

針對次微米級高深寬比微結構關鍵尺寸量測之創新式深紫外光波長掃描式散射術與系統

Novel DUV Wavelength-scanning Scatterometry and System for Sub-micron Scale High-aspect-ratio Microstructures

楊福生、林元琦、吳旻儒、洪彥鴻、郭柏辰、陳亮嘉

Fu-Sheng Yang, Yuan-Ci Lin, Min-Ru Wu, Yen-Hung Hung, Bo-Chen Kuo, Liang-Chia Chen

隨著半導體 3D 封裝技術的發展，進而使高深寬比 RDL 與 TSV 結構已經成為各層間關鍵訊號傳導通道，進而使市場上亟需一套完整的量測流程用於該類微結構之各項關鍵尺寸量測。本研究提出了一種結合 DUV 光譜式反射術與波長掃描瞳面影像散射術的混合量測系統來解決高深寬比結構帶來的挑戰。經與 FIB/SEM 量測結果相比，本團隊所提出的混合式量測策略於量測各項關鍵尺寸時的量測偏差皆小於 3%，確認本系統具備量測此類高深寬比微結構的量測能力。

With the development of semiconductor 3D packaging technology, high aspect ratio RDL and TSV structures have become critical signal transmission interfaces between layers. Therefore, there is an urgent demand for a comprehensive measurement technology to measure the critical dimensions of high aspect ratio structures accurately. This study proposes a hybrid metrology measurement system that combines DUV reflectometry and wavelength-scanning back focal plane image scatterometry to address the challenges posed by high aspect ratio structures. Compared to FIB/SEM measurement results, our hybrid metrology measurement result achieves a measurement bias of less than 3% for all critical dimensions, demonstrating the system's capability for measuring high aspect ratio microstructures.

一、前言

隨著先進半導體封裝製程在縮小結構之關鍵尺寸上逐漸受到物理上的限制，如何延續摩爾定律成為了一大難題。半導體製造商將先進 3D 封裝技術視為延續摩爾定律的最佳方案⁽¹⁾，如使用異質晶片垂直堆疊的 CoWoS (chip on wafer on substrate) 技術，單位面積中的晶體管密度可以大幅增加且由於不同元件間的距離減少，可以有效的提高能源使用效率。在該技

術中，又以重新分布層 (redistribution layer, RDL) 和矽穿孔 (through silicon via, TSV) 這兩種用於信號傳輸的結構最為重要⁽²⁾。由於此類結構的幾何關鍵尺寸已逐漸向次微米級與高深寬比發展，而具有高深寬比特性的微結構難以使用傳統線上光學量測技術進行精準的量測，如何準確地進行線上量測並管控這些結構的幾何尺寸成為了先進封裝產業的重要議題。儘管 CD-SEM、AFM 和 X-ray 散射術等工具能對高深寬比結構進行高精度的幾何尺寸量測^(3, 4)，但這些工具皆被其量測速度所限制，使得這些量測技術目前仍應用於離線量測中。一項快速、高效且準確的線上量測系統急需被提出供製程控制使用。

一項基於深紫外光譜式反射術量測系統的解決方案被提出⁽⁵⁾。憑藉著深紫外光在孔狀結構中具有更強的傳遞能力，入射光源可以通過次微米級開口並有效傳遞至高深寬比結構底部。相較於傳統的可見光反射術來說，深紫外光量測訊號的響應可以有效地挾帶結構底部關鍵尺寸信息⁽⁶⁾。但受限於結構上下表面返回之干涉光譜對結構深度的敏感度指數相當高，遠大於其對於橫向關鍵尺寸 (線寬、槽寬) 的敏感度，使得該技術對橫向關鍵尺寸的預測精度仍稍嫌不足。綜觀現今有能力精準量測橫向關鍵尺寸之線上量測技術，瞳面影像散射術常被用於解析週期性結構之橫向關鍵尺寸⁽⁷⁾，受益於繞射信號於橫向關鍵尺寸上具備其公式與物理模型，該技術應用於量測橫向關鍵尺寸具備相當高的準確度⁽⁸⁾。但在信號響應裡有關深度資訊的部分僅載於各個繞射階的強度量值，此量測方法對於縱向關鍵尺寸的量測敏感度相較於橫向關鍵尺寸則略顯不足。

本研究提出了一種基於深紫外光波段的光譜式反射術與近紫外光波段的瞳面影像散射術的混合型量測策略，以解決次微米級高深寬比矽質深槽結構的量測挑戰。透過瞳面影像散射術的量測數據輔助深紫外光光譜式反射術的方式，解決光譜式反射術於橫向關鍵尺寸量測上準確度不足的問題。同時我們也導入了近紫外光源於光學散射術系統中，藉由此光源正向入射於待測樣品，照明光束可以有效地傳遞進開口尺寸約 0.45 微米的次微米深槽底部並帶回結構底部關鍵尺寸的資訊，改善以往可見光式散射術無法量測高深寬比結構底部關鍵尺寸的困境。

二、量測方法

2.1 次微米級高深寬比結構之量測限制

由於次微米級高深寬比結構的幾何特性，所以光學量測系統的照明數值孔徑 (numerical aperture, NA) 設計會對光學量測訊號的信噪比具有很大的影響，如圖 1 所示。隨著微結構的深寬比提高，由於結構本身的遮蔽效應帶來的影響，只有有限入射角的照明光可以傳遞至結構底部，可抵達結構底部的入射角範圍可表示為式⁽¹⁾：

$$\tan(\theta) \leq \frac{0.5 \cdot \text{width}}{\text{depth}} \quad (1)$$

其中 θ 為量測光的入射角、width 為結構上表面的開口寬度、depth 為結構深度。而照明數值孔徑的定義為 $\text{N.A.} = \sin(\theta)$ 所以透過控制量測光的照明 N.A.，可以有效地防止照明光從物鏡高 N.A. 的區域入射並於結構中漫射，並與垂直入射垂直返回的光學訊號發生混雜。使用此方法可以有效的提高量測高深寬比結構的光學信號純淨度，使得量測光的光學使用效率獲得大幅的提升。

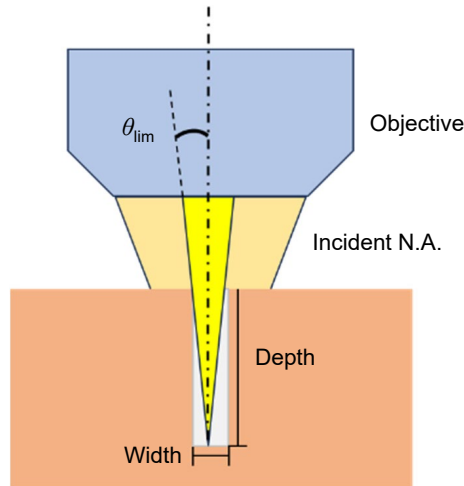


圖 1. 高深寬比結構幾何造成的遮蔽效應。

對於次微米級開口的高深寬比微結構而言，可見光波段的量測光無法有效的通過次微米級開口並傳遞到高深寬比結構底部⁽⁵⁾，如圖 2 所示。此項限制使得可見光波段的光譜式反射術難以對次微米級結構底部的關鍵尺寸進行準確量測。因此本研究採用深紫外光波段作為量測系統的工作波長，期望可以有效解決次微米級開口高深寬比結構的量測難題。

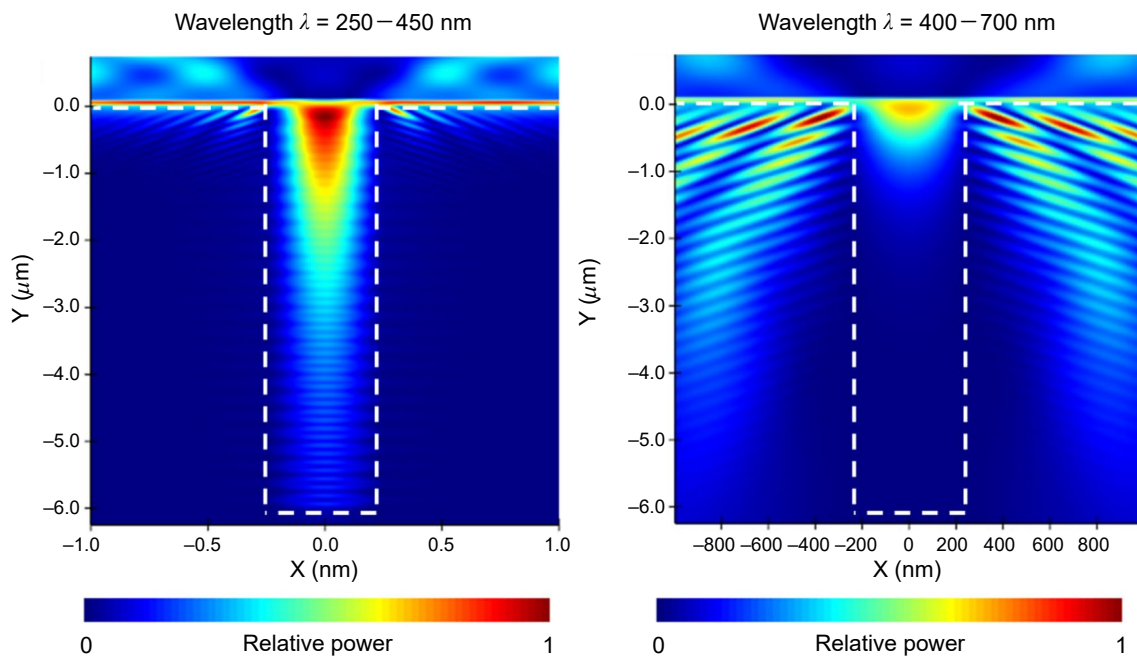


圖 2. 深紫外光波段與可見光波段於高深寬比結構內光波傳遞情形模擬。

2.2 基於模型的量測方式

由於次微米級結構的幾何尺寸尺度與光學繞射極限非常接近，難以透過影像式量測方法進行關鍵尺寸的量測。為此本研究發展了一種基於模型的非直接量測方式來突破光學繞射極

限的限制，基於模型的量測方式乃是以有限時域差分法 (finite difference time domain, FDTD) 所建立的電磁模擬模型為基礎。透過電磁模擬建立模擬量測訊號資料庫，並使用資料庫搜尋法將實際量測訊號與電磁模擬訊號進行配對⁽⁹⁾，進而求解出量測結構的關鍵尺寸，此量測流程如圖 3 所示。

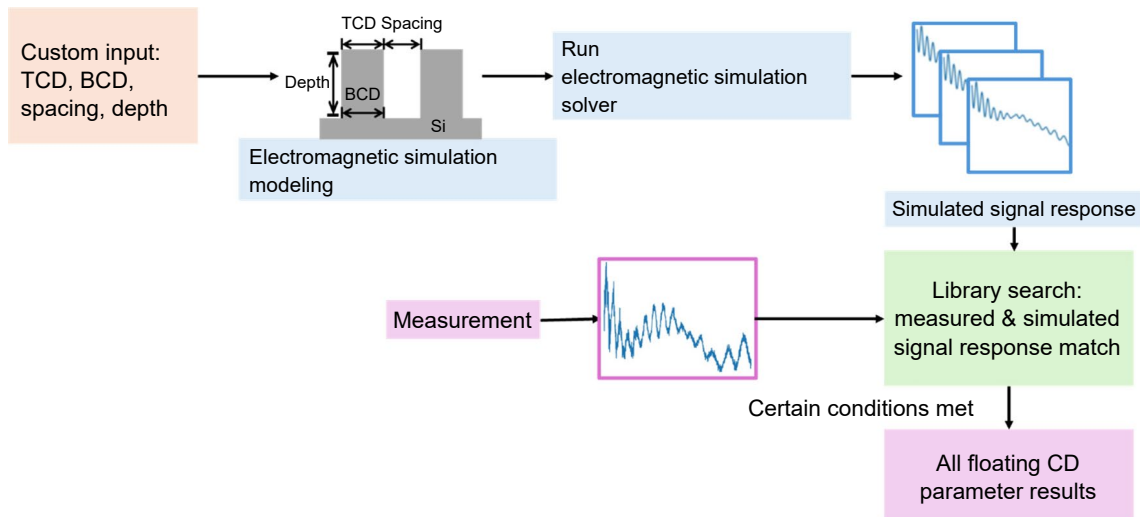


圖 3. 基於模型的量測方式量測流程。

在進行量測訊號與模擬訊號配對時，可透過最小平方方法演算法來計算量測訊號與模擬訊號的相似程度，如式 (2) 所示：

$$\chi^2 = \frac{1}{N} \left[y_i^{\text{exp}} - y^{\text{sim}}(x_i, a) \right]^2 \quad (2)$$

其中， N 為量測訊號之取樣點數， y_i^{exp} 代表實驗量測到的訊號，以一維陣列表示。

$y^{\text{sim}}(x_i, a)$ 為使用有限時域差分法生成的電磁模擬訊號，其中 x_i 為光學系統的量測條件 (如波長、照明 N.A.、偏極態等)， a 則是電磁模擬模型中的微結構的關鍵尺寸 (如 depth、TCD、BCD 和 spacing 等)。透過將實驗量測訊號與電磁模擬資料庫中的每一筆模擬資料進行配對，可以獲得此資料庫中 χ^2 的最小值。當 χ^2 為最小值時，可經由此最佳擬合結果的模擬結構參數資訊獲得量測樣品關鍵尺寸之最佳解 $a_{\min}$ 。

2.3 量測原理

由於本研究將光譜式反射術與波長掃描瞳面影像散射術結合應用於關鍵尺寸求解模型中，並透過混合式量測策略提高關鍵尺寸的量測準確度。在本節中將會針對兩種光學量測訊號分別進行原理說明。

在光譜式反射術中，透過觀察實驗得到的光譜訊號可以發現此訊號為基於結構深度做頻率調製的餘弦訊號，由於該訊號本質上是由結構上表面反射光與結構底部反射光間的雙光束干涉訊號，如圖 4 所示。

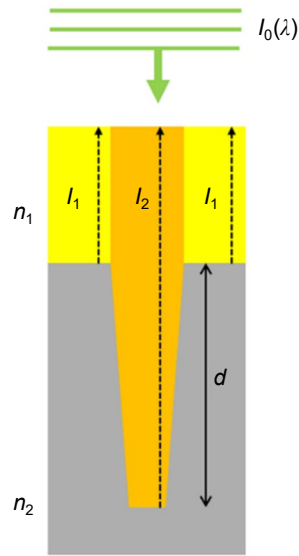


圖 4. 微結構段差模型與其反射行為。

在考慮正向入射且光源為強度隨波長變化的寬頻平面波條件下，可以將光源強度假設為 $I_0(\lambda)$ 。由 Fresnel Equation 可知在此模型中，微結構基板的反射率可以表示為式 (3)。

$$R(\lambda) = \left| \frac{n_1(\lambda) - n_2(\lambda)}{n_1(\lambda) + n_2(\lambda)} \right|^2 \quad (3)$$

其中 $n_1(\lambda)$ 與 $n_2(\lambda)$ 分別為空氣與結構基板之折射率，此時干涉光譜強度訊號可以表示為式 (4)，且此干涉訊號的強度會受到結構深度 d 與波長 λ 調製如式 (5) 所示。

$$I_{12}(\lambda) = I_1(\lambda) + I_2(\lambda) + 2\sqrt{I_1(\lambda)I_2(\lambda)} \cos(\Delta\phi) \quad (4)$$

$$\Delta\phi = 2 \cdot \frac{2\pi}{\lambda} \cdot d \quad (5)$$

其中 I_1 與 I_2 分別代表來自量測結構上表面與量測結構下表面反射光的強度，且不同表面的反射光強與照明光束的面積比例具有相關性，如式 (6) 與式 (7) 所示。

$$I_1(\lambda) = I_0(\lambda)R(\lambda)A_{top} \quad (6)$$

$$I_2(\lambda) = I_0(\lambda)R(\lambda)\eta(\lambda)A_{bottom} \quad (7)$$

此外，由結構底部反射的光強訊號需要額外乘上一隨波長變化的消逝函數 $\eta(\lambda)$ 。由於不同材料與不同的幾何關鍵尺寸都會影響光波在結構中傳遞的穿透與吸收性質，所以使用電磁模擬可以更加準確的計算由結構返回的雙反射光束間的干涉訊號。透過此物理模型的推導，我們可以得知反射光譜干涉訊號對待測樣品的深度具有較高的敏感度。

在波長掃描瞳面影像散射術中，由於矽穿孔 (TSV) 與訊號重新分布層 (RDL) 均為周期性結構，所以本團隊將量測結構視為一種近似於週期性反射式光柵的結構。自量測結構底部

的反射光通過量測結構表面的次微米級開口時，此光束會由於結構開口尺度接近系統工作波長而產生繞射現象。由於量測系統的照明光點會一次性地覆蓋多個高深寬比微結構，所以在光學系統的瞳面影像中可以觀察到近似於多狹縫繞射的光學訊號。此光學訊號的強度分布與角度資訊將夾帶著量測結構的橫向關鍵尺寸資訊。

本研究將不同波長的瞳面影像訊號中的光強分布資訊與繞射角度資訊與電磁模擬資料庫中的模擬訊號進行配對，並進行結構關鍵尺寸的重建與量測。此量測方法如圖 5 所示。

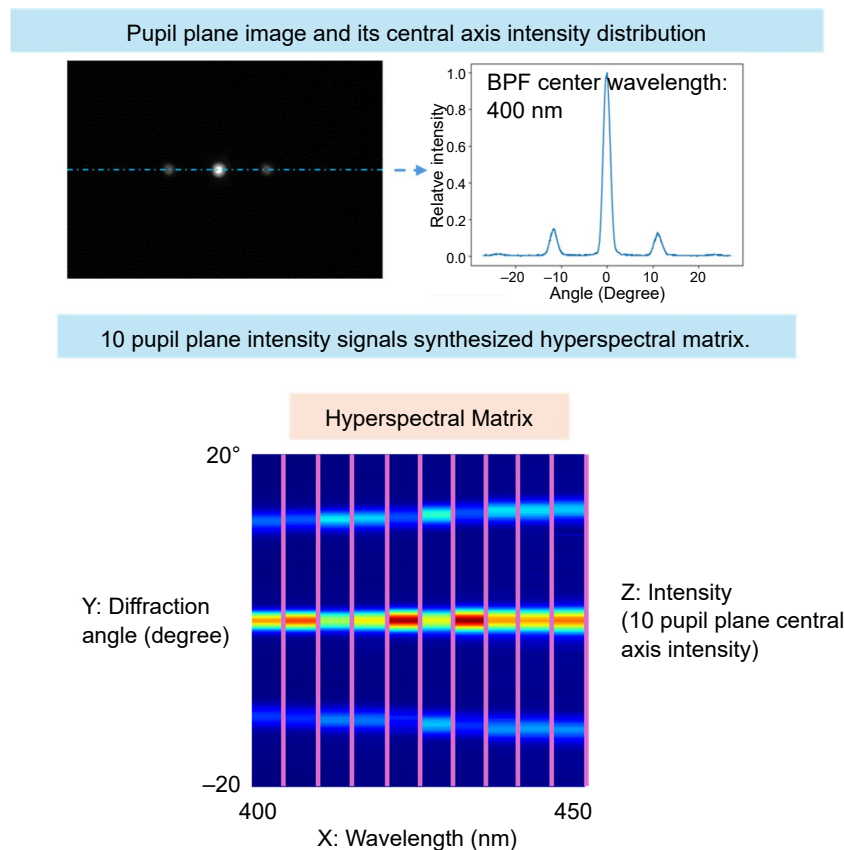


圖 5. 波長掃描瞳面影像散射術 (TW 發明專利)。

2.4 混合式量測策略 (TW 發明專利)

混合式量測策略是一種量測優化策略，透過多個量測工具來量測相同的量測樣品，並將不同量測工具的量測資料、數據、分析結果以協同運作的方式使用，藉以提高系統整體的量測精度。同時，此方法也降低單一工具的量測誤差對整體量測結果的影響。此方法在無需建置複雜量測系統的前提下，便能實現各個獨立系統的量測優勢，具備高度的彈性與穩定性⁽¹⁰⁾。

在本研究中，我們提出了一種波長掃描瞳面影像散射術輔助光譜式反射術的混合式量測策略，用以實現次微米級高深寬比矽深槽各項關鍵尺寸的精準量測。本團隊首先透過敏感度分析工具確定光譜式反射術與波長掃描瞳面影像散射術對各項量測關鍵尺寸的敏感度指數。

並透過敏感度分析結果，對特定關鍵尺寸具有較高敏感度指數的量測工具作為該關鍵尺寸之主要量測工具。確定主要量測工具與次要量測工具之先後順序後，便會由次要量測工具依照其量測流程先行量測待測樣品之各項關鍵尺寸，並將量測結果前饋至主要量測工具。透過此量測資訊協同的過程，可以有效的降低主要量測工具量測時不同關鍵尺寸間的量測耦合效應，進而提高系統整體的量測準確度。混合量測流程圖如圖 6 所示。使用此混合式量測策略便能透過輔助量測工具的量測結果提升主要量測工具量測特定關鍵尺寸時不足的準確度並且兼顧使用系統的彈性。

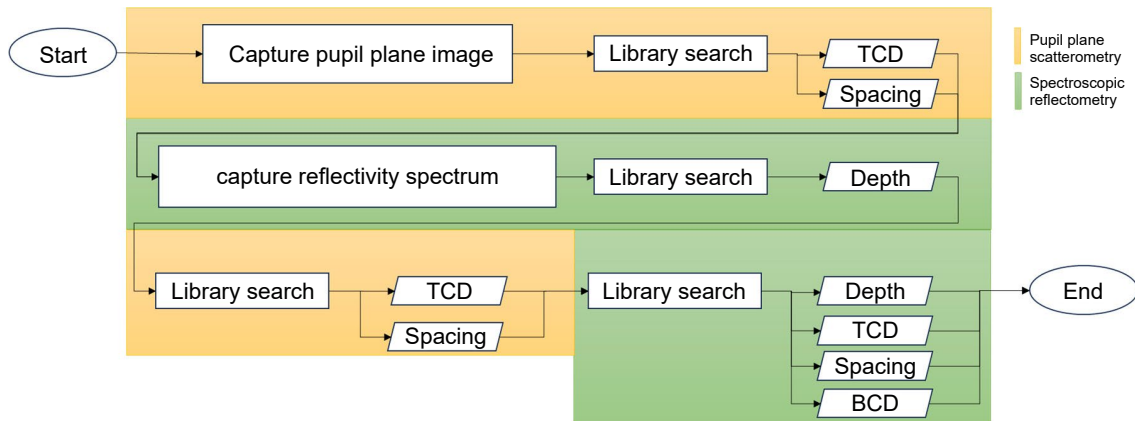


圖 6. 混合式量測策略量測流程 (TW發明專利)。

2.5 敏感度分析

本研究採用基於變異數的敏感度分析方法對此兩種量測技術進行深入探討。該敏感度分析方法將針對不同量測子系統量測關鍵尺寸的能力進行全面剖析⁽¹¹⁾，以表明各子系統的優缺點。最終，此敏感度分析結果將作為制定混合式量測策略決策的依據。

敏感度分析旨在定量特定輸入變數對模型輸出的響應程度，其透過敏感度指數的量化，使我們能夠直觀評估模型輸出對特定輸入變數的敏感性。基於變異數的敏感度分析方法則是建立在機率框架下，將模型輸出的變異數分解為單個或多個輸入變數的貢獻，進而計算各輸入變數的敏感度指標，考慮一個具有 d 種輸入變數的模型 $Y=f(X_1, X_2, \dots, X_d)$ ，且模型輸出 Y 為純量，在實際量測情境下，輸入變數間的交互作用效應總是顯著地影響模型輸出 Y 。在這個條件下基於變異數的總效應 (Total effect) 指數可以很好地量化變數間交互作用的效應，對於變數 X_i 其總效應指數可以表達為式 (8)。

$$S_{Ti} = \frac{E_{X \sim i}(V_{X_i}(Y|X_{\sim i}))}{V(Y)} = 1 - \frac{V_{X \sim i}(E_{X_i}(Y|X_{\sim i}))}{V(Y)} \quad (8)$$

其中 $X_{\sim i}$ 表示除了第 i 個以外之所有輸入變數集， E 為期望值， V 為變異數。總效應指數考慮了所有與 X_i 有關的交互作用效應，進而獲取變數 X_i 完整的敏感度量值。

三、光學系統設計與架構

在本研究中，量測數據都取自於國立臺灣大學自行研製之深紫外光光學關鍵尺寸量測系統(TW 發明專利)，如圖 7 所示。

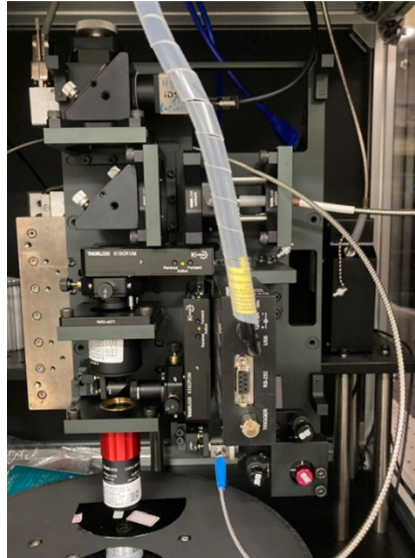


圖 7. 深紫外光光學關鍵尺寸量測系統 (TW 發明專利)。

在深紫外光反射光譜式反射術子系統中，本團隊在光學系統中加入了瞳面空間濾波模組。透過波特蘭透鏡在像面後的架構 (after-image-plane Configuration)，將物鏡背焦面投影至光學系統中⁽¹²⁾，並使用空間濾波器將量測週期性結構時產生的高階繞射信號自量測光譜訊號中濾除，目的在於避免高階繞射光的光譜訊號混雜至零階光譜訊號中降低量測信號對比度，此瞳面空間濾波模組的效果如圖 8 所示。

Si Trench FDTD - TCD= 1.383, BCD = 1.322, Spacing = 0.649, Depth = 4.981.

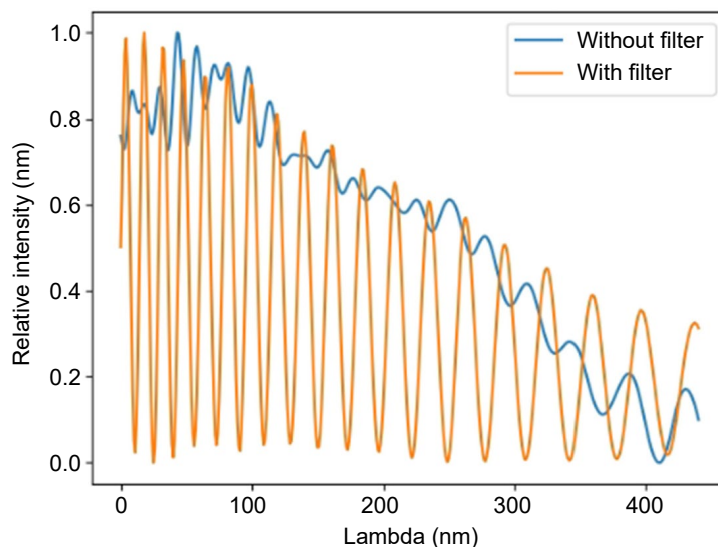


圖 8. 透過電磁模擬進行瞳面空間濾波器效果模擬 (TW 發明專利)。

在瞳面影像散射術子系統中，本團隊使用近紫外光波段的十個帶通濾波器組成波長掃描模組並結合工業相機來擷取不同波長的瞳面影像。由於量測樣品為週期性微結構，所以量測到的瞳面影像中會包含高階繞射光的繞射角度資訊與光強分布資訊。此技術可以將十組不同波長的繞射影像進行拼接，組合出一橫軸為波長、縱軸為繞射角度資訊的高光譜矩陣。使用量測到的高光譜矩陣與電磁模擬資料庫中的模擬高光譜矩陣進行資料庫搜尋法擬合即可求解出待測樣品的關鍵尺寸。

四、實驗結果與分析

4.1 量測樣品描述

本次研究量測的樣品為矽質的次微米級週期性深槽結構，總共有三件。此三件量測樣品均經由 FIB/SEM 驗證的關鍵尺寸。驗證的關鍵尺寸包含頂部線寬 (TCD)、底部線寬 (BCD)、槽寬 (spacing)、深度 (depth) 和週期 (period) 等五項，樣品實體圖如圖 9 所示。三件樣品之槽寬皆為次微米級，屬於傳統可見光光學關鍵尺寸量測系統難以準確預測的範疇，開口大小最小至 0.459 微米，深寬比最深至 9.96。

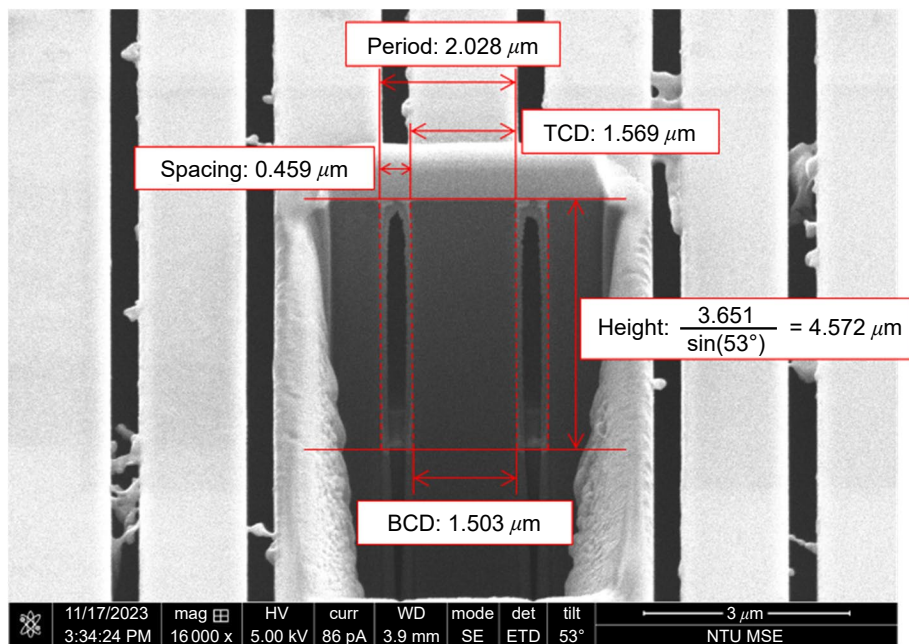


圖 9. 一號量測樣品的 FIB/SEM 影像。

4.2 量測系統敏感度分析結果

表 1 展示了敏感度分析模擬所探討的關鍵尺寸區間，此區間涵蓋了本次量測所涉及的所有高深寬比矽深槽結構的關鍵尺寸。圖 10 中呈現了光譜式反射術的光譜訊號的敏感度指數與瞳面影像散射術中的一階繞射光繞射角度，並分別顯示了此兩種量測術的敏感度指數分布情況。

由敏感度指數分析結果可以發現，在同一量測波段下光譜式反射術對於關鍵尺寸的深度與槽寬的敏感度遠大於其餘關鍵尺寸，意味著當結構深度與槽寬的尺寸改變時，會在量測光

表 1. 敏感度分析探討的高深寬比微結構關鍵尺寸區間。

Critical dimension parameter ranges in sensitivity analysis	
Depth	4.0 – 6.0 μm
TCD	1.2 – 1.7 μm
Spacing	0.3 – 0.8 μm
BCD	1.2 – 1.7 μm
Global settings: Wavelength range DUV (250 – 450 nm), TE mode (The electric field direction parallel to the grating line)	

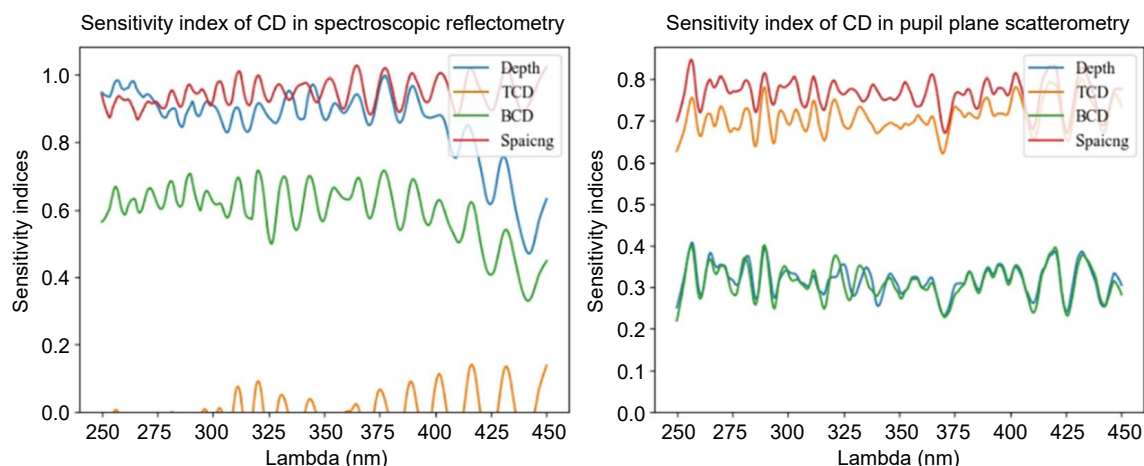


圖 10. 光譜式反射術與瞳面影像散射術的敏感度分析結果。

譜中造成顯著的變化，此分析結果驗證了光譜式反射術的物理模型假設。結構深度帶來的反射光譜變化主要來自於上下表面反射光的光程差改變時，會造成雙光束干涉信號的頻率改變，自然帶來較高的敏感度。在實驗中本團隊也發現，當微結構的槽寬與波長尺度相近時，會導致干涉光譜產生額外的相位偏移，推測這便是在反射光譜的敏感度指數分布中微結構槽寬開口尺寸變化帶來相當高敏感度的原因。在瞳面散射術系統中，橫向關鍵尺寸的變化如微結構槽寬開口尺寸與線寬尺寸在一階繞射角度訊號中具有較高的敏感度指數，透過狹縫繞射公式 (式 (9)) 與光柵方程式 (式 (10)) 的佐證，本方法可從繞射階出現的角度與光強度分布推斷出樣品的線寬與槽寬及週期等關鍵尺寸大小。

$$I_s(\theta, \lambda) = I_0(\lambda) \sin^2 \left(\frac{\text{Spacing} \cdot \pi \cdot \sin(\theta)}{\lambda} \right) \quad (9)$$

$$I_m(\theta, \lambda) = I_s(\theta, \lambda) \frac{\sin^2 \left(\frac{N \cdot (TCD + \text{Spacing}) \cdot \pi \cdot \sin(\theta)}{\lambda} \right)}{\sin^2 \left(\frac{(TCD + \text{Spacing}) \cdot \pi \cdot \sin(\theta)}{\lambda} \right)} \quad (10)$$

根據敏感度分析結果，本團隊將瞳面影像散射術作為輔助量測工具使其為光譜式反射術提供準確的橫向關鍵尺寸資訊，降低光譜式反射術中橫向關鍵尺寸與縱向關鍵尺寸間的耦合效應，具體的量測流程如圖 6 所示。

4.3 樣品量測結果與討論

表 2 與表 3 分別展示了單純使用光譜式反射術和本研究提出的瞳面影像散射術輔助光譜式反射術混合量測策略的量測結果，並與 FIB/SEM 量測結果進行了比較。

表 2. 單純使用光譜式反射術之量測結果。

Sample	Parameter	FIB/SEM	Reflectometry	Bias	Bias (%)
1	TCD (μm)	1.569	1.640	0.071	4.53
	BCD (μm)	1.503	1.451	-0.052	-3.46
	Spacing (μm)	0.459	0.477	0.018	3.92
	Depth (μm)	4.572	4.703	0.131	2.87
	Period (μm)	2.028	2.117	0.089	4.39
2	TCD (μm)	1.383	1.433	0.050	3.62
	BCD (μm)	1.322	1.276	-0.046	-3.48
	Spacing (μm)	0.649	0.680	0.031	4.78
	Depth (μm)	4.981	5.048	0.067	1.35
	Period (μm)	2.032	2.113	0.081	3.99
3	TCD (μm)	1.109	1.130	0.021	1.89
	BCD (μm)	1.094	1.052	-0.042	-3.84
	Spacing (μm)	0.872	0.899	0.027	3.10
	Depth (μm)	5.254	5.385	0.131	2.49
	Period (μm)	1.981	2.029	0.048	2.42

表 3. 使用混合量測策略之量測結果。

Sample	Parameter	FIB/SEM	Hybrid Metrology	Bias	Bias (%)
1	TCD (μm)	1.569	1.593	0.024	1.55
	BCD (μm)	1.503	1.499	-0.004	-0.25
	Spacing (μm)	0.459	0.459	0.0	0.001
	Depth (μm)	4.572	4.592	0.02	0.44
	Period (μm)	2.028	2.052	0.024	1.18
2	TCD (μm)	1.383	1.397	0.014	0.99
	BCD (μm)	1.322	1.31	-0.012	-0.87
	Spacing (μm)	0.649	0.655	0.006	0.99
	Depth (μm)	4.981	4.935	-0.046	-0.92
	Period (μm)	2.032	2.052	0.02	0.98
3	TCD (μm)	1.109	1.109	0.0	0.001
	BCD (μm)	1.094	1.068	-0.026	-2.35
	Spacing (μm)	0.872	0.867	-0.005	-0.56
	Depth (μm)	5.254	5.271	0.017	0.32
	Period (μm)	1.981	1.976	-0.005	-0.25

由量測結果可以清楚看出，單純使用光譜式反射術測量矽深槽的各項關鍵尺寸，其結果不盡理想，大多數誤差超過了 3%。推測原因在於僅使用單一技術時，為滿足擬合精度的要求，資料庫建立所需的樣本數量龐大，使得在我們目前的模擬數量下精度不足，導致誤差過大。採用本文提出的複合型測量策略，將橫向關鍵尺寸測量交由瞳面影像散射術以提升精度，而原先的光譜式反射術則專注於測量縱向關鍵尺寸，根據敏感度分析結果進行分工合作，進行二次性的測量並將結果校正回歸。結果可以發現，各項關鍵尺寸的整體誤差明顯降低到 3% 以下，部分關鍵尺寸的測量誤差甚至降至 1% 以下。在模擬資料庫數量沒有增加的情況下，將特定關鍵尺寸交由量測敏感度較高的光學量測子系統顯著提升了系統整體的量測準確度，並且量測結果具備較高的穩定性，這一結果驗證了本團隊的猜想。

透過觀察圖 11 中量測訊號與電磁模擬訊號的匹配結果可以發現，無論是哪個量測方法匹配結果均展現出極高的一致性，兩者之間的相關係數均在 0.9 以上。得益於入射光照明 N.A. 控制與使用深紫外光波段，本研究中的兩個量測子系統所測得的訊號響應均與電磁模擬結果高度匹配。同時，在光譜式反射術系統中加入的瞳面濾波模組也發揮了其效益，將光譜訊號擬合結果的相關係數提升至驚人的 0.96。而帶通濾波器陣列則為傳統的光學散射術額外增加了一個波長軸的維度。本研究的方法透過結合多波長的繞射影像訊號，成功提升了繞射訊號擬合的穩定性，並反映在最終的量測結果上。

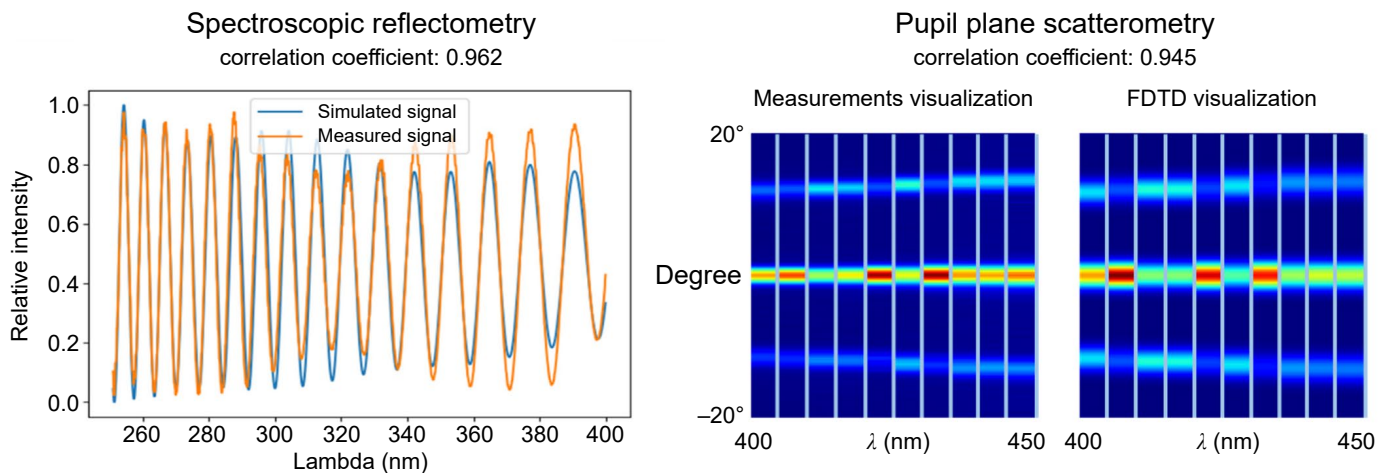


圖 11. 量測樣品三的量測訊號與電磁模擬訊號擬合結果。

五、結論

本研究展示了一種針對高深寬比次微米級結構之混合式量測策略系統，團隊整合了光譜式反射術以及波長掃描瞳面影像散射術之量測訊號，並藉由本研究所提出之全局敏感度分析結合這兩種光學響應對於縱向與橫向關鍵尺寸的量測優勢，從而完整地獲取開口小至 0.459 μm 之微溝槽各項關鍵尺寸，與 FIB-SEM 相比結構之幾何關鍵尺寸量測誤差皆小於 3% 同時具備良好的量測一致性。透過採用本文所提出的混合量測策略，可以有效解決次微米級高深寬比結構的量測挑戰，並且為先進半導體封裝的線上量測提供非破壞性、快速且準確的量測方案。

參考文獻

1. S. Y. Hou, W. C. Chen, C. Hu *et al.*, *IEEE Transactions on Electron Devices*, **64** (10), 4071 (2017).
2. J. P. Gambino, S. A. Adderly, and J. U. Knickerbocker, *Microelectronic Engineering*, **135**, 73 (2015).
3. W. Sun, H. Ohta, T. Ninomiya *et al.*, *Journal of Micro/Nanolithography, MEMS, and MOEMS*, **19**, 024002 (2020).
4. H. Chouaib, T. Shi, A. Chou *et al.*, “Leveraging x-ray scatterometry and machine learning to enable robust and high-throughput optical critical dimension metrology for advanced 3D flash memory contact hole profile”, *SPIE Advanced Lithography - Metrology, Inspection, and Process Control XXXVIII*, April 9 (2024).
5. F.-S. Yang, M.-R. Wu, Y.-H. Hung *et al.*, “AI-enhanced optical critical dimension metrology for high aspect ratio structures in semiconductor advanced packaging”, *SPIE*, 12956, (2024).
6. W.-H. Chein, F.-S. Yang, Z.-Y. Fu *et al.*, *Surface Topography: Metrology and Properties*, **11** (2), (2023).
7. N. Kumar, P. Petrik, G. K. P. Ramanandan *et al.*, *Optics Express*, **22** (20), 24678 (2014).
8. A. Paul, D. Kolenov, T. Scholte *et al.*, *Applied Optics*, **62** (29), 7589 (2023).
9. A. D. Vito, I. Osherov, A. M. Urbanowicz *et al.*, “Ultra large pitch and depth structures metrology using spectral reflectometry in combination with RCWA based model and TLM Algorithm : AM: Advanced Metrology”, 2020 31st Annual SEMI Advanced Semiconductor Manufacturing Conference (ASMC) , August 24-26 (2020).
10. V. Alok, Y. Bin Bin, J. Yun Tao *et al.*, “A holistic metrology approach: hybrid metrology utilizing scatterometry, CD-AFM, and CD-SEM”, 7971, 797103.
11. E. Quaglietta, and V. Punzo, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, **34**, 38 (2013).
12. J. Kurvits, M. Jiang, and R. Zia, *Journal of the Optical Society of America A*, **32** (11), 2082 (2015).

作者簡介

楊福生先生現為國立臺灣大學機械工程學系博士生。

Fu-Sheng Yang is currently a Ph.D. student in the Department of Mechanical Engineering at National Taiwan University.

林元琦先生現為國立臺灣大學機械工程學系碩士生

Yuan-Ci Lin is currently a M.S. student in the Department of Mechanical Engineering at National Taiwan University.

吳旻儒先生為國立臺灣大學機械工程學系碩士，現為美商科磊股份有限公司工程師。

Min-Ru Wu received his M.S. in Mechanical Engineering from National Taiwan University. He is currently an Engineer in KLA Co., Ltd..

洪彥鴻先生現為國立臺灣大學機械工程學系碩士生

Yen-Hung Hung is currently a M.S. student in the Department of Mechanical Engineering at National Taiwan University.

郭柏辰先生現為國立臺灣大學重點科技研究學院碩士生

Bo-Chen Kuo is currently a M.S. student at the Graduate School of Advanced Technology at National Taiwan University.

陳亮嘉先生為南澳大利亞大學製造與機械系博士，現為國立臺灣大學機械工程學系特聘教授。

Liang-Chia Chen received his Ph.D. in Advanced Manufacturing and Mechanical Engineering from the University of South Australia. He is currently a Distinguished Professor in the Department of Mechanical Engineering at National Taiwan University.