

應用雙向反射分佈函數量測技術的多方位光學散射光量測系統之研發

劉承揚
工研院量測中心
CY_Liu@itri.org.tw

劉子安
工研院量測中心
liutzean@itri.org.tw

傅尉恩
工研院量測中心
WeienFu@itri.org.tw

摘要

奈米微粒分布及粒徑量測是半導體製程中相當重要的量測參數，其基本要求即是晶圓表面奈米微粒之尺寸大小、數量及分布。針對此需求，本文提出一奈米級的多方位偏振散射光量測系統，我們將此量測系統分成三個部分，包括偏振光源裝置、待測物運動機構和光接收裝置等，將這三個部分整合即可成為奈米級的散射光微粒量測系統，可量測的微粒直徑範圍為 100 nm~1 μ m，並可承載 4~8 吋的晶圓進行量測。

關鍵字：散射光量測、晶圓表面奈米微粒、多軸方向調整器

壹、前言

在半導體與平面顯示器的製程當中，晶圓表面加工前後的品質對於往後成品的良率有直接的影響。因此在任何加工前或清洗後，晶圓表面的品質檢測，包括缺陷或微粒等，均是非常重要的量測參數。偵測奈米級微粒的散射光藉以判斷其粒徑大小與分佈是一個非常有效的量測方法。近年來，美國標準與技術研究院的 Germer 博士在這方面有相當傑出的研究成果[1]，包括奈米微粒散射光的計算理論建立以及偏振散射光的量測系統等，並推行晶圓表面奈米微粒量測的能力比對，從以了解各種奈米級光學量測設備量測能力。本文主要為建立一晶圓表面微粒檢測系統，藉由改變入射光的偏振態，量測散射光的雙向反射分佈函數 (bidirectional reflectance distribution function, BRDF) [2]，經由 Mueller 矩陣的計算來歸納出偏振光強與粒徑大小的關係。

貳、散射光量測理論

晶圓表面微粒可以依下列光散射的幾何光路來判斷[2]。雷射以角度 θ_i 入射晶圓表面，如圖 1 所示。產生角偏的散射光，並與圖中 Z 軸夾角為 θ_r 。從 Rayleigh 的光散射理論來說，當微粒直徑遠小於光波長時，散射光源可視為點偏振 dipole。光源入射晶圓表面微粒後，產生之反射光也會照射在微粒上，形成 dipole，產生半圓的散射光。我們可以根據 BRDF 來定義由微粒所產生的散射光函數[3]，如下所示：

$$f(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r) = \frac{\partial \Phi_r}{\partial \omega} \frac{1}{\Phi_i \cos \theta_r} \quad (1)$$

其中 $\frac{\partial \Phi_r}{\partial \omega}$ 為每固定角度的散射光強度， Φ_i 為入射光強度， θ_r 為散射光極角， ϕ_r 為散射光方位角， θ_i 為入射光極角， ϕ_i 為入射光方位角。

首先，若我們可設定 $\theta_i = \theta_r = 45^\circ$ 和 $\phi_r = 90^\circ$ ，即可量測表面微粒的散射光能量大小。我們設計一個可以 4 方向旋轉的方向調整器 (goniometer) 用來承載待測晶圓，以便進行旋轉與掃描晶圓表面的動作，如此可以量測整個晶圓表面上的粒徑大小與分佈。為了有效的量測奈米微粒各種散射光的強度，必須設計一個可以多方向旋轉的運動機構來加以配合。如圖 2 所示，為一個可以四個角度旋轉的方向調整器設計，其可旋轉角度分別為 α 、 β 、 γ 及 δ 。角度 α 為繞著主軸旋轉的角度，角度 β 為使得試片載具可以繞著垂直主軸的方向旋轉，角度 γ 為試片載具可繞著主軸自轉，角度 δ 則是光偵測

器可獨立繞著主軸旋轉。如此以來運用此四個角度的旋轉搭配便可以達到我們想要旋轉的入射光與散射光的角度 θ_i 、 θ_r 、 ϕ_i 及 ϕ_r 等。妥善的利用這些旋轉角度，我們即可有效的偵測到由奈米微粒所反射的散射光，再藉由偏振散射強度的計算得知微粒粒徑大小。

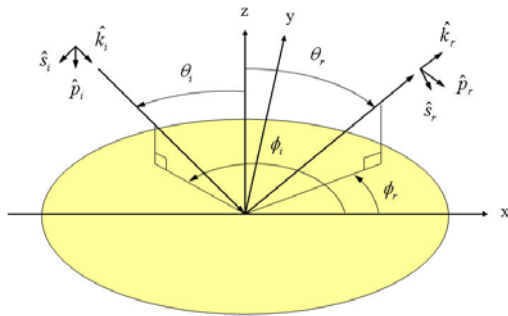


圖 1. 散射光角度座標系統

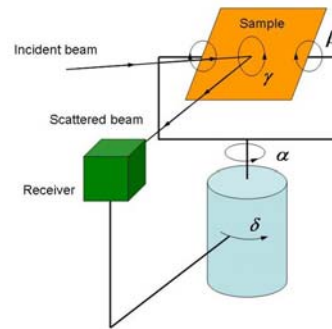


圖 2. 四個角度旋轉的方向調整器

參、晶圓表面奈米微粒量測系統

整個散色光量測系統架構如圖 3 所示，此量測系統主要利用雷射光打入欲量測的晶圓表面，然後利用一光接受裝置來收取微粒的散射光，利用此散射現象來判斷晶圓上微粒的粒徑大小。因此整個量測系統可以分成三個部分來組成，包含光源裝置、待測物運動機構、光接收裝置等。

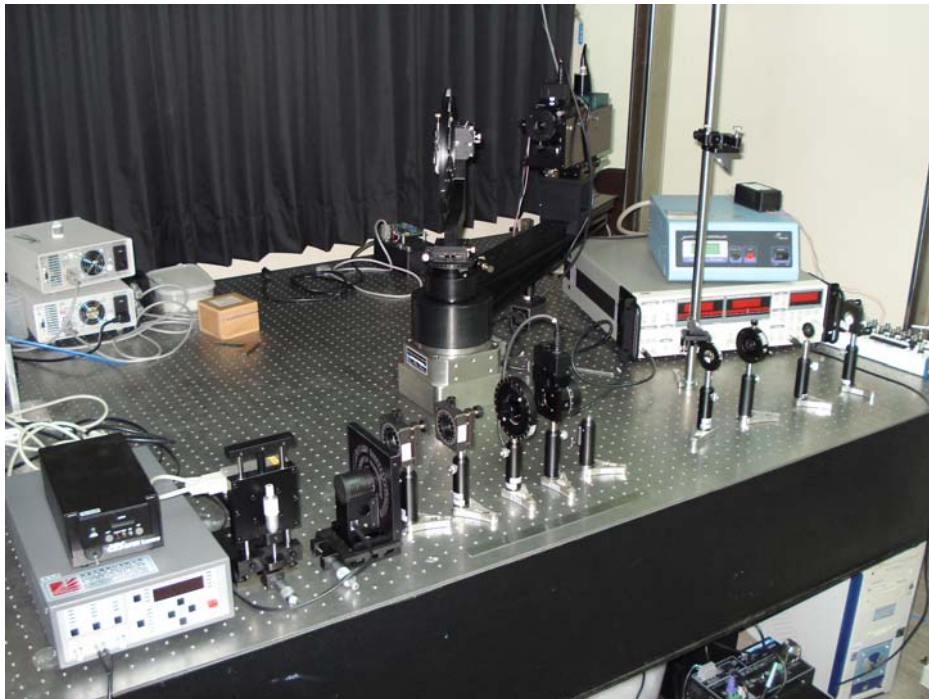


圖 3. 晶圓表面奈米微粒量測系統

在光源裝置部分，其必須提供穩定且固定偏振方向的雷射光源，如圖 4 所示。在光源裝置中，我們使用光波長為 532 nm 的綠光雷射當光源，光截波器(Chopper)用於給予入射光強度適當的調變，以便於接收器的接收與提高訊噪比。偏振片和二分之一波片(Half wave plate)可以用來控制光的偏振方向，我們使用一電控的自動旋轉平台來控制偏振片和光學平板的旋轉角度，其解析度為 0.005 度，如此一來可以很精密的控制偏振光的旋轉角度。透鏡用來將雷射光束聚焦於試件上，針孔則用來過濾不需要的雷射光並控制光點大小。

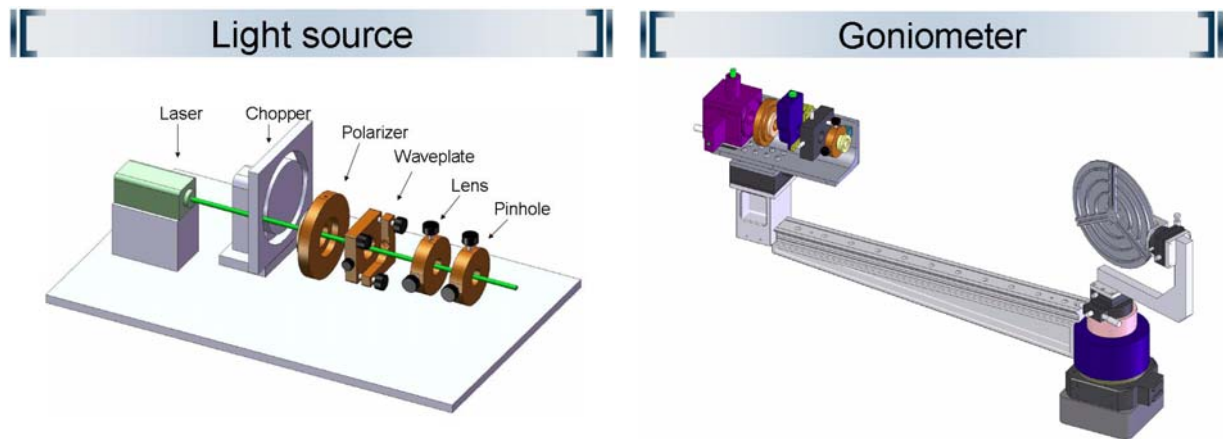


圖 4. 偏振光源裝置

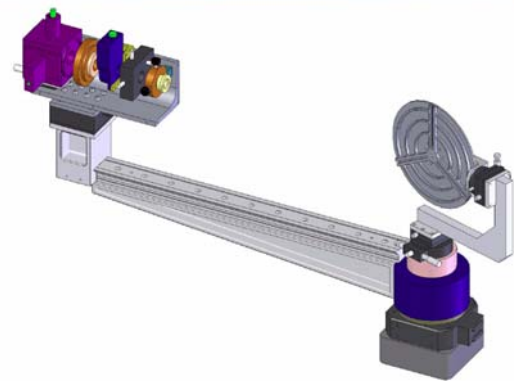


圖 5. 待測物運動機構

量測用方向調整器又可稱為待測物運動機構，主要為一個 3 軸向 4 個角度旋轉的機構，如圖 5 所示，其主要目的為使待測物可以自行旋轉運動，以便光接收裝置可以接收到不同角度微粒的散色光。本研究自行設計了符合在散射光量測理論分析中相當重要的 4 個角度 α 、 β 、 γ 、 δ 的運動機構，在圖 5 中光接收裝置可繞著試件做 360 度的旋轉（角度 δ ），而試片夾持器亦可以 360 度自旋（角度 α ）與傾斜（角度 β ）。光接收裝置還可以在懸臂上移動，藉以接收到微粒的散射光。在試片拖方面，此試片拖盤可以分別裝載 4 吋、6 吋、8 吋的晶圓試片，用以量測附著在晶圓表面上的奈米微粒。我們並在機構中加入一精密的電控旋轉平台用以控制旋臂的旋轉角度，也就是控制光接收裝置的角度，如此一來可以精確的控制散射光的偵測角度。光接收裝置主要用來收取從晶圓表面上的散射光，如圖 6 所示，汲取散射光強度後可以經由本文後方的公式用以判斷附著在晶圓表面上微粒的粒徑大小。在光接收裝置中，針孔用於過濾散雜光，而透鏡用於將光線聚焦至積分球，偏振片和二分之一波片用於控制欲量測偏振光的方向，積分球則用於降低並除去因光線之形狀、發散角度、及偵測器上不同位置之響應度差異所造成之量測誤差，以便在偵測光強度大小時，提高量測之準確度。在積分球上裝有一個光偵測器和一個光電倍增管，當光強度足夠的時後使用光偵測器來量測光強度，當光能量相當微弱時則切換到使用光電倍增管來量測光強度，如此便可有效的偵測收集的光訊號。我們亦使用一個電腦控制的自動旋轉機構來控制偏振片的旋轉角度，因此可以很精密的量測不同角度的偏振散射光。

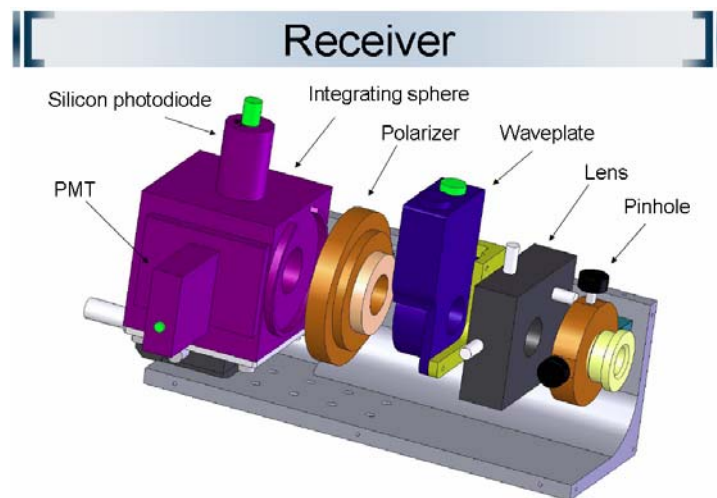


圖 6. 光接收裝置

在描述及計算光的偏振特性時，我們常用 Mueller 矩陣[3]來表達，當光與介質產生交互反應的時後可以使用一個 4×4 的 Mueller 矩陣 M 來表示：

$$M = \begin{pmatrix} M_{11} & M_{12} & M_{13} & M_{14} \\ M_{21} & M_{22} & M_{23} & M_{24} \\ M_{31} & M_{32} & M_{33} & M_{34} \\ M_{41} & M_{42} & M_{43} & M_{44} \end{pmatrix} \quad (2)$$

在量測時我們使用 $\omega:4\omega$ 方法[4]，也就是說，當第一個二分之一波片的旋轉為 ω 時，第二個光學平板的旋轉為 4ω ，如此一來所量測到的訊號即為光學平板旋轉角度的函數，可表示為：

$$A(\xi) = \sum_j [c_j \cos(j\xi) + s_j \sin(j\xi)] \quad (3)$$

其中 c_j 和 s_j 值可由 Fourier 分析得到，所以 Mueller 矩陣中的元素可以簡單的利用 c_j 和 s_j 來表示[5]，如下所示：

$$M = \begin{pmatrix} c_0 & -c_4 & -s_4 & n.d. \\ c_{16} & -c_{12} - c_{20} & s_{12} - s_{20} & n.d. \\ s_{16} & -s_{12} + s_{20} & -c_{12} + c_{20} & n.d. \\ n.d. & n.d. & n.d. & n.d. \end{pmatrix} \quad (4)$$

由於本系統使用二分之一的光學平板，所以 Mueller 矩陣中的第 4 行和第 4 列均無法求得。在實際量測時，同時旋轉兩個光學平板，並做 16 次的量測，第一個二分之一的光學平板從 0° 轉到 $90^\circ \times (15/16) = 84.375^\circ$ ，同時第二個二分之一的光學平板從 0° 轉到 $360^\circ \times (15/16) = 337.5^\circ$ 。將這 16 個量測值做 Fourier 轉換即可得到我們所需的 Fourier 係數 c_j 和 s_j ，然後再將所得到的 Fourier 係數帶入方程式 4 中即可得到此時偏振光的 Mueller 矩陣。不同的粒徑大小會產生不同的 Mueller 矩陣，經由量測和計算之後，我們發現經由散射光能量的大小可以用來判斷得知奈米微粒的直徑大小。

肆、結論

本文詳細說明散色光量測系統架構之規劃與設計，我們將量測系統設計成三個部分，包括光源裝置、待測物運動機構和光接收裝置，將這三個部分整合即可成為一散射光量測系統，其可量測的微粒粒徑範圍為 $100 \text{ nm} \sim 1 \mu\text{m}$ 、雷射光的 spot size 為 0.5 mm ，雷射波長為 532 nm 。因此使用散射光量測系統來量測晶圓表面上微粒的粒徑、分佈等參數是非常實用且有效的。

伍、參考文獻

- [1] T. A. Germer, & C. C. Asmail. (1997). A goniometric optical scatter instrument for bidirectional reflectance distribution function measurements with out-of-plane and polarimetry capabilities. Proc. SPIE. 3141, 220-231.
- [2] L. Sung, G. W. Mulholland & T. A. Germer. (1999) Polarized light-scattering measurements of dielectric spheres upon a silicon surface. Optics Letters. 24, 866-868.
- [3] T. A. Germer & C. C. Asmail. (1999) Goniometric optical scatter instrument for out-of-plane ellipsometry. Review of Scientific Instruments. 70, 3688-3695.
- [4] R. M. A. Azzam. (1978) Photopolarimetric measurement of the Mueller matrix by Fourier analysis of a single detected signal. Optics Letters. 2, 148-150.
- [5] J. H. Kim, S. H. Ehrman, W. Mulholland & T. A. Germer. (2001) Polarized light scattering

from metallic particles on silicon wafers. Proc. SPIE. 4449, 281-290.