

## 簡單的光學突破 3C 科技瓶頸：浸潤式微影

林育詩

國立交通大學光電工程所  
e-mail: ivy15253028@gmail.com

(投稿日期：民國 105 年 06 月 19 日，接受日期：105 年 07 月 05 日)

**摘要：**台灣在 IC 製造上在全球扮演著舉足輕重的角色，在技術研發更有相當的貢獻，而中學所學到的基本光學，也被引用到 IC 製造，引領了技術瓶頸的突破。隨著 IC 尺寸的微小化，藉由電晶體的通道長度縮短，來達到較好的元件特性。在當半導體元件製程技術發展到 65 nm 技術節點時，現有光學微影製程<sup>註一</sup> (photolithography) 的曝光技術到達了瓶頸。以水為介質的「浸潤式微影」，在微影製程技術上有突破性的發展，更成功的被應用在 65-,45-,和 32-nm 的半導體製程技術上。浸潤式微影利用簡單的物理光學原理，包含折射、繞射與鑑別度，可以同時改善解析度和焦距深度。使用原有微影系統，搭配浸潤式微影，可以達到更短光源波長的效果，對 IC 尺寸的微小化有很大的幫助。

**關鍵詞：**折射、繞射、浸潤式微影、半導體研發

### 壹、前言

中學生在學物理時，可能會質疑這些理論的實用性。本文從高中物理光學的原理出發，介紹現今科技技術突破的實例-浸潤式微影(immersion lithography)，來突顯基礎物理與科技應用端的緊密連結。

1965 年，英特爾(Intel)共同創辦人 Gordon Moore 提出的 Moore's Law：積體電路上可容納的電晶體數量，每 24 個月會增加

一倍。現今，在我們生活周遭電子產品內的微小晶片上，就擁有上億顆電晶體。隨著積體電路設計複雜化，晶片尺寸縮小化，單一晶片上的電晶體的密度增加。使用光學微影製程，短時間內可以大量生產，且解析度佳、成本低等優勢，成為半導體製程的關鍵技術，但困難度也日益遽增。如何讓光罩上奈米尺度的圖案不失真的轉移至晶片上，更是近幾年半導體界棘手問題之一。

當 IC 元件尺寸縮小，光罩上的圖案線

寬小於光源波長，繞射現象將會造成圖案的嚴重失真。透過縮短光源波長得以改善，從原先的波長 436 nm 發展到目前使用的波長 193 nm ArF 光波源。但早在 2002 年左右，半導體製程技術一路微縮到 65 nm 技術節點時，ArF 的光源已經無法突破。

為了突破光因繞射而產生的失真問題，林本堅於 1987 年提出了「使用波長 193 nm 的 ArF 光波源，並以水作為介質的浸潤式微影，可以成功的達到更短波長的曝光效果」[1]。當時，台積電和荷蘭半導體設備製造商 ASML 合作，共同成功的開發出 193 nm 浸潤式微影機台。由於開發新光源的成本之高，以水作為介質的浸潤式微影，不僅延長了 ArF 光波源的使用壽命，且在 65-、45-、和 32-nm 的半導體製程技術節點上有極大的貢獻。

## 貳、浸潤式微影的基本原理

浸潤式微影所使用的光學原理是根據 Snell's Law，式(1)，折射率和折射角的關係，在光學系統和晶片之間填滿水(圖 1)，光在不同介質行進的角度不同，進而改善解析度(圖 2)[2]。

$$\text{Snell's Law} : n_1 \sin\theta_1 = n_2 \sin\theta_2 \quad (1)$$

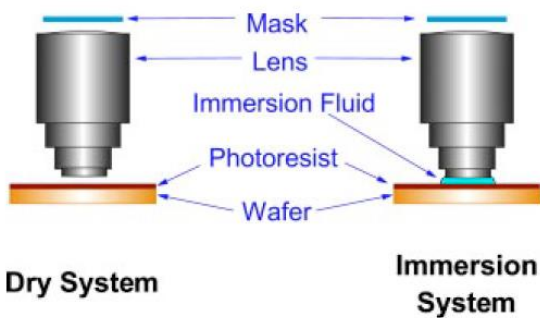


圖 1：傳統式微影光學系統(左)與浸潤式微影光學系統(右)。

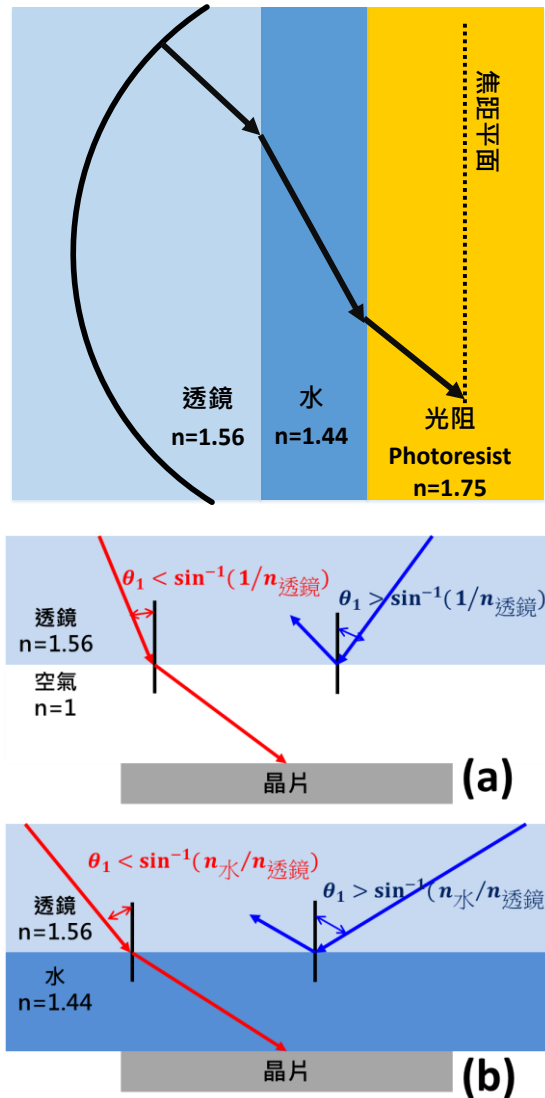


圖 2：光進入介質角度示意圖。

光從透鏡到空氣，光入射最大角度須小於臨界角 $\theta_1$ ，超過臨界角 $\theta_1$ 則會產生全反射。當光無法穿過透鏡、介質空氣到達晶片，光訊號也因此散失，使圖案失真。我們可以透過 Snell's Law 計算臨界角 $\theta_1$ 。

假設  $n_{\text{空氣}}=1$ ， $n_{\text{透鏡}}=1.56$ ， $n_{\text{水}}=1.44$ ，折射角 $\theta_2 = 90^\circ$ 即發生全反射。

Ex(圖 2a)：

$$n_{\text{透鏡}} \times \sin\theta_1 = n_{\text{空氣}} \times \sin\theta_2$$

$$\theta_1 < \sin^{-1}\left(\frac{n_{\text{空氣}}}{n_{\text{透鏡}}}\right), \theta_1 < 39.87^\circ$$

Ex(圖 2b) :

$$n_{\text{透鏡}} \times \sin\theta_1 = n_{\text{水}} \times \sin\theta_2$$

$$\theta_1 < \sin^{-1}\left(\frac{n_{\text{水}}}{n_{\text{透鏡}}}\right), \theta_1 < 67.38^\circ$$

$\theta_1$ 表示光可穿過透鏡的最大角度，當 $\theta_1$ 越大，越不易發生全反射，所以晶片可接收到的光源角度越大，光訊號越多，相較傳統微影系統(圖 2a)光接收角度範圍 $\theta_1 < 39.87^\circ$ ，浸潤式微影系統(圖 2b)角度可達到 $\theta_1 < 67.38^\circ$ ，接收到的光源較多。

藉由改變透鏡和晶片中間的介質，由折射率較高的水取代原先的介質空氣，使得原先會被全反射的高階繞射光可穿過透鏡，根據解析度，式(2)，可知 $\theta_1$ 越大，可搜集到的光角度範圍越大(即數值孔徑(Numerical Aperture, NA)越大)，達到高解析度(即R越小)，改善解析度。提升數值孔徑除了可以使用較高折射率的介質，也可以透過使用較大的透鏡來搜集光，但成本也隨之提高。因此，使用以折射率高的水為介質的浸潤式微影來達到提高數值孔徑，提高解析度的目的。

$$R = K_1 \frac{\lambda_0}{n \sin\theta_1} = K_1 \frac{\lambda_0}{NA}, NA = n \sin\theta_1 \quad (2)$$

此外，由於 $n_{\text{空氣}} < n_{\text{水}}$ ，同一入射角 $\theta_1$ 的光，從透鏡進入空氣的折射角 $\theta_2$ 大於從透鏡進入水的折射角 $\theta_3$ ，光從透鏡進入介質水( $n_{\text{水}}$ 較高)，可得到較小的折射角 $\theta_3$ (圖 3)，雖然折射角不同，但數值孔徑並不改變，式(3)。

$$n_{\text{透鏡}} \times \sin\theta_1 = n_{\text{空氣}} \times \sin\theta_2 = n_{\text{水}} \times \sin\theta_3 = NA \quad (3)$$

$$DOF = k_3 \times \frac{\lambda}{NA^2} = k_3 \times \frac{\lambda}{\sin^2\left(\frac{\theta}{2}\right)}$$

$$= \frac{k_3}{2} \frac{\lambda_0}{n - \sqrt{n^2 - NA^2}} \quad (4)$$

根據焦距深度與折射率關係，公式(4)，

傳統微影和浸潤式微影系統對焦距深度的比例觀察到，當介質的折射率越大，焦距平面較深，且焦距深度( Depth of Focus, DOF)較大。推導如下：

$$\frac{DOF_{\text{浸潤式}}}{DOF_{\text{傳統}}} = \frac{n_{\text{空氣}} - \sqrt{n_{\text{空氣}}^2 - NA^2}}{n_{\text{水}} - \sqrt{n_{\text{水}}^2 - NA^2}}$$

$$= \frac{n_{\text{空氣}} \left[ 1 - \sqrt{1 - \left(\frac{NA}{n_{\text{空氣}}}\right)^2} \right]}{n_{\text{水}} \left[ 1 - \sqrt{1 - \left(\frac{NA}{n_{\text{水}}}\right)^2} \right]} \approx \frac{n_{\text{水}}}{n_{\text{空氣}}} = \frac{1.44}{1} \quad (5)$$

浸潤式微影的焦距深度為傳統微影的焦距深度約 1.44 倍。

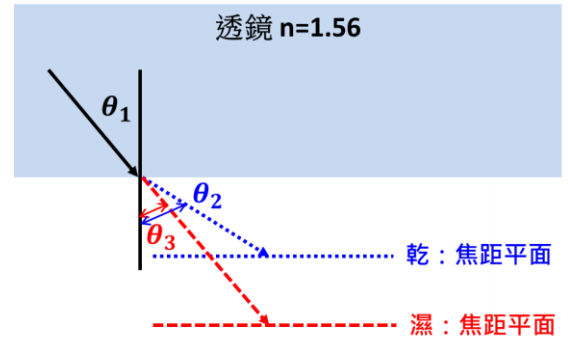


圖 3：浸潤式微影和傳統微影的不同光路徑

一般日常生活中常聽到的景深( Depth of field )是指光聚焦後可以清晰成像的範圍(圖 4)，而焦距深度( Depth of focus )是對景深的成像範圍之補充。相較於日常生活使用的相機鏡頭成像，微影製程在微觀下(奈米尺度)，需要將物平面、像平面和透鏡間的相對傾斜角，對圖像能夠清晰成像的範圍所造成的變化加以考慮，即是焦距深度。而焦距深度與數值孔徑(NA)、光源波長皆有關。

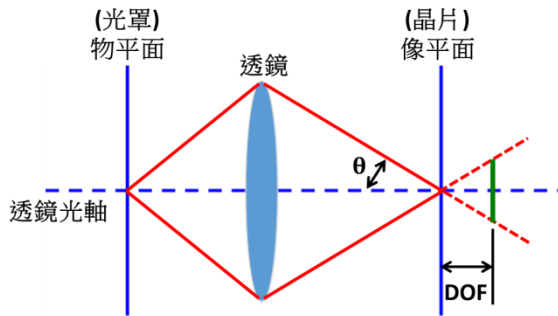


圖 4：透鏡聚焦深度。

當元件尺寸微縮，曝光線寬越來越小，對曝光解析度和焦距深度的要求隨之提高。傳統微影系統隨著光源波長變短，解析度提高，焦距深度也隨之變淺，表示著解析度和焦距深度是難以同時兼顧的。而浸潤式微影系統的發展，解析度和焦距深度可以同時透過浸潤式微影達到改善的效果。

### 參、浸潤介質：水

從上述浸潤式微影所應用的光學原理可知，在光學透鏡和晶片之間加入折射率較高的液體-水，取代原先介質空氣，能夠擁有較高的數值孔徑，同時改善解析度和焦距深度。使用原有的光源下，光罩上的圖案不失真的轉移至晶片上。了解浸潤式微影的原理後，選用越高折射率的液體，效果是否越好？為何現今科技業選用的是水當作介質？

首先，高折射率的液體，對光的吸收率較高，將會導致微影製程曝光效率降低 [3]。目前業界選用的液體是折射率為 1.44 的水，水對光的吸收率較低，穿透率較高，在各方面的控制相較容易、穩定，此外，純水取得的技術也較為成熟，使用水作為介質對其他製程步驟的影響能夠降至最低。

除了光吸收率的考量，晶片和水之間產生的污染也需要列入評估。例如晶片上的高分子聚合物(光阻)中含有光酸物質，與光反

應後的生成物會部分溶在水裡造成污染。透過機台的設計，水可以一定的流動速度循環，使污染物不會一直存在水中，避免水質惡化嚴重。更可以透過在光阻上方加上一層不反應的覆蓋層，使水不直接接觸光阻，或是在光阻中加入斥水性分子。相關的研究都有在文獻中被提出討論。

然而，使用水作為浸潤式微影仍有曝光的極限 33.5 nm，許多文獻針對添加不同液體深入研究，如： $\text{AlCl}_3$ ， $\text{H}_3\text{PO}_4$ ， $\text{Na}_2\text{SO}_4$  [4]，或許可以是下一代浸潤式微影的液體選擇之一。

### 肆、結論

透過 3C 產品內晶片的技術，可發現其背後所應用的物理原理並不艱深，科技的創新與研發往往建立在基礎物理上。「浸潤式微影」建立在高中物理光學單元的折射與繞射原理，簡單而基本的物理概念，成功的突破半導體在微影製程的瓶頸，微影製程的解析度和焦距深度也同時獲得改善。當浸潤式微影克服在機台設計、製程使用上等棘手的問題，波長 193 nm 的 ArF 光波源的使用壽命更延長。在下一代微影製程，更短光源波長 13.5 nm 的 EUV 尚未準備好之前，浸潤式微影為半導體產業提供了解決辦法。

註一

有關「光學微影製程」(photolithography)可參閱書籍 J. D. Plummer, M. D. Deal, and P. B. Griffin, (2000) "Silicon VLSI Technology: Fundamentals, Practice, and Modeling," Prentice Hall

### 參考文獻

1. Lin, B.J., (1987), 'The Future of Subhalf-Micrometer Optical Lithography', *Microelectronic Engineering*, 6, (1), pp.

- 31-51.
2. Lin, B.J., (2004), 'Immersion Lithography and Its Impact on Semiconductor Manufacturing', *Journal of Micro/Nanolithography, MEMS, and MOEMS*, 3, (3), pp. 377-395.
  3. Zhou, J., Fan, Y., Bourov, A., Lafferty, N., Cropanese, F., Zavyalova, L., Estroff, A., and Smith, B.W., (2005), 'Immersion Lithography Fluids for High Na 193 nm Lithography', in, *Microlithography* (International Society for Optics and Photonics)
  4. Smith, B.W., Fan, Y., Slocum, M., and Zavyalova, L., (2005), '25 nm Immersion Lithography at 193 nm Wavelength', in, *Microlithography*, (International Society for Optics and Photonics)

## **Simple optics principles overcomes the bottleneck of 3C Technology : Immersion Lithography**

**Yu-shih Lin**

Institute of Electro-Optical Engineering, National Chiao-Tung University  
e-mail: ivy15253028@gmail.com

### **Abstract**

Taiwan plays an important role in IC technology manufacturing in the whole world. It also makes important contributions to technology research and development. Besides, the basic optical principles that we learned in high school have been applied to semiconductor manufacturing to overcome the bottleneck of IC technology. In the past, the channel length of transistors shrank to improve the performance. Optical lithography which used a 193-nm light was approaching its limit past the 65-nm technology node. However, under the simple and basic optical principles, lithography using water immersion can effectively improve the resolution and the depth of focus simultaneously. Thus, the immersion technique is being used in modern lithography for the 65-, 45-, and 32-nm nodes.

**Key words:** Immersion lithography, Semiconductor manufacture