

EUV 計量標準與量測系統不確定度

EUV Metrology and Measurement Uncertainties

莊宜蓁、陳政憲

Yi-Chen Chuang, Cheng-Hsien Chen

為配合國內半導體先進微影技術發展，國家度量衡標準實驗室 (National Measurement Laboratory, NML) 啟動發展極紫外 (EUV) 波段光輻射量測與校正技術，首先進行的是 EUV 光偵測器分光響應 (spectral responsivity) 校正系統與技術之建立，已與國家同步輻射中心 (National Synchrotron Radiation Research Center, NSRRC) 合作，建置相關硬體設備與量測系統，並執行相關量測系統評估與校正流程之測試。本文將以 EUV 光偵測器分光響應校正為例，介紹其系統架構、量測原理、系統追溯圖、及量測不確定度，希望透過此計量標準的建立，協助晶圓廠更精確地掌握曝光參數、精簡製程程序、進而達成節能之效。

To support the development of advanced EUV lithography for the semiconductor industry in Taiwan, an EUV calibration system for photodiodes' spectral responsivity was established by the National Measurement Laboratory (NML). This EUV spectral responsivity calibration system is the first radiometric calibration system in the EUV region in Taiwan. This system utilizes the EUV radiation generated from synchrotron radiation light source provided by the National Synchrotron Radiation Research Center (NSRRC). Some calibration procedures have been tested and compared. And strategies to reduce measurement uncertainties were also studied. In this article, the EUV spectral calibration system will be introduced, including the calibration principles, metrological traceability, and uncertainty evaluation details. Through the establishment of metrology standard, local foundries could tune the exposure parameters of an EUV exposure machine with more certain knowledge, and thus could simplify the dose calibration processes and save energy consumption.

一、EUV 計量標準與應用

EUV 微影被認為是 N7 以下製程之主流技術，然而相關材料、元件、設備、及製程，仍需持續研發改良，並衍生諸多量測需求。表 1 收錄了幾個與 EUV 微影相關之量測需求與應用情境，包括：曝光參數評估調校、曝光光源發光特性評估、光阻感光靈敏度 (sensitivity) 評估、反射鏡／光罩反射率評估、反射鏡／光罩材料吸收特性評估、光罩保護膜 (pellicle)

穿透率評估、光罩保護膜溫度評估…等，都需要透過量測對應的量 (quantities)，來達成應用情境所需之目的。在缺乏計量標準的狀況下，業界僅能憑經驗或採用試誤法 (trial and error) 來評估相關參數及規格，不僅耗時且結果可信度低。以製程曝光劑量評估程序 (dose calibration process) 為例，晶圓廠需對晶圓樣品進行上光阻、曝光、顯影、檢測曝光成效…等程序，以得知最新之曝光劑量及機台設定參數，每次耗時 1 天，但若能適當地運用具計量追溯鍊之量測標準件及校正手法，量測取得光源於晶圓放置處之輻射曝露 (radiant exposure) (J/m^2)，則可提升量測結果之可靠度與準確度，有助於提高研發及量產之效率，可受惠的廠商包括：EUV 光學元件廠商、晶圓廠、先進半導體材料開發商、EUV 光阻廠商、設備廠…等。

表 1. EUV 微影相關之量測需求與應用情境。

量測需求／應用情境 (範例)	待測量	計量標準
曝光參數評估調校 曝光光源發光特性評估	曝光劑量 (J/m^2)	分光響應 (A/W) 輻射曝露 (radiant exposure) (J/m^2)
光阻靈敏度 (sensitivity) 評估	曝光劑量 (J/m^2)	分光響應 (A/W) 輻射曝露 (radiant exposure) (J/m^2)
反射鏡/光罩反射率評估	輻射功率 (W)； 反射率 (%)	分光響應 (A/W) 反射率 (%)
反射鏡/光罩材料吸收特性評估	複折射率； 反射率 (%)	反射率 (%)
光罩保護膜 (pellicle) 穿透率評估	穿透率 (%)	穿透率 (%)
光罩保護膜 (pellicle) 溫度評估	溫度 (K)	穿透率 (%)； 反射率 (%)； 放射率 (emissivity)

目前國際上僅少數國家計量機構 (National Metrology Institutes, NMIs) 具備 EUV 計量 (EUV metrology) 標準，如：美國國家標準與技術研究院 (National Institute of Standard and Technology, NIST) 與德國聯邦物理技術研究院 (Physikalisch-Technische Bundesanstalt, PTB)。主要為分光響應 (spectral responsivity) 及反射率 (reflectivity) 兩項計量標準，可擴散應用之量測情境如表 1 所示，涵蓋大部分 EUV 微影相關之計量標準追溯需求。

早期有關 EUV 波段的研究，都是採用同步輻射光源，因此同步輻射光源相較於近年發展的 EUV 光源，如：高次諧波 (high order harmonic generation, HHG) 產生之同調 EUV 光、雷射激發電漿 (laser produced plasma, LPP)…等，技術更成熟、且光源較穩定。對於發展計量技術而言，系統的穩定性為首要考量，美國 NIST 及德國 PTB 之 EUV 計量標準系統都是採用同步輻射 EUV 光源^(1,2)。

二、我國之 EUV 光偵測器分光響應校正系統

目前國家度量衡標準實驗室之 EUV 光偵測器分光響應校正系統係採用國家同步輻射研究中心之光束線 BL08B⁽³⁾ 為校正光源，透過真空式單光儀及濾片篩選出校正所需之單波長光。EUV 光偵測器分光響應校正系統之主要設備包括：同步輻射光源、樣品腔、電動移動

平台、樣品座及電流表，系統之架構如圖 1 所示。光源所及之處皆處於真空中，校正時放置標準光偵測器與待校光偵測器之樣品腔體內部保持真空度約 10^{-9} torr。

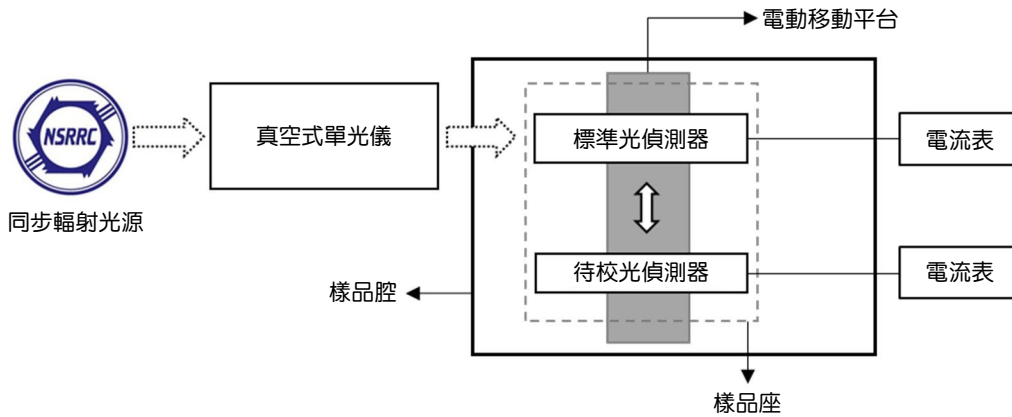


圖 1. EUV 光偵測器分光響應校正系統 (示意圖)。

2.1 量測原理

本套 EUV 光偵測器分光響應校正系統是依據替代法 (substitution method) 校正原理，於相同量測條件 (同一光源、相同照射條件) 下分別取得標準光偵測器及待校光偵測器之輸出光電流，再搭配標準光偵測器之標準分光響應值，計算求得待校光偵測器之分光響應值。因光偵測器之輸出光電流正比於照射於光偵測器之光輻射功率及該光偵測器響應之乘積，標準光偵測器及待校光偵測器之光電流可分別表示為：

$$i_t(\lambda, t_1) \propto P_t(\lambda, t_1) \cdot R_t(\lambda) \quad (1)$$

$$i_s(\lambda, t_2) \propto P_s(\lambda, t_2) \cdot R_s(\lambda) \quad (2)$$

其中， $i_t(\lambda, t_1)$ 與 $i_s(\lambda, t_2)$ 分別為待校光偵測器與標準光偵測器由電表量得之輸出光電流值 (單位：A)、 $P_t(\lambda, t_1)$ 與 $P_s(\lambda, t_2)$ 分別為量測當時照射於待校光偵測器與標準光偵測器之某波長之光輻射功率 (單位：W)、而 $R_t(\lambda)$ 與 $R_s(\lambda)$ 分別為待校光偵測器與標準光偵測器之分光響應 (單位：A/W)、而 t_1 與 t_2 則分別代表待校光偵測器與標準光偵測器之量測時刻。

對一個穩定之校正系統而言，無論量測時刻是何時，量測條件皆相同，亦即照射於待校光偵測器及標準光偵測器之光輻射功率相同，且無其他環境或系統雜訊造成之干擾， $P_t(\lambda, t_1) = P_s(\lambda, t_2)$ 。在此條件下，

$$\frac{i_t(\lambda, t_1)}{i_s(\lambda, t_2)} = \frac{P_t(\lambda, t_1) \cdot R_t(\lambda, t_1)}{P_s(\lambda, t_2) \cdot R_s(\lambda, t_2)} = \frac{R_t(\lambda, t_1)}{R_s(\lambda, t_2)} \quad (3)$$

而待校光偵測器之分光響應可由下式來求得：

$$R_t(\lambda) = \frac{i_t(\lambda, t_1)}{i_s(\lambda, t_2)} \cdot R_s(\lambda) \quad (4)$$

若標準光偵測器與待校光偵測器在進行量測時，量測條件有所差異，如：光源擾動造成量測條件變異、電磁雜訊或微電流量測雜訊造成量測條件變異，則可導入適當之校正系統修正機制，使得：

$$\frac{P_t(\lambda, t_1)}{c_t(\lambda, t_1)} = \frac{P_s(\lambda, t_2)}{c_s(\lambda, t_2)} \quad (5)$$

其中， $c_t(\lambda, t_1)$ 與 $c_s(\lambda, t_2)$ 分別為待校光偵測器與標準光偵測器量測當時所對應之校正系統修正係數。校正系統修正係數可以用以監測校正系統穩定性之訊號 (monitoring signals)，或是其他可以即時反映校正系統變化之變數^(4, 5)。在此狀況下：

$$\frac{P_t(\lambda, t_1)}{c_t(\lambda, t_1)} \cdot R_t(\lambda) \propto \frac{i_t(\lambda, t_1)}{c_t(\lambda, t_1)} \quad (6)$$

$$\frac{P_s(\lambda, t_2)}{c_s(\lambda, t_2)} \cdot R_s(\lambda) \propto \frac{i_s(\lambda, t_2)}{c_s(\lambda, t_2)} \quad (7)$$

而依據式 (6) 及式 (7)，待校光偵測器之分光響應可由下式來求得：

$$P_t(\lambda) = \frac{i_t(\lambda, t_1)}{c_t(\lambda, t_1)} \cdot \frac{c_s(\lambda, t_2)}{i_s(\lambda, t_2)} \cdot R_s(\lambda) \quad (8)$$

對一個穩定之校正系統 (理想狀況)， $P_t(\lambda, t_1) = P_s(\lambda, t_2)$ ，因此 $c_t(\lambda, t_1) = c_s(\lambda, t_2)$ ，式 (8) 等同式 (3)。

實務上，將標準光偵測器與待校光偵測器置於樣品座 (圖 2)，架設於樣品腔 (圖 3) 內，以電動移動平台控制標準光偵測器與待校光偵測器位置，使 EUV 光束得以照射光偵測器中央，再以外電表量測取得標準光偵測器與待校光偵測器在 EUV 光束照射下之輸出光電流，由式 (3) 或式 (8) 計算求得待校光偵測器之分光響應。

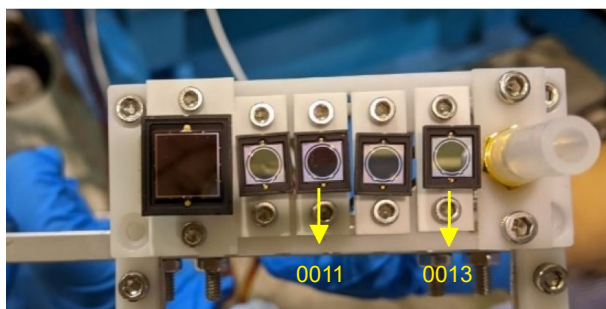


圖 2. EUV 光偵測器與樣品座 (實體照片)。

2.2 量測系統追溯圖

替代法校正中，標準光偵測器之分光響應 ($R_s(\lambda)$) 需透過分光響應原級校正系統，追溯

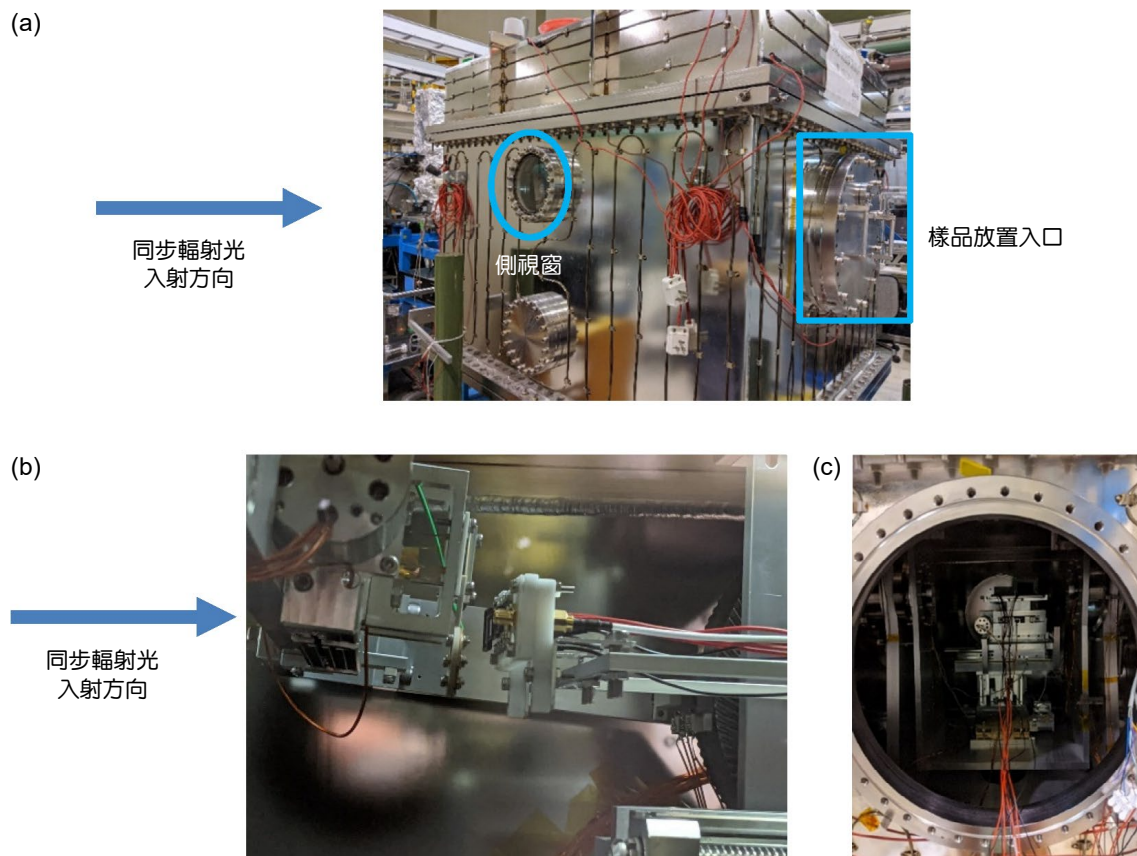


圖 3. EUV 光偵測器分光響應校正之樣品腔與內部架構 (實體照片)：(a) 樣品腔外觀；(b) 由側視窗所見之樣品座；(c) 由樣品放置入口所見之電動移動平台。

至光輻射功率標準。國際上之主流做法是以低溫絕對輻射計 (cryogenic radiometer) 做為光輻射功率之原級標準件 (primary standard)，準確量得光源之輻射功率 ($P_s'(\lambda)$)，再以標準光偵測器量測同一光源取得其輸出之光電流值 ($i_s'(\lambda)$)，依據式 (9)，計算取得標準光偵測器之輻射功率響應標準值。

$$R_s(\lambda) = \frac{i_s'(\lambda)}{P_s'(\lambda)} \quad (9)$$

由於國內並無 EUV 波段之低溫絕對輻射計與計量標準專用之同步輻射光束線 (Metrology beamline)，未能在地進行 EUV 光偵測器分光響應之原級校正，現階段 EUV 波段之分光響應標準是將標準光偵測器送至他國國家標準計量機構校正的方式取得。目前 EUV 標準光偵測器之分光響應 ($R_s(\lambda)$) 是追溯到德國 PTB。圖 4 為 EUV 光偵測器分光響應校正追溯圖。

三、不確定度分析

本章節依據 ISO Guide 98-3:2008⁽⁶⁾ 之量測不確定度估算指引，說明 EUV 光偵測器分光響應校正之量測不確定度評估結果。假設理想狀況 $c_i(\lambda, t_1) = c_s(\lambda, t_2)$ ，EUV 光偵測器分光響

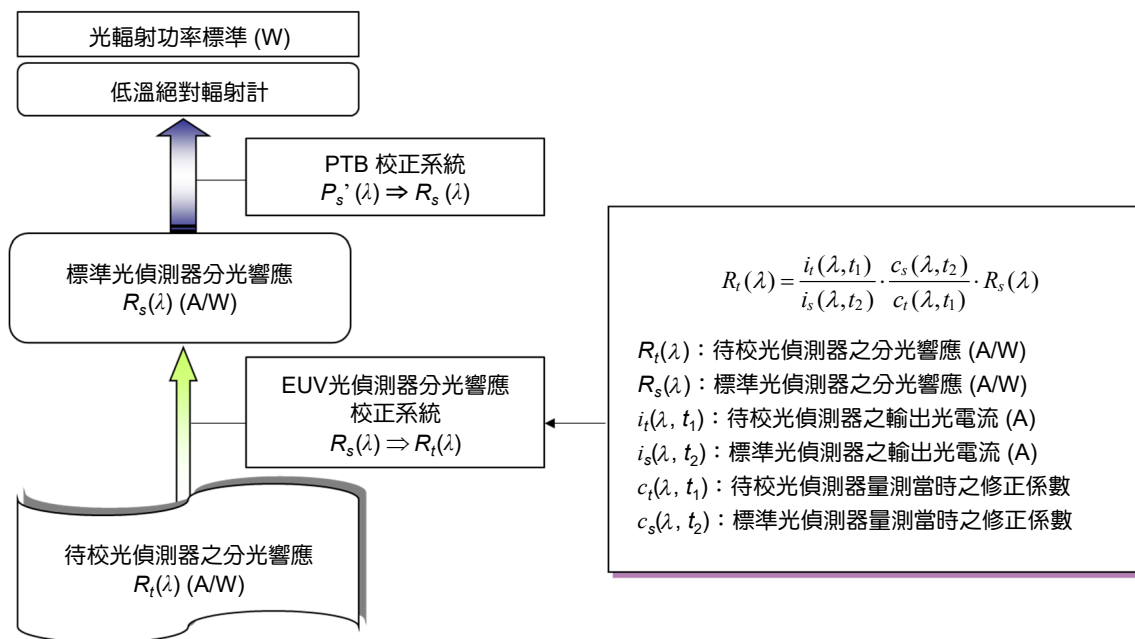


圖 4. EUV 光偵測器分光響應校正追溯圖。

應校正之量測方程式如下：

$$R_t(\lambda) = \frac{i_t(\lambda, t_1)}{c_t(\lambda, t_1)} \cdot \frac{c_s(\lambda, t_2)}{i_s(\lambda, t_2)} \cdot R_s(\lambda) = \frac{i_t(\lambda, t_1)}{i_s(\lambda, t_2)} \cdot R_s(\lambda) \equiv f(\lambda) \cdot R_s(\lambda) \quad (10)$$

其中，變數之定義如第 2.1 節所述。

依據式 (10)，EUV 光偵測器分光響應校正之不確定度來源可分為：比例係數 ($f(\lambda)$) 之不確定度及分光響應標準值 ($R_s(\lambda)$) 之不確定度兩大項。比例係數 ($f(\lambda)$) 之不確定度至少包含 10 項不確定度來源，而分光響應標準值 ($R_s(\lambda)$) 之不確定度則至少包含 2 項不確定度來源。以下章節針對這幾項不確定度之估算進行說明。

3.1 比例係數之不確定度

比例係數之不確定度來源包括：光電流比值重複性、光電流比值長期穩定性、光偵測器響應空間均勻性、電表準確性、單光儀波長準確性、波寬效應、高階繞射雜光 (higher diffraction orders)、擴散散射雜光 (diffuse scattered radiation)、入射角度、及溫度影響…等。前 2 項屬 A 類不確定度，其餘屬 B 類不確定度。

3.1.1 光電流比值重複性

實驗用之待校光偵測器與標準光偵測器廠牌/型號/序號分別為：Optodiode/AXUV20HS1/0011 及 Optodiode/AXUV20HS1/0013 (如圖 2 標示)。本次系統評估共進行 8 組獨立實驗、每組實驗重複量測 4 次，以式 (11) 估算光電流比值每天 (每組) 重複性的相對標準不確定度：

$$u_r(f(\lambda))_x = \frac{S_{f(\lambda)_x}}{f(\lambda)} = \frac{\frac{S_{f(\lambda)_x}}{\sqrt{n}}}{f(\lambda)} \quad (11)$$

再取此 8 筆 $u_r(f(\lambda))_x$ 之最大值做為光電流比值重複性之相對標準不確定度： $u_r(f(\lambda))_1 = \max(u_r(f(\lambda))_x) = 0.5761\%$ 。自由度為 $4 - 1 = 3$ 。詳如表 2。

3.1.2 光電流比值再現性

光電流比值再現性之標準不確定度可以每組獨立實驗之平均值 $\overline{f(\lambda)_x}$ 的標準差來估算，而光電流比值再現性之相對標準不確定度則為： $u_r(f(\lambda))_2 = \frac{S_{\overline{f(\lambda)_x}}}{\overline{f(\lambda)_x}} = \frac{0.0116}{0.9729} = 1.1876\%$ 。自由度為 $8 - 1 = 7$ 。詳如表 2。

表 2. 光電流比值量測數據。

日期	6/23	7/1-1	7/1-2	7/2-1	7/2-2	10/22	10/23-1	10/23-2
光電流比值 $f(\lambda)_x$	0.9683	0.9844	0.9870	0.9859	0.9736	0.9643	0.9516	0.9558
	0.9742	0.9816	0.9860	0.9858	0.9736	0.9681	0.9513	0.9581
	0.9732	0.9794	0.9858	0.9859	0.9731	0.9699	0.9733	0.9477
	0.9739	0.9800	0.9876	0.9854	0.9751	0.9692	0.9668	0.9566
平均值 $\overline{f(\lambda)_x}$	0.9724	0.9814	0.9866	0.9857	0.9739	0.9679	0.9608	0.9545
標準差 $(S_{f(\lambda)_x})$	0.0028	0.0022	0.0008	0.0003	0.0009	0.0025	0.0111	0.0047
$u_r(f(\lambda))_x$	0.1414 %	0.1123 %	0.0421 %	0.0132 %	0.0457 %	0.1284 %	0.5761 %	0.2453 %

3.1.3 光偵測器響應空間均勻性

光偵測器響應空間均勻性造成之量測不確定度可以有效感光面積內輸出光電流值之變異範圍來估算。圖 5 為評估實驗用之標準光偵測器 (Optodiode/AXUV20HS1/0013)，在感光面積內之輸出光電流相對訊號分布⁽⁷⁾，最大值為 1.025、最小值為 0.97，以最大最小值之差為不確定度評估之全寬 ($\Delta i_{\max}$)，假設矩形分配，則光偵測器響應空間均勻性造成之相對標準不確定度為： $u_r(f(\lambda))_3 = \frac{\frac{(1.025-0.97)}{2\sqrt{3}}}{\frac{(1.025-0.97)}{2}} = 1.5917\%$ ，估算其相對不確定性為 10%，自由度 ($v(f(\lambda))_3$) 為 50。

3.1.4 電表準確性

依據實驗，待校光偵測器在其響應波長範圍所對應之輸出光電流介於 1 nA 至 1 μ A 間，而本次系統評估所使用之電表 (Keithley/6485/0968143)，其電流讀值在此範圍內之最大相對標準不確定度為 0.0135 %⁽⁸⁾。因校正執行時使用 2 台同型號之電表，以其相對組合標準不確定度做為因電表準確度造成之光電流相對標準不確定度： $u_r(f(\lambda))_4 = \sqrt{(0.0135\%)^2 + (0.0135\%)^2} = 0.0191\%$ ，估算其相對不確定性為 10%，自由度 ($v(f(\lambda))_4$) 為 50。

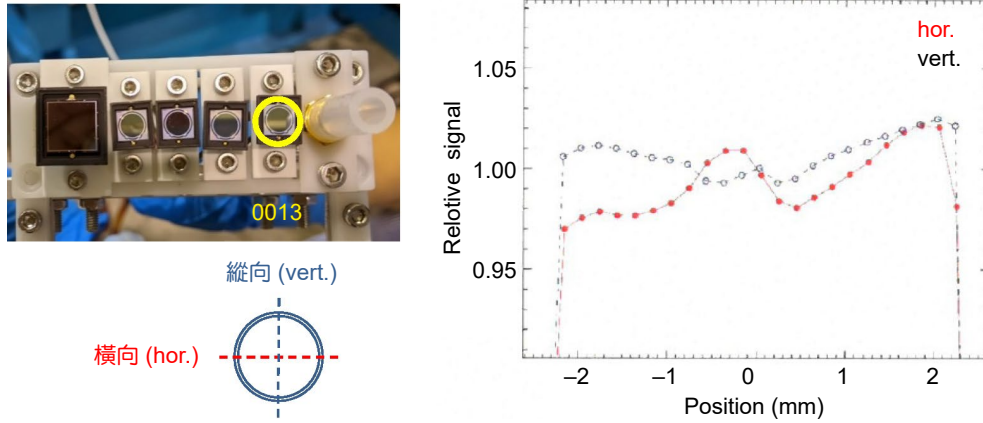


圖 5. 光偵測器 (Optodiode/AXUV20HS1/0013) 之響應空間均勻性量測結果 (橫軸為相對位置、縱軸為輸出光電流之相對訊號)；紅色 (實心) 為橫向量測結果、藍色 (空心) 為縱向量測結果。

3.1.5 單光儀波長準確性

依據實驗，在 $(10-15) \text{ nm}$ 之波長範圍內，單光儀波長偏差 $\pm \Delta \lambda_a \text{ nm} = 0.03 \text{ nm}$ ，則因單光儀波長偏差所造成的分光響應誤差 (半寬) 可由式 (12) 估算：

$$\Delta R_{wl} = \max(\Delta R^+, \Delta R^-) \quad (12)$$

其中， $\Delta R^+ = \left| \frac{R(\lambda_0 + \Delta \lambda_a) - R(\lambda_0)}{R(\lambda_0)} \right|$ 、 $\Delta R^- = \left| \frac{R(\lambda_0 - \Delta \lambda_a) - R(\lambda_0)}{R(\lambda_0)} \right|$ ，而 $R(\lambda_0)$ 為光偵測器在波長 λ_0 之分光響應值、 $R(\lambda_0 + \Delta \lambda_a)$ 為光偵測器在波長 $(\lambda_0 + \Delta \lambda_a)$ 之分光響應值、而 $R(\lambda_0 - \Delta \lambda_a)$ 為光偵測器在波長 $(\lambda_0 - \Delta \lambda_a)$ 之分光響應值。

依據實驗結果，假設矩形分布，則因單光儀波長偏差所造成的分光響應相對標準不確定度： $u_r(f(\lambda))_5 = \frac{\Delta R_{wl}}{\sqrt{3}} = \frac{0.0535\%}{\sqrt{3}} = 0.0309\%$ ，估算其相對不確定性為 10% ，自由度 $(v(f(\lambda))_5)$ 為 50 。

3.1.6 波寬效應

依據參考文獻⁽⁹⁾之描述，光偵測器分光響應在波長 λ_0 時之量測值可表示為：

$$R_m(\lambda_0) = \frac{\int_{\lambda_0 - \Delta \lambda_b}^{\lambda_0 + \Delta \lambda_b} R(\lambda) \cdot L(\lambda - \lambda_0) d\lambda}{\int_{\lambda_0 - \Delta \lambda_b}^{\lambda_0 + \Delta \lambda_b} L(\lambda - \lambda_0) d\lambda} \quad (13)$$

其中， $R(\lambda_0)$ 為分光響應在波長 λ_0 時之真值、 $L(\lambda)$ 為單光儀之狹縫函數、 $\Delta \lambda_b$ 為單光儀之波寬 (bandwidth)。假設為理想之對稱三角形分布，中心波長為 λ_0 ，且 $L(\lambda_0) = 1$ 。將上式中 $R(\lambda)$ 以泰勒展開式 (Taylor's expansion) 展開並忽略高次項，經整理後可得波寬效應造成的量測誤差 (半寬) 可由式 (14) 估算：

$$\Delta R_b = \frac{R_m(\lambda) - R(\lambda)}{R(\lambda)} \approx \frac{\Delta \lambda_b^2}{12 \cdot R_m(\lambda)} \cdot \frac{d^2 R_m(\lambda)}{d\lambda^2} \quad (14)$$

依據實驗結果，假設 U 形分配，則因波寬效應造成的分光響應相對標準不確定度：
 $u_r(f(\lambda))_6 = \frac{|\Delta R_b(\lambda)|}{\sqrt{2}} = \frac{0.0002\%}{\sqrt{2}} = 0.0001\%$ ，估算其相對不確定性為 10%，自由度 $(v(f(\lambda)))_6$ 為 50。

3.1.7 高階繞射雜光 (higher diffraction orders)

依據參考文獻⁽¹⁰⁾，因高階繞射雜光造成的相對標準不確定度： $u_r(f(\lambda))_7 = 0.03\%$ ，估算其相對不確定性為 10%，自由度 $(v(f(\lambda)))_7$ 為 50。

3.1.8 擴散散射雜光 (diffuse scattered radiation)

依據參考文獻⁽¹⁰⁾，因擴散散射雜光造成的相對標準不確定度： $u_r(f(\lambda))_8 = 0.2\%$ ，估算其相對不確定性為 10%，自由度 $(v(f(\lambda)))_8$ 為 50。

3.1.9 入射角度

理想狀況下，光偵測器參考面之法線需與光軸對齊，若光偵測器參考面傾斜角 θ ，則受光面有效面積需修正為 $A \cdot \cos\theta$ 。以 $1 - \cos\theta$ 做為不確定度之半寬，假設矩形分配，依經驗評估光偵測器參考面之傾斜偏差可控制於 $\pm 5^\circ$ 內，則因光偵測器參考面傾斜造成之受光面有效面積之相對標準不確定度為： $u_r(f(\lambda))_9 = \frac{1 - \cos\theta}{\sqrt{3}} = 0.2197\%$ ，估算其相對不確定性為 10%，自由度 $(v(f(\lambda)))_9$ 為 50。

3.1.10 溫度影響

依據參考文獻⁽¹⁰⁾，AXUV 型之光偵測器在 13.5 nm 因溫度變化造成之響應偏差係數為： $3.1 \times 10^{-4}/^\circ\text{C}$ 。假設校正時真空腔體內溫度 $\leq 2^\circ\text{C}$ ，則因溫度變化造成之相對響應偏差為：
 $\Delta R_{\Delta T} = \frac{3.1 \times 10^{-4} \cdot \Delta T}{R_s(\lambda)} = \frac{3.1 \times 10^{-4} \cdot 2}{1.002} = 0.0619\%$ ，以此做為不確定度之半寬，假設矩形分配，則因溫度變化造成之標準不確定度： $u_r(f(\lambda))_{10} = \frac{\Delta R_{\Delta T}}{\sqrt{3}} = 0.0357\%$ ，估算其相對不確定性為 10%，自由度 $(v(f(\lambda)))_{10}$ 為 50。

3.2 分光響應標準值之不確定度

分光響應標準值之不確定度來源包括標準值追溯及標準光偵測器長期穩定性，皆屬 B 類不確定度。

3.2.1 標準值追溯之相對標準不確定度

依據標準件追溯報告⁽⁷⁾，標準光偵測器 (Optodiode/AXUV20HS1/0013) 13.5 nm 響應值之
 $u_r(R_s(\lambda))_1 = \frac{\frac{U}{R_s(\lambda)}}{\frac{2}{R_s(\lambda)}} = \frac{\frac{3.2 \times 10^{-3}}{0.2194}}{2} = 0.7293\%$ ，估算其相對不確定性為 10%，自由度 $(v(f(\lambda)))_1$ 為 50。

3.2.2 標準光偵測器長期穩定性之相對標準不確定度

標準光偵測器長期穩定性之量測不確定度可以光偵測器歷年響應值之變異範圍來估算。

以標準光偵測器 (Optodiode/AXUV20HS1/0009) 為例，假設矩形分配，標準光偵測器長期穩

定性之相對標準不確定度為： $u_r(R_e(\lambda)_2) = \frac{0.005}{0.2245} = 0.6429\%$ ，估算其相對不確定性為 10%，自由度 $(v(R_s(\lambda))_2)$ 為 50。

3.3 EUV 光偵測器分光響應校正系統能量

EUV 光偵測器分光響應校正之相對組合標準不確定度 $u_r(R_t(\lambda))$ 可表示為：

$$u_r(R_t(\lambda)) = \sqrt{u_r(f(\lambda))^2 + u_r(R_s(\lambda))^2} = \sqrt{\sum_{j=1}^{10} [u_r(f(\lambda))_j]^2 + \sum_{j=1}^{10} [u_r(R_s(\lambda))_j]^2} \quad (15)$$

其中， $u_r(f(\lambda))$ 與 $u_r(R_s(\lambda))$ 分別為比例係數與分光響應標準值之相對標準不確定度。有效自由度為：

$$v_{f(\lambda)} = \frac{u_r(R_t(\lambda))^4}{\sum_{j=1}^{10} \frac{[u_r(f(\lambda))_j]^4}{v_{f(\lambda))_j} + \sum_{j=1}^{10} \frac{[u_r(R_s(\lambda))_j]^4}{v_{R_s(\lambda))_j}} \quad (16)$$

將 3.1.1~3.2.2 評估結果帶入式 (12) 及式 (13)，可得 EUV 光偵測器分光響應校正之相對組合標準不確定度： $u_r(R_t(\lambda)) = 2.3055\%$ ，有效自由度： $v_{f(\lambda)} = 61$ 。不確定度分析表如表 3 所示。

表 3. EUV 光偵測器分光響應在波長 13.5 nm 之不確定度分析表。

不確定度來源	型態	靈敏係數	相對標準不確定度	自由度
◆ 比例係數 $(f(\lambda))$		1	2.0899 %	43
光電流比值重複性	A	1	0.5761 %	3
光電流比值長期穩定性	A	1	1.1876 %	7
光偵測器響應空間均勻性	B	1	1.5917 %	50
電表準確性	B	1	0.0191 %	50
單光儀波長準確性	B	1	0.0309 %	50
波寬效應	B	1	0.0001 %	50
高階繞射雜光	B	1	0.03 %	50
擴散散射雜光	B	1	0.2 %	50
入射角度	B	1	0.2197 %	50
溫度影響	B	1	0.0357 %	50
◆ 響應標準值 $(R_s(\lambda))$		1	0.9722 %	98
標準值追溯	B	1	0.7293 %	50
標準光偵測器長期穩定性	B	1	0.6429 %	50
量測值 (A/W)		0.2194	有效自由度	61
相對組合標準不確定度		2.3049 %	涵蓋因子	2.00
相對擴充不確定度		4.6 %		

四、結論與未來展望

本文介紹台灣第一套 EUV 波段之計量標準系統，並描述此 EUV 光偵測器分光響應校正系統之不確定度評估方法與結果。目前系統校正能量 (calibration capability) 範圍為：波長 13.5 nm，相對擴充不確定度 4.6 % ($k = 2.00$)。依據不確定度分析結果，本系統主要的不確定度來源來自光電流比值再現性以及光偵測器響應空間均勻性，未來可視國內產學研界需求，針對上述兩項不確定度來源進行控制，以降低量測不確定度。目前國際上仍是採用同步輻射光源做為 EUV 校正用光源，但其脈衝頻率與功率等級與業界製程中所使用之曝光光源不同，此外，校正時之校正用光源之照射模式 (定點量測) 也與產線上 EUV 曝光機之曝光模式 (動態掃描) 不同，在實際應用時於產線量測時，可能會因校正條件與應用條件不同，導致校正結果在實際應用時量測結果有所偏差，需依據校正條件與應用條件之不同，進一步修正調整校正所得之分光響應，以更符合實際應用之情境，這也是 NML 發展校正技術之重點方向。我國 EUV 計量標準之建立仍屬起步階段，期望未來能陸續建立其他 EUV 計量標準校正系統，並配合 EUV 製程產線需求，研發現場用、具計量追溯鏈之計量傳遞標準件，實現 EUV 標準技術實用化之目標。

參考文獻

1. S. Grantham, C. Tarrio, R. Vest, and T. Lucatorto, *EUV Sources for Lithography*, SPIE, Chapter 29 (2006)
2. F. Scholze and G. Ulm, *EUV Sources for Lithography*, SPIE, Chapter 30 (2006)
3. J. Y. Yuh, S. W. Lin, L. J. Huang, H. S. Fung, L. L. Lee, Y. J. Chen, C. P. Cheng, Y. Y. Chin, and H. J. Lin, *J. Synchrotron Radiation*, **22**, 1312 (2015)
4. A. Gottwald, U. Kroth, M. Richter, H. Schoppe, and G. Ulm, *Meas. Sci. Technol.*, **21**, 125101 (2010)
5. Y.-C. Chuang and C.-H. Chen, *J. Phys.: Conf. Ser. (JPCS)* (submitted, 2024)
6. ISO/IEC Guide 98-3:2008, Uncertainty of measurement - Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM:1995).
7. Silicon photodiode Calibration certificate, 21 PTB 71025, PTB (2021)
8. 微電流表校正報告，報告編號E200417A，國家度量衡標準實驗室，2020年。
9. C. A. Schrama, R. Bosma, K. Gibb, H. Reijn, and P. Bloembergen, *Metrologia*, **35**, 431 (1998)
10. F. Scholze, R. Vest, and T. Saito, *Metrologia*, **47**, 02001 (2010)

作者簡介

莊宜蓁為美國北卡大學夏洛特分校光學與工程博士，現為工研院量測中心 / 國家度量衡標準實驗室研究員。

Yi-Chen Chuang received her Ph.D. in Optical Science and Engineering from the University of North Carolina at Charlotte, USA. She is currently a Researcher of the Center for Measurement Standards, Industrial Technology Research Institute/National Measurement Laboratory.

陳政憲為國立中央大學光電科學與工程學系博士，現為工研院量測中心光電計量與感測技術研究室經理。

Cheng-Hsien Chen received his Ph.D. in Optics and Photonics from the National Central University. He is currently the Manager of the Optoelectronic Measurement and Sensing Technology Laboratory at the Center for Measurement Standards, Industrial Technology Research Institute.