

論文の内容の要旨

論文題目 X線リソグラフィにおける高解像度パターン形成法の研究

氏名 菊池幸子

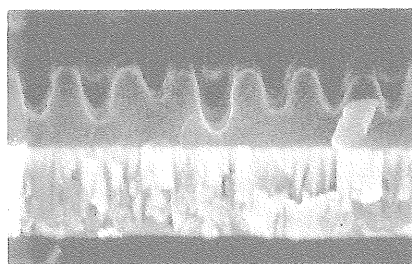
半導体集積回路は3年ごとにチップサイズを1/2に縮小する発展を維持している。そのための要となる技術はパターンをウェハ上に焼き付けるリソグラフィ技術である。本論文ではX線を用いた半導体リソグラフィの解像性について報告する。

X線リソグラフィは1 nm前後の波長をシンクロトロン放射光から取り出して光源とし、マスクと、レジストを塗布したウェハを微小ギャップで対向させて、マスク上のパターンをレジストに転写する、等倍転写技術である。

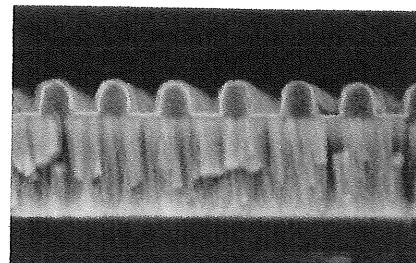
X線リソグラフィに用いるマスクは、X線を透過および吸収させるために、メンブレン基板に重金属パターンを乗せた構造を用いるが、この構造のマスクを作製するためには、非常に多くの開発課題がある。本論文では、そのなかで、SiNをX線マスク用のメンブレン基板とするために、LP-CVDでの成膜法を最適化して低応力化に成功した方法を述べた。X線マスクメンブレンとしてのSiN応力の最適値は2～ $3 \times 10^9 \text{ dyne/cm}^2$ であり、応力と屈折率のあいだに密接な関係があることも見いだした。最適応力を有するSiNの屈折率は2.3であった。Si基板上に成膜したSiNから

X線マスク用のメンブレン領域を得るために、Si基板中央部分の30 mm角の領域を高濃度(30wt%)・高温度(100°C)のKOHでバックエッチし、メンブレンとすることができた。このメンブレンの可視光透過率は70%以上あり、H含有率が1%以下の良質なアモルファスSiNであることが分かった。

重金属の吸収体パターンを形成するためには、重金属膜上での電子ビーム描画を行うが、電子ビームが重金属に入射すると、Si中に比べて多くの後方散乱二次電子が発生しする。そのため一般的にSi上での電子ビーム描画に比べると解像性が低下する。本論文では、重金属上でも高解像度のパターンを得る方法を検討し、得られた結果を適用して、実際に高解像度のX線マスクパターンを形成した。レジスト中での二次電子による吸収エネルギー分布を計算するために、モンテカルロシミュレーションプログラムを開発し、EDF (Energy Distribution Function)を決定した。そのEDFをもとに、0.1~0.2 μmのLine-and-Space(L/S)パターンを描画した場合のレジスト中での吸収エネルギー分布を調べた結果、レジスト内の深さ方向で、大きな差があり、これは前方散乱が深さ方向に対して大きくなるためであることが判明した。後方散乱によるエネルギー分布は、レジスト内で一様な値を持つので、深さ方向でのパターン解像性の変化に対しての寄与はほとんどないことも分かった。従って、重金属上の描画で高解像度を得るためには、電子の加速電圧を大きくすることと、レジスト膜厚を薄くすることによって、前方散乱を低減することが効果的である。実験では、40keVの電子ビーム描画装置での描画と、膜厚0.25 μm



レジスト膜厚 0.5 μm



レジスト膜厚 0.25 μm

図1 W基板上に0.15-μm-L/Sを電子ビーム描画した結果

のネガレジスト (SAL601) を用いて、W基板上で 0.15- μm -L/S パターンを描画することに成功した。図 1 は、描画したパターンの断面 SEM 写真である。左は、レジスト膜厚 0.5 μm の場合で、0.15- μm -L/S パターンが分離解像できていないが、レジスト膜厚を 0.25 μm とした右側では良好な解像パターンが得られていることが分かる。

X線リソグラフィにおける解像の原理はフレネル回折に基づくが、X線のエネルギーが高いために、レジストやウェハで発生する二次電子の散乱も解像性に大きな影響を及ぼす。従って、X線リソグラフィの解像性の議論では、フレネル回折の特性による部分と二次電子散乱の特性による部分の要因分析が重要である。本論文では、その要因解析を重点的に行った。従来、フレネル回折に基づく解像性 w は、 $w = k (\text{gap} \cdot \lambda)^{1/2}$ 、 k は 1 前後とされていたが、この場合、 $\lambda = 1 \text{ nm}$ 、 $\text{gap} = 10 \mu\text{m}$ とした場合の解像度は 100 nm 止まりである。しかし、X線はマスクの吸収体部分も比較的良く (通常 10% 以上) 透過するので、X線マスクは位相シフト型のハーフトーンマスクとなっている。これを含めてフレネル回折を計算すると、ギャップが大きい場合のパターンのコントラストが、完全に光を吸収する場合に比べて向上することが分かった。高コントラストと低コントラストのマスクによる転写結果 (レジスト : SAL601) では、0.15- μm -L/S パターンのギャップ 30 μm における露光量マージンは、低コントラスト (4.5) のほうが高コントラスト (8.4) に対して 5 倍以上の向上を示し、L/S パターンのマスク duty (Line 対 Space 比) を忠実に転写する能力も、低コントラストマスクの方が高いことが明らかになった。一方、フレネル回折強度でもとめられるパターンの寸法より、実験で得られたパターンの寸法はかなり太く、位相シフトを考慮したフレネル回折の計算だけでは、パターン寸法を適切に表現できないことが分かった。そのため、二次電子のレジスト内での散乱によるぼけの程度を考察する必要があり、モンテカルロシミュレーションを行った。その結果、レジストに吸収されるエネルギー分布で評価した二次電子によるぼけは、 σ が 10 nm 程度であり、主としてオージェ電子によるものであることが分かった。この程度の二次電子のぼけをフレネル回折に加えても、実験によるパターンの寸法との相違を説明することはできず、相違の原因は、化学増幅レジスト

における酸の拡散や、現像特性など、レジスト自身の性質に由来すると考える必要があることが分かった。それを裏付ける別の実験結果として、L/SパターンおよびC/Hパターンのマスクリニアリティを調べた結果、同じマスクを用いてもレジストによって差が現れるが、これは、フレネル回折に σ 値として 20～40 nm のぼけを与えて計算すると、レジストによるマスクリニアリティの差が、ぼけの差として比較的良く説明できることが分かった。

X線リソグラフィの有効性を確認するため、コンタクトチェーンと4Gbit-DRAMセルの試作を行った。コンタクトチェーンでは、0.085 μm のC/H 950個による電気抵抗を評価することが出来、X線リソグラフィが微細なC/Hの形成において高い能力を持つことを実証した。4Gbit-DRAMセルの試作では、コントラスト3.8のX線マスクを露光ギャップ 20 μm で用いて、100 および120 nm のデザインルールによる、素子分離、ゲート、Plugの3層のパターンを良好に形成することができた。ただし、図2に示すような、デザインルール 100 nm の素子分離パターンでは、ラインエンドショートニングが検出され、ギャップ 20 μm では、パターンの長さがマスクの長さより 51 nm (8.5%) , ギャップ 10 μm では 36 nm (6%) 短くなることが分かった。これに対してはマスクリサイズが有効であった。

70 nm ノードのパターンが基本的にすべて解像可能であることを実験で確認した。図3のように、L/Sから孤立ラインが一本引き出されるような、フォトリソグラフィが不得意とするパターンも良好に解像でき、シミュレーションで行ったF2リソグラフィとの解像性比較において、マスクに対する忠実性、露光マージンともに優れていることを明らかにした。

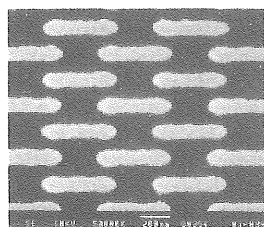


図2 デザインルール100 nm の素子分離パターン (露光ギャップ 20 μm)

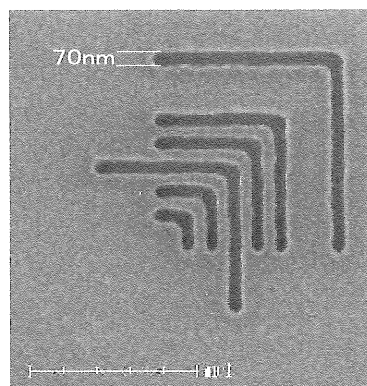


図3 線幅70 nm のエルボパターン (露光ギャップ 10 μm)