

薄膜量測標準

Thin Film Metrology and Standards

傅尉恩

工研院量測中心(CMS/ITRI) 研究員

工研院量測技術發展中心負責執行國家度量衡標準實驗室任務，肩負我國最高計量標準研究實驗、建立與維持之責任，深切體會新科技由實驗室走向市場時所遭遇的困難與挑戰。由於計量是提供數字化科學證據的唯一途徑，國家度量衡標準實驗室透過發展奈米技術計量標準，建置國際一流水準的奈米量測標準，提供精確可靠的奈米尺度量測，俾便對於奈米技術商品化過程中的每一個階段，能真實地理解與掌握製造過程，並確保產品品質。本文係量測中心執行國家度量衡標準實驗室計畫之奈米技術計量標準計畫中，對薄膜厚度標準片校正之系統評估，此一校正系統提供二氧化矽薄膜厚度範圍為10~200nm之追溯校正服務。系統是以波長掃描範圍為250~850nm之分光式橢圓偏光儀，量測熱成長二氧化矽薄膜的物理與光學特性。透過最小平方方法來擬合實驗中所量得的橢圓偏光函數，可以求得此熱成長二氧化矽層的薄膜厚度與折射率。系統的評估方法參考國際標準組織(ISO)發行的「量測不確定度表示法的指引」分析各誤差源，系統之擴充不確定度為0.2nm，信賴水準(擴充係數1.98)為95%。

National Measurement Laboratory, in the Center for Measurement Standards of Industrial Technology Research Institute, was authorized by the Bureau of Standards, Metrology & Inspection of the Ministry of Economic Affairs to establish, maintain, and disseminate national measurement standards and advanced metrology. The standards and advanced metrology are fundamental to provide 'the science of measurement, embracing both experimental and theoretical determinations at any level of uncertainty in any field of science and technology.' They aim to enhance the reliability and traceability of the measurement processes and quality systems. Under "Nanometer-Scale Metrology Project", the National Measurement Laboratory conducts the highest levels of nanometrology including the fundamental research and calibration systems. One of the calibration systems was developed for the calibration services to provide the traceability of the thin film thickness. The thin film thickness calibration system consists of a Spectroscopic Ellipsometer (SE) with scanning ranges of wavelength from 250 nm to 850 nm, which is used to characterize the physical and optical properties of the thermally grown silicon dioxide thin films. The uncertainty evaluation of measuring thin film thickness of this system was performed according to "The guide to the expression of uncertainty in measurement", ISO. The system can currently provide the calibration service of SiO₂ thin film thickness from 10 nm to 200 nm with the expanded uncertainty of 0.2 nm at a confidence level (a coverage factor of 1.98) of 95 %.

關鍵字/Key Words

奈米計量(nanometrology)、薄膜厚度校正(thin film thickness calibration)、不確定度(uncertainty)、系統評估(system evaluation)

一、前言

奈米技術是化學、物理、機械、材料、電子、量測等科技的融合，是一項整體、跨領域的科技發展，從民生消費性產業到尖端的高科技領域，都能找到與奈米科技相關的應用。由於是全方位的科技進展，應用於基礎產業上精進及發揮，或與尖端科技結合等，有絕佳的機會獲致突破性的進展。因此，奈米科技被公認是引領各項產業發展新契機最有機會的一項工具。面對這樣的變化，台灣的產業也必須加速應用奈米技術於產業精進與突破。尋求更快、更低耗能及更微小的元件，一直是全球上IC發展的共同目標，因此發展奈米電子技術、尋求新奈米材料、新結構與新製造技術，以挑戰IC細微化的極限。當進行開發高效能的奈米能源或挑戰IC細微化的極限，量測能力是成功與否的關鍵課題之一。例如：薄膜式太陽電池由於只需使用一層極薄光電材料⁽¹⁾，相較於矽晶圓必須維持一定厚度而言，材料使用非常少，且由於薄膜可使用軟性基材，應用彈性大，市場面寬廣。如進一步與多孔性薄膜結合，利用多孔性奈米結構設計中，孔徑大小及分佈，將影響氧化還原的速度，增加電池效率。再加上應用奈米粒子的直徑與表面積、奈米粒子的分散能力、表面化學、光學及電學等功能性量測，對於未來染料敏化太陽電池的設計、製造，有著舉足輕重的影響。除了高科技產業外，量測物質在奈米尺寸產生的特殊現象，對於傳統產業的進步，也是同等重要，同時由於奈米量測科技及量測儀器的進步，新特性的發現將衍生新的應用創意，對產業界有可能造成革命性的影響。因此，世界各國不論學術界、研究機構、產業界莫不傾全力發展奈米科技，期望能在全球競爭下佔有一席之地。

工研院量測技術發展中心接受經濟部標準檢驗局委託，自2003年起開始進行奈米技術計量標準的研發，至2008年第一期計畫完成時，共進行了奈米尺寸、力學與微流等三個領域的標準技術研發，並陸續建置完成八套國家奈米量測標準系統並開放服務，對象包括產業界與學術研究各界，諸如：階高校正系統、奈米壓痕量測系統、微流量測系統、大角度校正系統和小角度校正系統、奈米薄膜量測系統X-ray反射儀量測系統、力量比較校正系統及奈米粒徑量測系統等。自2009年開始的第二期計畫，執行重心分別為奈米粒子／線之尺寸形貌與功能性量測標準追溯、薄膜結構與特性量測標準追溯、奈米國際量測與產品標準推動。進行各項奈米量測標準系統之建置與前瞻技術之研發，期能直接配合國內奈米技術相關產業的發展與需要，提供服務並促進產業發展。

就「薄膜結構與特性量測標準追溯」分項而言，是以薄膜表面或表面下結構的CD檢測為主。為使「薄膜結構與特性量測標準追溯」計畫，在量測技術的發展上，能以業界需求為依歸，或能更貼近符合業界需求，工研院量測中心及奈米中心於2007年，針對IC半導體產業及傳統產業做親訪式問卷調查。針對半導體製程及檢測部份，中、長期的需求(對應至ITRS 2013年)，在32nm及22nm的製程要求下，為了提高良率，除了新薄膜材料的開發(如high-k、low-k)外，仍以薄膜表面或表面下結構的CD檢測為主，包括單一線寬或多條線寬的uniformity、缺陷檢測、奈米微粒或空隙在bare wafer和patterned wafer表面檢測。除CD檢測標準建立，奈米結構所衍生的功能性檢測，亦為生產製程所必須。由於薄膜材料多為鍍製於基材上單層或多層之結構，元件可靠與否與薄膜材料之機械性質息息相關。因此，如

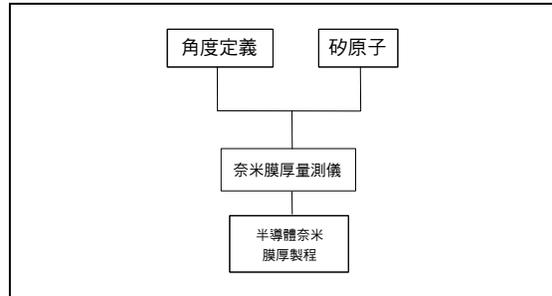
材料。雖然目前已有許多商品化的膜厚參考物質可取得，但多數為厚度介於10~200nm的熱成長二氧化矽薄膜，並以使用旋轉偏振器分光式橢圓偏光儀(rotating-polarizer spectroscopic ellipsometer；RPSE)，來測定二氧化矽薄膜的厚度與折射率。藉由量測所得的橢圓偏光函數 $\tan\psi$ 與 $\cos\Delta$ 的最小平方法擬合，來間接求得熱成長二氧化矽薄膜的厚度與折射率。國家度量衡實驗室所建立的薄膜量測系統，即是使用旋轉偏振器分光式橢圓偏光儀(SOPRA S. A. GESp5)，進行薄膜厚度校正。薄膜量測系統的評估及擴充不確定度的計算，則是依據「ISO Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement」⁽³⁾。為達到量測的品質保證，本實驗團隊定期量測 National Institute of Standards and Technology (NIST)標準參考物質的薄膜厚度，並比較其結果。薄膜校正系統利用經橢偏儀校正薄膜標準片作為不確定度的傳遞，其傳遞路徑如圖二。

(一)橢圓偏光量測原理

橢圓偏光量測技術的基本原理，簡單說明如下。橢圓偏光量測技術的量測參數是複數 Fresnel 反射係數的比率⁽⁴⁾，其公式如式(1)。

$$\rho = \frac{r_p}{r_s} = \tan \Psi \exp i\Delta \quad (1)$$

其中 $r_p(r_s)$ 為光的偏振方向平行(垂直)於入射面的複數 Fresnel 反射係數，而 ψ 與 Δ 為傳統的橢圓偏光量測參數。一般來說，橢圓偏光儀不直接去量測 ρ 值，而是量測可推導出 ρ 值的參數。橢圓偏光儀的旋轉偏振器可以偵測、記錄隨時間相依的光強度，此光強度為偏振器角



▲圖二 系統追溯圖

頻率的函數，其中 α 與 β 為 Fourier 係數，其公式如式(2)。

$$I = I_0(1 + \alpha \cos 2P + \beta \sin 2P) \quad (2)$$

其中 I_0 為平均光通量，而 P 為旋轉偏振器的方位角。透過式(3)可以由 Fourier 係數 (α, β) 來計算出橢圓偏光常數。

$$\begin{aligned} \tan \Psi &= \tan A \sqrt{\frac{1+\alpha}{1-\alpha}}, \\ \cos \Delta &= \frac{\beta}{\sqrt{1-\alpha^2}} \end{aligned} \quad (3)$$

其中 A 值為相對於入射面方位角的量測值。為了將量測所得的參數與薄膜的物理特性聯繫起來，採用由矽基板二氧化矽薄膜空氣所構成的單層結構模型。對每片晶片來說，以熔融二氧化矽本體與voids的等效中間近似法(effective medium approximation)來作為二氧化矽薄膜的模型。矽本體的折射率可由文獻中獲得⁽⁵⁾。在關注的波長範圍內，折射率的虛部假設為零，待校晶片的薄膜厚度是由一週內5次個別量測的平均值所計算而得，而每一次量測所得的膜厚值是透過最小平方法的擬合，由 ψ 與 Δ 的線性回歸分析而得。在最小平方法的擬合過程中，當無偏估計值 χ^2 (unbiased estimator)趨近於零時，可得到變數的最佳擬合值，其中無偏估計值 χ^2 定義為擬合值與實驗量測值之間的差異。

$$\chi^2 = \frac{1}{N-p-1} \sum \{ [\Psi_{exp}(\lambda_j) - \Psi_{cal}(\lambda_j, z)]^2 + [\Delta_{exp}(\lambda_j) - \Delta_{cal}(\lambda_j, z)]^2 \} \quad (4)$$

其中 N 為量測時光譜波長的點數，而 p 為變數的數目⁽⁶⁾。此模型中的變數包括二氧化矽層的厚度與折射率等。由此一迴歸分析所得到的量測膜厚值表示如式(5)。

$$t(G) = t_G + \sigma_{t_G} \quad (5)$$

其中 t_G 為厚度的最佳擬合值， σ_{t_G} 為由迴歸分析所得的膜厚值標準差。於是待校晶片最終的膜厚值與折射率大小，可由一週內5次個別量測的平均值計算而得，而每一次量測所得的膜厚值是由 ψ 與 Δ 的線性迴歸分析所獲得。一般來說，橢圓偏光儀的量測是在 $0.25\sim 0.85\mu\text{m}$ 的波長範圍內，取120個波長點數。為了降低擬合變數間的關聯性所造成的不確定度，以原生氧化層厚度量測結果，作為量測入射角。其中，假設原生氧化層和熔融二氧化矽本體是相符的，然後以入射角與膜厚值作為擬合變數。在每一次的量測中，當重新裝載樣品時，二軸晶片座必須做精細的調節。把從原生氧化層所得到的入射角值當作固定的參數，其它從同一晶片所獲得的變數，可透過橢圓偏光量測的回歸分析估算而得⁽⁷⁻⁹⁾。

(二)薄膜量測系統的評估

待校晶片的膜厚值是重複量測的平均值，並帶有A類與B類的不確定度。膜厚值是由 ψ 與 Δ 的量測值而得，其中 ψ 與 Δ 值在已知入射角 ϕ 與 λ 波長的情況下可同時獲得，因此 ϕ 與 λ 的值所造成的不確定度，須納入膜厚的總體不確定度當中。於是膜厚值及其不確定度可表示如式(6)。

$$t = \bar{t}_G + \varepsilon_\phi + \delta_t + \delta_\phi + \delta_{NS} \quad (6)$$

其中 \bar{t}_G 為膜厚值5次量測的平均值，其中 \bar{t}_G 是由迴歸分析所得； ε_ϕ 為由入射角最佳擬合值透過5次重複量測誤差所貢獻； δ_t 為由膜厚迴歸分析誤差所貢獻； δ_ϕ 為由入射角迴歸分析誤差所貢獻； δ_{NS} 為非統計方法所得之誤差所貢獻(B類)。因此膜厚值的組合標準不確定度可表示如式(7)。

$$u_c(t) = \sqrt{u^2(\bar{t}_G) + u^2(\varepsilon_\phi) + u^2(\delta_t) + u^2(\delta_\phi) + u^2(\delta_{NS})} \quad (7)$$

其中 $u(\bar{t}_G)$ 與 $u(\varepsilon_\phi)$ 分別為膜厚值與入射角大小的最佳擬合值，經過5次重複量測所得的不確定度，而 $u(\delta_{NS})$ 以用非統計方法獲得的膜厚值的不確定度分量。透過迴歸分析，可以計算膜厚值與入射角大小的不確定度，其不確定度表示為 $u(\delta_t)$ 與 $u(\delta_\phi)$ 。

(三)不確定度源

不確定度分量 $u(\bar{t}_G)$ 與 $u(\varepsilon_\phi)$ ：

不確定度分量 $u(\bar{t}_G)$ 與 $u(\varepsilon_\phi)$ 是由迴歸分析的最佳擬合值所得到的標準，為了要估計這兩個不確定度分量，在5天中重複橢圓偏光的量測，並計算膜厚值與入射角大小最佳擬合值的標準差。根據最近所做的厚度為100nm NIST SRM量測結果，5次量測結果的標準差分別為0.0440nm與0.004nm(表一)，其標準不確定度如下： $u(\bar{t}_G) = \frac{0.0440}{\sqrt{5}} = 0.0197$ 與 $u(\varepsilon_\phi) = \frac{0.004}{\sqrt{5}} = 0.001789$ ，靈敏係數同為1。

1. 不確定度分量 $u(\delta_t)$ 與 $u(\delta_\phi)$ ：

$u(\delta_t)$ 與 $u(\delta_\phi)$ 也是由迴歸分析的標準差所得到的標準，經由每天的量測，可得到公式(5)中的5個 σ_{t_G} 值，具有95%的信賴水準，其對於膜厚值的不確定度貢獻如式(8)。

$$u(\delta_t) = \sqrt{\frac{u_1^2(\delta_t) + \dots + u_5^2(\delta_t)}{5}} \quad (8)$$

▼表一 量測厚度為100nm的NIST SRM的原始數據

	Day 1	Day 2	Day 3	Day 4	Day 5	Average	Std. (nm)
Thickness(nm)	97.1400	97.1600	97.1900	97.2000	97.0900	97.1560	0.0440
Inc. Angle(degree)	75.1080	75.1140	75.1090	75.1080	75.1030	75.1084	0.0040
Thickness Std.(nm)	0.0480	0.0500	0.0480	0.0470	0.0520	0.0490	0.0490
Inc. Angle Std(degree)	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001

而入射角相對應的不確定度 $u(\delta_\phi)$ ，可經由相同的方法計算而得。由於每一天的量測共有120個數據點，因此每一天的量測自由度為118(=120-2)。厚度為100nm的NIST SRM五次量測結果的組合標準差分別為0.049nm與0.0001nm(請參見表二)。其標準不確定度為 $u(\delta_t)=0.049$ 與 $u(\delta_\phi)=0.0001$ ，靈敏係數同為1。

2. 入射角不確定度 $u(\delta_g)$ 與 $u(\delta_a)$ ：

入射角不確定度 $u(\delta_g)$ ， $u(\delta_a)$ 是屬於B類標準不確定度，包含了測角器校正($\delta\theta_g$)以及角度規塊校正($\delta\theta_a$)的貢獻，因此，根據國家度量衡標準實驗室測角器校正程序⁽¹⁰⁾，可得 $\delta\theta_g < 0.015^\circ$ 。而根據國家度量衡標準實驗室長度研究室所發行的校正報告B930035， $\delta\theta_a = 0.001^\circ$ ，其有效自由度為60。

每一次量測中以相同的旋轉方向來達到所有測角器的角度位置，避免測角器電動機驅動系統小幅度的反衝所造成的不確定度。為了要由單位為度的 $\delta\theta_g$ 與 $\delta\theta_a$ 來推估單位為nm的 $u(\delta_g)$ 與 $u(\delta_a)$ ，以實驗方法量得 $\frac{\partial t}{\partial \theta}$ 的比率為 $0.55 \text{ \AA}/0.1^\circ$ 。因此 0.015° 可轉換成 $0.015 \times 0.55 = 0.00825 \text{ nm}$ 。假設呈矩形分佈，其標準不確定度為 $u(\delta_a) = \frac{0.00055}{2\sqrt{3}} = 0.00016$ ，靈敏係數 $\frac{\partial t}{\partial \delta_a}$ 為1，估計其相對不確定度為10%，則可得自由度 $\nu(\delta_g)$ 為50。同樣的 0.001° 可轉換成 $0.001 \times$

$0.55 = 0.00055 \text{ nm}$ 。假設呈矩形分佈，其標準不確定度為 $u(\delta_a) = \frac{0.00055}{2\sqrt{3}} = 0.00016$ ，靈敏係數 $\frac{\partial t}{\partial \delta_a}$ 為1，估計其相對不確定度為10%，則可得自由度 $\nu(\delta_a)$ 為50。

3. 波長的不確定度 $u(\delta_\lambda)$ ：

選用光譜儀的解析度來代表波長的不確定度，並以實驗方法量得光譜儀的光譜解析度為0.033nm。然而根據Woollam, et al.⁽¹¹⁾，當波長範圍設定在400~750nm時，即使是0.5nm的誤差，對於膜厚準確性的影響仍是微乎其微的。因此對於本實驗不確定度0.033nm來說，在不確定度的計算中可以忽略此分量。

4. 偏振器的橢圓率(在經過分區平均之後)：

偏振器的橢圓率在經過量測的分區平均之後是可忽略的，其中量測時分析器的方位角設定在+A與-A⁽⁷⁾。分區平均是透過量測控制軟體GESPAK 7.0版來自動執行。

5. 偵測器的非線性(在主入射角時)：

偵測器的非線性所造成的不確定度是可忽略的，因為選定的入射角(固定於 75°)是接近於矽的主角度，且在每一個波長的量測點下，偵測器的方位角會自動調變至非常接近 ψ 值，因此被偵測到的光強度的分量是正負交替地接近於零。

(四)擴充不確定度

依據上述的分析以及式(7)，膜厚的組合標準不確定度包含了A類標準不確定度與B類標準不確定度，可進一步表示如式(9)。

$$u_c(t) = \sqrt{u^2(\bar{t}_G) + u^2(\varepsilon_\phi) + u^2(\delta_t) + u^2(\delta_\phi) + u^2(\delta_g) + u^2(\delta_a)} \quad (9)$$

以量測薄膜厚度為100nm的NIST SRM為例，來計算一般情況下的不確定度。在假設測角器的校正為矩形分佈(自由度50)下，且所有分量的靈敏係數皆為1，以表二為例的組合標準不確定度經計算，可以表示如式(10)。

$$u_c(t) = \sqrt{(0.0197)^2 + (0.001789)^2 + (0.049)^2 + (0.0001)^2 + (0.0024)^2 + (0.00016)^2} = 0.53 \text{ nm} \quad (10)$$

擴充不確定度可由式(11)計算而得：

$$U(t) = k \times u_c(t) \quad (11)$$

其中

$U(t)$ ：待校二氧化矽晶片的膜厚擴充不確定度

$u_c(t)$ ：待校二氧化矽晶片的膜厚組合標準不確定度

$k=t_{95}(v_{eff})$ ：擴充係數，具有95%的信賴水準，其有效自由度為 v_{eff}

有效自由度 v_{eff} 可由下式計算而得(以表二為例)：

$$v_{eff} = \frac{u_c^4(t)}{\left(\frac{u^4(\bar{t}_G)}{v_{\bar{t}_G}} + \frac{u^4(\varepsilon_\phi)}{v_{\varepsilon_\phi}} + \frac{u^4(\delta_t)}{v_{\delta_t}} + \frac{u^4(\delta_\phi)}{v_{\delta_\phi}} + \frac{u^4(\delta_g)}{v_{\delta_g}} + \frac{u^4(\delta_a)}{v_{\delta_a}} \right)} = \frac{0.053^4}{\left(\frac{0.0197^4}{4} + \frac{0.001789^4}{4} + \frac{0.049^4}{590} + \frac{0.0001^4}{590} + \frac{0.0024^4}{50} + \frac{0.00016^4}{50} \right)} = 165 \quad (12)$$

因此，組合標準不確定度的有效自由度為165，由此本實驗得到擴充係數為1.98，具有95%的信賴水準，於是膜厚的擴充不確定度如式(13)。

$$U(t) = k \times u_c(t) = 1.98 \times 0.53 = 0.105 \text{ nm} \approx 0.2 \text{ nm} \quad (13)$$

經過上述的系統分析與評估之後，奈米薄膜校正系統-分光式橢圓偏光儀的能量訂定如下。

標準物質：熱成長二氧化矽薄膜

膜厚：10~200nm

波長掃描的範圍：0.25 ~0.85 μm

晶片大小：直徑1"~12"

擴充不確定度：0.2nm

信賴水準：95%

擴充係數k：1.98

▼表二 薄膜厚度為100 nm的NIST SRM的不確定度分量表

u	不確定度源	不確定度類型	機率分佈	不確定度分量	自由度
$u(\bar{t}_G)$	以回歸分析所得之膜厚最佳擬合值	A	t	0.0197 nm	4
$u(\varepsilon_\phi)$	以回歸分析所得之入射角最佳擬合值	A	t	0.00179 nm	4
$u(\delta_t)$	以回歸分析所得之膜厚的標準差	A	Normal	0.049 nm	590
$u(\delta_\phi)$	以回歸分析所得之入射角的標準差	A	Normal	0.0001 nm	590
$u(\delta_g)$	測角器校正	B	Rectangular	0.0024 nm	50
$u(\delta_a)$	角度規塊校正	B	Rectangular	0.00016 nm	50

四、結論

半導體工業快速的進步發展，亟需國家實驗室提供準確的厚度量測技術，及完整校正追溯服務，尤其是薄膜厚度薄至奈米等級時，需要更準確的厚度量測技術及校正系統。工研院量測中心接受經濟部標準檢驗局委託，開發國家奈米薄膜量測標準系統並開放服務，期能直接配合國內奈米技術相關產業的發展與需要，提供服務並促進產業發展。

本文敘述評估奈米薄膜校正系統-分光式橢圓偏光儀的程序，根據國際標準組織(International Standards Organization ; ISO)所提出的「Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement」，來分析分光式橢圓偏光儀系統的不確定度。利用橢圓偏光量測中，量測傳統橢圓偏光Fresnel反射係數的比率中的 ψ 與 Δ ，計算出橢圓偏光常數。實際量測中，量得的參數須與薄膜的物理特性聯繫起來，因此採用由矽基板二氧化矽薄膜、空氣所構成的單層結構模型。對每一片晶片來說，以熔融二氧化矽本體與voids的等效中間近似法(effective medium approximation)，來作為二氧化矽薄膜的模型。在量測的波長範圍內，折射率的虛部假設為零。待校晶片的薄膜厚度是由一週內5次個別量測的平均值所計算而得，而每一次量測所得的膜厚值是透過最小平方方法的擬合，由 ψ 與 Δ 的線性回歸分析而得。

擴充不確定度的評估，包括了A類標準不確定度與B類標準不確定度的組合標準不確定度。其不確定度源有以回歸分析所得之膜厚最佳擬合值 $u(\bar{t}_G)$ 、以回歸分析所得之入射角最佳擬合值 $u(\varepsilon_\phi)$ 、以回歸分析所得之膜厚的標準

差 $u(\delta_i)$ 、以回歸分析所得之入射角的標準差 $u(\delta_\phi)$ 、測角器校正 $u(\delta_g)$ 、角度規塊校正 $u(\delta_a)$ 。

由於橢圓偏光儀是以間接的方法來量測膜厚值，因此很難評估其量測結果的準確性。就評估結果而言，不確定將受薄膜厚度的影響，但無明顯證據顯示呈線性分佈。因此，待測之校正件，將完全依據評估程序，並計算擴充不確定度。就保守估計的角度而言，如計算所得之擴充不確定度是否小於0.2nm，最佳校正能力將以0.2nm為基準。因此，量測系統採用95%的信賴水準，估算有效自由度為165，經查表得擴充係數 k 值為1.98，奈米薄膜校正系統-分光式橢圓偏光儀的擴充不確定度 U 為0.2nm。

參考文獻

1. M. Law, L. E. Greene, J. C. Johnson, R. Saykally and P. Yang, "Nanowire dye-sensitized solar cells", *Nature Materials*, 4, 2005, 455.
2. International Technology Roadmap for Semiconductors, 2007 edition (ITRS).
3. ISO/IEC Guide 98-3:2008, Uncertainty of measurement - Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM:1995).
4. R. M. A. Azzam and N. M. Bashara, *Ellipsometry and Polarized Light*, North-Holland, Amsterdam, 1977.
5. E. D. Palik, *Handbook of Optical Constants of Solids*, Academic Press, Boston, 1991.
6. G. E. Jellison, Jr., *Appl. Optics* 30, 3354, 1991; G.E. Jellison, Jr., *Thin Solid Films* 234, 1993, 416.
7. G. A. Candela, D. Chandler-Horowitz, J. F. Marchiando, D. B. Novotny, B. J. Balzer, and M. C. Croarkin, *Standard Reference Materials*, NIST Special Publication 260, 1988, 109.
8. N. R. Draper, *Applied Regression Analysis*, John Wiley & Sons, 1998.
9. J. M. Cameron, *The Use of the Method of Least Squares in Calibration*, NBSIR 74, 1974, 587.
10. Hyeyoung Ahn, *Calibration Procedure for the Thin Film Measurement System*, CMS-ICT, 2001.
11. J. A. Woollam, J. N. Hilfiker, C. L. Bugay, R. A. Synowicki, T. E. Tiwald, and D. W. Thompson, "Spectroscopic Ellipsometry From the Vacuum Ultraviolet to the Far Infrared", in *Characterization and Metrology for ULSI Technology*, AIP CP550, 2001, 511-518.