

称号及び氏名	博士（工学）	三坂	章夫
学位授与の日付	令和2年9月25日		
論文名	「高精度微細パターン設計技術の研究」		
論文審査委員	主査	平井	義彦
	副査	岡本	晃一
	副査	竹井	邦晴
	副査	笹子	勝

## 論文要旨

LSI(Large-scale Integrated Circuit)と称される半導体集積デバイスは、現在の情報化社会の基盤である。その進化は、一般の人々の生活にも大きな恩恵をもたらした。半導体集積デバイスの発展に大きく貢献してきた技術が、マスクパターンを用いてマイクロデバイスの大量生産を可能にしたリソグラフィやエッチングなどの微細加工技術である。従来、微細加工においては、装置性能の向上により微細化を実現し、マスクパターン（設計パターン）通りにパターン形成を行えることが最も重要な性能の一つとして考えられていた。しかしながら、微細化が進むにつれ、その加工精度に問題が生じるようになった。リソグラフィにおいては、近接効果と呼ばれる現象により、パターン形状やパターン密度に依存して、加工形状に歪みが生じる。エッチングで発生する同様の現象は、マイクロローディング効果と呼ばれるものである。原因のメカニズムはそれぞれに異なるが、これらの現象のために、設計通りの加工を行うことが困難となり、先端デバイスの実用的な微細化限界の大きな原因となるようになった。

上記の課題に対して、設計パターン通りの加工を実現できるマスクパターンを、要因となる現象の物理モデルに基づいたシミュレーション技術を利用して設計し、解決する新しい研究が始まった。このような研究は、最初に電子線リソグラフィで行われ、後に先端LSI製造の主要技術となった光リソグラフィにも拡大された。当初の目的は、加工パターンの形状歪みを解決するための補正であったが、さらに微細化を進展させるために、製造安定性の向上を目的として、プロセスウィンドウ（プロセスの余裕度）の広いパターンを設計することもその目的に加わった。この技術は、一般的に光近接効果補正(OPC: Optical Proximity Correction)と呼ばれるが、近接効果の補正に限定されず、シミュレーション技術を駆使して OPC や露光条件等の全てのプロセス条件を、同時に最適化して微細化を達成しようとする技術である。本論文の主題である「高精度微細パターン設計技術の研究」は、微細化を実現するためのマスクパターン設計手法を、シミュレーション技術を駆使して実現するものである。この内容に対する研究成果を以下の7つの章にまとめた。

第1章では、本研究の背景、目的及び内容についての概略を示し、本論文の構成について述べる。

第2章では、電子線リソグラフィにおける近接効果を、マスクパターンデータの補正によって解決するための研究について論じる。ここでの課題は、膨大で複雑なパターンで構成されたLSIに対して、実用的な時間内で高精度に近接効果補正を実現できる手法の創出である。本研究では、次の3つの実験的および計算的手法の創出を行った。1番目は、露光パターンを高速計算するためのシミュレーションモデルのパラメーターを、高精度かつ効率的に抽出する実験手法である。ここでは、短時間の光学顕微鏡測定によって、ナノメートル精度でパラメーター抽出を実現できる手法を創出した。2番目は、多様で複雑なパターン形状に対しても、設計通りの加工パターンを実現できるマスクパターンデータを自動生成する手法である。ここでは、設計パターンを細分化し、各パターン上に設定したシミュレーションポイントでの計算結果を利用した反復修正法により、最適なマスクパターンデータを生成するアルゴリズムを創出した。3番目は、膨大な数のパターンに対する計算時間を短縮する手法である。ここでは、LSIパターンの階層構造を利用して、同じ形状のパターンに対する重複計算を除去できる階層ゾーニングという手法を創出した。これにより、計算時間を1/10~1/100に短縮でき、世界で初めてシミュレーションをベースとした近接効果補正を実際の先端LSIに適用し、その効果を実証した。

第3章では、ドライエッチングにおけるマイクロローディング効果に対応できる形状シミュレーターの研究について論じる。従来の典型的なシミュレーターでは、基板に到達した粒子の量で、形状変化を単純に定義していた。そのため、実際のエッチング反応との差異が大きく、実際に発生しているマイクロローディング効果を再現することが困難であった。本研究では、より実際のエッチングに近いモデリングを実現するために、表面吸着層のモデリングを創出し、表面吸着層を介して形状変化が発生する形状シミュレーションを実現した。これにより、エッチングとデポジションの競合反応から発生する形状変化を正確に表現できるようになった。さらに、エッチングで形成される微細構造内部における粒子の輸送に対しても、基板表面状態の影響を正確に反映できるようになった。本研究で構築した形状シミュレーターにより、ホール径に依存して、エッチング深さやエッチング形状が変化するマイクロローディング効果の再現に成功した。

第4章では、光リソグラフィにおける加工パターン寸法(CD:Critical Dimension)のばらつき観点から、位相シフトマスク(PSM:Phase Shifting Mask)や変形照明を含む解像度強調技術とOPCの効果について論じる。ここでは、光リソグラフィに対する応答曲面関数を新たに導入し、CDばらつきを評価するための手法を創出した。本来、光リソグラフィによって安定した製造を実現するための実用解像度は、CDばらつきによって決定される。本研究により、解像度強調技術とOPCをそれぞれ単独で用いた場合には、大きな効果が得られないことが判明した。一方、これらの技術を同時に導入し、露光条件(開口数、照明等)までの一連の最適化を行うことで、大きな相乗効果が得られることを示した。その効果は、パターン寸法が露光波長に対して縮小される程大きくなり、システムLSIの1世代分(70%のCD縮小)の解像度改善効果が得られることを検証した。

第5章では、マスクエンハンサーと名付けた光リソグラフィにおける新規解像度強調技術の創出について論じる。この技術は、通常マスクパターンに位相シフターパターン(180度の位相反転パターン)を付加することで構成するものである。これは、それらパターンのサイズを調整することにより、干渉効果を利用して露光像のコントラストを最大化する発想に基づくものである。これにより、寸法補正だけでなくプロセスウィンドウの拡大も同時に可能とした。マスクエンハンサーは、微細なライン(線)パターンを形成する上で、従来技術において最も解像度強調効果が強いと言われる相補型位相シフトマスク(Alternative PSM)を上回る解像度強調効果を達成した。また、微細なホール(穴)パターンにおいても、焦点深度、露光マージン、MEEF(Mask Error Enhancement Factor)の全てのプロセスウィンドウを、従来技術に対して30%以上拡大することを実証した。新規に創出したマスクエンハンサーにより、多重露光を用いることなく、既存技術に対してシステムLSIの1世代分以上の微細化を実現し、世界初の45nmシステムLSIの

製造に寄与した。

第6章では、レンズ機能をパターン設計技術によって実現する BILM (Built-in Lens Mask) 技術の提唱と、その基本原理の実証及び応用について論じる。ここでは、マスクとレンズで形成される光の波面と同じ波面をマスクパターンの変調によって形成することにより、レンズ機能をパターン設計技術によって実現できることを光学理論より創出した。BILM を用いて、近接露光方式のようなレンズを利用しない低コストリソグラフィのさらなる微細化が可能になることを実証した。すなわち、露光装置の進展によって実現されてきた微細化機能を、マスクパターン設計技術によって実現できることを示した。

さらに、BILM 技術を応用して、3次元露光像の形成を可能とするパターン設計手法も創出した。これを実現するために、仮想露光システムと呼ぶコンセプトを新規に導入した。これは、1組のマスクとレンズで構成された露光システムを複数考え、それらを合成することで作製される露光システムである。これは物理的に実際の装置として作製不可能なシステムであるが、光学理論に基づいて数学的には定義可能であり、3次元露光像の形成が可能な露光システムである。この仮想露光システムの露光像が、BILM 技術によって、1枚の平面マスクの1回露光で再現可能であることを理論的に導いた。ここでは3次元露光像の設計手法の具体例を提示するとともに、平面上に描くことが不可能な3次元形状の像を、2次元マスクによる1回露光で結像可能であることを、シミュレーションによって検証した。BILM 技術は、2次元パターン形成に限定されていた従来の大量生産型の光リソグラフィ技術を、3次元像の結像が可能な技術に発展させられる有用な技術であることを示した。

第7章では、本研究で得られた研究成果を総括した。

本研究で得られた結果は、高精度微細加工を実現するためのパターン設計技術の役割をさらに大きく発展させるものである。

## 審査結果の要旨

本研究は、高精度微細加工の実現を行うためのパターン設計技術に関するもので、シミュレーション技術を駆使してマスクパターン作成を行うための手法の創出を通じて、ナノスケールの高精度微細加工の実現及び、光リソグラフィ技術の微細化限界の克服を実現するための研究を行った。以下に得られた成果を示す。

1)電子線リソグラフィにおける近接効果を、シミュレーションをベースとしたマスクパターンデーターの補正によって解決するための基本手法及び、高速計算手法を創出することにより、世界で初めて実際の LSI において近接効果補正の実現に成功した。

2)ドライエッチングの形状シミュレーションにおいて、表面吸着層のモデリングを創出することで、表面吸着層を介して形状変化が発生する形状シミュレータを実現し、ホール径に依存してエッチング深さやエッチング形状が変化するマイクロローディング効果のシミュレーションに成功した。

3)光リソグラフィにおける加工パターン寸法のばらつきを評価する手法を創出し、その手法を用いて解像度強調技術、OPC 技術、露光条件（開口数、照明等）までの一連の最適化を同時に行うことで、パターン寸法のばらつきの抑制に対して大きな相乗効果が得られることを検証した。これにより、露光波長の縮小によらずに微細化限界を克服できることを明らかにした。

4)マスクパターンに位相シフターパターンを付加することで、個々のパターンのコントラストを最大化するマスクエンサー技術を創出し、従来の光リソグラフィの微細化限界に対して70%以下の加工寸法を実現することに成功した。この技術は、45nm システム LSI の製造を世界で初め

て実現することに寄与した。

5) レンズ機能をパターン設計技術によって実現する BILM 技術の創出と、その基本原理の実証を行った。さらに、BILM 技術を応用し、3次元露光像の形成を可能とするパターン設計手法も創出し、2次元の平面マスクから1回露光で鮮明な3次元像を形成出来ることを検証し、生産性の高い従来の光リソグラフィによる3次元加工の可能性を示した。

以上の成果は、今後の高精度微細加工を利用した集積化デバイス分野の発展に学術的・産業的に大きく貢献するものと認められ、申請者が自立した研究活動を行うことに必要な能力と学識を有することを証したものである。