

審査の結果の要旨

氏名 菊池 幸子

半導体産業は、回路パターンの微細化により、自らの著しい発展と同時に社会の変革をもたらしている。しかし、これまで微細化を牽引して来た紫外線による縮小投影露光技術である光リソグラフィは、短波長化の限界に突き当たりつつあり、それに伴ってリソグラフィコストも急激に上昇している。等倍 X 線リソグラフィ技術は、光リソグラフィを引き継ぐ量産用リソグラフィ技術として開発されてきた。本論文は、等倍 X 線リソグラフィの解像性および転写精度を材料の物理的特性や形状との関係において定量的に論じ、次世代リソグラフィとして必要な性能を有するかどうかを検証したものである。本論文は 6 章からなる。

第 1 章は緒言であり、ロードマップにおけるリソグラフィの位置付けを示し、等倍 X 線リソグラフィ開発の歴史と原理を概説している。その中で、SOR(シンクロトロン放射)光源が登場したことの重要性と、解像性における中心課題がフレネル回折と二次電子散乱であることを記述し、本研究の目的について述べている。

第 2 章では、X 線リソグラフィにおける最も重要な構成要素であるメンブレンマスクの作成方法を、窒化シリコン製メンブレンと W 吸収体の場合に関して記述している。即ち、窒化シリコン膜は化学的気相成長法(CVD)において原料ガスの流量比 ($\text{SiH}_2\text{Cl}_2/\text{NH}_3$) および成膜温度を選ぶことによって、膜の屈折率が応力の良好な指標となることと、 10^9 dyn/cm^2 台前半の応力を持つ窒化シリコン膜により X 線マスクとして好ましい諸特性を有するメンブレンが得られることを述べている。化学増幅型レジストによる W 吸収体のパターン形成では、電子ビーム描画条件に着目し、後方散乱の影響だけでなく、前方散乱の影響に関してもモンテカルロ計算を基に定量的に評価した結果、 $0.2 \mu\text{m}$ 以下のライン/スペースパターンの解像性においては、後方散乱よりも前方散乱の役割の方が重要で、特にレジストの膜厚方向でのコントラスト変化が解像性を著しく左右することを明らかにし、高解像性を得るためのレジスト薄膜化の定量的議論と実証を行っている。

第 3 章では、実験的に得られた解像性に関して、露光ギャップ、マスク形状、マスクコントラスト、マスク duty などの影響を、フレネル回折と二次電子散乱の観点から解析している。X 線マスクパターンを化学増幅型ネガレジストに転写して得たパターンの寸法がフレネル回折強度から得られるパターンの寸法に比べて大きいという結果に対して、レジスト中の二次電子散乱はモンテカルロ計算の結果では 10 nm 程度であって、この大きな寸法差を説明できるものではなく、レジスト中の酸の拡散等によるぼけを考えるべきであることを明らかにしている。一方、W 基板上で転写した場合のパターン形状について、レジ

スト/W 基板界面近傍での寸法変化を、W 基板からの二次電子の後方散乱が原因であるとした計算によって定量的に説明することが出来たことから、レジスト中の二次電子散乱距離が 10 nm であることは十分信頼できる結果であり、X 線リソグラフィの解像限界に関する評価を上方修正すべきことを示している。また、低コントラストマスクの効果露光量マージン、解像性、マスク duty に対する転写の忠実性に関して研究し、本効果を他研究に先んじて実証している。

第4章はX線リソグラフィの性能を実証するために2種のデバイス試作を行った結果を示したもので、コンタクトチェーン試作では光リソグラフィでは不可能な直径 85 nm 径の 950 個のコンタクトホールアレイを形成し、50%のイーールドで電氣的接続を確認したことによって、コンタクトホール形成能力の高さを実証している。さらに DRAM セルトランジスタ試作では、デザインルールが 120 nm の実デバイス設計・実プロセスへの適用を行い、100 nm までの適用可能性を確信できる結果を他に先駆けて示している。

第5章ではX線リソグラフィの70 nm 世代での解像性をF₂リソグラフィの計算上の解像性との比較において示した。X線リソグラフィは、ライン、コンタクトホール、セルアレイなど、デバイスで使用される各種の基本パターンを、孤立・密集の区別なく、マスクに忠実に同一露光条件で形成する能力を有しているのに対し、F₂リソグラフィではマスクに光学近接補正(OPC)用の補助パターンを必要とする上に焦点深度が極めて小さいという結果から、X線リソグラフィが明らかに優位であることを示した。

第6章は総括である。

以上要するに、本論文は、X線リソグラフィは光リソグラフィが直面している 100 nm 以下のパターン寸法における解像限界および深刻なマージン不足を解消できる技術であり、マスクを始めとする露光システムは複数世代での使用に耐える性能を持ち、解像特性は位相シフト成分を考慮したフレネル回折で基本的に理解できること、二次電子の影響も計算による予測可能なものであることなど、X線リソグラフィの解像性を決定する要因と結果の関係を明確に示し、少なくとも 70 nm の世代までは現在の技術の延長で実現可能であることを実証し、マテリアル工学の発展への貢献が大きい。

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。