

# 實現高數值孔徑極紫外光(High NA EUV)的運算式微影解決方案

## 作者

Gandharv Bhatara

新思科技產品行銷

## 背景

隨著新的製程節點特徵尺寸(feature size)和解析度(resolution)持續縮小，先進半導體光罩上的裝置密度和數量快速增加。極紫外光微影技術(Extreme Ultraviolet Lithography, EUV)已經成為半導體產業的關鍵技術，它不僅促進摩爾定律的發展，還能實現積體電路(IC)進一步微型化。目前投入生產的EUV系統具有0.33的數值孔徑(NA)，通常被稱之為低數值孔徑極紫外光(Low NA EUV)系統。

為了進一步縮小設備節點並實現更小的特徵，高數值孔徑極紫外光(High NA EUV)微影技術是箇中關鍵，目前正在開發中。

隨著產業轉向這些High NA EUV系統以實現更好的解析度和產量，對更準確和複雜的建模和校正方法的需求也變得十分迫切。本白皮書指出並討論了支持High NA EUV微影技術的開發、優化和實作所需的運算需求。同時探討與High NA系統複雜性增加的相關挑戰，提出潛在的解決方案，並強調運算式微影(computational lithography)對於推動下一代先進EUV微影技術取得成功的重要性。

## 高數值孔徑極紫外光(High NA EUV)的挑戰

從0.33 NA過渡到0.55 NA帶來了一些新的挑戰，這裡總結如下：

- 提高像差敏感度(Aberration Sensitivity)：像差源自於光學的不完美，如鏡面曲率、材料和多層不均勻性，或定位偏移。這些失真(distortion)會導致投影圖案的變異，影響關鍵尺寸、對比度和定位精準度。相較於0.33 NA，0.55NA的像差敏感度變得更關鍵；同時對低像差的要求也變得更加重要。而像差的精準建模對於預測性微影模擬而言也變得更不可或缺。
- 電磁效應：了解和量化電磁效應對於0.33 NA和0.55 NA的影響同樣關鍵。模擬精準度以及光罩性質(多層膜的吸收層  $n$  和  $k$  值，薄膜層厚度，側壁角度，圓角等)的精確特徵都是進行模擬時的重要輸入參數。High NA EUV系統需要考慮光罩構形的高度起伏(mask topography)效應，其中光罩上的3D特徵會影響晶圓平面的強度分佈，從而影響關鍵尺寸均勻度(CDU)和圖案保真度。
- 光罩吸收層(absorber)和多層堆疊反射層(reflector)：EUV中的一個關鍵組件是光罩，它由光罩吸收層和多層膜反射層組成，結構複雜。吸收層圖案定義了電路特徵，而多層膜反射層增強了光罩的反射特性，促使系統能夠有效地進行光的傳遞。設計用於High NA EUV的光罩吸收層和多層膜反射層涉及各種要素的平衡，例如圖案保真度、反射率和製程相容性。在維持圖案保真度的同時能達到整個曝光狹縫(exposure slit)範圍內的均勻反射率仍然是一個主要障礙。此外，還需要徹底了解材料特性、多層膜界面粗糙度和製程變異(process variations)對性能的影響。先進的運算技術，包括嚴謹的電磁模擬和優化演算法，將在設計和優化這些組件中扮演關鍵的角色。

- 閃焰 (Flare)：閃焰來自各種來源，包括由於光學元件表面粗糙度、光罩吸收層結構或基板本身而引起的散射。它會顯現為曝光劑量的不均勻分佈、造成對比度降低、導致關鍵尺寸(CD)和線寬(linewidth)變異，圖案保真度降低，或在最壞的情況下，產生缺陷。增加的數值孔徑(NA)會加劇閃焰效應，因此需要更有效的緩解策略。
- 變形成像(Anamorphic Imaging)：High NA EUV投影系統具有變形成像特性，其中光罩縮小係數在水平方向(即曝光狹縫方向)為4倍，在垂直方向(即掃描方向)則為8倍。因此，需要針對水平和垂直特徵分別調整光罩校正策略。此外，設計規則和光罩製造限制或光罩規則需要考慮到變形成像條件。

## 高數值孔徑極紫外光(High NA EUV)的運算式微影解決方案

運算式微影解決方案對於實現High NA EUV而言，發揮了重要作用。該技術的發展在嚴謹型模擬(rigorous simulation)、精簡型建模(compact modeling)、光源光罩最佳化(SMO)和反向微影術(ILT)等方面皆需要取得顯著進展。新思科技(Synopsys)光罩解決方案已經為High NA EUV開發做好準備。本節摘要說明最近取得的一些關鍵進展，以提供相關支持性解決方案。

### 嚴謹型模擬(Rigorous Simulation)

嚴謹型模擬可以準確預測High NA EUV系統的成像表現。它們提供對解析度極限、製程容限(process window)和對比度特性的關鍵洞察，為微影製程的設計和優化訂下指導方針。

藉由將複雜的光學現象、光罩構形、偏振(polarization)效應和反射式光學納入考量，嚴謹型模擬已成為解析、優化和預測High NA EUV微影系統行為不可或缺的工具。它們已經被應用在系統優化、光罩設計、光瞳塑形(pupil shaping)和光源優化。

Synopsys S-Litho™代表半導體製程開發和優化過程中，微影模擬的產業標準，適用於先進記憶體和邏輯應用。運用S-Litho解決方案，可以執行High NA EUV所需的所有模擬。

圖1以圖像方式總結S-Litho的一系列獨特功能。

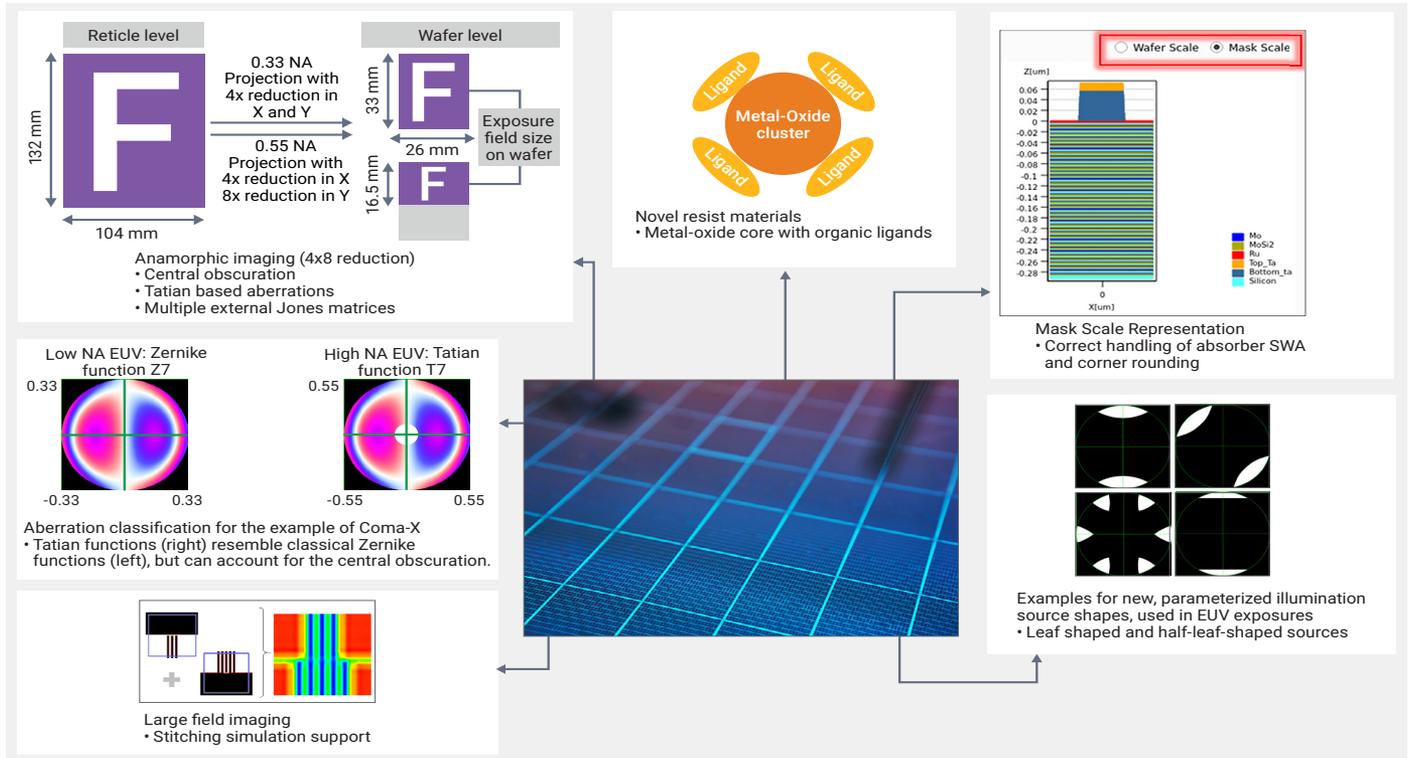


圖 1: 適用於High NA EUV微影的選定S-Litho功能

## 精簡型建模(Compact Modeling)

由於EUV具有更多在DUV微影中不存在的系統性和隨機性變異來源，因此擁有準確的預測能力來測試和理解設計與微影製程之間的相互作用，變得更加重要。EUV特有的物理行為，如遮蔽(shadowing)、閃焰(flare)、光罩構形(即Mask3D)效應、光罩堆疊反射率、光罩吸收層行為和其他效應，是EUV如何從光罩到接下來曝光的晶圓成像的關鍵差異。

因此，反射式光罩基板(mask substrate)和EUV特定的光罩吸收層堆疊，對於High NA EUV的優化有高度重要性。最近，業界對優化EUV光罩堆疊產生極大的興趣，以進一步增強成像行為、實現更好的圖案解析度、擴大製程容限、降低隨機缺陷率和優化閃焰效應表現。

為此，這個是需要出色的模擬精準度來實現新光罩薄膜層堆疊的效果評估。而S-Litho中完全嚴謹的3D光罩求解器參考，可以妥善地捕捉到這些效果。

然而，業界還需要準確的精簡型模型3D光罩求解器，以滿足全晶片光罩合成在OPC、ILT、微影成像驗證這些面向的應用。為了平衡這些全晶片應用所需的精準度和運算效率要求，新思科技開發了高精度和預測性模型。這些先進的精簡型3D光罩模型可以與完整嚴謹的3D光罩模型參考精確地匹配，如圖2所示。

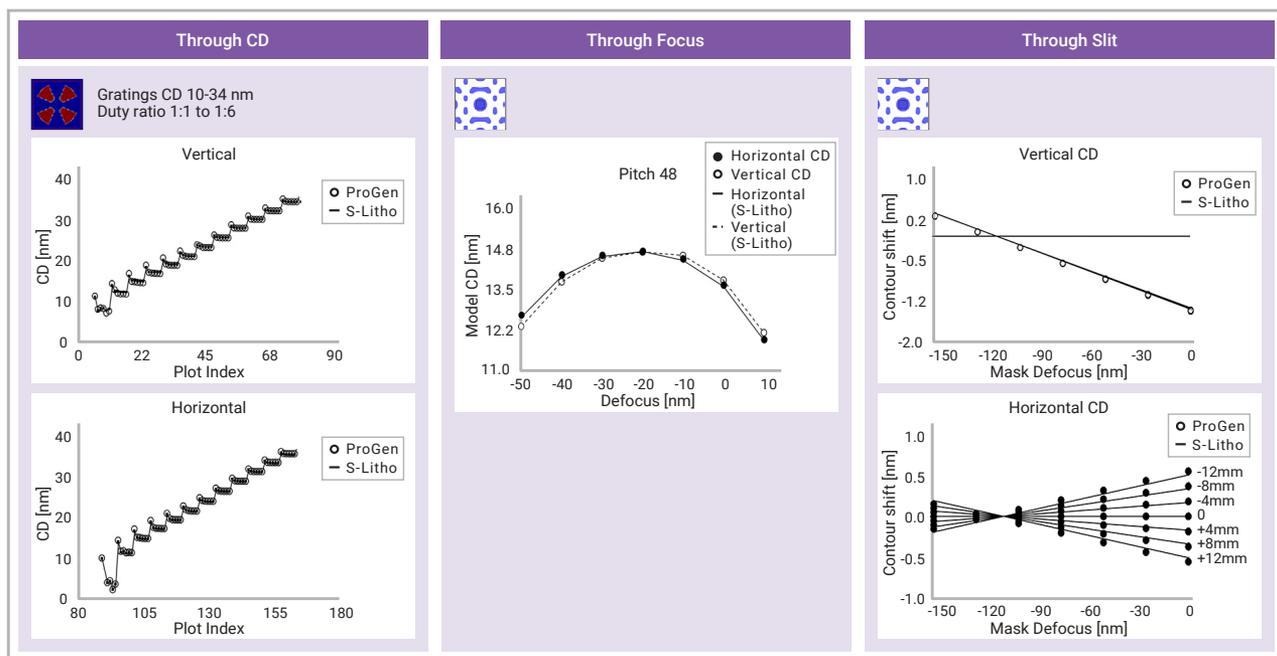


圖 2：精簡型模型模擬通過一系列圖案與嚴謹參考模型相匹配

High NA EUV精簡型建模需要解決的另一項關鍵問題是中心遮蔽(central obscuration)的影響。在設計中引入中心遮蔽是為了使0.55投影系統實現更高光學透射率，以避免額外的反射鏡需求。有了中心遮蔽，就需要使用一組替代的多項式(Tatian多項式)來描述像差。這種用於描述具有環形光瞳(annular pupils)的光學系統像差的形式，已經在Synopsys Proteus™精簡型模型中獲得了很好的體現。

## 光源光罩最佳化(Source Mask Optimization)

光源光罩最佳化(SMO)共同優化照明光源和光罩佈局，以增強微影製程。它已被廣泛應用於DUV和EUV微影，用來定義光機器的照明光源。對於High NA EUV而言，SMO現在需要考慮變形(anamorphic)和中心遮蔽效應。

Proteus SMO解決方案的獨特優勢在於，光源和光罩解決方案可以直接輸出到S-Litho進行進一步的嚴謹探索和驗證。這種方法可以提高最終光源的品質，並提供更大的製程容限。

圖3為High NA EUV SMO流程概覽。

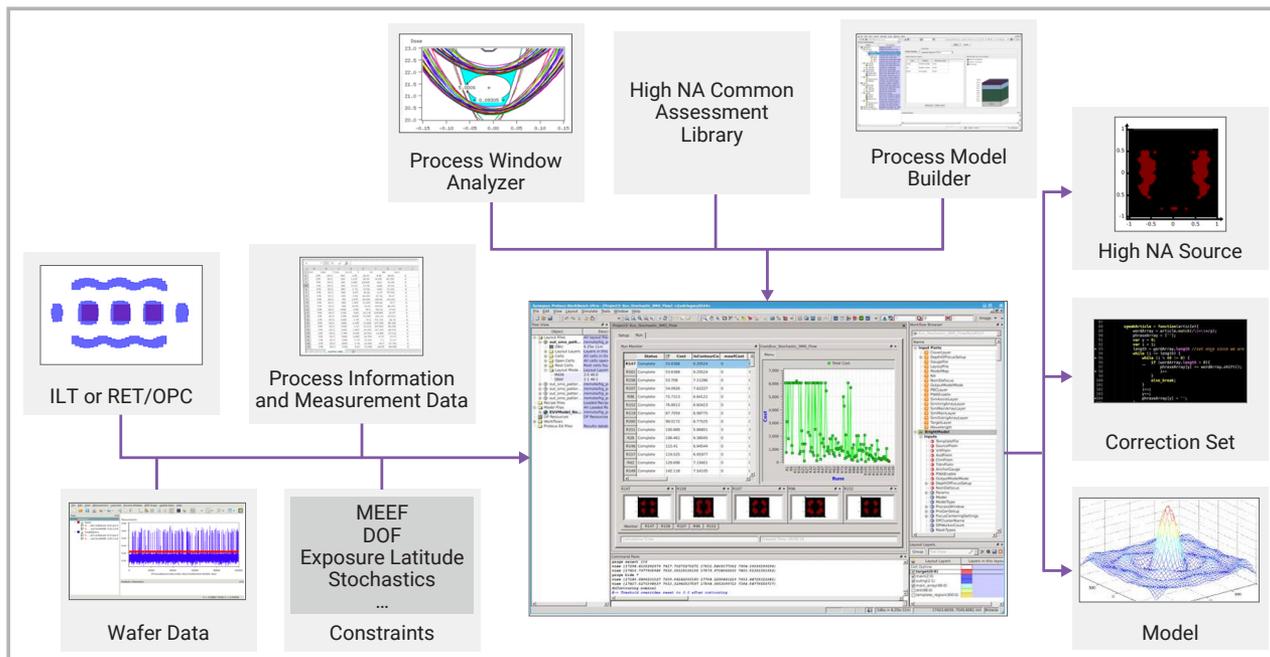


圖 3: 光源光罩優化流程

## 反向光學微影(Inverse Lithography, ILT)

反向光學微影(ILT)是一種眾所周知的技術，可以解決複雜微影問題，並實現優異的結果。直到最近，反向光學微影的應用仍僅限於設計規則優化、記憶體陣列的處理(包括周邊部分)，以及解決關鍵的「熱點(hotspots)」或「良率限制因素(yield limiters)」。然而，由於相關的運算成本，它尚未用於全晶片製程。此外，應用反向光學微影所產生的光罩布局通常是曲線形的，這使得製作光罩變得困難。

多波束光罩寫入機(multibeam mask writers)使生產具有曲線圖案的高品質光罩成為可能，並且已經開始倡議進行光罩曲線特徵數據格式的標準化。這些光罩寫入機的推出，為創建曲線光罩提供了一個新的機會。由於其具備以合理的寫入時間和圖案質量寫入具有曲線特徵的光罩的能力，高效且具有成本效益的光罩數據準備系統的要害也已到位。其中包括CATS光罩誤差校正(MEC)、CATS光罩規則檢查(MRC)和CATS圖形裂解分割(Fracture)，皆適用於曲線特徵。

此外，透過結合演算法加速、機器學習技術、大規模處理技術和基於GPU的加速技術，全晶片的反向光學微影也已經變成是可行的事實。

雖然反向光學微影和曲線光罩處理並非High NA EUV微影獨有，但由於其巨大的微影優勢，這些能力被認為對於High NA EUV非常關鍵。其中，需要提及的一個重要面向是反向光學微影能夠考慮到High NA EUV的變形成像特性。

變形反向光學微影(Anamorphic ILT)藉由對X和Y方向的光罩圖案進行不同的校正，來補償這些變形效應。它使用運算式演算法來優化每個方向的光罩圖案，確保晶圓上的最終圖案達到所需的解析度和保真度。透過針對特定的變形成像行為調整光罩校正量，變形反向光學微影可以減輕成像差異並改善整體微影效能。

在執行反向光學微影時，解決曲線形光罩規則合規性(mask rule compliance)的能力，將是提供可行校正方案的關鍵。這種能力已經被整合在Proteus ILT解決方案中。圖4顯示了如何透過使用反向光學微影並搭配曲線MRC強化的使用來改善圖案保真度。

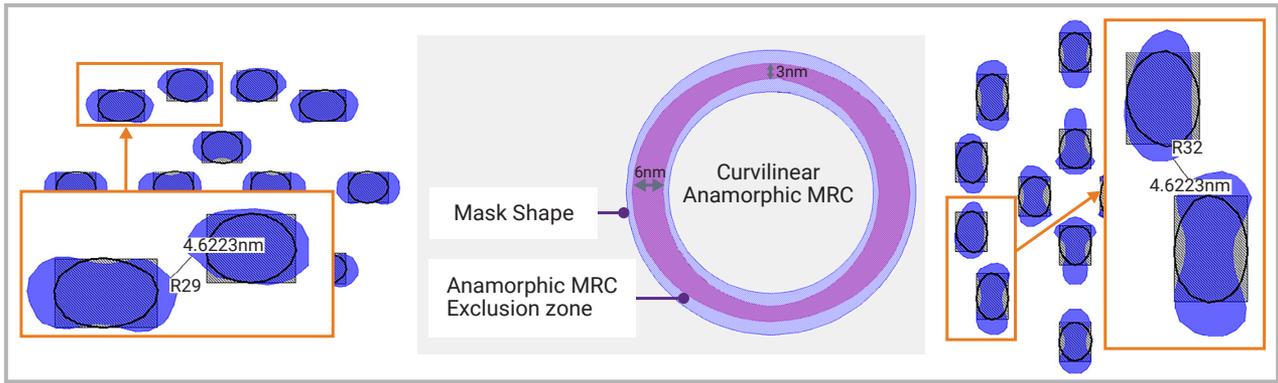


圖 4：使用反向光學微影和曲線MRC強化可改善水平和垂直特徵的圖案保真度

## 總結

High NA EUV微影技術的開發已經順利展開。儘管它是Low NA EUV微影技術的延伸，但它依然存在著亟待解決的重大挑戰。新思科技S-Litho工具以及Proteus SMO、OPC和ILT光罩合成和光罩數據準備所需的工具目前都取得顯著進展，已經準備到位可以支持High NA EUV開發。