

論文の内容の要旨

論文題目 EUVリソグラフィ用マスクの構造最適化に関する研究

氏 名 加茂 隆

現在の大規模半導体集積回路 (ULSI) の高集積・高精度化には半導体素子の微細化が大きく貢献しており、この微細化は光リソグラフィ技術の進展によるところが大きい。リソグラフィによる微細パターン形成は、回路を形成したい薄膜上にレジストを塗布し、マスクと呼ばれる回路原版のパターンをレジストに露光、現像しレジストパターンを形成する。このパターンをマスクとしてエッチング加工、さらにレジスト除去することにより所望の薄膜材料の回路パターンを形成するものである。現在は ArF 波長 (193nm) の液浸露光というウエハと露光装置レンズ間を純水で満たすことで高解像を達成しているが、マスクパターンをウエハ上に忠実に転写できなくなる光近接効果と呼ばれる現象が顕在化し、この光近接効果を事前に予測、マスクパターンを補正することで設計に忠実な転写パターンを得る光近接効果補正 (Optical Proximity Correction : OPC) の負荷が大きくなっている。最小線幅を回路配線パターンの最小ピッチの半分 (half pitch: hp) の寸法で定義すると、hp32nm の世代においては、さらにダブルパターンニングと呼ばれる多重露光手法により加速する微細化要求に応えている。hp22nm 以下の世代においては、従来の光リソグラフィで使用されている露光波長よりも 1 桁以上小さい 13.5nm 付近の極端紫外線 (Extreme Ultraviolet : EUV) を使用すると解像度を飛躍的に小さくすることができ、次世代のパターンニング技術として拡張性に優れた最も有望な技術とされている。EUV 露光装置では屈折光学系が使用できず多層膜が形成された反射ミラー光学系を使用する。マスクについても従来の光リソグラフィ技術で使用された透過型マスクではなく、多層膜が基板表面に形成された反射型マスクを使用する。EUV リソグラフィ固有でマスクへの斜入射の反射に起因する現象として、マスクに投影された EUV 光の方向に対して平行方向と垂直方向のマスクパターン間で転写寸法が異なるシャドウイング効果がある。また反射型

マスクの最大の課題は多層膜基板の欠陥低減であり、位相欠陥と呼ばれる多層膜の周期を乱す欠陥が EUV マスク固有の欠陥である。

上述の通り EUV リソグラフィの高解像性により、EUV マスクでは従来のフォトマスクに比べて OPC の負荷が軽減される反面、新たにシャドウイング効果に起因するマスクパターン補正が必要とされている。ウエハ転写像で高コントラストを得つつもシャドウイング効果の補正負荷を軽減することを目標に、マスク構造の最適化を行った。

本論文は 5 章より構成され、以下に各章の概要を述べる

第 1 章では、半導体集積回路の高集積化とリソグラフィ技術の進展、EUV リソグラフィの位置付けと技術課題、さらに EUV マスクに対する要求特性について述べ、本研究の目的と解決すべき課題を示した。

第 2 章では最適マスク吸収体構造とその転写特性について述べた。ハーフトーン型位相シフトマスクの適用により従来のバイナリマスクよりも吸収体膜厚を低減させることができる光学定数の範囲を示し、Ta 系吸収体薄膜化によるハーフトーン型位相シフト効果を予想した。さらに小領域露光装置による露光実験を行い、シャドウイング効果を抑制し転写性能を劣化させることのない吸収体の最適膜厚の範囲を示した。EUV マスクブランクとして、Si キャップ多層膜、CrN (10nm 膜厚) バッファー、LR-TaBN 吸収体構造を適用した場合には、ハーフトーン型位相シフト条件を満たす 51nm の吸収体膜厚が最も効果的であることを実証した。また複数ショット露光による寸法平均化手法を用いることにより、最適吸収体膜厚におけるパターン欠陥転写性を評価しバイナリマスクとの転写特性の違いを示した。

第 3 章ではハーフトーン型位相シフトマスクへの遮光帯導入について述べた。ULSI チップ製造でウエハ全面にハーフトーン型位相シフトマスクでの露光を行う場合は、各転写ショット間の境界部分に多重露光が生じ、転写寸法変化が生じる。隣接ショットからの漏れ光を防止するためにハーフトーン型位相シフトマスクのメインパターンの外周領域に設ける遮光帯の構造として、積層吸収体と多層膜加工の 2 つの構造を提案、マスク作製を行った。さらに小領域露光装置での転写実験により、両方式の遮光帯部の EUV 光に対する遮光能力は厚膜吸収体マスクと同等以上であることを実証した。一般に EUV 光源から発せられる光は EUV 波長領域の光の他に遠紫外線を主とした Out of Band (OoB) 光とよばれる波長成分を含むが、多層膜加工方式により作製した遮光帯領域は OoB 光に対しても最も遮光能力が高いことを明らかにした。また、多層膜加工方式の遮光帯で懸念される多層膜加工領域と吸収体領域の境界での漏れ光は観測されず、マスク寸法の高精度化のためのプロセス柔軟性の観点からも多層膜加工方式の遮光帯形成は有望であることを示した。

第 4 章ではフルフィールド露光装置用マスクのインテグレーションと転写特性について述べた。多層膜加工型遮光帯のマスク製造工程において、高い圧縮応力を有する多層膜をマスク遮光帯領域から除去し遮光帯を形成することで生じるマスク位置精度変化は無視できる量であることを確認した。次に、フルフィールド露光用マスクを作製、ULSI チップ量産時の露光ショットマップを想定した露光において、薄膜吸収体マスクにおける多層膜加工遮光帯の効果を実証し、実デバイス作製に対し最適なマスク構造であることを示した。最後に低欠陥 EUVL マスクの達成は EUVL の量産適用に向けた最大のハードルとして位置付けられていることから、ブランク・マスク欠陥の検査と転写評価を行い、ハーフトーン型位

相シフトマスクにおいても、EUV マスク固有の位相欠陥が吸収体パターン下に隠れる領域が大きいと、欠陥転写インパクトが小さくなることを確認した。また、隣接ショットパターンに対して影響を及ぼす遮光帯領域の欠陥をパターン検査装置で検出した例を示し、この欠陥が多層膜孤立残りであることを特定した。

第 5 章では本論文全体の成果を総括した。EUV リソグラフィ用に、ハーフトーン型位相シフトマスクを導入することにより、ウエハ転写像で高コントラストを得つつもシャドウイング効果を軽減できること、またハーフトーン型位相シフトマスクで実デバイスを露光する上で必須な遮光帯として、多層膜加工構造が最適であることを結論づけた。さらに多層膜加工遮光帯付きのハーフトーン型位相シフトマスクに残された課題を示し、今後の EUV リソグラフィ用マスクの展望について述べた。