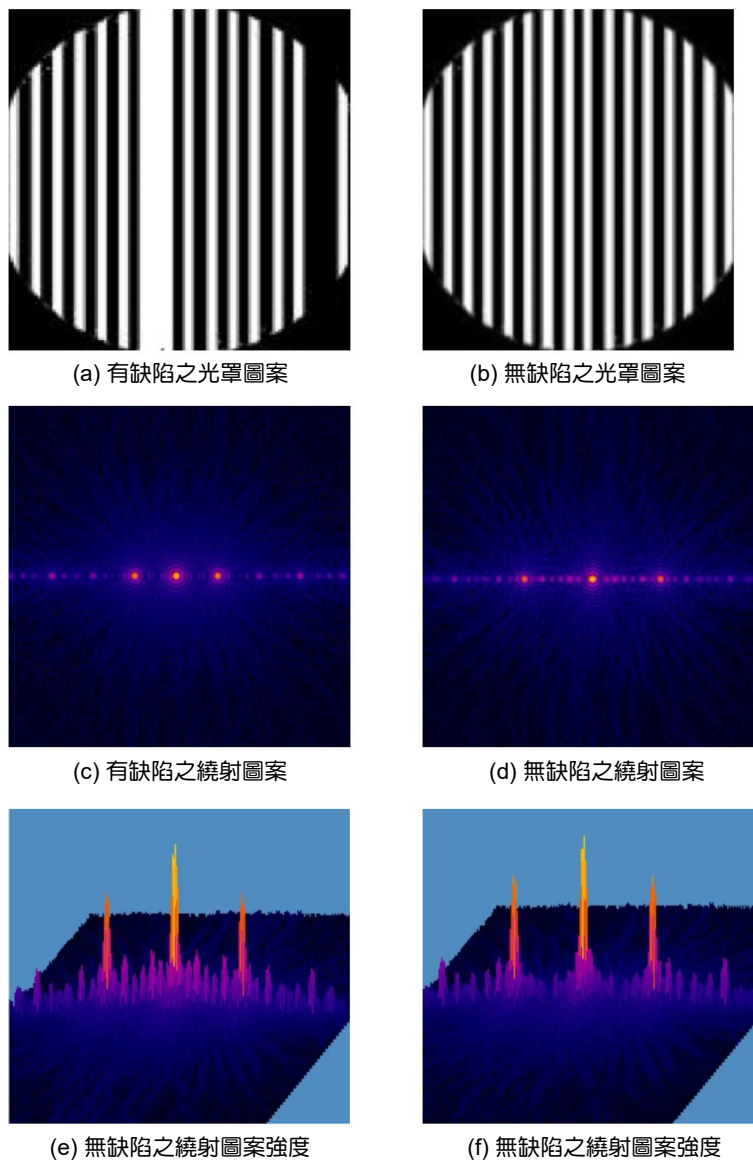


圖 9. 光罩圖案繞射模擬圖：(a)、(b) 分別為有缺陷與無缺陷之光罩圖案，(c)、(d) 分別為有缺陷與無缺陷之繞射圖案，(e)、(f) 為繞射圖案轉換為強度分布。

六、光阻特性評估

光阻評估之干涉微影採用 **Achromatic Talbot Lithography (ATL)** 方式曝光^(20, 21)，EUV 光束通過周期性結構，然後於晶圓上產生干涉圖案。不同於應用單波長的傳統 Talbot 成像，使用較大頻寬光源的 ATL，其不同波長的 EUV 光產生之自成像會於縱向重疊，進而產生類似駐波的效應，從而大幅提升其曝光景深，克服 EUV 光的色差問題。ATL 其可快速曝光大面積週期性結構的特性適合應用於需要大量重複圖案之元件製作上，如記憶體、光電元件等，並因其解析度只受繞射極限影響，選擇足夠短之波長如 EUV 即可應用於先進半導體製程節點。ATL 架構示意圖如圖 10， Z_A 為 Achromatic Talbot Distance，表示其開始產生駐波成像的距離，由 EUV 光的波長和週期性結構的週期決定，若以頻寬 4% 同步輻射光源照射 $100 \times 100 \mu\text{m}^2$ 之 ATL mask，並且光柵週期為 200 nm，其產生 Z_A (Achromatic Talbot Distance) 為 $148.1 \mu\text{m}$ ，其餘相關參數如表 2，根據計算結果可知 ATL mask 與基板距離非常接近，因此保持兩者準確距離與良好平行度十分重要。本系統先將水平之 EUV 光源經 45 度平面反射鏡改變光路為垂直方向，便於 XY 移動平台上進行不同樣品或不同位置曝光，整

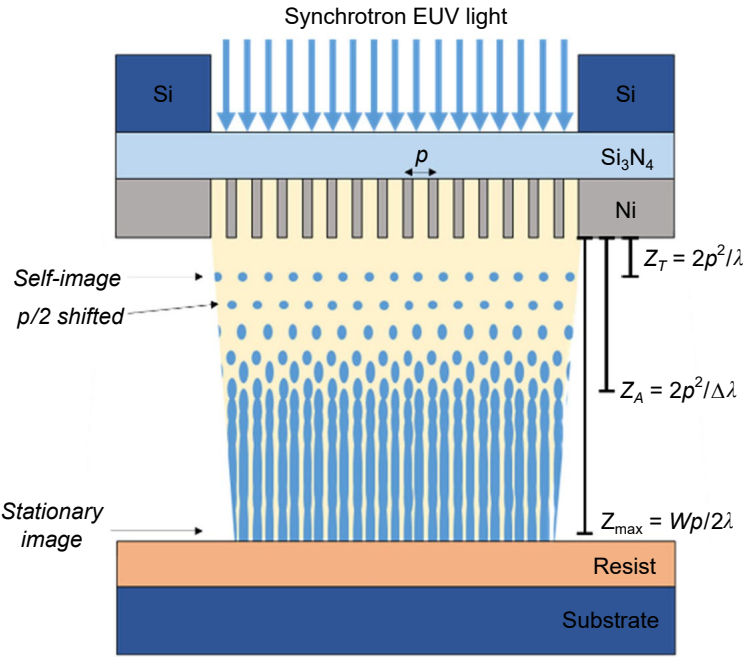


圖 10. Achromatic Talbot lithography 架構示意圖。

表 2. 以同步輻射為光源， $100 \times 100 \mu\text{m}^2$ ATL mask, $p = 200 \text{ nm}$ 計算 Talbot lithography 距離參數。

Parameter	Equation	Value
Illumination wavelength	λ	13.5 nm
Spectral bandwidth	$\Delta\lambda/\lambda$	4%
Monochromatic Talbot distance	$Z_T = 2p^2/\lambda$	5.9 m
Achromatic Talbot distance	$Z_A = 2p^2/\Delta\lambda$	148.1 m
Maximum distance	$Z_{\text{max}} = Wp/2\lambda$	740.7 m

合 45 度平面反射鏡與 ATL mask 治具 3D 圖如圖 11，ATL mask 為穿透式光罩，本次測試使用之 ATL mask 主要於 100 nm 厚的懸空 Si_3N_4 上製作 Ni 光柵圖案，如圖 12 所示。ATL mask 治具設計三點水平量測點，用來定義治具與樣品距離，藉由調整六軸樣品載台使三點至樣品相同距離以達到 mask 與樣品之間良好的平行度，同時也避免 ATL mask 破裂。圖 13 為直徑 100 nm 點陣列與線寬 60 nm 週期性結構 (週期皆為 200 nm) 之 ATL mask 圖案與其進行曝光後結果。

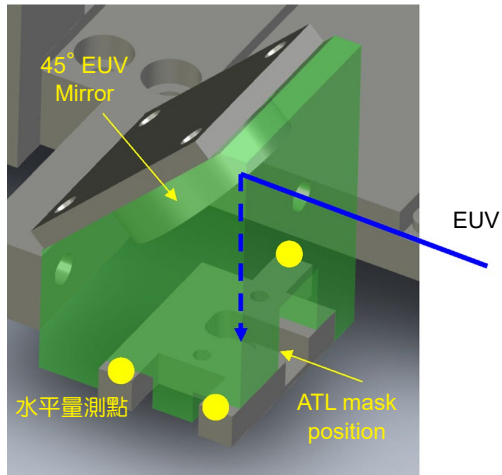


圖 11. ATL mask 治具 3D 圖說明。

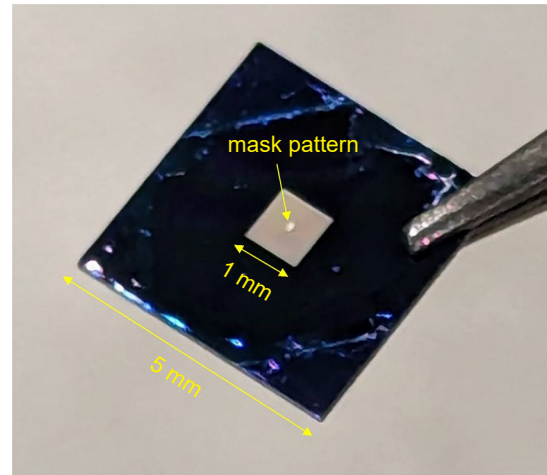


圖 12. ATL 光罩樣品。

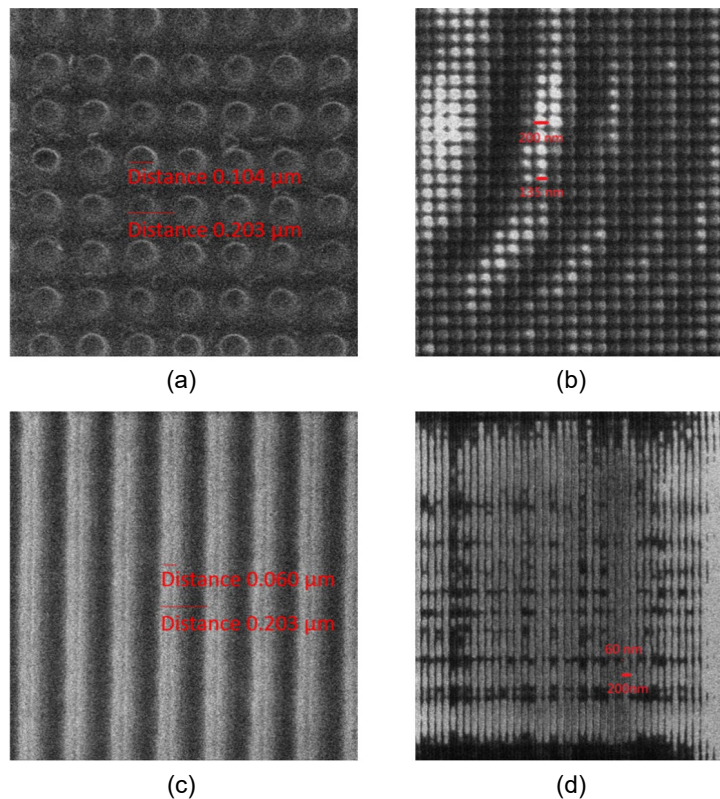


圖 13. (a) 直徑 60 nm，週期 200 nm 點陣列光罩與 (b) 使用該光罩曝光後之樣品氦離子束顯微鏡照片。(c) 線寬 60 nm，週期 200 nm 結構光罩與 (d) 使用該光罩曝光後之樣品氦離子束顯微鏡照片。

七、結論

本系統「多功能式極紫外光微影元件檢測服務平台」為執行科技部「前瞻基礎建設—數位建設突破半導體物理極限與鏈結 AI 世代」計畫所建置，本平台可進行 $0-85^\circ$ 絕對反射率量測，移動範圍 100 cm^2 的干涉微影曝光，以及 CSM 圖案光罩檢測技術。EUV 微影元件檢測是 EUV 微影技術發展的重要部分，通過對 EUV 光罩、光阻、反射鏡等關鍵元件進行檢測，確保 EUV 微影工藝的穩定性和可靠性，從而提高 EUV 微影製程的良率和產率，以及進一步開發下世代所需之關鍵材料與組件為本計畫之重要目標，此外，更希望藉由檢測服務平台建立，可協助相國內關產業升級降低研發門檻，與協助學研界先進製程技術之開發。

參考文獻

1. K. Ronse, *Micro and Nano Engineering*, **23** 100263 (2024).
2. F. R. Powell and T. A. Johnson, "Filter windows for EUV lithography", *Proc. of Annual International Symposium on Microlithography*, **4343**, 585 (2001).
3. 李正中, 薄膜光學與鍍膜技術, 新北市: 藝軒 (2012).
4. A. Rastegar and V. Jindal, "EUV Mask Defects and Their Removal", *Proc. of SPIE* **8352** 83520W-1 (2012).
5. E. Louis et al., *Progress in Surface Science*, **86**, 255 (2011).
6. S. Yulin, N. Benoit, T. Feigl, N. Kaiser, *Microelectronic Engineering*, **83** (4-9), 692 (2006).
7. S. M. Giday et al., "Exploring EUV near absorption edge optical constants for enhanced and sensitive grazing incidence reflectivity", *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, September 26, **8861**, 886111-1 (2013).
8. R. Hirano et al., *Journal of Micro/ Nanolithography, MEMS, and MOEMS*, **13** (1), 013009 (2014).
9. Ardavan Zandiatashbar et al., *Proc. of SPIE Photomask Technology*, **96351A** (2015).
10. Ted Liang et al., *Proc. of SPIE Advanced Lithography*, **1132310** (2012).
11. D. G. Stearns; D. P. Gaines; D. W. Sweeney; E. M. Gullikson, *Journal of Applied Physics*, **84** (2), 1003 (1998).
12. A. Erdmann et al., *Journal of Modern Optics*, **58**, 480(2011).
13. Please refer to the website:
<https://optodiode.com/photodiodes-axuv-detectors.html>
14. A. Erdmann, et al., *Advanced Optical Technologies*, **6** (3-4), 187 (2017).
15. V. Philipsen et al., *Proc. of the EUVL Symposium*, **24-26** (2016).
16. M. Hosoya et al., *Japanese Journal of Applied Physics*, **47**, 4898 (2008).
17. V. Luong, V. Philipsen, E. Hendrickx, K. Opsomer, C. Detavernier, C. Laubis, F. Scholze, and M. Heyns, *Applied Sciences*, **8** (4), 521 (2018).
18. M. Wu et al., *Micro and Nano Engineering*, **12**, 100089 (2021).
19. T. Harada et al., *Journal of Vacuum Science & Technology B*, **27** (6), 3203 (2009).
20. D. Kazazis, L. Tseng, Y. Ekinici, *Journal of Vacuum Science & Technology B*, **36**, 06J501 (2018).
21. H. H. Solak, and Y. Ekinici, *Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures Processing, Measurement, and Phenomena*, **23** (6), 2705 (2005).

作者簡介

卓文浩先生為國立中央大學光電科學與工程博士，現為國家實驗研究院台灣儀器科技研究中心副研究員。

Wen-Hao Cho received his Ph.D in the Department of Optics and Photonics from National Center University. He is currently an Associate Researcher at Taiwan Instrument Research Institute, NARLabs.

吳品鈞先生為國立陽明交通大學電子物理系博士，現為國家同步輻射研究中心副研究員。

Pin-Jiun Wu received his Ph.D. in the Department of Electrophysics from National Yang Ming Chiao Tung University. He is currently an Associate Researcher at National Synchrotron Radiation Research Center.

李建霖先生為國立台灣大學電子工程學研究所博士，現為國立台灣大學電機工程學系博士後研究員。

Chien-Lin Lee received his Ph.D. in the Graduate Institute of Electronics Engineering from National Taiwan University. He is currently a Postdoctoral Fellow in the Department of Electrical Engineering at National Taiwan University.

黃羿誌先生為國立台灣大學工程科學及海洋工程碩士，現為國立台灣大學工程科學與海洋工程學系奈米光子與奈米電子實驗室研究助理。

I-Chih Huang received his M.S. in the Department of Engineering Science and Ocean Engineering from the National Taiwan University. He is currently a Research Assistant in Nanophotonics and Nanoelectronics Lab at National Taiwan University.

李昭德先生為國立台灣大學材料科學與工程學系博士，現為國家實驗研究院台灣儀器科技研究中心研究員。

Chao-Te Lee received his Ph.D. in the Department of Materials Science and Engineering from the National Taiwan University. He is currently a Research Fellow at Taiwan Instrument Research Institute, NARLabs.

蔡坤諭先生為史丹福大學航太工程與電機工程博士，現為國立台灣大學電機系副教授。

Kuen-Yu Tsai received his Ph.D. in Aeronautics & Astronautics Department and Electrical Engineering from Stanford University, USA. He is currently an Associate Professor in the Department of Electrical Engineering at National Taiwan University.

李佳翰先生為美國普渡大學電機與資訊工程學博士，現為國立台灣大學工程科學及海洋工程學系教授。

Jia-Han Li received his Ph.D. in Electrical and Computer Engineering from the Purdue University. He is currently a Professor in the Department of Engineering Science and Ocean Engineering at National Taiwan University.