

自動化阻劑處理系統介紹

微影技術是半導體產業往線寬 0.1 微米以下推進的關鍵製程，在微影的十個基本製程中，除圖案對準及阻劑曝光外，其餘步驟皆由自動化阻劑處理系統負責完成，其重要性可見一斑。本文將以阻劑處理系統為主軸，內容包括了機台硬體的設備及演進、各微影製程的原理與機台性能的相關性，最後介紹如何調整阻劑處理系統的製程參數，以達到製程條件最適化的要求。

楊金成、柯富祥、吳政三

一、前言

隨著半導體積體電路之積體層次的快速增加，微影技術所要求的線幅寬度也越來越小，根據動態隨機存取記憶體 (DRAM) 的設計準則 (design rules)，製作 64 Mbit 的 DRAM 所需最小線幅為 $0.35\ \mu\text{m}$ ，製作 256 Mbit 的 DRAM 所需最小線幅為 $0.25\ \mu\text{m}$ ，製作 1 Gbit 的 DRAM 所需最小線幅為 $0.18\ \mu\text{m}$ ，製作 4 Gbit 的 DRAM 所需最小線幅約需 $0.15 - 0.13\ \mu\text{m}$ 。

為達到曝出最小線寬的要求，曝光的光源由早期的 G-line、I-line，演進到 KrF (248 nm)、ArF (193 nm) 的準分子雷射，及正在積極研發中的 F_2 (157 nm) 雷射；機台設計由光學步進機 (stepper) 演

進為光學掃描機 (scanner)；阻劑也由早期 novolak (高分子) 及 diazonaphthoquinone (感光劑) 系統，演進到以 poly (4-hydroxystyrene) 為主鏈的化學放大型阻劑 (chemical amplification resist)，及以酯環族 (alicyclic) 為主結構的 ArF 光阻；在製程技術上也不停的引進新的觀念，如偏軸照光 (OAI)、光學微影鄰近效應修正 (OPC)、相位轉移光罩 (PSM)、抗反射層塗佈 (BARC、TARK)、表面成像技術 (TSI)、化學縮洞製程 (resolution enhancement lithography assisted by chemical shrink, RELACS) 等。

圖 1 為微影製程的流程圖，由圖中可知微影的主要步驟有 HMDS 汽化蒸鍍、冷卻、阻劑旋轉塗佈、阻劑軟烤 (soft bake)、冷卻、對準 (alignment) 及曝光，阻劑曝後烤 (post exposure bake, PEB)、冷卻、阻劑顯影、阻劑硬烤 (hard bake) 等十項主要的製程步驟，須靠自動化阻劑處理系統 (track system) 及光學步進機或光學掃描機兩種機台來完成微影步驟。在這十個製程中，阻劑處理系統執行了其中的九項，可見阻劑處理系統功能的好壞對微影的製程有關鍵性的影響；儘管目前國內外的論文或期刊在

楊金成先生為國立台灣大學化學工程研究所碩士，現任國家毫微米元件實驗室助理研究員。

柯富祥先生為國立清華大學原子科學系博士，現任國家毫微米元件實驗室副研究員。

吳政三先生為淡江大學航空系學士，現任國家毫微米元件實驗室技術員。

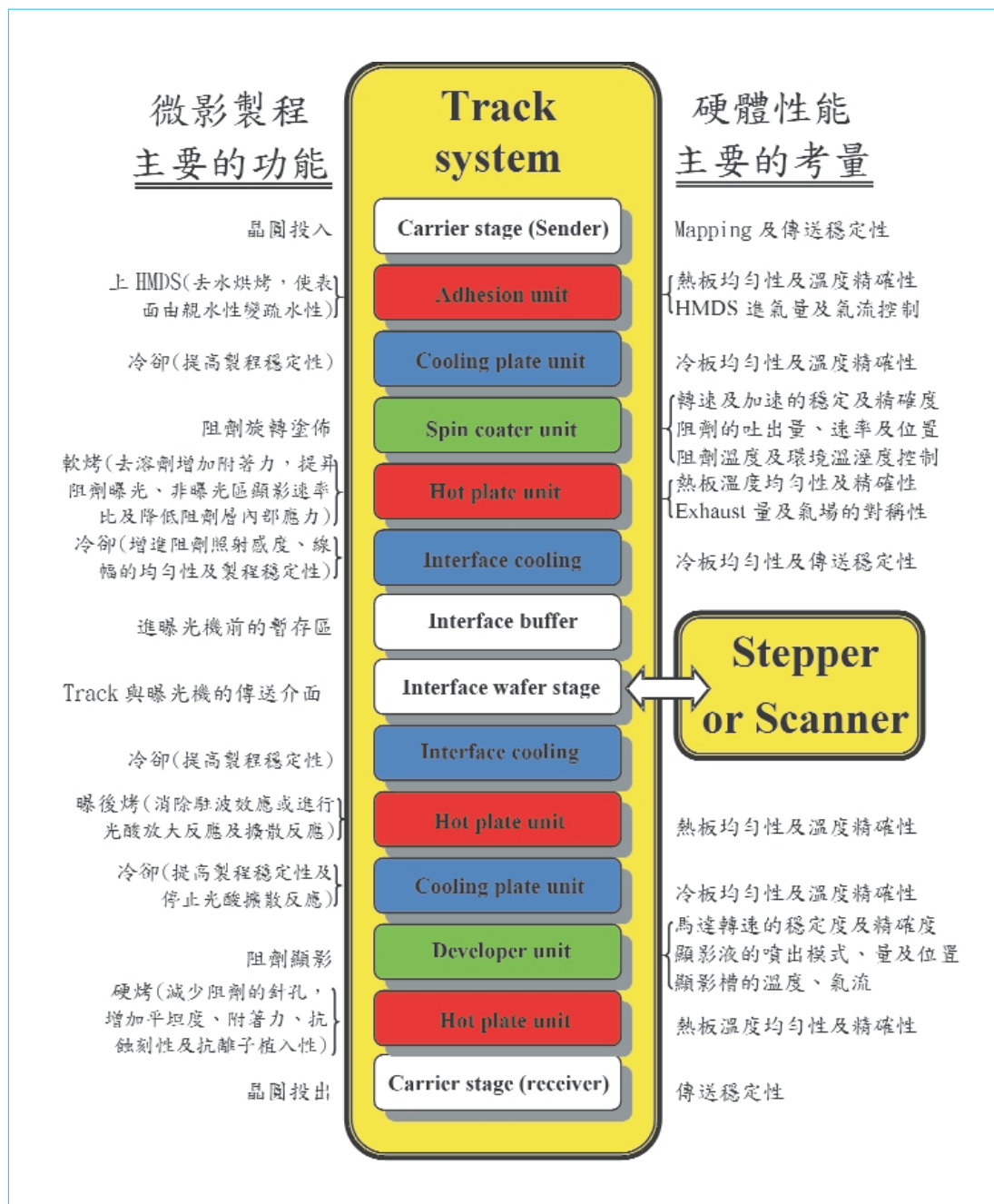


圖 1. 微影製程流程圖。

曝光機台演進或技術、新型光罩的製作與改良、阻劑的研發及性能及微影新穎製程技術等，皆有大量的文獻報導，唯獨很少看到專文介紹阻劑處理系統。所以本文將以阻劑處理系統為主架構，介紹其機台的演進及其中各單元的製程，最後介紹如何調整阻劑處理系統製程參數，以達到最適化微影製程的要求。

二、阻劑處理系統機台的演進

目前半導體業界中阻劑處理系統主要的製造廠家有TEL (日本)、DNS (日本)、SVG (美國)、FSI (美國) 及 APEX (德國) 等，各大廠的機台設計各有其考量的方向，所以機台性能也各擅其長，其中又以 TEL 公司的機台在半導體業的市場占有率最

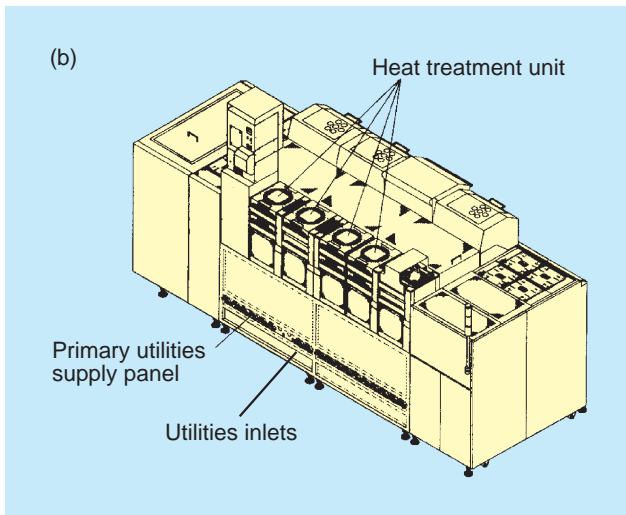
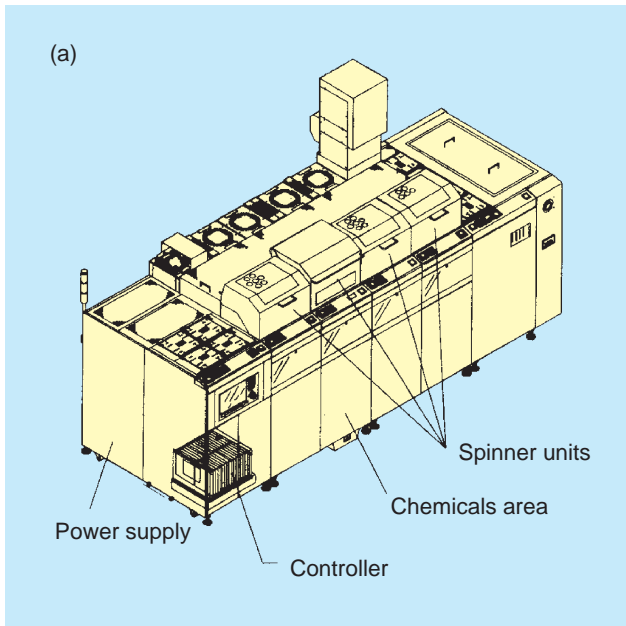


圖 2.(a) 與 (b) TEL 阻劑處理系統 MK-V 與 VZ 機型外觀圖。

高，在全世界市場約為 60%，在台灣更高達 90% 左右，本文將對 TEL 公司的阻劑處理系統作介紹。

圖 2(a) 及圖 2(b) 為 TEL 阻劑處理系統中 MK-V 與 MK-VZ 機型的立體圖，圖 3(a) 及圖 3(b) 為 TEL 阻劑處理系統 MK-8 機型的立體圖，圖 4 為 TEL 阻劑處理系統最新機型 Act-12 的立體透視圖，圖 5 為 Act-12 的各單元配置示意圖。由圖 2 到圖 5 可發現，為了完成圖 1 所提的九項基本微影

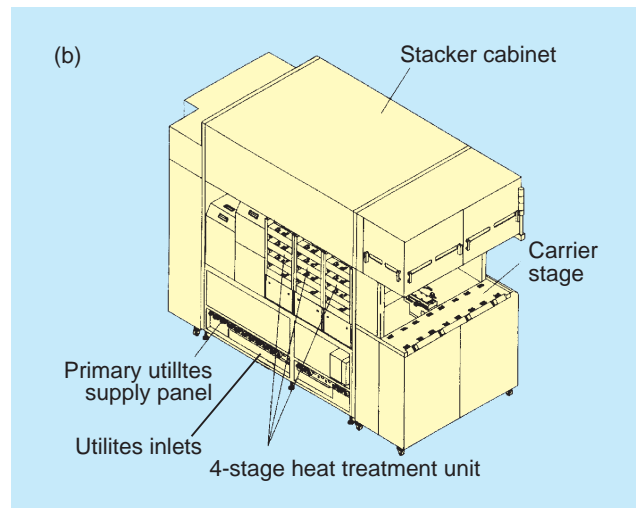
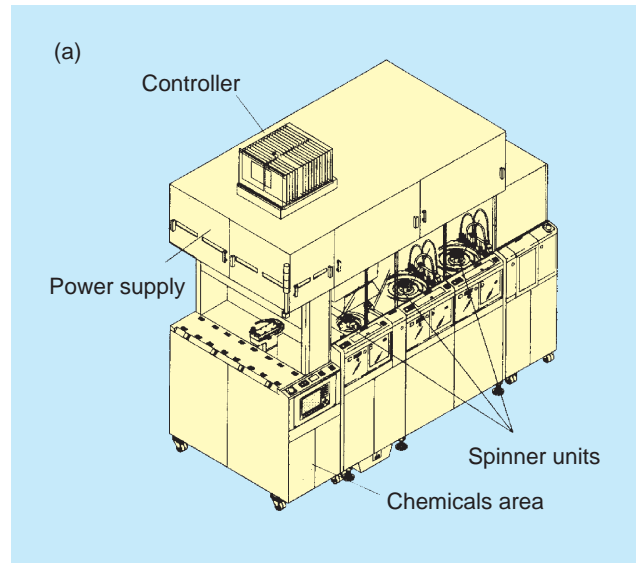


圖 3 (a) 與 (b) TEL 阻劑處理系統 MK-8 機型外觀圖。

步驟，不管是早期的 MK-V 系列到最新型的 Act-12 系列，其硬體一定會包括冷熱板的單元、阻劑旋轉塗佈單元、阻劑顯影單元等結構，以完成所需製程程序，這些單元組合成阻劑處理系統中的製程處理區 (process block) (圖 5 中的 block 2)；會有晶舟處理區 (cassette block) 作為晶圓投入及輸出的人機介面 (圖 5 中的 block 1)；有介面傳輸區 (interface block) 作為顯影系統與曝光系統的傳輸介面 (圖 5 中的 block 3)。此外，為達到自動化執行及傳輸的目的，機台必定有電腦控制系統及機械手臂 (CRA、PRA、IRA)。其他附屬的配備還包括化學儲存倉 (負責製程所需化學藥劑如汽相蒸鍍劑、

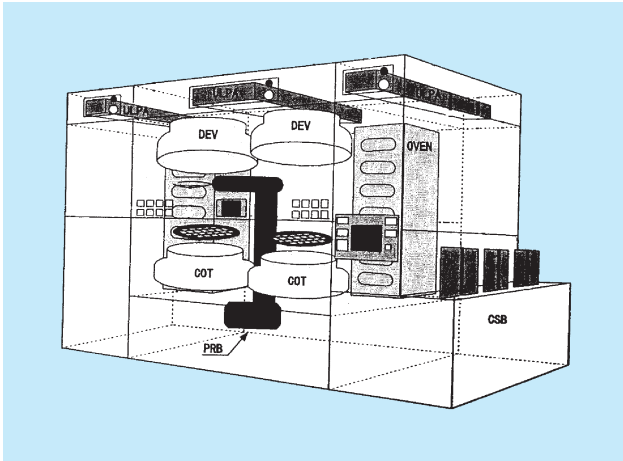
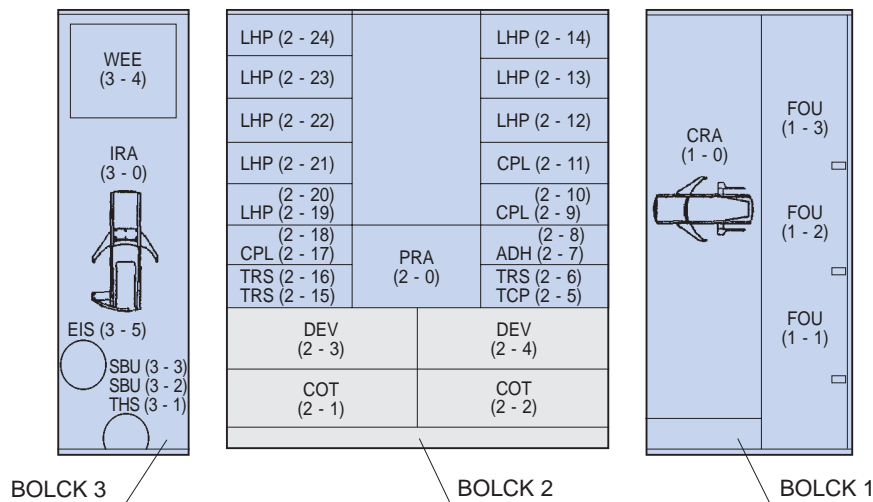


圖 4. TEL 阻劑處理系統 Act-12 機型立體透視圖。

阻劑、洗邊劑及顯影劑等的儲存及供給)、恆溫控制器 (控制所需化學藥劑的溫度)、溫濕度控制 (控制整個系統的溫度及阻劑旋轉塗佈單元的溼度) 及電源供應器 (變壓器) 等四大項。

隨晶圓尺寸由 5 吋、6 吋、8 吋到 12 吋, 要達到大面積上阻劑其厚度的均勻性, 及顯影後阻劑關鍵尺寸 (CD) 的精確控制, 機台硬體所需的要求日異的嚴苛, 各阻劑處理系統的製造商也不停地將新的設計理念及性能更加優越的製程單元配置於機台中, 以符合設計準則所需之規格。以 TEL 阻劑處理系統為例, 隨著新機型的推出, 機型 MK-V 及 VZ 系列主要用於 5 吋與 6 吋晶圓的製造, 機型



UNIT	ACRONYM	NAME
1-0	CRA	Cassette Block Robotic Arm
1-1~1-3	FOU	FOUP Unit-Cassette Stage
2-0	PRB	Process Block Robotic Arm
2-1~2-2	COT	Coat Process Station
2-1~2-2	DEV	Develop Process Station
2-5	TCP	Transition Chill Plate
2-*	TRS	Transition Stage
2-7~2-8	ADH	Adhesion Process Station
2-*	CPL	Chill Plate Process Station
2-*	LHP	Low Temp. Hot Plate Process Station
3-0	IRA	Interface Block Robotic Arm
3-1	THS	Temporary Holding Stage
3-2~3-3	SBU	Stationary Buffer
3-4	WEE	Wafer Edge Exposure Process Station
3-5	EIS	Exposure Interface Stage Module

- Wafer Flow**
- Step1 FOU 1-1 1-2 1-3
 - Step2 TRS 2-6
 - Step3 ADH 2-7 2-8
 - Step4 CPL 2-9 2-11
 - Step5 COT 2-1 2-2
 - Step6 LHP 2-12 2-13
 - Step7 CPL 2-17
 - Step8 SBU 3-2
 - Step9 EIS 3-5
 - Step10 SBU 3-3
 - Step11 WEE 3-4
 - Step12 TRS 2-16
 - Step13 LHP 2-21 2-22
 - Step14 CPL 2-18
 - Step15 DEV 2-3 2-4
 - Step16 LHP 2-23 2-24
 - Step17 TRS 2-15
 - Step18 FOU 1-1 1-2 1-3

圖 5. TEL 阻劑處理系統 Act-12 各單元配置示意圖。

MK-7/8 系列主要用於 6 吋與 8 吋晶圓的製造，而目前的最新主力機型 ACT-8 及 ACT-12 系列主要用於 8 吋與 12 吋晶圓的製造。單一阻劑處理系統各單元配置的數目亦由少而多，排列方式由平面設計而到立體的堆疊（參看圖 2 到圖 5）。以 MK-V 及 VZ 為例，其標準配備包括 4 個冷熱板、1 個阻劑旋轉塗佈單元及 2 個阻劑顯影單元，而 ACT-8 及 ACT-12 則有超過 10 個以上的冷熱板、2 個阻劑旋轉塗佈及 2 個阻劑顯影單元，各單元並採立體的堆疊設計以節省機台佔地 (footprint)。目前最龐大的 ACT 系列，由一個晶舟處理區 (block 1)、二個製程處理區 (block 2、block 3) 及一個介面傳輸區所組成，有超過 20 個以上的冷熱板、4 個阻劑旋轉塗佈及 4 個阻劑顯影單元，需要如此多個製程單元的主要考量，除了增加單一機台的晶圓輸出率 (throughput) 外，主要是最新穎的微影製程通常需作抗反射層的塗佈，不同層所用的阻劑不盡相同，而不同阻劑的烘烤製程條件亦不相同，故需數目如此多的冷熱板單元；而阻劑顯影製程所花的時間最久，約為阻劑旋轉塗佈製程的兩倍，故通常阻劑顯影單元數目為阻劑旋轉塗佈單元的兩倍。

隨著化學放大型阻劑製程的引進，Mark-7/8 及 ACT 系列，除了採用密閉式的設計及加裝高效的濾網 (ULPA) 以維持阻劑處理系統內的潔淨度及氣流溫濕度外，尚需有化學濾網 (chemical filter) 以防止環境中的鹼性物質進入阻劑處理系統內，其會中和阻劑的光酸並造成製程上的干擾 (產生 T-top)。此部分與早期的開放式設計亦有極大的不同。

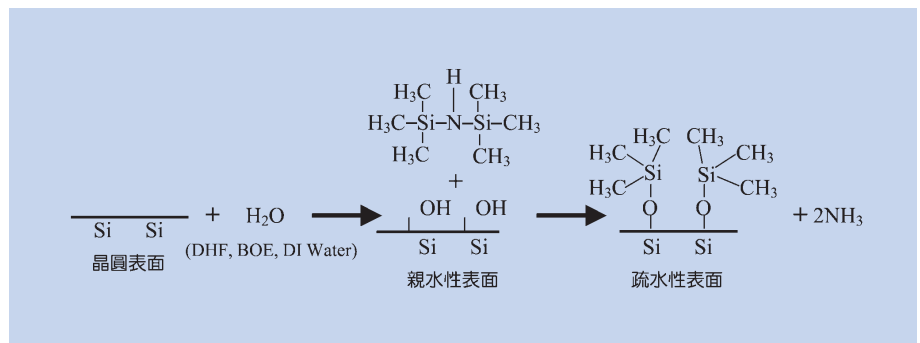
結束本章節前在此簡單介紹一下阻劑處理系統

中自動化的重要觀念 - 晶圓流向 (wafer flow)。早期沒有阻劑處理系統，只有個別的單機如 HMDS oven、阻劑旋轉塗佈機、阻劑顯影機等，欲完成圖 1 所介紹的微影製程，需先設好每一機台的製程條件，而由操作員以手動的方式，將每一單機所完成該製程的晶圓送至下一步驟，不但產品的輸出率低，且由於人為操作習慣的不同及疏失，常會降低製程良率或影響製程的性能。阻劑處理系統即是以電腦為控制中樞，以自動化的機械手臂取代手動之操作，工程師需事先將圖 1 的微影製程所需的詳細條件，建在每一個單元的程式中，同一個單元中，因製程條件的差異，會有許多不同的製程處方 (recipe)，並建一個晶圓流向的檔案，圖 5 所舉的例子為一典型的微影製程所需的晶圓流向。在 TEL 的機台設計上，習慣將各單元予以編號並附以簡稱 (參看圖 5)，以方便晶圓流向的撰寫，晶圓流向的每一個步驟需指定該單元中的某一製程處方以確定製程條件。透過阻劑處理系統自動化的控制及執行，並配合良好的環境控制，將使製程良率及性能大幅的提昇。

三、各步驟的製程原理及單元的硬體介紹

欲完成微影十項主要製程步驟，須靠阻劑處理系統及光學步進機或光學掃描機兩種機台來完成，此概念已在圖 1 的製程流程圖中提及，我們可將阻劑處理系統的主要硬體結構用圖 1 中的四種顏色來作區分，白色表示晶圓傳送的相關結構 (晶舟處理區、機械手臂及介面傳輸區等)，紅色表示與烘烤

圖 6. 汽化蒸鍍 HMDS 以改變晶圓表面極性反應。



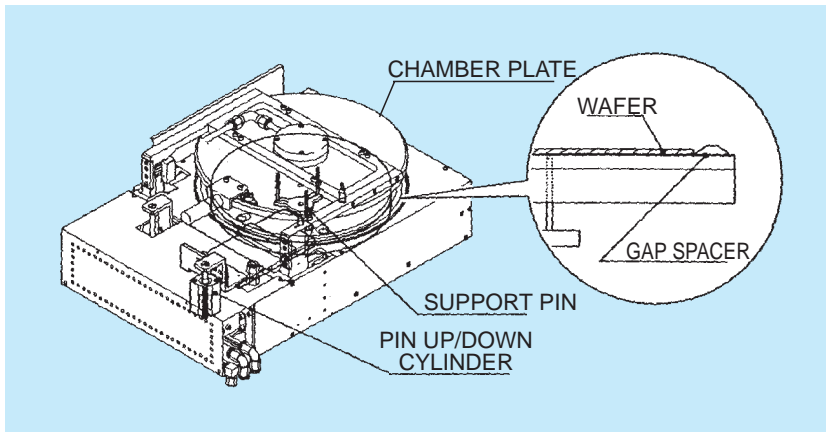


圖 7.
單片 HMDS 汽化蒸鍍單元結構圖。

相關的單元結構 (晶圓表面汽化蒸鍍 HMDS、阻劑軟烤、曝後烤及硬烤等所需的加熱單元)，藍色表示冷卻板的硬體結構，青色表示與馬達旋轉、化學試劑噴出等的相關的單元結構 (阻劑旋轉塗佈、阻劑顯影等)，本節將對各步驟的製程及單元的硬體逐一作介紹。

1. 汽化蒸鍍 HMDS

一般而言，晶圓的表面常覆蓋一層水分子，並在晶圓表面生成親水性的矽醇基 (silanol, Si-OH)。由於阻劑是一種有機高分子聚合物，本身較偏疏水性質，若將阻劑直接旋塗於親水性的晶圓表面時，將因兩者的極性不同、附著力不夠，而產生塗佈不良的結果。改善的方法通常以 HMDS (hexamethyldisilazane, $(\text{CH}_3)_3\text{SiNHSi}(\text{CH}_3)_3$) 來改變晶圓表面的極性，其反應的示意圖如圖 6，含 Si 一端 (無機端) 與晶圓表面的矽醇基進行化學反應，形成 -Si-O-Si- 鍵結，並使晶圓表面由親水性 (Si-OH) 變成疏水性 (Si- CH_3)；含 CH_3 的一端 (有機端) 與阻劑中 C、H、O 等分子團產生較強的作用力，進而增加阻劑與晶圓表面的附著力。

圖 7 為單片 HMDS 汽化蒸鍍單元的結構圖，其基本結構為一可均勻控制溫度的熱板，熱板上方為一腔盤 (chamber plate)，可藉汽缸 (cylinder) 使腔盤上升開啟或下降，並與熱板形成密閉空間。晶圓表面的汽化蒸鍍 HMDS 的步驟如下：

- (1) 機械手臂將晶圓送至支撐梢 (support pin) 上。
- (2) 支撐梢下降，晶圓落在熱板上的間隔環 (gap

spacer) 上。

- (3) 腔盤下降與熱板形成密閉空間。
- (4) 抽氣及通氮氣使腔內形成負壓。
- (5) 抽氣及通 HMDS 蒸氣，HMDS 與晶圓面形成鍵結。
- (6) 抽氣及通氮氣將腔內殘餘的 HMDS 帶走。
- (7) 破真空後，腔盤上升，支撐梢上升。
- (8) 機械手臂將晶圓移走完成 HMDS 汽化蒸鍍步驟。

目前業界常用的製程溫度為 90°C ，整個製程所需的時間約為 60 秒。另外，圖中的間隔環是一種陶瓷材料，厚僅 0.1 mm，共六片對稱分布於熱板 (或冷卻板) 上，晶圓置於單元中加熱或冷卻時，並不直接與冷熱板接觸，以減少晶背污染，提高製程良率。

2. 冷卻

晶圓上完 HMDS 後為 90°C 左右，而阻劑只有 $22 - 24^\circ\text{C}$ 左右 (一般設定在 23°C)，若不經冷卻直接進行阻劑旋轉塗佈的話，晶圓的高溫將使阻劑中的溶劑急速的揮發，而造成阻劑塗佈不均的現象，所以一般在進行阻劑旋轉塗佈前會將晶圓置於 $22 - 24^\circ\text{C}$ (配合阻劑設定的溫度) 冷板冷卻 60 秒。

圖 8 為冷卻板的結構圖，其基本結構為一可均勻控制溫度的冷板。晶圓冷卻的作動步驟如下：

- (1) 機械手臂將晶圓送至支撐梢上。
- (2) 支撐梢下降，晶圓落在冷板上的間隔環上。
- (3) 靜置於冷板上冷卻 60 秒。

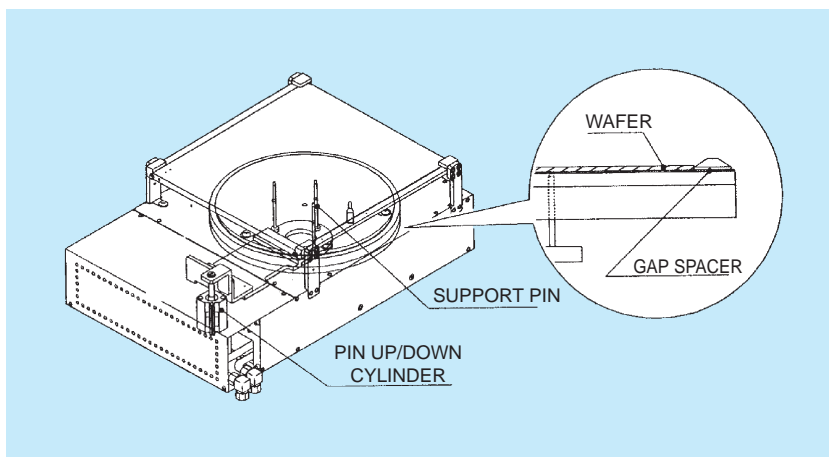


圖 8.
冷卻板結構圖。

(4) 支撐梢上升，機械手臂將晶圓移走完成冷卻步驟。

3. 阻劑旋轉塗佈 (Resist Coating)

阻劑中的聚合物、光酸產生劑 (photo-acid generator, PAG)、酸捕捉劑 (acid quencher) 及添加劑等皆溶於溶劑中，因此阻劑塗佈通常利用高速旋轉的方式，借離心力將阻劑均勻旋轉塗佈於晶圓表面。圖 9 說明了旋轉塗佈時，影響阻劑厚度的主要四個作用力。

- (1) 溶劑於旋轉時揮發對溶劑的作用力， S 。
- (2) 阻劑於高速旋轉時所受的離心力， F 。
- (3) 阻劑本身的黏滯力， γ 。
- (4) 晶圓表面與阻劑的附著力， A 。

所以要完成良好的阻劑塗佈必須控制塗佈槽的

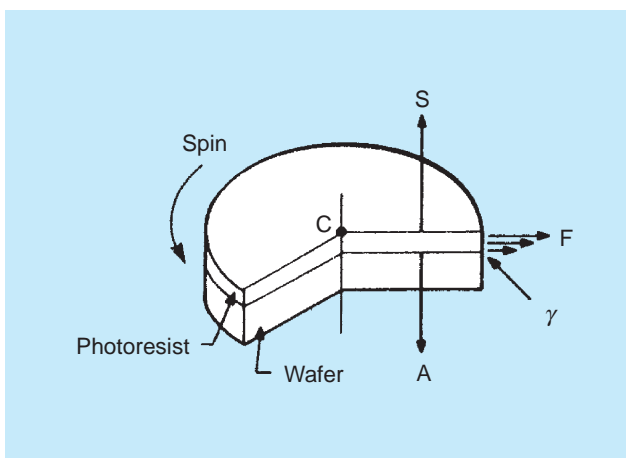


圖 9. 阻劑旋轉塗佈時所受作用力。

溫度、溼度、風速以求 S 大小固定，並控制晶圓與阻劑的溫度相近，以減少阻劑吐出 (dispense) 的時候與晶圓之間有太大的熱交換，而造成溶劑成分瞬間的改變；先汽化蒸鍍 HMDS，調整 A 值，使不同基材間與阻劑的附著力相近；必須有轉速及加速的穩定且精確的馬達以使 F 值固定。此外，阻劑本身的黏滯係數、固體含量及溶劑的種類則與 γ 值有關；此外，整個製程處方的內容如阻劑吐出速度的快慢、時間的長短及量的精確性 (與阻劑吐出幫浦的性能有關)、阻劑吐出的位置是否在晶圓正中等 (與阻劑吐出之機械手臂的性能有關)，與阻劑旋轉塗佈的行為皆有重大的影響。

一般阻劑厚度與轉速的關係可用下式表示。

$$T = \frac{KP^2}{\sqrt{W}}$$

T ：阻劑厚度

P ：阻劑中固體含量 (與 S 及 γ 值有關)

W ：轉速 (與 F 值有關)

K ：常數 (其他影響的參數歸類到此項)

圖 10 為旋轉塗佈單元的示意圖，其基本結構為一可程式控制的高速精準馬達，馬達轉軸上附一真空吸附晶圓的 chuck；另有化學藥劑吐出用的機械手臂一組，上附 R.R.C. (reduced resist consumption) 及阻劑噴嘴各一；E.B.R. (edge bead remover) 機械手臂及 E.B.R. 噴嘴一組；晶背清洗 (backside rinse) 頭兩組。旋轉塗佈的作動步驟如下：

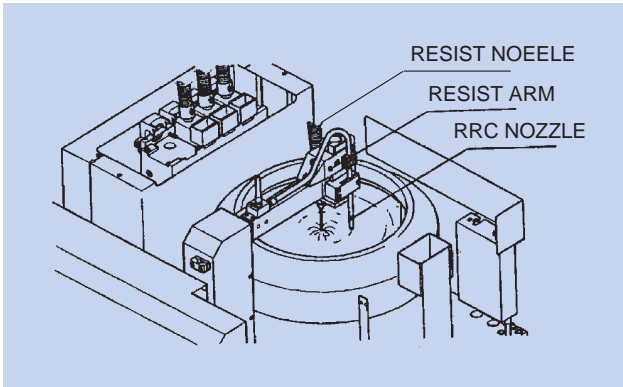


圖 10. 旋轉塗佈單元結構圖。

- (1) 機械手臂將晶圓送至吸盤 (chuck) 上，利用真空吸附晶圓背面。
- (2) chuck 下降。
- (3) 進行阻劑旋轉塗佈。
- (4) chuck 上升。
- (5) 關閉真空閥，機械手臂將晶圓移走完成旋轉塗佈步驟。

上述的步驟 (3) 依阻劑的種類及所需的厚度不同，其製程內容亦隨之改變，以下舉一工業界常用的製程條件為例，說明各細部分解步驟的意義及考量。參看圖 11，依轉速的不同將其分解成 7 個分解步驟：

步驟 I：晶圓靜置，R.R.C. 噴嘴移至晶圓正中央吐出溶劑，一般 R.R.C. 所選用的溶劑為該阻劑中所含的溶劑，就半導體的光阻而言大致可分為 EL (ethyl lactate) 或 PGMEA (propylene glycol monomethyl ether acetate) 兩大類。

步驟 II：藉旋轉將溶劑旋塗於晶圓的表面，使晶圓表面層覆蓋一層極薄的溶劑，表面潤濕後 A 值會減少，可使用較少的阻劑完成均勻塗佈的動作。此步驟若旋轉太久，溶劑將完全揮發乾而失去 R.R.C. 的作用；若旋轉太短，溶劑殘餘過多，阻劑吐出時將會造成局部稀釋的不良效應，而造成厚度不均。

步驟 III：阻劑噴嘴移至晶圓正中央吐出阻劑，此時晶圓保持高速旋轉 (動態塗佈阻劑)。

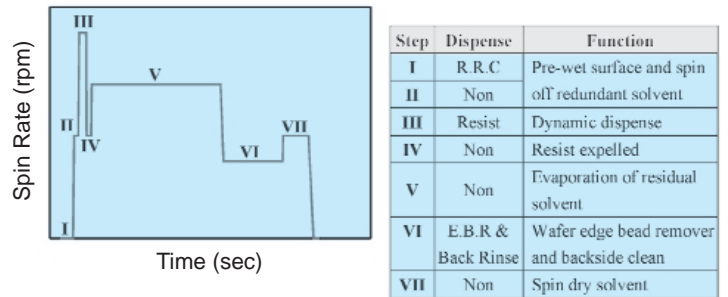


圖 11. 旋轉塗佈製程步驟分解圖。

步驟 IV：較低速將多餘的阻劑旋離晶圓表面。通常步驟 III & IV 的轉速、加速度及時間會影響厚度的均勻性，大部分的溶劑於此步驟揮發。

步驟 V：以中等轉速長時間旋轉，將阻劑中殘餘的溶劑揮發。此步驟的轉速稱為主轉速，其速度的快慢決定阻劑的厚度。在實際的製程調整上通常先調整步驟 III & IV 的參數，達到良好的厚度均勻性後再調主轉速，以達阻劑所需的製程厚度。

步驟 VI：E.B.R. 機械手臂及噴嘴移至晶圓邊緣，並噴出溶劑以清洗晶圓邊緣阻劑，同時晶圓背部也噴溶劑作晶背清洗的動作。此步驟的功用主要是防止晶圓邊緣及背面有殘餘的阻劑，以免於其他製程時污染冷熱板、間隔環及晶圓吸盤等。E.B.R. 與晶背清洗所用的溶劑，一般與 R.R.C. 為同一種。

步驟 VII：將步驟 VI 所噴的溶劑旋乾，完成旋轉塗佈阻劑的所有步驟。

一般而言，完成整個阻劑旋轉塗佈製程所需的時間約在 50 - 60 秒左右，阻劑及溶劑的溫度維持在 23 °C，環境的溫度及溼度控制在 23 °C 及 40% 左右。

4. 軟烤

軟烤 (soft bake) 的主要目的，為除去阻劑旋塗後殘餘於阻劑膜中的溶劑，以增加阻劑對晶圓的附著力。此外，阻劑於旋塗的過程中，溶劑會隨著揮發或高速離心旋轉而去除，高分子被迫停在較高的

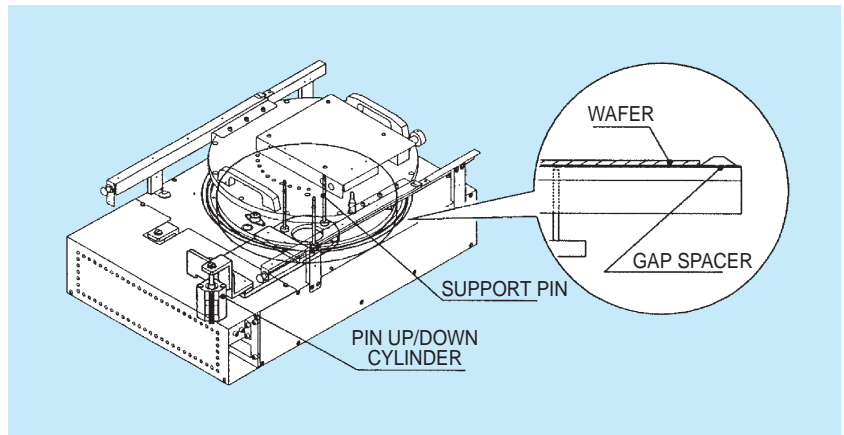


圖 12.
熱板的結構圖。

態而使內部應力增加，故通常軟烤的溫度設在阻劑的玻璃轉移溫度 T_g (glass transition temperature) 附近。當軟烤的溫度過低時，阻劑中殘餘的溶劑濃度較高，此時顯影的速度較快，但對線寬的控制較不易；當軟烤的溫度過高時，阻劑中殘餘的溶劑濃度較低，此時顯影的速度較慢，需要較高的曝光能量，但對線寬的控制較佳，所以此步驟對後續的參數有舉足輕重的影響。

圖 12 為熱板的結構圖，其基本結構為一可均勻控制溫度的不銹鋼板，熱板上方為一腔盤，可藉汽缸使腔盤上升開啟或下降，並與熱板形成密閉空間，結構與單片 HMDS 汽化蒸鍍單元極相似，但沒有進 HMDS 及通氮氣等管路。軟烤的步驟如下：

- (1) 機械手臂將晶圓送至支撐梢上。
- (2) 支撐梢下降，晶圓落在熱板上的間隔環上。
- (3) 腔盤下降與熱板形成密閉空間。
- (4) 進行阻劑軟烤，此時腔內會維持小流量的抽氣，將蒸發出的溶劑帶走。
- (5) 腔盤上升，支撐梢上升。
- (6) 機械手臂將晶圓移走完成阻劑軟烤步驟。

在硬體的設計上，熱板溫度均勻性及精確性、腔盤抽氣的量及氣場的對稱性，都會影響阻劑厚度的均勻性，進而影響線寬的控制。微影工程師每隔一段時間必須用自重式表面溫度測棒監控，並調整熱板溫度均勻性及精確性，用氣壓計監控，並調整氣場的對稱性及抽氣量的大小，以確保製程條件的穩定。

5. 冷卻

阻劑經軟烤後，宜以冷板控制其冷卻的速度（每秒 1 - 3 °C），以減少阻劑中的自由體積 (free volume)，進而增進阻劑照射感度與線幅的均勻性。

6. 對準及曝光

對準及曝光需用光學步進機或光學掃描機機台來完成，其原理、機台設計及製程參數相當複雜，限於篇幅，在此不作介紹。

7. 曝後烤

曝後烤 (post exposure bake) 的主要功用有兩個：

- (1) 消除駐波效應 (standing effect)：入射光在阻劑中的光束 (無 π 相位差) 與入射到晶圓表面再反射的光束 (產生 π 相位差) 產生干涉的效應，此駐波效應造成阻劑在不同的厚度所接收的曝光量不同，顯影後阻劑的輪廓形成擺動狀 (swing)，而非垂直。曝後烤利用熱能促使原本依不同干涉狀況分佈之分解及未分解的感光化合物產生熱擴散，而使縱向分佈較趨於均勻，以減少駐波效應的影響，進而提昇解析度。
- (2) 進行光酸放大反應及擴散反應：化學放大型阻劑經照射後，質子酸 (H^+) 需經曝後烤提供光酸催化及擴散反應所需的活化能，因此曝後烤的溫度及時間對化學放大型阻劑的感光度及解析度有重大的影響。曝後烤熱板的結構及步驟與軟烤相同，烘烤的時間及溫度隨阻劑而異。

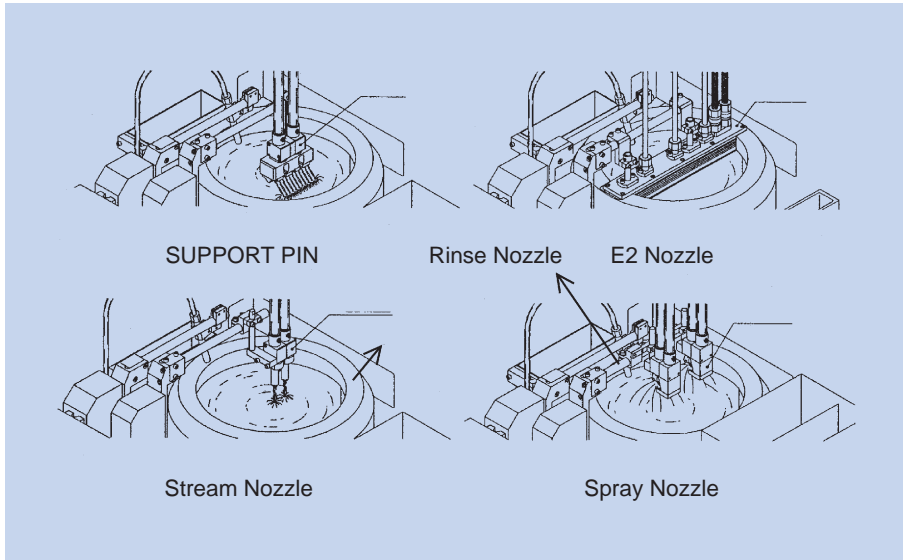


圖 13. 單片噴灑式阻劑顯影單元結構圖。

8. 冷卻

降低阻劑溫度以停止光酸擴散反應，提高製程的穩定性。

9. 阻劑顯影

阻劑經曝光後改變了原有的化學結構，使照射區及非照射區在顯影劑中的溶解速率產生極大的差別，在正型阻劑中，照射區發生極性變化、斷鏈等作用。易溶於顯影液中，非照射區則不易溶。負型阻劑與正型阻劑相反，照射區發生交聯等作用而不易溶於顯影液中，非照射區則易溶。通常兩者的溶解速率差異越大，其將光罩上的圖案轉移到阻劑的能力越佳。目前半導體業的顯影液以不含金屬離子且稀釋過的 TMAH (tetramethyl ammonium hydroxide, 2.38 w.t.%) 為主。

圖 13 為單片噴灑式阻劑顯影單元的示意圖，其基本結構為一程式控制的高速精準馬達，馬達轉軸上附一可真空吸附晶圓的吸盤；另有的機械手臂一組，上附顯影噴頭 (develop nozzle) 一組；清洗用的機械手臂及噴嘴一組；晶背清洗頭四組。圖 13 可看到四種不同設計的顯影噴頭，最早期為水柱型噴嘴，設計為圓形的管口，顯影液如水柱般噴灑在晶圓的正中央，衝擊力較大，會造成晶圓中間的圖案過度顯影，且所需顯影液量較大 (6 吋晶圓每片需 50 c.c. - 60 c.c.)；噴霧型噴嘴為水柱型噴嘴

的改良，顯影液改採噴霧狀的方式以減少衝擊力，但噴霧狀所造成類似傘狀的瀑幕其單位面積所供給的顯影劑速率並不均勻，所以會造成顯影速度隨位置不同而有所差異；經改良後出現，長方形、長度橫跨晶圓直徑的 E2 噴嘴，其設計可大幅減低水柱對阻劑的衝擊力，改善顯影的均勻性，並減少顯影劑的用量 (8 吋晶圓每片需 35 c.c. - 40 c.c.)。圖 14 為 E2 nozzle 噴灑顯影液的分解圖，E2 噴嘴吐出時噴嘴頭與晶圓表面的間距為 1 mm，噴灑顯影液的同時晶圓以 30 rpm 的速度旋轉半圈，故僅需 1 sec 的時間顯影液便可均勻覆蓋於晶圓，大幅提高顯影的均勻性，其缺點為 E2 噴嘴與晶圓表面間距太小，E2 噴嘴易被濺起顯影液污染，故需常清潔 E2 噴嘴的噴嘴。H 噴嘴為另一種改良的設計，H 噴嘴吐出時噴嘴頭與晶圓表面的間距為 8 mm，以減少顯影液濺起造成 nozzle 噴嘴的污染。圖 15 為 H nozzle 噴灑顯影液的分解圖，H nozzle 的噴嘴採多個等間距的直線分佈以提高噴灑時的均勻性；噴嘴採一斜角噴出以減少對阻劑的衝擊力；由外而內噴灑並配合不同旋轉速率，以求較短時間內顯影液便可均勻覆蓋於晶圓，與 E2 nozzle 相較，缺點為顯影劑的用量較大 (8 吋晶圓每片需 60 c.c. - 90 c.c.)。目前工業界所使用的 nozzle 主要為 E2 nozzle 及 H nozzle。

阻劑顯影單元的作動步驟如下：

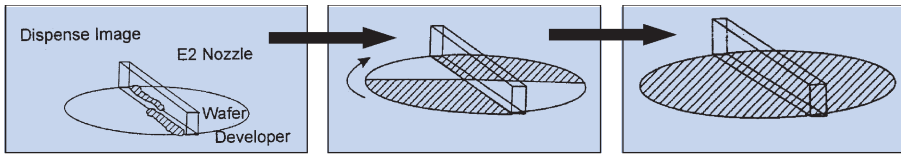


圖 14.
E2 nozzle 噴灑顯影液的步驟
分解圖。

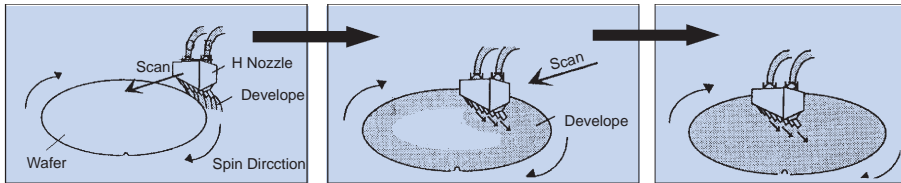


圖 15.
H nozzle 噴灑顯影液的步驟分
解圖。

- (1) 機械手臂將晶圓送至吸盤上，利用真空吸附晶圓背面。
- (2) 吸盤下降，顯影防濺環 (develop cup) 上升，防止顯影液濺出。
- (3) 進行阻劑顯影。
- (4) 顯影防濺環下降，吸盤上升。
- (5) 關閉真空閥，機械手臂將晶圓移走完成旋轉塗佈步驟。

上述的步驟 (3) 依阻劑的種類，其製程內容亦隨之改變，以下以 E2 nozzle 為例，舉一工業界常用的製程條件來說明各細部分解步驟的意義及考量。參看圖 16，將其分解成 6 個分解步驟：

步驟 I：E2 nozzle 移至晶圓正中央吐出顯影液，晶圓以 30 rpm 的轉速旋轉 1 秒 (半圈)，顯影液因表面張力會均勻覆蓋在晶圓之阻劑表面。

步驟 II：顯影液靜置於阻劑上一段時間，此覆液時間 (puddle time) 使顯影液擴散進入阻劑中，進行靜置顯影的動作。此時自動排氣閥 (auto damper) 會關閉，以避免向下氣流 (down flow) 流經晶圓表面的時候，氣流造成表面顯影液的擾動，而造成顯影不均 (因為向下氣流所造成的流場在晶圓的中央較小而在邊緣較大，較大的流場會產生較大的擾動而使該處的顯影速率增加，其顯影後的線寬與晶圓位置的關係如圖 20(b) 所示)。

步驟 III：顯影液與阻劑作用會放出鹼性的氣體，所以在靜置顯影的後段，會開啟自動排

氣閥而排出鹼性的氣體。步驟 I 到步驟 III 的時間為阻劑實際的顯影時間，一般條件為 60 秒左右。

步驟 IV：先以較中等轉速將顯影液旋離晶圓表面，清洗噴嘴移至晶圓正中央吐出清洗液清洗阻劑中殘餘的顯影液，四組晶背清洗頭也同時吐出清洗液以清洗晶背。

步驟 V：維持低速轉速旋轉，繼續作晶圓表面及背面清洗的動作。若以 2.38% 的 TMAH 為顯影劑的話，其清洗液為去離子水。

步驟 VI：高速旋轉將步驟 V 所噴的液體旋乾。完成阻劑顯影的所有步驟。

10. 硬烤

硬烤 (hard bake) 的目的主要為將殘餘的顯影液或清洗液蒸乾，並使阻劑中的聚合物結構更緊密以減少阻劑的針孔缺陷，增加與晶圓表面的附著力，提高抗蝕刻性、抗離子佈植以及增加平坦度等功用。

硬烤熱板的結構及步驟與軟烤相同，烘烤的時間及溫度隨阻劑而異。

四、阻劑處理系統的製程參數

微影製程最重要的任務是將設計於光罩上的電路圖案，精確的轉印到晶圓的阻劑上，所以衡量阻劑處理系統製程性能的良窳，主要在比較旋轉塗佈後阻劑厚度的精確性及均勻性，顯影後的阻劑輪廓、線寬控制及線寬的均勻性，這些製程的規格有

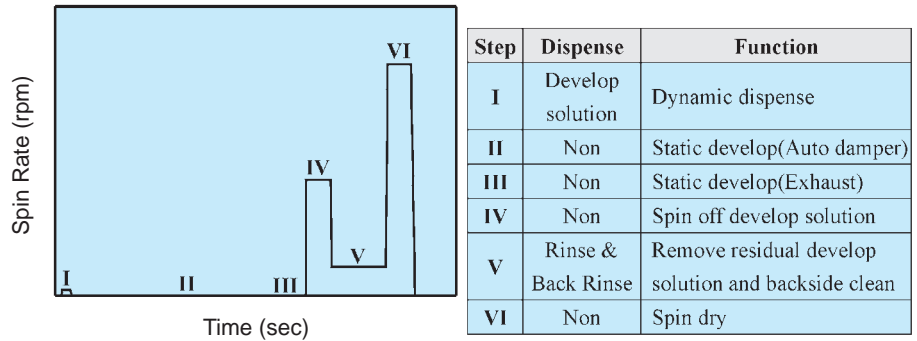


圖 16. 阻劑顯影製程步驟分解圖。

一定的規定及標準，以 12 吋的晶圓為例，若以 193 nm 為光源作 0.1 μm 的製程，對阻劑厚度均勻性的要求需控制在 $3\sigma \leq 10 \text{ \AA}$ (阻劑目標厚度 (target thickness) 約在 5000 \AA 左右)，顯影的 CD 誤差需控制在 $3\sigma \leq 30 \text{ \AA}$ ，製程工程師必須監控制程的條件，方可使最後的阻劑圖形能符合規格之要求。以下分為阻劑厚度及線寬大小來說明。

1. 阻劑厚度

阻劑厚度是微影製程中的重要參數，一般而言阻劑的厚度越薄，其線寬的解析能力越佳，但其阻擋蝕刻或離子植入的能力也越差，所以阻劑厚度的設定必須同時考量這兩個因素。另外還需作出阻劑 E_0 (dose-to-clear E) 對厚度的作圖，而得到所謂的擺動曲線 (swing curve)，並選定擺動曲線中曝光能量的波峰或波谷為目標厚度，以期得到最佳的圖案，請參看圖 17。所謂 E_0 是指某一固定厚度之阻劑於顯影時被完全顯開所需的最小曝光能量。

阻劑厚度的精確性及均勻性，主要決定於旋轉塗佈單元硬體的設備及製程的設定。一般的製程設定上先達到同一片晶圓上阻劑的均勻性，最後再調主轉速以達所需的厚度。影響單一晶圓上阻劑厚度均勻性的常見原因及解決方法歸納如圖 18，圖 18A 為阻劑的溫度過高或過低時位置對位置的關係圖，若阻劑厚度中間最高兩邊較低而邊緣的厚度又稍增，表示是阻劑溫度相對於晶圓太高，阻劑吐出時將熱傳到晶圓表面而造成阻劑中溶劑成分瞬間的改變，進而影響到 S 值及 γ 值，而使阻劑厚度不均；阻劑溫度相對於晶圓太低時，所得到的圖形則相反，故由所得的圖形可知該調高或調低阻劑溫度。圖 18B 及 C 為冷板及旋轉塗佈槽溫度不對時

的情形，其原因亦為阻劑吐出時與晶圓表面的熱交換而造成溶劑成分瞬間的改變。圖 18D 為阻劑吐出的行為與厚度的關係，其特徵為中間厚度平緩而晶圓邊緣厚度的變化較大。圖 18E 為旋轉塗佈槽溼度對厚度的影響，溼度較大時溶劑揮發較少 (S 值變小)，黏滯較小 (γ 值較小)，所以整片厚度變小。圖 18F 與旋轉塗佈槽 exhaust 量的大小有關，因為向下氣流所造成的流場在晶圓的中央與邊緣不同，過大的 exhaust 量會使晶圓邊緣的氣流較大而使厚度較厚。圖 18G 的特徵為有幾個位置厚度特別的高或低，其可能原因為阻劑噴嘴的位置不在晶圓正中，或噴嘴有殘餘的阻劑形成硬塊，於吐出阻

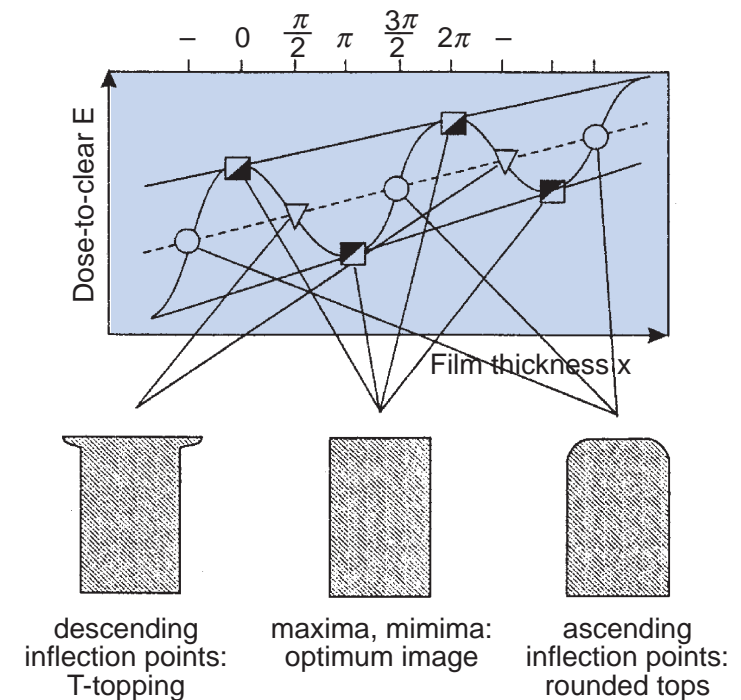


圖 17. 擺動曲線及阻劑厚度對圖案輪廓之影響。

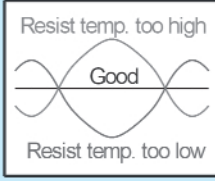
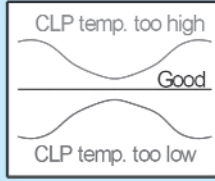
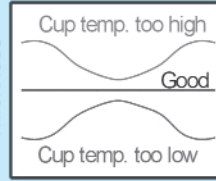


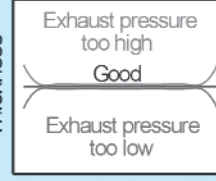

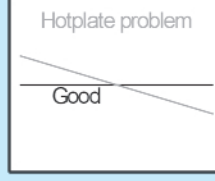
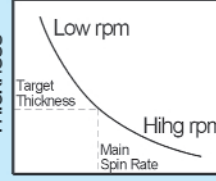
 <p>A Edge Center Edge</p>	 <p>B Edge Center Edge</p>	 <p>C Edge Center Edge</p>
<p>Solution : Adjust resist temperature.</p>	<p>Solution : Adjust cooling plate (CLP) temperature.</p>	<p>Solution : Adjust coater cup temperature.</p>
 <p>D Edge Center Edge</p>	 <p>E Edge Center Edge</p>	 <p>F Edge Center Edge</p>
<p>Solution : Adjust resist dispense speed.</p>	<p>Solution : Adjust humidity.</p>	<p>Solution : Adjust exhaust valve.</p>
 <p>G Edge Center Edge</p>	 <p>H Edge Center Edge</p>	 <p>I Spin Rate</p>
<p>Solution : • Clean the resist nozzle. • Adjust the resist nozzle position.</p>	<p>Solution : • Adjust the process robots. • Adjust the position and clean the plate.</p>	<p>Solution : Adjust spin rate.</p>

圖 18. 影響晶圓上面阻劑厚度均勻性的常見原因及解決方法。

劑時硬塊落於晶圓表面而造成厚度不均的現象。圖 18H 的現象為阻劑厚度呈傾斜，可能是機器手臂進熱板時的位置不對，或熱板上的間隔環位置不對或損壞，或熱板上有微顆粒，使晶圓並非水平落於熱板上，故軟烤時所受的熱傳量不相同，而造成厚度的不均，此外，熱板本身溫度均勻性及熱板的抽氣量是否對稱，亦會影響阻劑軟烤後厚度的均勻性。

事實上影響阻劑均勻度的原因相當複雜，前面我們將阻劑塗佈時所受的作用力簡化為 S 、 F 、 γ 及 A 四項，但實際上溶劑於旋轉同時會揮發，進而造成晶圓表面溫度的下降及旋轉塗佈槽溼度的增加，故 S 、 F 及 γ 值於塗佈的同時隨時間在變化，目前尚無一完整的數學方程式可用以具體描述各參數對厚度及均勻性的影響。所以實際上作阻劑均勻度調整是根據阻劑厚度對晶圓位置所得的圖形，按圖索

驥去做參數的調節。圖 18I 為轉速對厚度的關係圖，通常待阻劑的厚度達一定的均勻度後再調主轉速，以達所需的目標厚度。

達到製程所需之目標厚度後，尚必須調整其他參數以使不同晶圓間平均厚度的差異最小。圖 19 說明一批晶圓中常見的片與片之間厚度不均勻常見的問題，圖 19A 的問題為阻劑的厚度隨塗佈的片數增加而下降，且同一片的厚度均勻性變差(標準偏差變大)，其主要發生的原因為旋轉塗佈槽於塗佈晶圓前溶劑蒸氣的濃度較低，隨塗佈片數的增加而使溶劑蒸氣逐漸累積於旋轉塗佈槽，導致後來塗佈阻劑中的溶劑較不易揮發逐漸變小 (S 值變小)，因而黏滯較小 (γ 值較小)，厚度就隨之變小。圖 19B 的問題為阻劑的厚度隨塗佈的片數有一週期性的變化，且每片的標準偏差值大小差異不大，導致此現象可能的原因為旋轉塗佈槽的溼度有週期性的

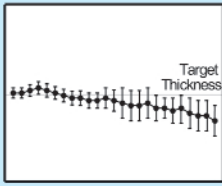
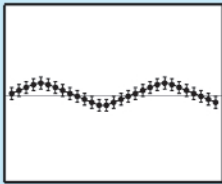
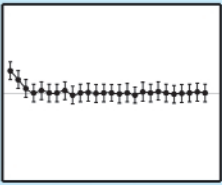
Phenomenon	Description & Cause	Solution
<p>A</p>  <p>Thickness</p> <p>Wafer No.</p>	<p>Description : Thickness decreases and within wafer uniformity decrease.</p> <p>Cause :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Insufficient cup temp. and humidity controller wind velocity. • The back rinse splashes back and accumulated in coater module. • Highly volatile thinner. 	<ul style="list-style-type: none"> • Check the wind velocity. If lower than the recommend value, readjust the equipment. • Increase the back rinse flow rate or shift the back rinse dispense position to the inside. • Change the cup Temp. and humidity controller setting from 23°C to 21°C.
<p>B</p>  <p>Thickness</p> <p>Wafer No.</p>	<p>Description : Cyclical thickness fluctuations. Within wafer thickness uniformity doesn't fluctuation very much.</p> <p>Cause : Cup humidity fluctuation.</p>	<p>Check the various settings related to cup temperature and humidity control.</p>
<p>C</p>  <p>Thickness</p> <p>Wafer No.</p>	<p>Description : Excessive thickness in first one or two wafers.</p> <p>Cause : The processing time of the chill plate before the coater is too short.(Since the prebake process is in the rate controlling status, the wafers after the first one or two are cooled for longer than the time set in the chill plate recipe)</p>	<p>Increase the setting of chill plate processing time. If increasing the time would force a setting outside the chill plate's guaranteed range, check the chill plate module.</p>

圖 19. 不同晶圓之間阻劑厚度均勻性的常見原因及解決方法。

漂動。圖 19C 的問題為阻劑的厚度在每批貨的前幾片較高，但每片的標準偏差值大小差異不大，導致此現象可能的原因為在冷板所設的時間太短，尚未完全冷卻到製程溫度便進行塗佈，導致厚度較厚，而後面的晶圓需等待前面的片數完成軟烤後，才會將晶圓由冷板送至旋轉塗佈槽進行塗佈，故前幾片所經歷的製程時間與後面不相等，實際的應用上須調整冷卻的時間，使每一片晶圓所歷經的製程條件及時間儘可能一致。圖 19 中問題解決的方法，已詳列於圖中說明，在此不贅述。除此之外，有時尚會發生阻劑無法完全塗佈、附著不良、塗佈濺影、微顆粒過多等問題，因篇幅所限在此不多作介紹。

2. 線寬大小

在確定阻劑厚度的精確性及均勻性後，進行阻劑輪廓、線寬控制與線寬均勻性確認才有意義。由於 CD 的確認為微影製程的最後一項，故微影製程中的十個步驟的條件（包括製程條件、所使用的化

學藥劑）、機台的狀況（阻劑處理系統、光學步進機或光學掃描機）及晶圓本身的品質皆有可能影響 CD 的性能，而量測儀器的好壞（Nano Spec、SEM）也有可能影響對 CD 的性能的判斷，故其問題發生的可能原因更為複雜。圖 20 中舉五個常見的影響單一晶圓上阻劑線寬大小及均勻性原因及解決方法，請參看圖中的文字說明，於此不再贅述。

除此之外，其他問題尚包括：顯影液無法完全覆蓋晶圓、阻劑側壁輪廓不佳（T-top or footing）、晶背殘餘顯影液及微粒過多等。

五、結語

本文以微影製程中的阻劑處理系統為主軸，依序介紹機台的演進概念，各製程單元的原理與配備，及阻劑厚度及線寬大小兩個最重要的製程參數，希望透過以上的介紹，能使讀者對阻劑處理系統與微影製程的相關性有一基本的認識與了解。事實上要完整的了解整個微影的製程，必須對阻劑材

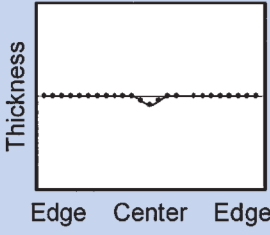
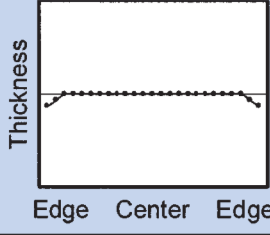
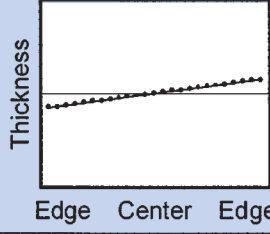
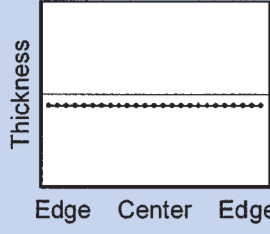
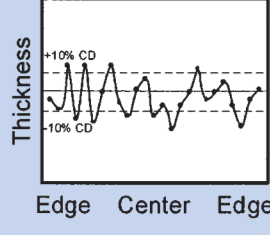
Phenomenon	Description & Cause	Solution
	<p>Description : Narrow center section.</p> <p>Cause : Over-developing in nozzle IN section.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Lower the dispense pressure. • Change sequence. • Shorten or eliminate static dispense time. • Use spin developing sequence. • Use pre-wet sequence. • Shift nozzle IN position about 3 to 5 mm from center.
	<p>Description : Narrow wafer circumference section.</p> <p>Cause : Drop in wafer circumference fluid temperature during developing.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Check auto damper is ON during developing. • Check exhaust pressure, lower if too high. • Increase fluid amount (to make it less susceptible the temperature changes).
	<p>Description : Wedge-shaped profile.</p> <p>Cause :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Lack of temperature uniformity during PEB. • Fluid layer became uneven during develop. • Stepper problem. 	<ul style="list-style-type: none"> • Check : PEB temperature distribution, cover gaps and cleanliness of plate. • Check whether chuck module is tilted. If so, increase fluid amount or change sequence. • Check stepper condition.
	<p>Description : Shift from target line width.</p> <p>Cause :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Incorrect dev. time. • Poor dev. sol. temp. • Poor exposure. • Poor dev. solution. • Poor coating. • Poor SEM focus. 	<ul style="list-style-type: none"> • Check developing time, change as needed. • Check set temperature, change as needed. • Review exposure condition. • Clean line or repair leak, then replace developer solution. • Check thickness. • Adjust thickness.
	<p>Description : Poor line width uniformity (no fixed trend).</p> <p>Cause :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Problem in resist/dev. solution characteristics. • Poor exposure. • Poor coating. • Poor puddle formation. • Poor wafer. 	<ul style="list-style-type: none"> • Check sequence. • Check/adjust exposure condition. • Check thickness uniformity. • Check puddle condition, adjust as follows: <ul style="list-style-type: none"> • Increase fluid amount. • Check sequence. • Check wafer (use new wafers as needed).

圖 20. 影響晶圓上面阻劑線寬大小及均勻性常見原因及解決方法。

料、曝光機台、曝光及顯影過程中所產生的化學反應、曝光製程條件 (曝光劑量及曝光焦距) 等有所了解, 故微影製程是一門結合物理光學、化學、化工材料、機械及電子電機的工程科學, 如何使微影工程師乃至於將來有興趣從事微影相關工作的學生或人員, 整合並融會貫通其牽涉相關的領域, 以面

對微影製程越來越嚴苛的挑戰, 是刻不容緩的。

誌謝

本文特別感謝漢民科技股份有限公司及 Tokyo Electron Ltd. 提供阻劑處理系統相關的圖片及資料。

參考文獻

1. 柯富祥, 光學微影術中光阻的發展趨勢, 毫微米通訊, 3 (5), 42 (1998).
2. K. Sugimoto, *Progress in I-line Photoresist Development*, JSR Technical Presentation, May 13 (1998).
3. K. Sugimoto, *Progress in KrF Resist Development*, JSR Technical Presentation, May 13 (1998).
4. R. Allen, *Progress in 193 nm Photoresists*, *Semiconductor International*, 73, Sep. (1997).
5. 莊達人, VLSI 製造技術, 高立圖書 (1995).
6. 龍文安, 積體電路微影製程, 高立圖書 (1998).
7. 張俊彥, 積體電路製程及設備技術手冊, 經濟部技術處 (1997).
8. J. R. Sheats and B. W. Smith, *Microlithography*, Marcel Dekker, Inc. (1998).
9. R. A. Levy, *Microelectronic Materials and Process*, Kluwer Academic Publishers (1989).
10. D. J. Elliott, *Integrated Circuit Fabrication Technology*, McGraw-Hill (1979).