

# 針對微影製程效益最大化的曲線光罩圖形

## 作者

Gandharv Bhatara

新思科技產品行銷

## 背景說明

傳統上，隨著半導體產業從一個製程節點移動到下一個更小的製程節點，臨界尺寸(CD)控制要求已經變得更加嚴苛，增加了約30%。由於193nm深紫外光(DUV)單次曝光成像停滯在最大數值孔徑(NA)1.35，從節點到節點的微影解析度縮放變得更加具有挑戰性。半導體產業已經開發許多方法來達到現行的圖案縮放。這些方法包括各種方式如多重圖形曝光、改善的微影製程整合、更好的製程控制、更佳的光阻材料、更精確的光學鄰近修正(OPC)以及0.33NA極紫外光(EUV)微影技術。這些新的技術發展促使了圖形微縮的持續進行；然而，這也增加在製作先進圖形節點須具備精準且考慮成本效益的光罩的難度。

反向光學微影光罩技術(ILT)是一種眾所周知的有效技術，可解決複雜的微影問題並能獲得優異結果。ILT在尋求靈活彈性的光罩圖形解決方案以改善微影製程操作範圍、2D臨界尺寸控制、低k1微影解析度，並最小化對雙重圖形曝光技術(DPT)和其他多重圖形技術的需求方面展現出顯著的優勢。ILT可以透過其光罩設計優化過程中的場域操作(field operations)提供最佳化的曲線光罩。然而，在之前無法大量製作曲線形狀，產業界必須尋找能遷就這個量產限制的方法，其中一種方法就是將曲線形狀轉換成曼哈頓形狀(Manhattanize)來降低光罩製作的難度，但這相當程度弱化了原本曲線ILT想要取得的微影效益。

為能因應這個挑戰，光罩產業已經利用多波束光罩寫入(MBMW)工具，開發並實施已改善的光罩寫入功能。相較於傳統的單變形光束(VSB)光罩寫入機，這些新工具提供顯著改善的生產效率，在不增加光罩寫入時間的情形下，能產出包括先進的曲線和全角度圖形光罩等複雜的光罩圖形。隨著這項技術的進展，曲線光罩現在可以擴展到先進的技術節點和微影技術，如超低k1 DUV、低k1 0.33NA EUV和高NA EUV成像的微影製程應用。

## 反向光學微影及全晶片製程處理的挑戰

如上所述，ILT以能藉由場域操作提供高度優化的微影用曲線光罩而聞名，這些光罩以卓越的品質幫助解決困難的微影問題。然而，運算成本(在運行時間及數據量上)的考量在之前曾經阻礙了ILT的廣泛應用。

十多年來，ILT已被用於眾多應用領域，如設計規則優化、記憶體陣列的處理(包括周邊部分)，以及解決關鍵的「熱點」或「良率限制因素」。然而，由於衍生出的運算成本，ILT尚未應用在全晶片(full-chip)製程。

為了能讓曲線ILT可以在完整晶片邏輯中部署，急需能解決執行時間問題的實用解決方案。透過大規模分散式處理和GPU硬體加速進行擴展、機器學習技術以及互補的快速曲線OPC技術都是實現全晶片ILT很有前景的方法。

此外，即使全晶片ILT的執行時間問題得以解決，也不足以確保這些曲線光罩能廣泛應用在大量生產製造，因為製造這種光罩還有其他挑戰。這些挑戰包括處理大量數據和缺乏系統性的光罩驗證方法。

因此，除了一個在運算上可行的光罩合成(Mask Synthesis)解決方案之外，還需要一個可有效支援曲線形狀製程的光罩數據準備流程。

## 全晶片曲線形數據資料處理系統的構成要素

全晶片曲線形數據資料處理系統所需的構成要素可分為兩個部份，即光罩合成解決方案和光罩數據資料準備解決方案。

### 光罩合成

#### 機器學習 (ML) ILT

隨著機器學習(ML)和深度學習技術的進展，應用它們來解決光罩合成問題，再自然不過。ML-ILT透過執行完整的ILT優化來為一組訓練圖形生成絕佳的光罩解決方案，然後訓練一個深度學習ML模型，為特定的目標圖形生成所對應的光罩圖形。

ML-ILT的優點在於它可以生成主光罩和輔助(AF)光罩特徵，相較於典型基於生產規則的AF(RBAF)和OPC解決方案，能顯著改善晶圓的操作範圍。此外，與執行完整的ILT相比擬，ML-ILT可顯著縮短整體周轉時間。然而，就像所有的ML建模應用一樣，模型中可能會有不準確性，在ML推論之後還需要再進行後處理以滿足生產要求。

為了使用完整ILT成本函數庫來優化ML-ILT的輸出，來維持或加強由ML-ILT解決方案提供的操作範圍，ILT可以運用在後處理(post-processing)；這可以比在沒有運用ML-ILT的情況下執行純粹的ILT可以有更快的周轉時間。或者，藉由OPC成本函數和其演算法求解器(solver)，也可以使用OPC進行後處理，相較於執行完整ILT可進一步減少周轉時間。

#### 參數曲線 OPC

正如先前提到的，描繪曲線形狀所需的數據量顯著增加是光罩合成的挑戰之一，而這數據量可能是曼哈頓解決方案基準的10倍以上。為了解決這個問題，提出的解決方案是以一系列參數曲線形狀來呈現曲線形狀的輸出。這種方法可以在最終輸出時使用明顯少很多的數據來呈現複雜形狀。

隨著產業在呈現參數曲線形狀的輸出格式上取得共識，重要的是透過建立OPC修正方法的資料結構(recipe data structure)和求解器來奠定基礎，以達成具有相同資料格式的光罩層輸出。

我們藉由Synopsys Proteus™ Curve OPC應用來解決這個問題，這個應用程式以一系列參數曲線來呈現任意形狀。在反覆執行OPC的過程中，我們移動控制點，並運用曲線裝飾器(curve decorator)將控制點和參數曲線連接起來，然後對形狀的參數曲線進行採樣，並將其輸出到預先設定好的光罩解析度的傳統曲線資料庫中。

#### ML ILT 和參數曲線 OPC 的全晶片流程

圖1說明如何使用ML ILT和參數曲線OPC構建一個實用的全晶片流程。這個解決方案已被證明能將ILT的執行時間減少一個數量級(>10倍)，同時提供接近ILT的製程餘裕。

圖2、3和4顯示這種流程相較於傳統OPC的製程餘裕優勢，這些優勢表現在關鍵指標如邊緣放置誤差(EPE)分佈、製程變異(PV)頻寬和光罩誤差增強因子(MEEF)的改善。

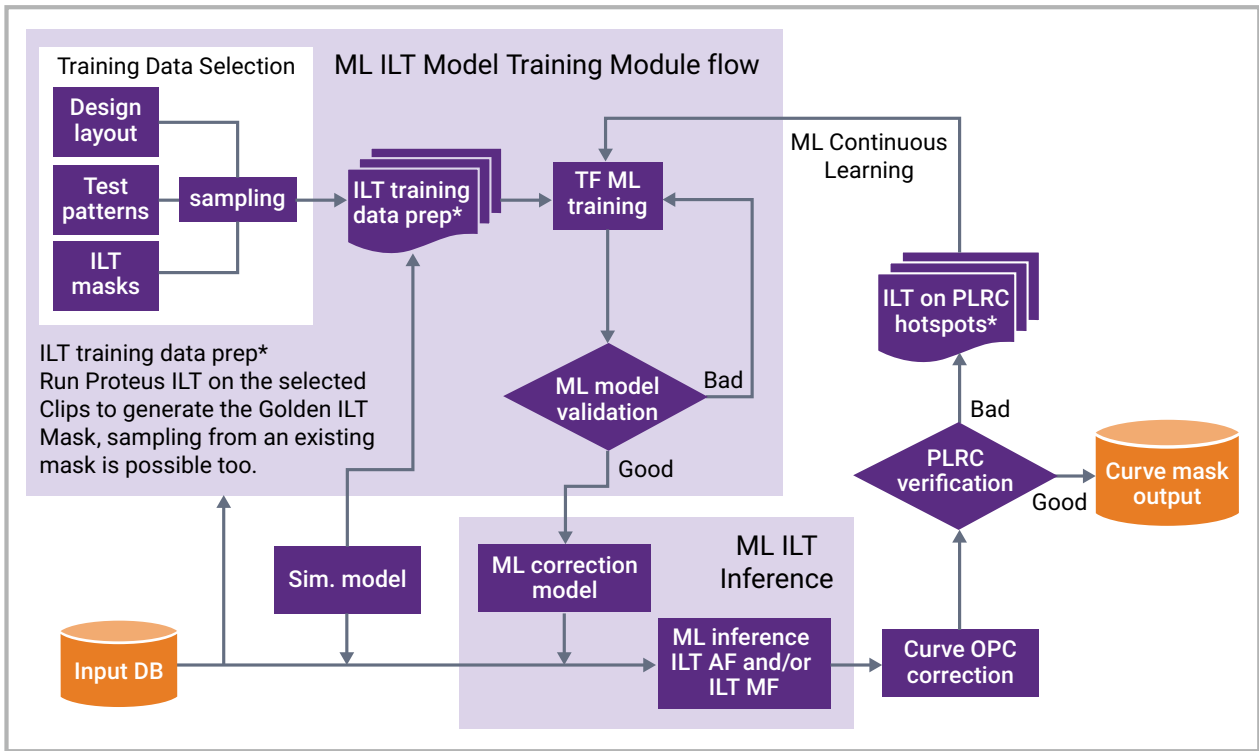


圖 1: ML-ILT和參數曲線OPC的全晶片流程

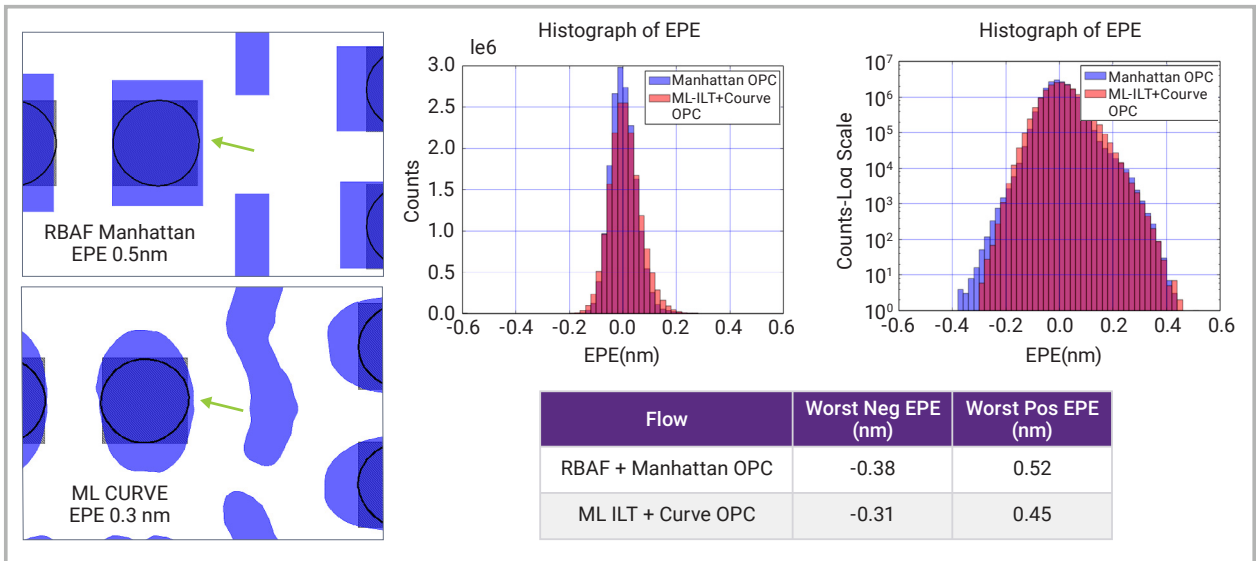


圖 2: ML-ILT + 參數曲線OPC提供更緊密的EPE分布(越低越好)

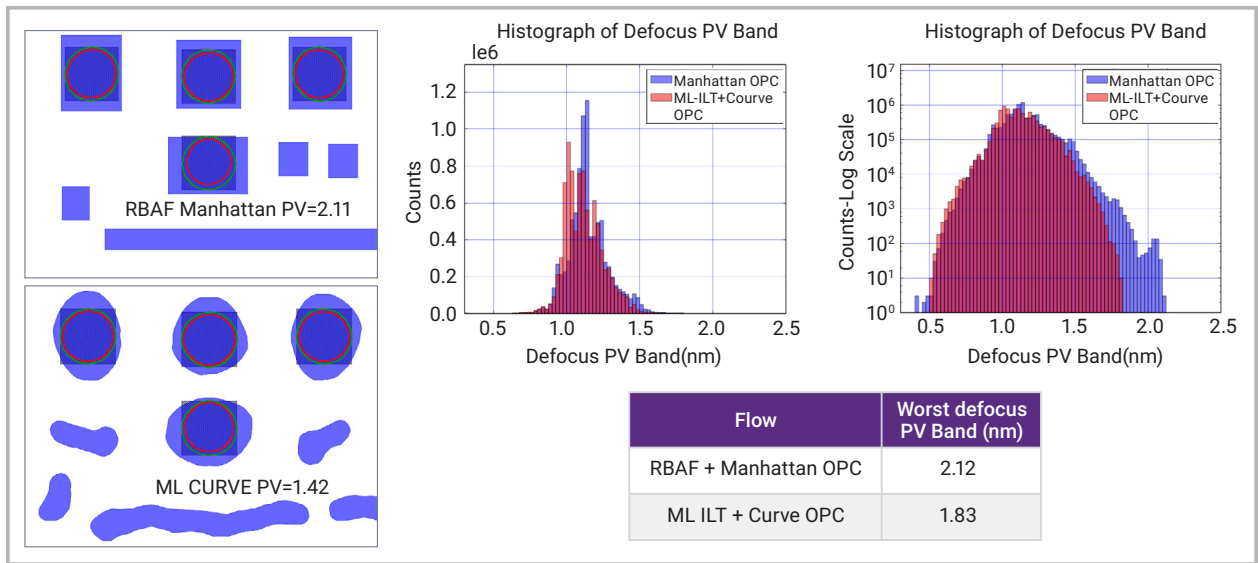


圖 3: ML ILT + 參數曲線OPC提供改善的PV頻寬(越低越好)

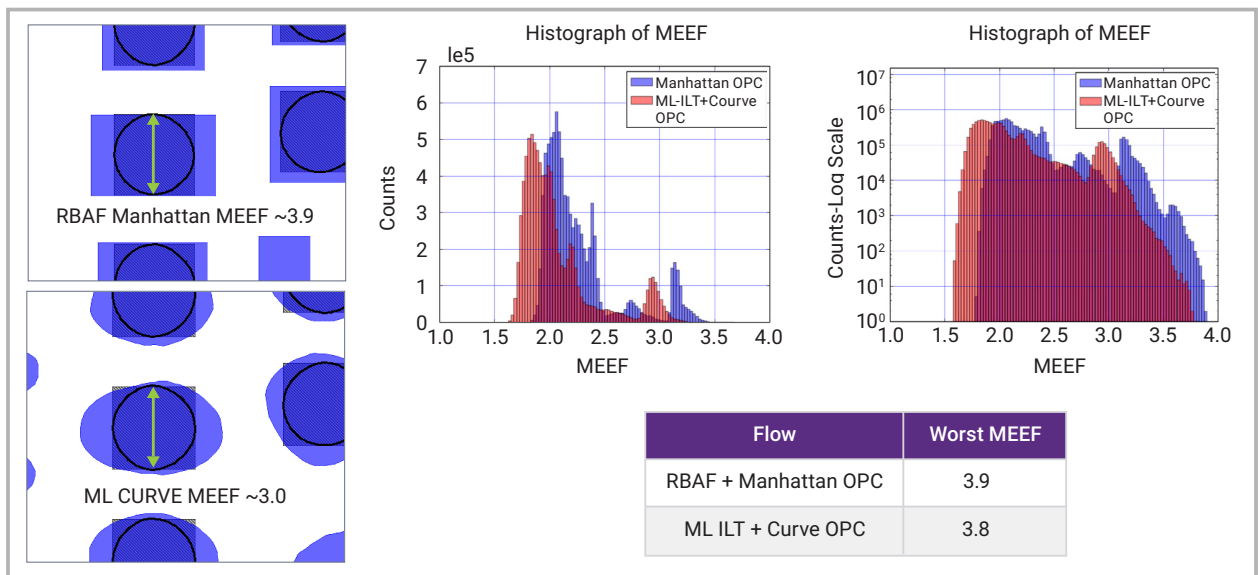


圖 4: ML ILT + 參數曲線OPC顯著改善MEEF(越低越好)

## 光罩數據資料準備

現代高效的光罩數據資料準備流程主要組成部份包括以下四個元素：光罩誤差校正(MEC)、圖形匹配、光罩規則檢查(MRC)和圖形裂解分割(fracture) (如圖5所示)。

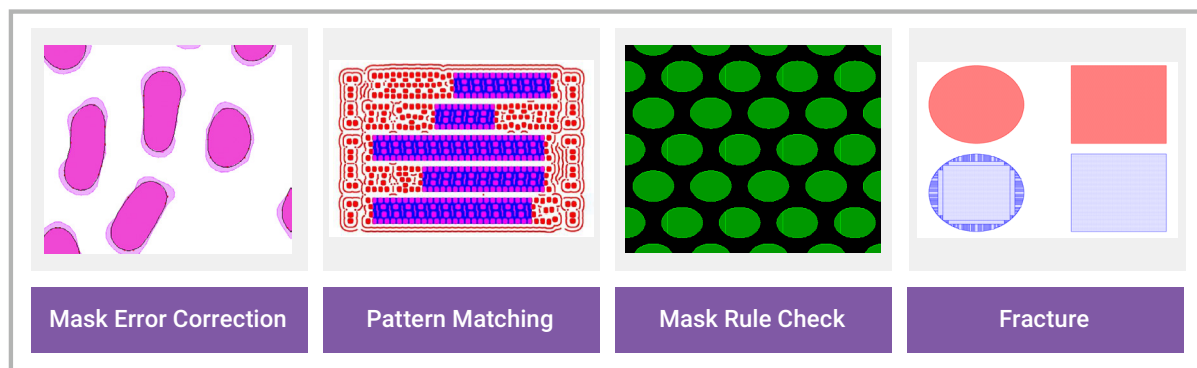


圖 5：光罩數據資料準備系統元件

### MEC

MEC對於小於32納米的技術節點來說是必要的，它可以補償各種微影和製程效應，提高CD線性度、均勻性和圖像對比。針對曲線校正，這個組件需要採用獨特的方法；由於用於定位的邊緣數量遠高於曼哈頓，解析和校正的成本可能非常高昂。此外，為了確保模擬的光罩輪廓與光罩誤差校正後的目標能高度匹配，必須在邊緣上測量EPE，並控制位置和角度。

光罩誤差校正工具使用完整校正的MEC光罩模型，提供可以滿足這些要求的必要基礎設施。如圖6所示，這個應用程序建立在Synopsys Proteus Curve OPC引擎之上，並承襲極其高效的資料庫處理能力。在反覆執行MEC校正期間，只有控制點被移動，並且用曲線裝飾器將這些控制點與參數曲線連接起來。

此外，該引擎對任何曲線裝飾器進行精細控制，讓MEC配方資料能同時處理曼哈頓和曲線結構。這意味著任何自由形式的光罩數據都能進行高精度校正。

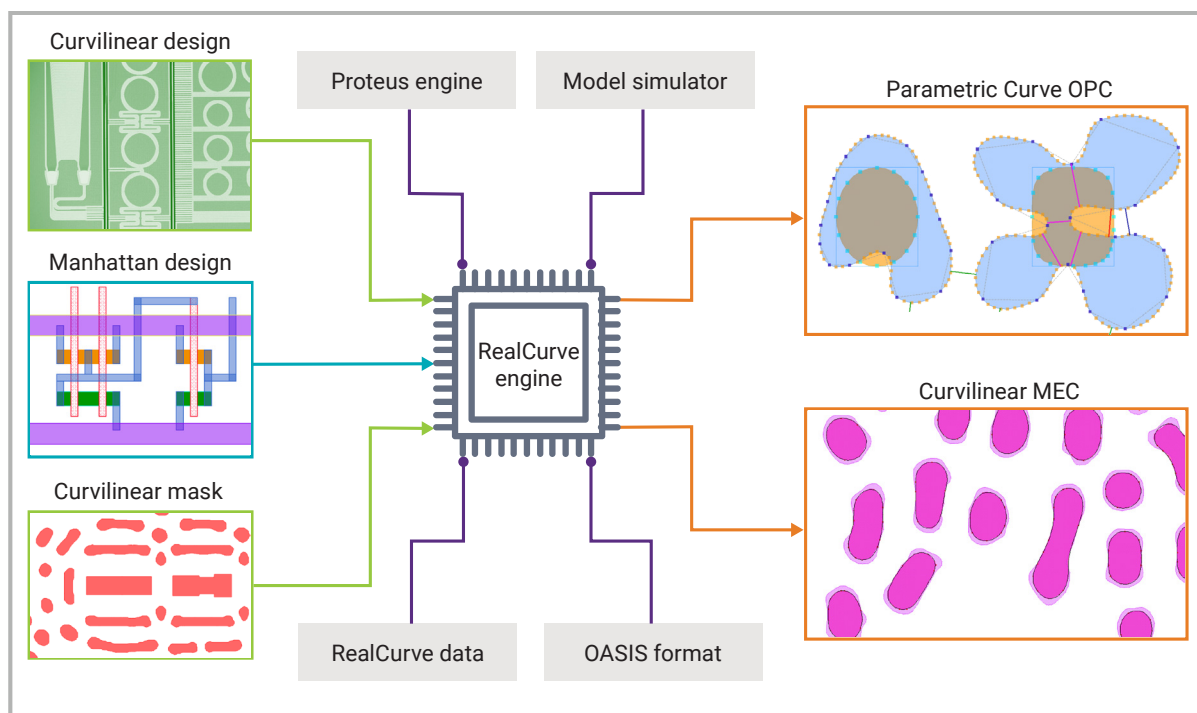


圖 6：MEC和參數曲線OPC有一樣的校正引擎和模型基礎設施

## 圖形匹配

圖形匹配是已經整合在光罩數據資料準備流程中的一種獨特工具，可用於各種特殊應用，如熱點標記、匹配和置換和以度量為基礎(metrology-based)的操作。然而，傳統圖形模板在形狀角度方面仍存在著一些限制，通常是以矩形為基礎且支援最多到45度形狀的邊緣處理。

為了解決這個限制，我們在Synopsys SmartMRC®工具中實現高效的圖形匹配功能，可以在獨立工具中進行曲線布局上的曲線形狀配對。這些功能用途廣泛，可以利用任何形狀的模板來檢測任何形狀的布局。有了這些新功能，布局重新定向(retargeting)、修復或圖形置換等應用，也可以適用在曲線形狀的應用上並確保校正的一致性，這在之前是做不到的。

## 曲線 MRC

MRC用於驗證數據資料設計和製程能力合規性，透過檢測無法解析的小尺寸圖形(non-resolving figure)和狹小間隙來防止對光罩品質的干擾。在處理曲線設計時，MRC應提供能夠區分曼哈頓和曲線形狀的1D/2D尺寸規則。

我們在Synopsys SmartMRC解決方案中設置了相關的進階檢查功能，還有特別的設計來確保進行曲線形狀驗證的準確性和驗證速度。圖7顯示Synopsys SmartMRC解決方案可以執行的一些典型檢查。

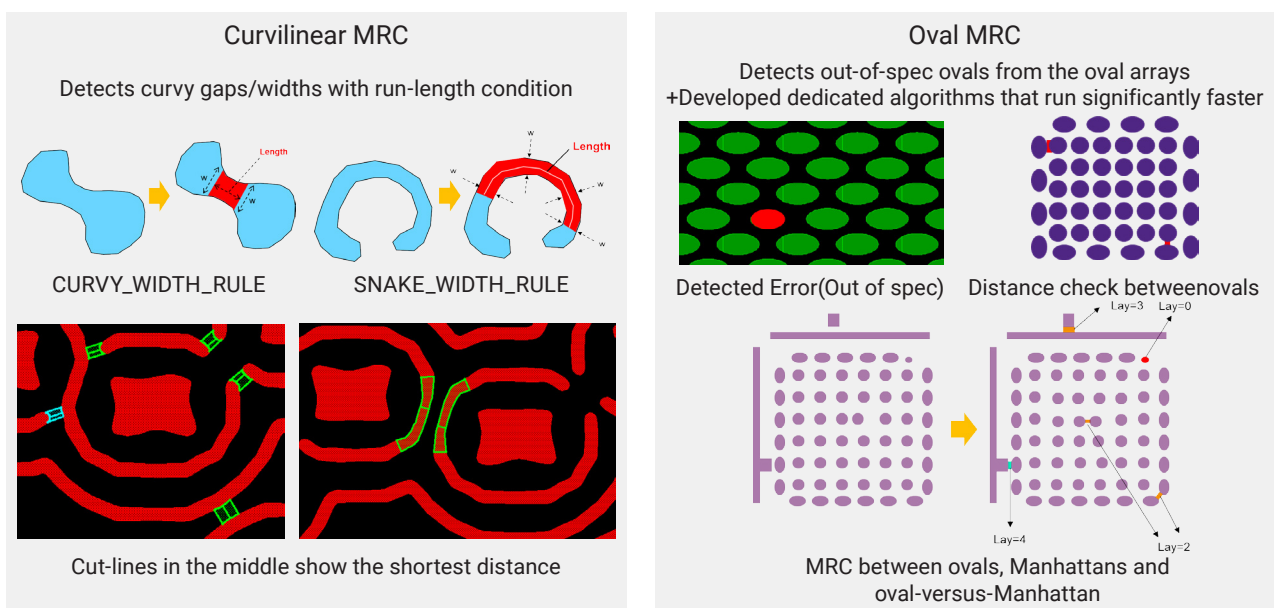


圖 7：在SmartMRC中實現實用且快速的MRC方法

這個解決方案提供的操作可以在光罩數據資料準備流程的多個點上使用。這個曲線特定的規則和命令套件可以組合或串聯以適應各種應用，藉由多個輸出檔案選項，為篩選和後續操作提供完整的穩健性。這些規則還可以客制化，以精確指定曲線形狀上的任何位置。

Synopsys SmartMRC解決方案展現卓越且領先業界的周轉時間和準確性。

## 曲線裂解分割

數據流程過程的最後一個步驟是裂解分割過程。在這個過程中，布局被轉譯為所需的微影格式，同時維持預期設計的準確呈現，無論是曼哈頓還是曲線形狀。

Synopsys CATS®光罩數據資料準備解決方案支援多光束寫入器，如IMS和NuFlare，具有可擴展的分散式處理功能。當需要進行布林(Boolean)和尺寸調整操作時，這個解決方案還會在整個過程中保留曲線邊緣。此外，還進行了重大改善以提高與高密度曲線布局的裂解分割過程相關的周轉時間、產能和可擴展性。

作為一個選配功能，MEC可直接寫入機器資料庫，或者被串聯到Synopsys CATS或Synopsys SmartMRC進行裂解分割或驗證。

MEC、Synopsys SmartMRC和Synopsys CATS的實作對於確保有效的曲線整合至關重要。藉由使用這些組件，現今光罩製造商的曲線設計可以實現最佳化的端對端解決流程。

## 總結

隨著MBMW工具的引入，半導體圖形化產業有一個很好的新機會，可以在全晶片設計上準確高效地創建曲線光罩，進而改善EUV和其他先進的圖形技術的微影圖形。儘管ILT曾是一個具有前景的解決方案，但其運算執行時間使得它直到現在都不適用於全晶片邏輯。將機器學習整合到ILT中有助於解決執行時間的問題。此外，參數曲線OPC解決方案可以優化較不關鍵的佈局區域的光罩圖形，為曲線ILT提供了一個有價值的互補選項。透過將ML ILT與參數曲線OPC結合，可以在高容量製程中部署全晶片ILT，無需承擔相應的運算損失。

除了上述的光罩合成技術之外，還需要一個實用且有效的光罩數據資料準備流程來落實ILT合成生成的這些曲線光罩。這個流程必須在易用性、數據複雜度之間取得平衡，並且足夠強健以滿足嚴格的耐受性和EPE規格。因此，一個完整的流程已然成形，其中每個組件都在數據資料路徑中提供獨特的覆蓋範圍，以確保光罩下線所需的品質和產能。