

行政院國家科學委員會專題研究計畫 成果報告

子計畫二：奈米壓印之精密對位系統

計畫類別：整合型計畫

計畫編號：NSC93-2218-E-002-014-

執行期間：93年08月01日至94年07月31日

執行單位：國立臺灣大學工程科學及海洋工程學系暨研究所

計畫主持人：吳文中

計畫參與人員：袁琪葦、郭泰維、丁立安

報告類型：精簡報告

處理方式：本計畫可公開查詢

中 華 民 國 94 年 10 月 31 日

一 中文摘要

本計畫主體在於設計並製作奈米壓印系統平台以及定位子系統。本年度的目標在初步完成壓印機台的設計與驗證以及多道精密對位系統的設計模擬與驗證。壓印系統之對位重點有二：其一為晶圓面與母模之平行度，其中將採用氣壓方式使之自動平行校準；其二為壓印母模與晶圓本身之二軸精密對位，研究將使用類似於目前掃描步進機的對位控制方式，使用兩段式控制 (dual-stage control)，第一階段使用下層的位移平台配合傳統的對位記號與白光顯微術做微米等級的粗定位，第二階段的對位系統採用光學干涉儀與影像檢測法並行之方式配合壓電致動器作奈米等級的精準對位。其中光學干涉儀分為近場模式量測以及遠場量測模式。遠場量測模式採用干涉術，配合壓印模與晶圓上的光柵尺，以繞射式光學尺的方式呈現；近場量測模式採用光柵耦合原理，以正負一階光強變化的曲線作為檢測的依據。而影像檢測法採用對位光柵偏移所造成光學影像偏差的方式，以 CCD 作影像耦合運算，藉由數值模擬計算之方式突破繞射極限。最終目的為開發一套具有奈米等級多道製程對位能力的奈米壓印系統。

關鍵字：奈米壓印、疊對技術、位移平台、繞射式光學尺

英文摘要

The aim of this project is to design and construct a nano-imprint lithography platform with precision alignment capability. In this year, the imprint platform was designed and verified and the overlay alignment process was also developed and verified with simulation and simple experiments. There are two major alignment issues on nano-imprint system. One is the parallel control of mold and wafer, the other is the overlay control between the mold and wafer. With regard to the parallel control, a hydro-pressure system will be applied to the mold, and when equal pressure contacts with the mask, the parallelism is naturally achieved, thus eliminating 2 degrees of alignment freedom. To improve the overlay control of the nano-imprint system, we are going to integrate diffractive laser encoder previously developed by our research team. The laser encoder takes ± 1 order diffractive beam form grating ruler into interference, and could achieve sub angstrom resolution and better than 10nm accuracy. The gratings are going to be directly fabricated onto the mold and the wafer, and with the special designed diffractive laser encoder optical head with absolutely positioning capability to offer sub-100nm overlay control precision. Dual-stage control strategy will be applied on the precision overlay control system. In the first stage, X-Y stage provides rough alignment on micron scale with traditional alignment mark and white light microscopy techniques. In the second stage, feedback control on piezoelectric actuators in conjunction with the special design diffractive laser encoder will offer nano-scale precision positioning. With joint efforts of other sub-projects, we are going to build a complete nano-imprint system with nano-scale overlay control capability in this project.

Keywords: nano-imprint lithography overlap control precision alignment diffractive laser encoder

二 研究目的

根據 ITRS (International Technology Roadmap for Semiconductors) 的 Roadmap，半導體製程之線寬目前已達到 100 奈米以下 (DRAM half-pitch linewidth)，預計在 2016 年將會達到 10 奈米。此尺寸已達到目前一般對奈米科技定義的尺寸範圍。在線寬從 100 奈米朝向 10 奈米發展的過程中，傳統微影術 (lithography) 面臨極大的難題。由於對應光波長之繞射極限問題，光源與步進掃描系統在成功突破 150 奈米之後，進入 50 奈米以下仍有臨大的問題待克服。而奈米壓印 (nano-imprint) 則提供了一條已證明 CD (critical dimension) 可達到 10 奈米以下的另一路徑。但是無論是步進掃描的系統或是奈米壓印的方式，在相關的定位技術上仍必須一起配合，以進入 10 奈米的尺寸之下，傳統的微影製程將會被奈米壓印挑戰，疊對精度仍然是製程中的重點，本文即研製奈米壓印的疊對系統，以利奈米壓印的應用。目前所有超精密定位幾乎都依賴雷射定位干涉儀 (distance measurement interferometer)，尤其是在一般半導體製程設備上也都非常廣泛的運用。此相關技術在過去三十年也幾乎沒有太大的變化。一般雷射定位干涉儀可以輕易達到 1 奈米以下的解析度 (resolution)，但是其精度 (accuracy) 則受限於雷射光波長的穩定性、光學與電子系統中的雜訊、環境中溫溼度對雷射光經過的路徑所造成的折射率變化、以及一般量測上的 abbe、cosine 等誤差。因此，一般雷射定位干涉儀的精度大概在 10 奈米到 100 奈米之間。可看出目前半導體製程設備的 CD 量測需求才剛進入 10 奈米，也就是說過去 30 年仰賴的雷射定位干涉儀到目前還足於應付製程設備定位的需求。相關的量測科技雖有一些零星的進展，但都沒有被整合實用化。當所有的尺寸控制需求都進入 100 奈米以下時，現量的量測技術將不敷需求。例如對位控制 (overlay control) 在 2005 年已經沒有解決方案。為了趕上半導體產業的量測需求，這個領域的研究變得相當重要。

三 文獻探討

一般光學微影技術的定位對準系統是藉由光罩上之對準圖案與基材之對準圖案配合而進行，在光罩對位的部分，目前均以雷射干涉儀或是光學尺作為其對位之標準。其精度與走過之距離受環境因素影響，可從 10nm 到 100 nm。但因為繞射極限，其精度很難再往上提升。而在光罩對位之過程，因光罩與母模並未接觸，其自由度在空間中有六個，在對位時所需的干涉儀機構亦非常龐大。

在奈米壓印的製程中，因母模與晶圓面直接接觸，在對位的基礎上就少了三個自由度，也就是 X tilting、Y tilting、以及 Z position，僅剩下 X、Y、以及 rotation

三個自由度。奈米壓印的對位方式一般都使用與曝光系統相同的方式，也就是利用對位標記的圖案配合影像處理的方式，也就是說，在進行壓印之前，仍然將母模懸浮於晶圓面上，等到對位完整時再向下平壓。

近年來卓越發展之微影疊對技術利用光柵繞射之方式，量測其繞射光，根據亮度對角度之變化，或是由疊對之誤差、散射光之不對稱性、以及相位移量計算其誤差角度與距離，這種方法突破了繞射極限，達到更高之定位解析。2000年White和Wood提出奈米壓印的對準系統，此系統利用壓印模上之對位光柵與基材對位光柵互相比較，採用壓電致動器調整壓印母模位置，以達到精密對位之目的。

四 研究方法

4.1 光學定位系統設計

壓印機台的光學定位系統從光學尺量測相對位移的架構為出發點，在母模與晶圓面上各做一組週期為 1.6 微米之光柵，利用這兩組重疊的光柵進行母模與晶圓的疊對控制。一般而言，我們將光場分成近場、遠場、以及這之間的灰色地帶。近場的定義為光傳遞小於半個波長的距離，遠場的定義是光傳遞距離遠大於徑瞳或狹縫，如下圖所示。壓印機台的光學定位系統主要的對位機制有二，分別是針對母模與晶圓面距離小於二分之波長的進場光學量測法以及母模與晶圓面距離較遠的遠場光學干涉法。下文將分別敘述其量測原理以及訊號解析方法。

定位系統的設計光路如圖 4.1，波長 633nm 的氦氖雷射光源，在經過分光鏡以及聚焦透鏡之後打在母模與晶圓面上的光柵組產生三次繞射，因為透鏡焦點置於光柵表面，故三次繞射之後的繞射光經過透鏡會轉換成平行光，沿原路經反射經過非偏極分光鏡分成兩束光，其中一束進入電荷耦合器(CCD, charge coupled device)，另一束光穿過空間濾波器將繞射光之間的距離拉開，最後進入光偵測器將光強轉換為電壓之後，經過放大濾波將訊號送入 DAQ 進入電腦做數值運算以求得相對位置。

4.2 壓印系統架構與壓印機台建構

奈米壓印的技術相對於目前半導體製程步進掃描機而言架構上最大之不同在於步進掃描採用光學對位的方式，奈米壓印在對位控制時由於母模於壓印的光阻面有實際的接觸，在空間上則省去了三個自由度之精密疊對控制，但其在接觸面之平行度問題，以及本身對於精度之控制則更加重要。因此，在壓印機台的設計上，我們參考了工研院材料所的光硬化機台(圖 4.2)，作為我們得設計藍本，而在實際操作上，因為壓力不平均的關係，所以會有不平整的結果(圖 4.3)。

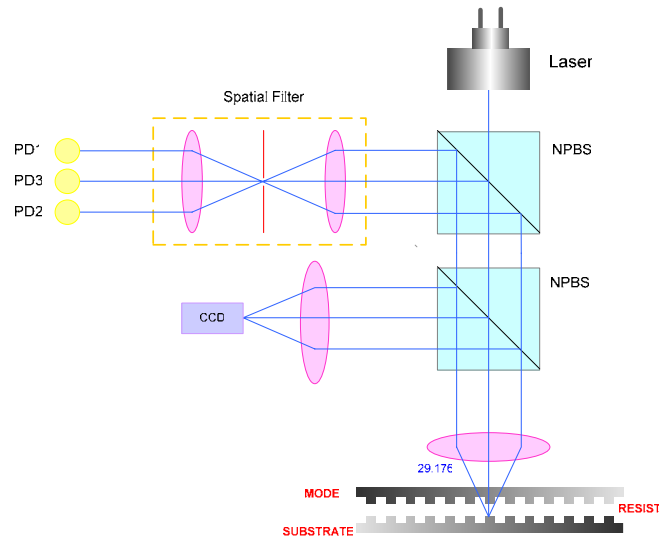


圖 4.1 定位系統光路圖

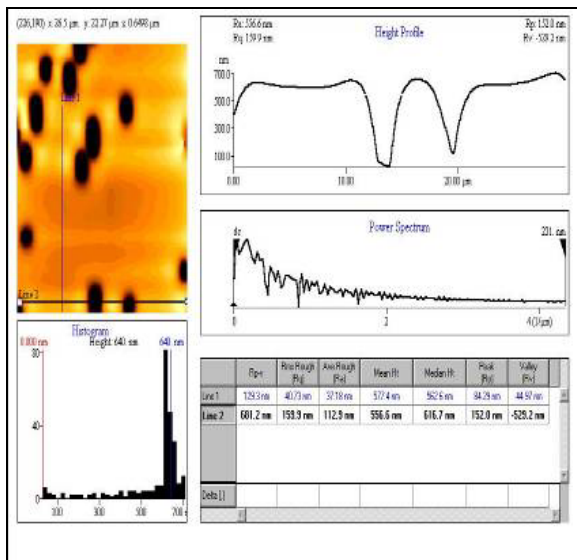


圖 4.2 工研院材料所光硬化壓印機台

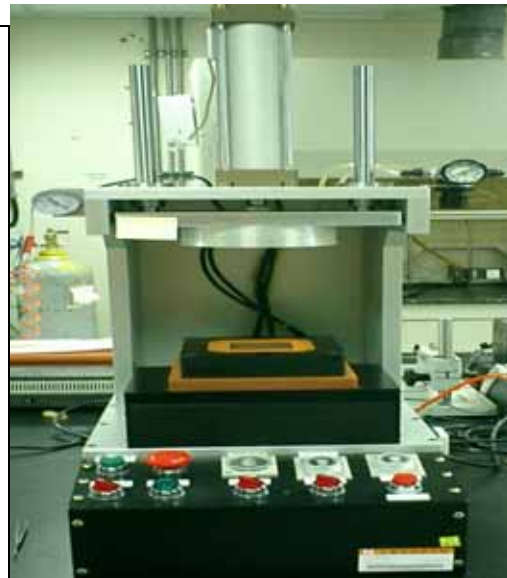


圖 4.3 壓印結果

為了使母模與光阻面接觸平整，在光阻面施壓過程中，並不直接使用”硬”壓力，而在母模上方作相對漸小作用力的支撐，且為確保母模與光阻面接觸之平整，採用對各方向皆施力平均之氣體施壓方式，使母模與光阻面”軟”接觸(soft contact)，圖 4.3 為我們所設計的壓印機台架構圖，機台主要可以分為四個部份，氣壓室、對位系統、母模承載系統，晶圓承載位移平台。其中對位系統嵌入氣壓室，整體而言，機台採用母模固定，晶圓跟隨平台移動的方式做相對位移以完成多層疊對之需求。

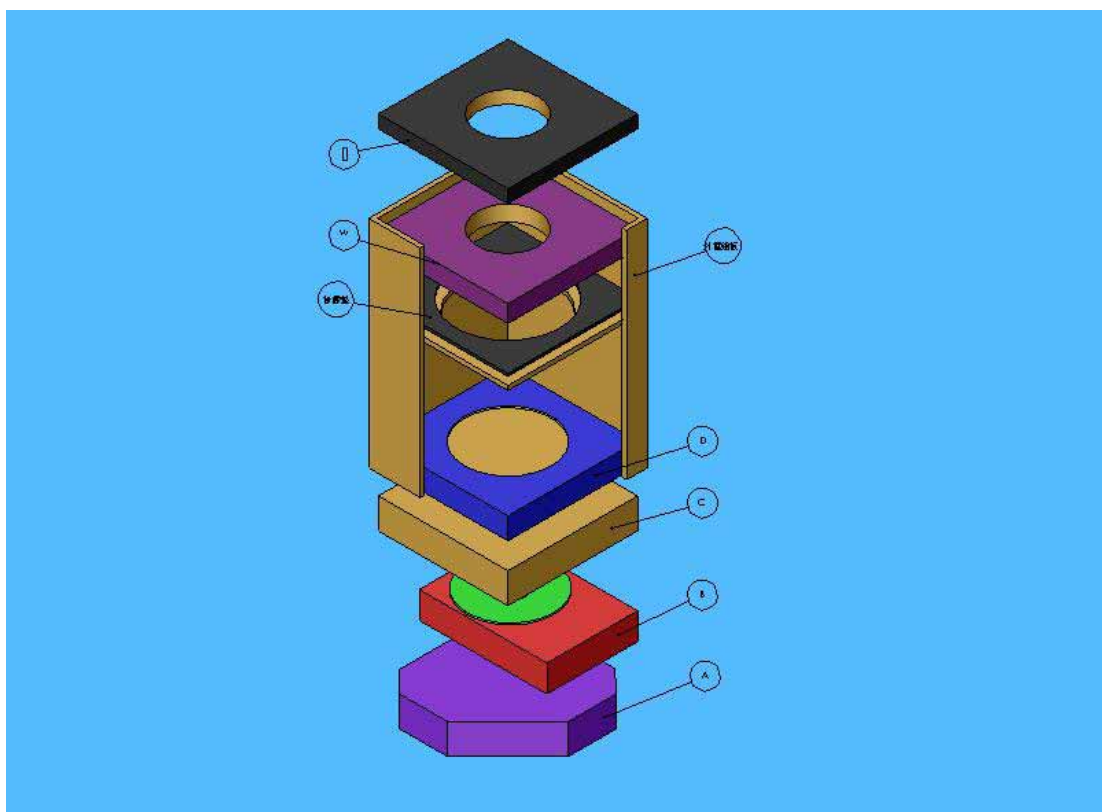


圖 4.3 壓印機台架構圖

五 結果與討論

5.1 系統模擬與分析

本節旨在敘述壓印機台光學對位系統因為近場效應所產生行為之模擬。主要使用的模擬軟體有二：G-Solver™以及 OptiFDTD。首先我們以 2000 年 D.L. White 與 O. L. Wood 用有限時域分析法模擬的結果作為模擬的樣本，觀察 G-Solver™以及 OptiFDTD 是否也能模擬出相同的光強交叉現象，接下來使用 G-Solver™軟體設計出最佳化幾何光柵外型，再對於這個設計出來的光柵做光柵偏移訊號分析，最後討論母模與晶圓面間的距離如何影響繞射效率。

圖 5.1 為 GSolver 的模擬結果，但是其正負一階光的曲線交點為半波長位置，探究其原因可能是因為在模擬時因為礙於堆疊方式，所以我們採用圖 5.2 的紅色區塊作為模擬的中心，可能是因為這樣的原因所以模擬結果差半個波長，不過即使是如此，表示的現象還是相同，所以可以證明 GSolver 可以用於光柵近場的模擬。

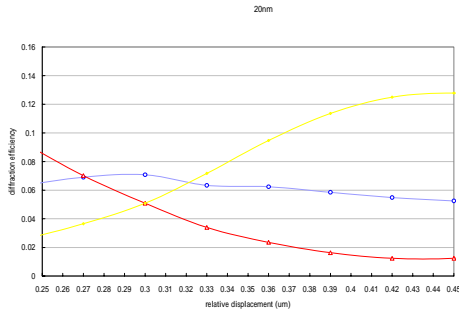


圖 5.1 Gsolver 的模擬結果

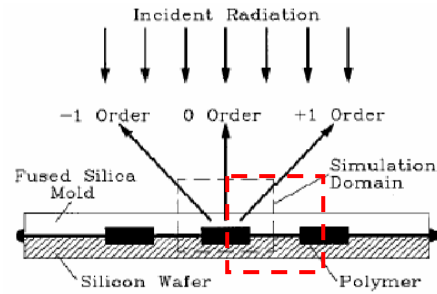


圖 5.2 模擬架構

為了提昇光柵尺的製造公差以及繞射光束的強度，本計畫透過 GSolver™ 光柵分析軟體，由 GSolver™ 分別對各種表面特徵的光柵作分析，包括：方波型光柵、三角波型光柵以及正弦波光柵。得到對本對位結構的最佳光柵幾何外型為：間距 (Pitch) 1.6μm、方波型相位式光柵 (Phase grating)，矽晶圓最佳光柵深度約為 172 nm 所示。母模的材質採用玻璃(SiO)，最佳光柵深度約為 111 nm。

另外，需要注意的是，雖然母模光柵深度在 0.8um 時的正負一階繞射效率較本論文所選的光柵深度高，但是玻璃的材質較硬，蝕刻不易，在小線寬的狀況下可能會使得光柵外型不完整或是崩裂，以北區微機電中心的機台而言，製作線寬小於 1um 的玻璃蝕刻時，小於 150nm 深度的蝕刻較容易成功，外型不崩裂，故本計畫用母模的光柵深度為 111nm。

當兩組光柵疊合，由於彼此間的距離甚近，當光在第一組光柵表面所產生的近場效應，表面消散波尚未消失時，就進入第二組光柵，被第二組光柵的表面結構所產生的光柵向量所影響，而在這兩組光柵的相對位置改變時所產生的光強變化，並非頻率域的變化或是簡單的相位差變化，因為這樣的變化所呈現的曲線並非線性關係或是正弦關係，故本計畫將此效應歸類為光柵耦合效應。為了解母模與晶圓面上的兩組光柵在近場相對位移造成的光強分布情形，本計畫即利用 GSolver™ 光柵分析軟體模擬此架構。

圖 5.3 為整理過的模擬結果，圖中橫軸為母模與晶圓面上光柵的相對位移，單位為 um，縱軸為繞射效率；深藍色曲線表示零階反射光，在相對位移半個週期的時候繞射效率最高，而對正位以及移動整數倍週期時繞射效率最差；紅色曲線和黃色曲線分別表示正負一階繞射光的繞射效率，觀察可知，當相對位移為半週期的整數倍，正負一階光的繞射效率相等，以至於有交點存在；藍綠色曲線是正負一階光繞射效率的差值，當相對位移為半週期的整數倍，其值為零，綠色曲線為正負一階光繞射效率的和，曲線呈現正弦型式，週期為 1.6um，當相對位移為週期的整數倍時，其值最大，相對位移為半週期的奇數倍時，其值最小。值得注意的是，除了正負一階光繞射效率的和之外，其餘的曲線看起來非常複雜，並

非單純的弦波或是多項式，因此近場光學定位的方式採用正負一階光相加的方式做準確的定位，並利用正負一階光相減值的正負來判斷光柵位移的方向。

另外，為了解繞射效率變化的結果是否和母模與晶圓面間距離有關，本文對於間隙距離兩繞射效率的關係做了一些分析。參考圖 5.4，當中繪出雙光柵間距 0nm 到 100nm 的位移造成正負一階光相加減的關係，以資料標點的是相加的正負一階繞射效率，當間距增加時，弦波振幅改變，但是並未平移，波形也一樣；然而觀察正負一階繞射效率相減的曲線可發現，當間距增加，曲線的波動情形較為嚴重，甚至在距離 90nm 以上的距離時，曲線在一個週期內的距離內與橫軸有兩個以上的交點，因此，若要獲得穩定的量測結果，母模與晶圓面的距離最好在 90nm 以內，若是超過此值，則相對位移方向可能要藉由其他機制來判斷。

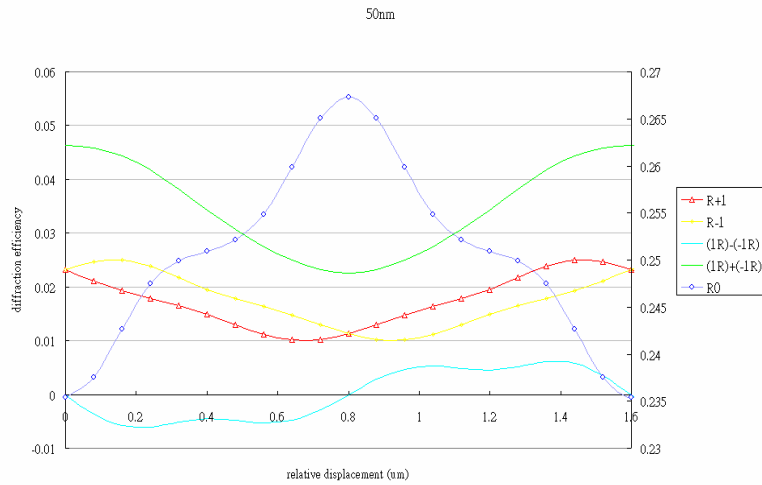


圖 5.3 光柵相對位移與各階光強改變量

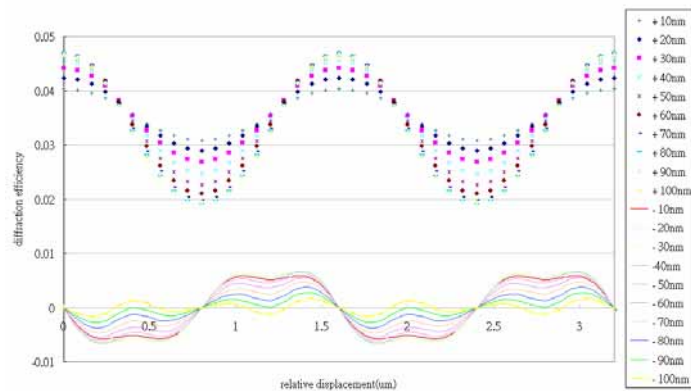


圖 5.4 雙光柵間距離和繞射效率的關係

5.2 壓印定位系統之校驗與結果

近場對位架構的理論為：在兩個光柵間距離小於半波長時，由於近場光學互相影響，此二光柵可視為一耦合的光柵，在光柵有相對位移時，其行為如同角度不同的閃耀式光柵。為驗證並應用光柵耦合理論於奈米壓印定位系統，我們將雷射光在兩個交疊的光柵表面上，觀察其繞射光強對於光柵間相對位移不同的變化。

本研究使用的穿透式光柵為石英基材，週期 2 μm ，深度約 200nm，反射式光柵以鋁為基材，週期 1.6 μm ，深度約 300nm。在實驗中為使母模固定，將母模結構面置放於物鏡焦平面，調整角度，將母模背面粘於物鏡邊緣，使之固定；為使兩個光柵面可貼合，在反射式光柵下方加裝硬質墊圈。為避免加裝墊圈造成相對位移時的誤差，在反射式光柵與穿透式光柵間加上潤滑劑，使得位移平順。

繞射光的影像如下，利用 NI Vision Assistant 處理 IMAQ 卡接收回來的資訊。當母模與晶圓面上的光柵平行時，會得到較亮的光強，繞射光點也會保持水平(如果母模光柵平行置放)，當角度差太多時，繞射光點會近乎消失。利用量化的方式，求取繞射光強值，如圖 5.5 所示，再配合平台位移資訊，即可繪出位移-光強圖，藉以得到光柵相對位移與繞射光強變化的關係。

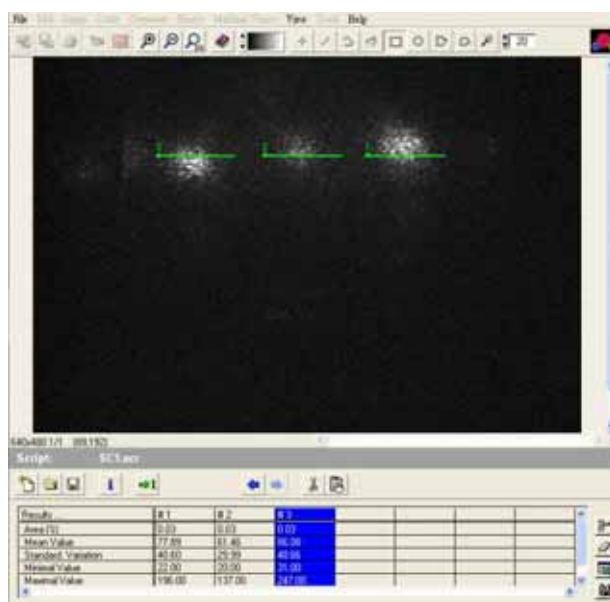


圖 5.5 NI Vision Assistant 介面

其結果如圖 5.6，橫軸表示光柵的相對位移量，單位為 μm ，縱軸表示光強，零階光、正一階光、負一階光分別為黃色、紅色、藍色則為將負一階光平移的結

果。其中可以發現在光柵有相對位移時，正負一階光的變化是相反的，而且有週期性的結果。將正負一階光放大來看，1 個 ripple 大約為 3.5 μm ，由於光柵等效週期為 4 μm ，這樣的誤差來源可能是因為光柵結構本身的誤差所導致，訊號的本身非常雜亂，推估原因可能有幾個：其一為環境中的溫度差異與氣流所影響，其次為 Z 軸的穩定度，由於 Z 軸為顯微鏡本身的鼻輪，並沒有做相當的控制，可是在模擬結果中(圖 5.7)可以發現，Z 軸距離若持續變化，整體光強也會隨著變化，這很有可能是誤差的來源；最後，由於目前的實驗並非動態擷取資料，在位移走走停停的情形下，墊圈的存在可能會對結果造成甚大的影響，這也是誤差產生的主因。

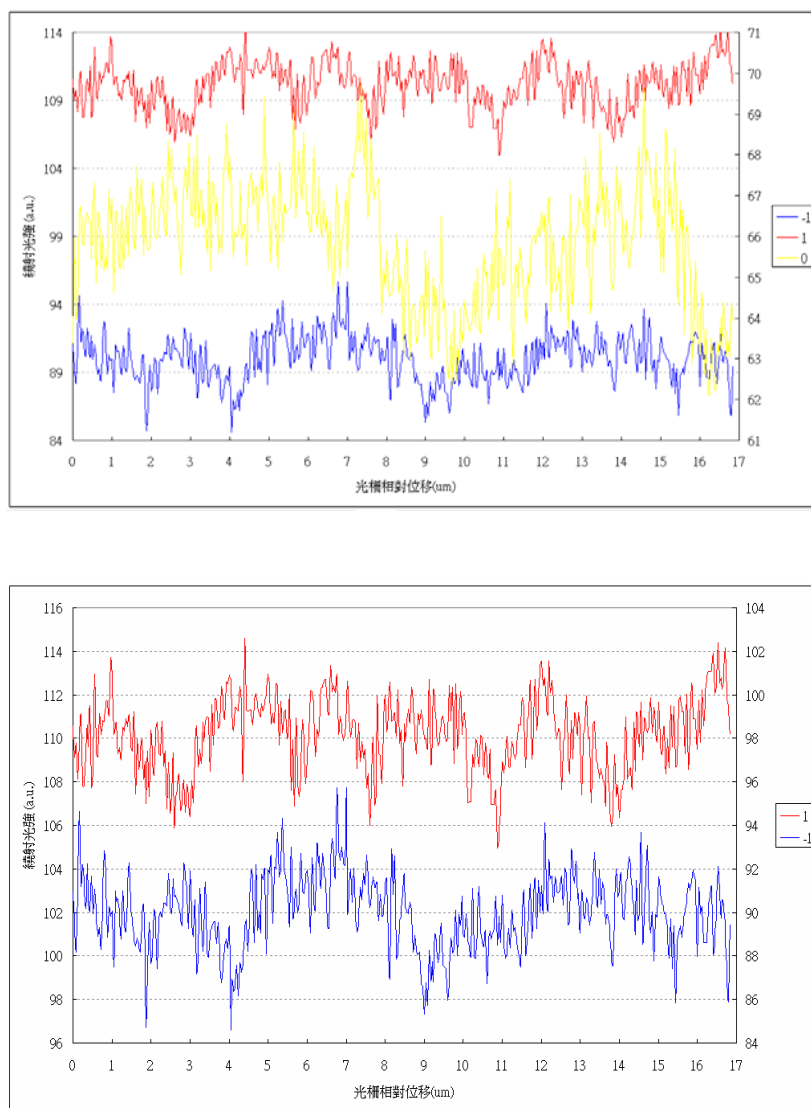


圖5.6 位移-繞射光強變化圖

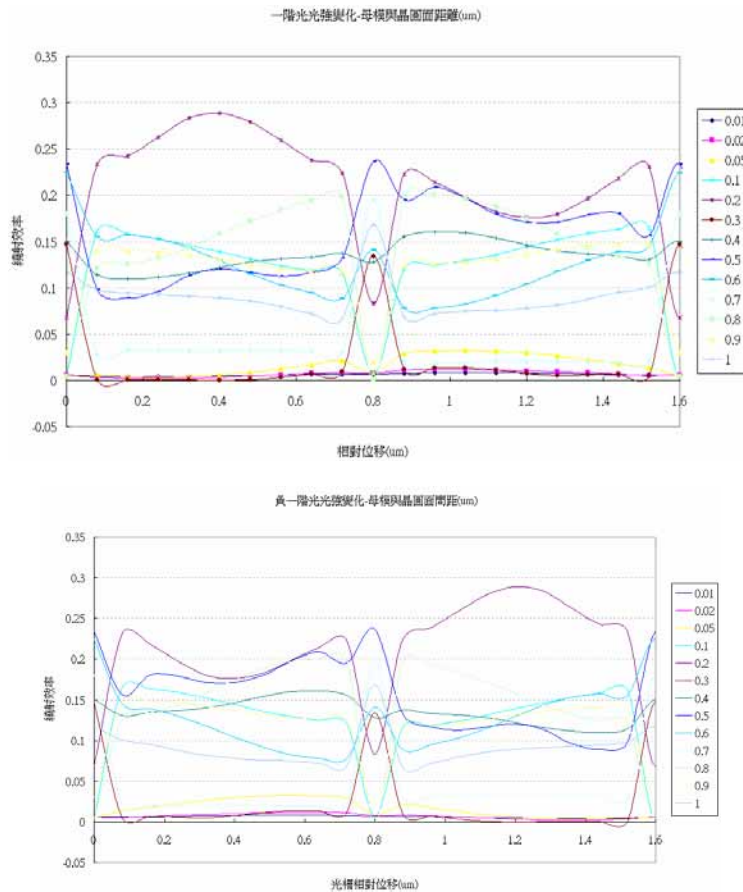


圖 5.7 母模與晶圓間距與繞射效率關係

5.3 討論與建議

本文提出應用於多層壓印機台光學對位系統之研製，其光學架構主要可分為物鏡、光柵尺、電荷耦合感應子、以及空間濾波器四部分。在研究中發現當母模與晶圓面間的距離在進場(<1um)和遠場(~5um)有截然不同的光學效應。其量測機制在近場可以採用光柵耦合的方式推導，其耦和結構外型上的不同導致繞射效率隨相對位移而變化。在遠距離定位的部分，採用繞射式光學尺的架構，此機制主要是移動所產生的都卜勒效應造成接收訊號的相位變化，經計算獲得相對位移。本計畫完成最佳化光柵尺幾何外型分析一間距 1.6 μm ，方波型的相位式光柵，提高了干涉光束的強度與光柵尺的製造公差容許度。進行母模與光柵相對位移對繞射效率影響的模擬，也藉由實驗初步驗證在光學上的現象。

本研究的未來發展，首要之務為結合長行程量測之光學尺與在一個週期內精準度甚高的光柵尺架構，並將光強訊號回授處理進行自動定位，再來則是將一維對位推展到三維定位。由於在理論以及模擬結果中發現，母模與晶圓面間的距離

與光強變化有關，若建立這個資料，利用光強與距離之間的關係即可做第三軸的定位。在應用的部分，除了可以進行3D奈米壓印，由於系統本身即為顯微鏡系統也可應用於其他對位系統，進行全方位的檢測平台。

參考文獻

1. Lloyd R. Harriott, "Limits of Lithography", *Proceeding of the IEEE*, vol.89, NO.3, March 2001, pp. 366-374
2. R. A. Lawes, "Future trends in high-resolution lithography", *Applied Surface Science*, 154-155, 2000, pp. 519-526
3. Rau et al., "Short-noise and Edge Roughness Effects in Resists Patterned at 10nm Exposure", *Journal of Vacuum Science & Technology B*, vol. 16, 1998, pp. 3784-3788
4. Stephen Y. Chou, Peter R. Krauss, and Preston J. Renstrom, "Imprint of sub-25nm vias and trends in polymers ", *Applied Physics Letters*, vol. 67, 1995, pp.3114-3116
5. D L White, O R Wood , "Novel alignment system for imprint lithography ", *Journal of Vacuum Science & Technology B*, vol. 18, 2000, pp.3552-3556
6. C. S. Su and Y. S. Ku, "An Ion Source for Low Energy Ion Scattering Spectrometry ", *Vacuum*, vol. 40, 2000, pp. 467
7. Nyysönen, D., "Theory of optical edge detection and imaging of thick layers," *J. Opt. Soc. Am.*, 72, pp. 1425-1436,1982.
8. Kirk, C. P., and Nyysönen, D., "Modeling the Optical Microscope Images of Thick Layers for the Purpose of Linewidth Measurement," *SPIE* 538, pp. 179-187, 1985.
9. Yuan, C., and Strojwas, A. J., "Modeling the Optical Alignment and Metrology Schemes Used in Integrated Circuit Manufacturing," *SPIE* 1264, pp. 203-218, 1990.
10. Seligson, J. L. et al., "Overlay metrology simulations - Analytical and experimental validations," *Proceedings of SPIE Vol. 5038*, pp.61-69 (2003).
11. Seligson, J. L. et al., "Overlay Metrology Simulations," *Proceedings of SPIE Vol. 4689*, pp. 295-303 (2002).
12. T. K. Gaylord, "Analysis and Applications of optical diffraction by gratings," *Proceedings of the IEEE* 73, pp894-937, 1985
13. S. Astilean, P. Lalanne, and M. Palamaru, "Light transmission through metallic channels much smaller than the wavelength" *Opt. Commun* 175, pp265-273, 2000