

疊對量測不確定度評估

龐秀蘭

工業技術研究院量測技術發展中心

hsiulanpang@itri.org.tw

顧逸霞

工業技術研究院量測技術發展中心

ysku@itri.org.tw

摘要

由於半導體製程關鍵尺寸(Critical Dimension)設計的逐年減小，利用傳統光學顯微鏡判讀半導體製程中層對層之間的疊對準確度已愈趨困難，根據 ITRS(International Technology Roadmap of Semiconductor) 2005 年對關鍵尺寸的要求，已由 2004 年的 90 nm 減小為 80 nm，相對於疊對量測的準確性要求，則由 2004 年的 3.2 nm 減小為 2.8 nm。針對製程線寬逐年減小，疊對量測準確度要求逐年提高，不確定度的評估愈趨重要。本文將針對疊對量測系統，提出量測不確定度的評估方法，包括系統重覆量測(動態重覆量測及靜態重覆量測)、量測機台所造成的不確定度影響(Tool Induce Shift-TIS)、晶圓製作所造成的不確定度影響(Wafer Induced Shift-WIS)、不同量測機台的誤差(Tool Matching)以及系統追溯參考量測系統(Reference Measurement System-RMS)，其中的參考量測系統可選用 CDSEM 或 CDAFM 量測儀器，藉由 Mandel 所提出的分析方法，將疊對量測系統與參考量測系統做比對，再由迴歸曲線計算出系統總量測不確定度(Total Measurement Uncertainty-TMU)。

關鍵字：疊對量測(Overlay measurement)，TIS(Tool Induce Shift)，WIS(Wafer Induce Shift)，參考量測系統(Reference Measurement System-RMS)

一 前言

對於新世代製程控制量測誤差評量表的急劇縮小，我們需要更清楚了解由 metrology tool 使用所得到總量測不確定度的定義。由量產晶圓線上的疊對量測分析數據，可以將資料回饋給 scanner 來控制光學微影系統的層對層對位，一般疊對量測不確定度影響來自於三大部分：一是量測儀器的貢獻包含了重複量測精密度(Precision)，量測機台的變動以及不同量測機台的誤差；二是晶圓製作的貢獻包含了製程的誤差，光罩的誤差及系統誤差，三是微影過程的貢獻包含了 scanner 的鏡片像差，scanner model 的極限等等。以往只考慮量測儀器所造成之不確定度，近年來愈多研究焦點專注在製程過程及微影過程的影響，其中由晶圓和光罩所貢獻之不確定度被定義為 Overlay Mark Fidelity(OMF)，傳統的 Box-in-box target OMF 約有 4-5 nm(3σ) 的不確定度貢獻。

目前商品化微影疊對量測方法是由亮場顯微術主導，係利用可見光為光源，其波長範圍約為 0.4~0.7 μm 。針對計量量測的目的，疊對量測圖樣被設計製作在晶片元件邊緣的切割道(Scribe line)上。雖然目前的製程線寬比可見光的波長更小，微影疊對量測圖樣卻必須遠大於最小的製程線寬才可被可見光鑑別量測。目前先進的商用量測機台所使用的疊對量測圖樣如 Fig 1，上下層條狀圖樣中心點疊對量測(Bar-in-bar)的設計尺寸大約為邊長 28 μm 。近年來的研究發展趨勢著重於發展新式的等距式量測圖像(periodic target)，另一方面則著重於改進光學系統設計及數值演算分析方法，以降低製程相關所導入但無法量化的 WIS 誤差。為了測試新設計的疊對圖像，需要設計光罩(Mask)及使用晶圓(Wafer)製造設備。並且使用至少一種量測機台及掃描式電子顯微鏡來量測疊對圖像及驗證新式

數值演算分析法。新設計的疊對圖像在光阻層(photo resist layer)完成微影曝光製程後所進行的蝕刻製程前後的量測結果比較將有助於定出各式新設計的疊對圖像準確度。

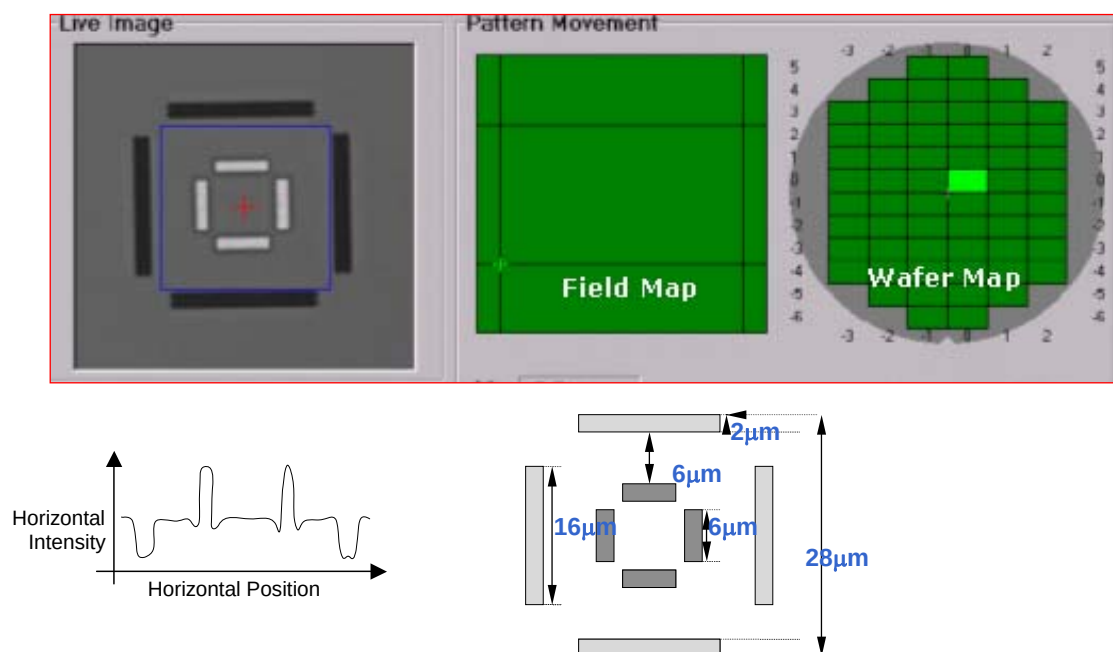


Fig 1 Bar-in-bar target

二 研究方法

設計尺寸 $28\mu\text{m}$ 的 Bar-in-bar 微影疊對量測圖樣，在晶圓製程上採用正光阻劑，製程中經過曝光顯影後將會留下光罩上不透光部份的圖樣，經由光罩上圖樣透光與不透光之排列組合，可以得到 3 種不同微影曝光圖樣如 Fig 2, 3, 4 所示，圖樣製作基材為 Si 晶圓，第一層微影疊對圖樣在材料 SiO_2 上，第二層微影疊對圖樣在光阻(PR)層上，利用微影疊對量測機台 Caliper，每種圖樣量測五個 field，計算其重覆量測精密度與 TIS，Fig 5 為晶圓圖樣；另外設計 OMF 的量測圖樣，在每個 field 內放置 9×9 個 Bar-in-bar 圖樣，Fig 6 為晶圓圖樣。

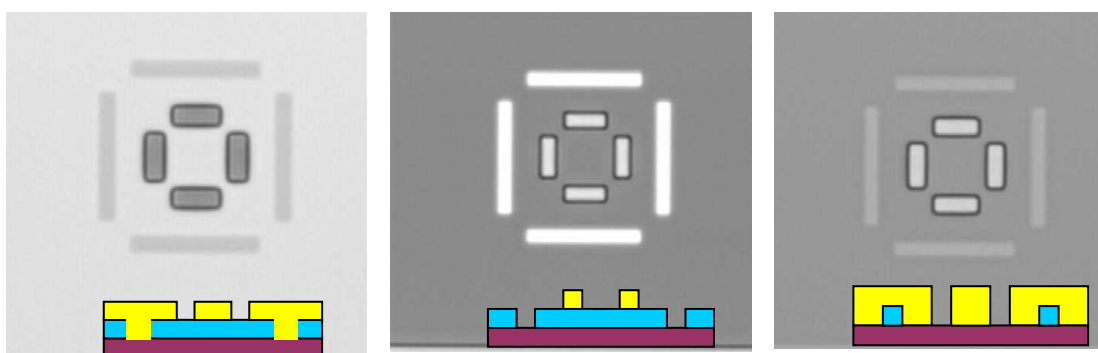


Fig 2 target 1

Fig 3 target 2

Fig 4 target 3

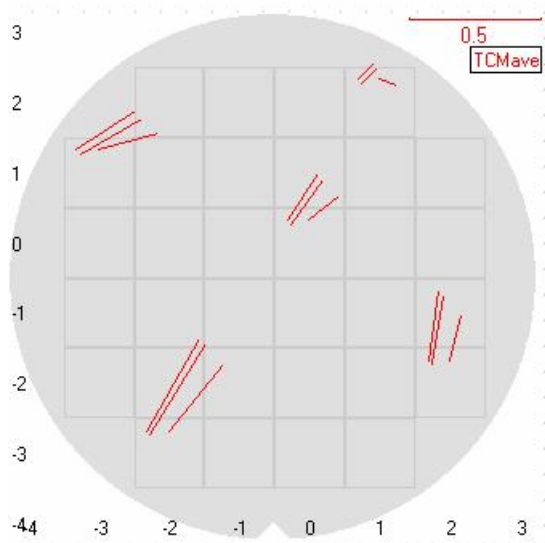


Fig 5 Wafer map

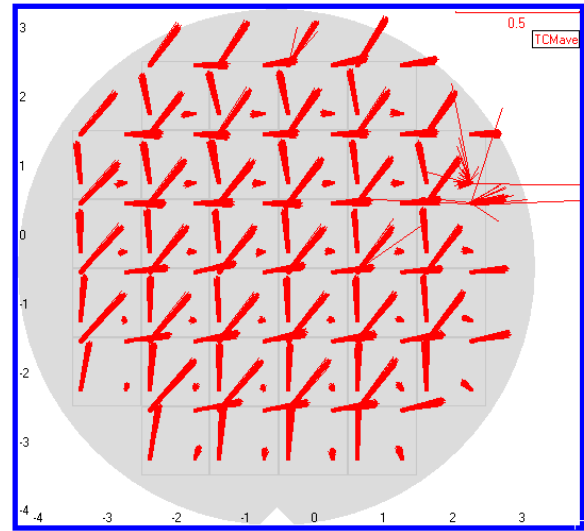


Fig 6 Wafer map

- (1) 精密度(Precision)之計算：重覆量測疊對圖樣數次，利用統計方法計算3倍標準差(3σ)。
- (2) TIS之計算：由於製程疊對量測的不完美，量測機台與圖樣間的光學交互作用，所造成的疊對量測系統誤差，可經由疊對量測 0° 與 180° 的計算去除 TIS 的影響。
TIS定義如下：

$$TIS \equiv (OVL(0^\circ) + OVL(180^\circ)) / 2$$

TIS平均值 $\langle TIS \rangle$ 定義如下：

$$\langle TIS \rangle \equiv \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{(OVL_i(0^\circ) + OVL_i(180^\circ))}{2}$$

TIS 3σ 由統計定義如下：

$$TIS 3\sigma \equiv 3 \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \left[\frac{(OVL_i(0^\circ) + OVL_i(180^\circ))}{2} - \langle TIS \rangle \right]^2}{n-1}}$$

- (3) OMF之計算：由晶圓和光罩所貢獻之不確定度，量測不同晶圓上多個field的疊對圖樣，經由統計方法計算W片晶圓上有F個field，每個field上有I個圖樣的OMF。

在第 k 片晶圓上的第 j 個field的OMF定義為：

$$OMF_{jk} = 3 \times \left[\frac{\sum_{i=1}^N OVL_{ijk}^2 - \frac{\left(\sum_{i=1}^N OVL_{ijk} \right)^2}{N}}{N-1} \right]^{1/2}$$

OVL_{ijk} ：第 k 片晶圓上之第 j 個field的第 i 個疊對圖樣

光罩誤差(mask error)定義為：

$$ME_i = \overline{OVL_i} - \frac{\sum_{i=1}^N \overline{OVL_i}}{N}$$

圖樣疊對的平均值定義如下：

$$\overline{OVL_i} = \frac{\sum_{k=1}^W \sum_{j=1}^F OVL_{ijk}}{W \times F} \quad W: \text{晶圓片數}, F: \text{field的數目}$$

統計估算光罩之OMF(Overlay Mark Fidelity)為：

$$OMF_{reticle} = 3 \times \left[\frac{\sum_{i=1}^N ME_i^2 - \frac{\left(\sum_{i=1}^N ME_i \right)^2}{N}}{N-1} \right]^{1/2}$$

(4) 總不確定度之定義(Total Measurement Uncertainty-TMU)：

$$TMU = \sqrt{\frac{(\{PREC_x 3\sigma\}^2 + \{PREC_y 3\sigma\}^2)}{2} + \frac{(\{TIS_x 3\sigma\}^2 + \{TIS_y 3\sigma\}^2)}{2} + \frac{(\{OMF_x 3\sigma\}^2 + \{OMF_y 3\sigma\}^2)}{2} + \frac{(\{MATCH_x 3\sigma\}^2 + \{MATCH_y 3\sigma\}^2)}{2} + RMS}$$

在本文僅使用一種機台量測，暫不討論最後一項不同量測機台所貢獻的不確定度；追溯參考量測系統(RMS)不確定度則視所選用之參考標準量測系統而定。

三 研究成果

微影疊對量測不確定度的評估結果，可由 NDL 製作之 Bar-in-bar 微影疊對量測圖樣設計，求得精密度、TIS 及 OMF。量測五片晶圓，每片晶圓量測五個 field，每個 field 內有 3 種不同圖樣，經由統計計算，重覆量測之精密度大小約為 0.2-10 nm 如 Fig 7 所示；TIS(3 σ)在 X 方向 6.5 nm，在 Y 方向 6.3 nm 如 Fig 8 所示。

OMF 的量測設計為量測四片晶圓的每個 field，在每個 field 內連續放置 9×9 個 Bar-in-bar 圖樣，分析 OMF(3 σ)可得到在 X 方向 1.7 nm，在 Y 方向 3.5 nm 如 Table 1 所示。

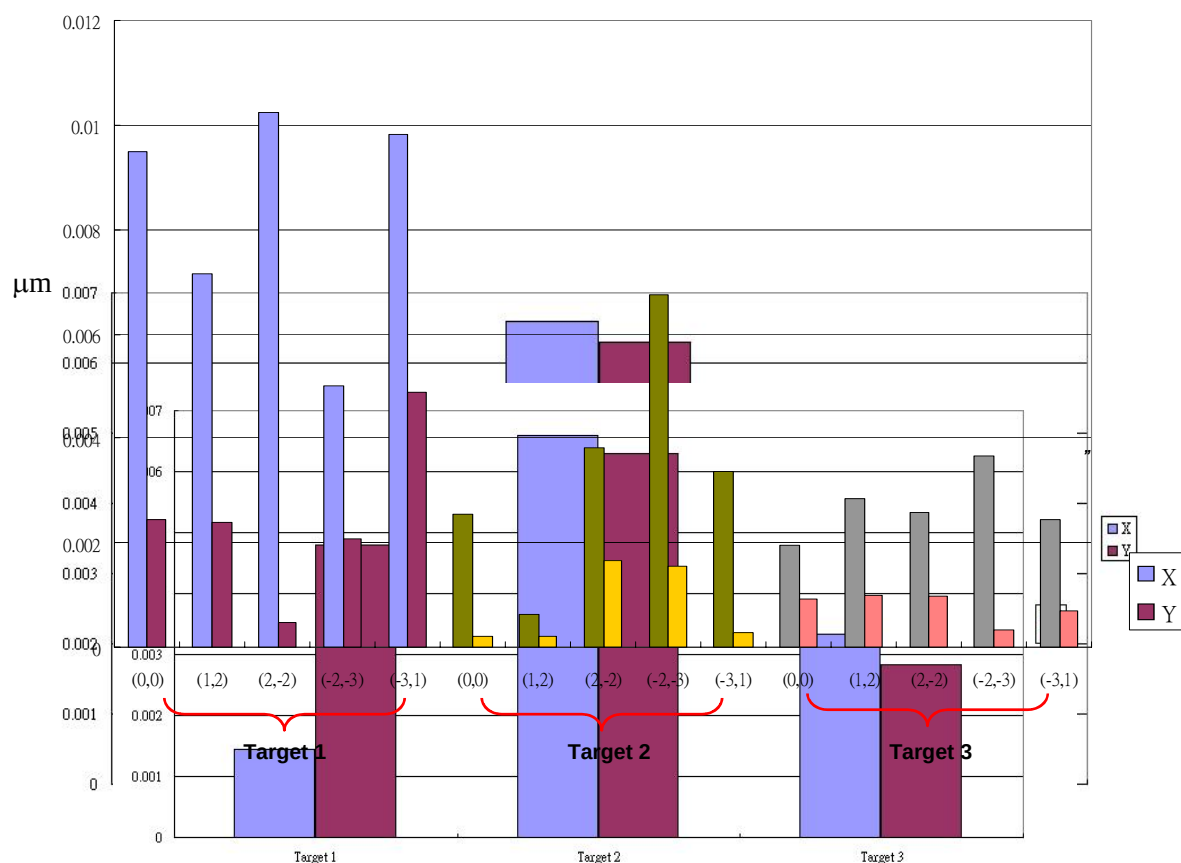


Fig 8 TIS analysis

Table 1 OMF(Overlay mark fidelity)

	X	Y
Average	4.9	5.6
Min	3.9	3.5
Max	6.8	8.6
3s	1.7	3.5

實驗數據由曝光機台模式的 MTF(Modulation Transfer Function)分析可得到很小的殘數，如 Table 2，殘數值約小於 20 nm，顯示曝光機台的曝光對於不同晶圓製作的條件一致。但對於位移(Translation)有較大的分析誤差，介於 100 ~ 200 nm，至於放大倍率(Magnification)也有較大的分析誤差，從晶圓中心到邊緣約有 75 nm 的疊對誤差；field 的誤差更大，在 20×20 nm 大小的範圍內從中心到邊緣，疊對誤差約為 100 nm。

Table 2 MTF(Modulation Transfer Function) analysis

Slot	TIS-corrected results				Analysis residuals		Stepper analysis									
	X		Y				Translation		Field				Grid			
	Min	Max	Min	Max	X	Y			X	Y	X	Y	X	Y	X	Y
1	9.7	217.7	-68.8	225.2	10.5	15.5	126.1	163.5	-7.7	-18.5	-5.7	-12.1	-1.64	-1.86	-0.08	-0.27
3	16.4	229.7	-58.2	243.7	9.7	12.2	137.1	174.9	-9.1	-19.2	-6.7	-12.7	-1.68	-1.91	-0.18	-0.37
5	15.1	258.3	-74.1	253.2	6.1	9.9	149.8	153.2	-9.0	-16.9	-6.8	-13.9	-1.91	-2.25	-0.07	-0.21
7	34.8	233.5	-55	280.1	12.2	8	155.4	151.2	-4.5	-12.8	-5.5	-14.4	-1.85	-2.21	-0.24	-0.38
9	37.8	233.9	-27.3	353.8	7.1	7.1	170.7	154.3	0.6	-6.5	-5.0	-14.6	-2.01	-2.64	-0.22	-0.37

四 結論與建議

雖然目前的製程線寬比可見光的波長更小，微影疊對量測圖樣卻必須遠大於最小的製程線寬才可被可見光鑑別量測。近年來的研究發展趨勢著重於發展新式的等距式量測圖像(periodic target)，將疊對量測圖像等距細分成與製程線寬同樣的尺寸(約為 0.11~0.09 nm)，盡可能增加量測所能得到的資訊；微影疊對量測準確度要求的提高，研發新式的微影疊對量測圖樣，將可提升量測精密度至 $3\sigma \leq 2 \text{ nm}$ ，新型的內置式晶圓微影疊對圖樣設計，亦可提供增進下一世代積體電路製造微影疊對量測的準確度；另一方面則著重於改進光學系統設計及數值演算分析方法，以降低前述與製程相關所導入但無法量化的 WIS 誤差。

四 參考文獻

1. Kenji Hoshi et al, "TIS-WIS Interaction Characterization on Overlay Measurement Tool", *SPIE vol.4689* (2002)
2. Mike Adel, Mark Ghinovker, Jorge Poplawski, Elyakim Kassel, Pavel Izikson, Ivan Pollentier, Philippe Leray, David Laidler, "Characterization of Overlay Mark Fidelity", *SPIE vol.5038* (2003)
3. M. Adel, J.A. Allgair, D. C. Benoit, M. Ghinovker, E. Kassel, C. Nelson, J. C. Robinson, G. S. Seligman, "Performance Study of New Segmented Overlay Marks for Advanced Wafer Processing", *SPIE vol.5038* (2003)
4. Justin J. Hwu*, Thao J. Pham, Sukhbir Dulay, Andrew Lopez, Peter Wilkens, "The Estimation of Total Measurement Uncertainty in a Multiple Metrology Tool Environment", *SPIE vol.5375*, (2004)
5. 顧逸霞 (2004)：細切割微影疊對圖樣量測不確定度分析，技術文件，93-A331XS9Q10-R-4-23。