

## 審査の結果の要旨

氏名 加茂 隆

半導体LSIは依然としてムーアの法則に従った微細化を続け、今や最少線幅45nmから32nm, さらにその先の22nmの時代に向けて微細化が進展している。この微細化を支えるパターン形成基盤技術であるリソグラフィ技術については、ArF液浸露光を用いたオプティカルリソグラフィの限界が懸念される中、EUV光(極端紫外光)を用いたリソグラフィ技術への期待が高まり、日米欧を中心に活発な技術開発が展開されている。このような情勢の下、本論文は、「EUVリソグラフィ用マスクの構造最適化に関する研究」と題して、EUV用マスク構造の最適化によるパターン転写の高性能化手法を提案し、実際の露光実験でその有効性を検証することによりEUVリソグラフィの極めて優れた解像性を実証したものである。

第1章では、EUV転写パターンの像質に対するマスクの寄与について検討している。EUVリソグラフィでは13.5nmという極めて短い波長の光を使うことから、多層膜が成膜された基板上に吸収体パターンを形成した反射型マスクが用いられる。申請者はこの特異なマスク構造に起因するパターン転写性能への影響因子として、吸収体構造・吸収体材料によるコントラスト確保とシャドウイング効果に起因する漏れ光の遮光を、転写性能を支配する影響因子として抽出した。

第2章では、最適なマスク吸収体構造とその転写特性について述べている。まず、吸収体材料とその構造(材料構成と膜厚)について、EUV光反射率をパラメータにシミュレーションと詳細な露光実験により最適な材料と膜厚を導出し、EUV領域におけるハーフトーン型位相シフトマスクの構造を提案している。まず、提案するマスク構造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推定している。次に、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ている。これらの検討結果に基づいて、EUVマスクブランクとして、Siキャップ多層膜、CrN(10nm膜厚)バッファ層、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提案している。

第3章では、ハーフトーン型位相シフトマスクへの新考案の遮光帯導入について述べている。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、積層吸収体方式と多層膜加工方式の2種類の方法について検討している。まず、提案方式のマスクの作製と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確認した。次に、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アウトオブバンド(OoB: Out of Band)光とよばれる波長成分を含むが、多層膜加工方式による遮光帯領域はOoB光に対しても遮光能力が極めて高いことを明らかにした。また、遮光性能として多層膜加工領域と吸収体領域の境界での漏れ光は問題ないこと、マスク寸法の高精度化に適したプロセス柔軟性にも優れることなどの観点も加味して、多層膜加工による遮光帯形成が最も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作製、および転写実験による提案手法の有効性について述べている。まず、作製したフルフィールド露光用マスクによるLSIチップ量産時の露光ショットマップを想定した露光実験によって、薄膜吸収体を用いるハーフトーン型位相シフトマスクが解像力確保上有効であること、および、このような薄膜吸収体マスクにおいても多層膜加工遮光帯が効果的であることを検証し、提案のマスク構造が実デバイス露光に適用可能であることを実証している。なお、転写性能確保に関連する問題として、多層膜加工型遮光帯の製造工程において懸念される多層膜除去加工時のマスクパターン位置精度確保についても、EUV用マスク固有の位相欠陥の転写懸念についても、露光実験により問題ないことを確認している。

第5章では、本論文全体の成果を総括している。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シャドウイング効果を軽減できること、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付けている。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ている。

以上のとおり本論文は、次世代半導体用極微細パターン形成技術であるEUVリソグラフィにおいて、多層膜EUVマスク構造、および遮光帯の最適化を行い、転写パターン品質の確保を実証した独創性ある研究であり、超微細半導体パターン形成に有効な超高解像パターン転写技術として、今後の半導体製造用の分野に大きな貢献があると考えられる。

よって本論文は、博士(工学)の学位請求論文として合格と認められる。