

氏 名	中 瀬 真
授 与 学 位	工 学 博 士
学位授与年月日	昭 和 62 年 2 月 12 日
学位授与の根拠法規	学位規則第 5 条第 2 項
最 終 学 歴	昭 和 46 年 3 月 千葉大学工学部写真工学科卒業
学 位 論 文 題 目	光および電子線リソグラフィにおける解像特性の研究
論 文 審 査 委 員	東北大学教授 西澤 潤一 東北大学教授 小野 昭一 東北大学教授 水野 皓司

論 文 内 容 要 旨

本研究は、MTF (Modulation Transfer Function) を用いて光リソグラフィの解像特性を電子線リソグラフィとの比較において考察し、光リソグラフィの微細加工限界について討論したものである。

今日までの半導体集積回路の飛躍的な進歩は、リソグラフィ技術（微細加工技術）の進歩に負うところが極めて大である。このリソグラフィ技術は、紫外線を用いて回路パターンを光学的に転写する光リソグラフィが最も一般的で、コンタクト方式、プロキシミティ方式、投影結像方式等に分類される。しかしながら、近年の回路パターンの微細化に伴って光の回折が無視出来なくなり、このため、より波長の短い電子線を用いた電子線リソグラフィが注目されるようになってきた。これら各リソグラフィ技術にはそれぞれ一長一短があり、対象となるデバイスに応じて互いに相補的な活用がなされていくものと思われる。その選定に際し、各方式のパターン形成上の諸特性を把握しておくことは重要な課題である。例えば、光リソグラフィと電子線リソグラフィ技術の二者を比較した場合、解像特性に特有の相違のあることが経験的に確かめられている。すなわち、前者においては用いるレジスト自身の解像力は十分であるが、結像系のそれが不十分で、結果として得られる総合解像力は、結像系によって制限されてしまう。後者においては電子線の後方散乱に起因するレジストの解像力の低下が著しく、結像系（電子光学系）の解像力が十分であるにもかかわらず、総合解像力は期待される程高くないのである。

一方、光学の分野では写真レンズや感光材料を光学的な伝達系と捕え、従来の解像力の概念に変わり空間的な周波数の応答特性によって光学系を評価する方法が提案された。これは MTF (Modulation Transfer Function) と呼ばれるもので、複数の系から構成された光学系における解像特性の推移を定量的に把握する場合、極めて有効な手段となる。すなわち、先に述べたような総合的な解像特性を結像系とレジスト系に分解して定量的に吟味するには、最も好都合である。

工業的な観点からみると、装置の処理能力は重要な要素であるが、電子線リソグラフィはこの点において光リソグラフィに大きく劣り、さらに近接効果を初めとするいくつかの実用上の問題が存在している。したがって、電子線リソグラフィの工業的な適用は、フォトマスク製作に限られているのが実状で、光リソグラフィによりどこ迄パターンの微細化が可能となるかは、興味の持たれる点である。このような状況のなかで 1977 年に光リソグラフィによる超 LSI の実現を可能としたステップアンドリピート縮小投影露光方式が考案された。この方式は、小画面による分割露光のため大口径投影レンズの搭載が可能となり、更にパターンの重ね合せ位置や焦点位置がステップ毎に補正できることから高解像力と高アライメント精度が得られる。したがって、光リソグラフィでは究極的な方式とも考えられるこのステップアンドリピート縮小投影露光方式の性能と問題点そして限界を把握することは、将来のサブミクロン超 LSI を考える上で重要な課題である。

以上の背景にもとづき本研究は、次の 6 つの部分に分けて行った。

- (1) 理論的 MTF を用いた光リソグラフィ及び電子線リソグラフィの結像系の解像特性に関する研究。
- (2) 光リソグラフィ及び電子線リソグラフィにおけるレジスト系の理論的 MTF の導出と解像特性に関する研究。
- (3) リソグラフィ技術における新しい MTF 測定法に関する研究。
- (4) 測定された MTF を用いた光リソグラフィの解像特性に関する研究。
- (5) 近接効果を中心とした電子線リソグラフィのパターン精度に関する研究。
- (6) ステップアンドリピート縮小投影露光方式の解像性能とアライメント精度及び微細パターン形成の限界に関する研究。

始めの(1)(2)項では、光リソグラフィ、電子線リソグラフィの結像系、レジスト系それぞれの理論的 MTF を求め、これを用いて両リソグラフィ技術の解像特性を比較する。次の(3)(4)項では MTF の測定法を提案すると共に、これを用いて実際に光リソグラフィの MTF を測定し各種露光方式の解像特性を比較考察する。(5)項では、電子線リソグラフィの近接効果によるパターン精度の低下を理論及び実験から示し、(1)(2)項で得られた MTF の結果と合せて電子線リソグラフィの解像特性上の問題点を明らかにする。最後の(6)項では、光リソグラフィの究極的な方式であるステップアンドリピート縮小投影露光方式を取上げ、新しく開発された装置により諸性能の現状を示し、サブミクロンパターン形成の可能性を探る。

次に、各研究の概要を章毎に述べる。

第 1 章では、本論文の導入部として MTF の歴史的背景と理論について概説を行った。MTF は、光学系の誤差を表す点像強度分布をフーリエ変換することによって与えられる。これにより、複数

の光学系を連結した時に最終的に得られる解像特性を記述するMTFは、構成する個々の系のMTFの積で表すことができる。このため、リソグラフィの解像特性を分解して考察する場合、MTFは極めて有効な手段となることを述べた。

第2章では、リソグラフィ技術を光学的な伝達系と捕えて結像系とレジスト系に分解し、結像系の理論的MTFを述べた。光リソグラフィの結像系については、既存の理論を用いて開口数(NA)及び波長とMTFとの関係を明らかにした。電子線リソグラフィの結像系については、電子線プローブを点像と仮定することにより理論的MTFを示した。これらの理論的MTFから電子線リソグラフィの結像系の高解像性能を明らかにした。

第3章では、モンテカルロ法によりレジスト系の理論的MTFを導出した。フォトレジストのMTFに関しては従来取上げられていなかったが、写真乳剤中の光散乱や電子線散乱のシミュレーションにおいて用いられてきたモンテカルロ法を駆使することにより、MTFの理論値を導出した。

フォトレジスト中に入射した光は、レジスト中の異物や基板等から散乱や反射を受け、これらが重畳されて実効的な露光量分布を示すことになる。このとき、光を個々の光線に分解して光子という概念を導入し、それぞれの光子の振舞いをモンテカルロ法により追跡することで、実効露光量分布をシミュレートした。ここでの光子は通常の量子論的な光子とは異なり、モンテカルロ法遂行のための便宜的なものである。その結果、点像強度分布が指数関数的形状になり、電子線露光の場合とかなり異なることが分った。また、これまで経験的に知られていたレジスト中への吸収剤の添加に伴う解像性能の向上やセンシタイザ濃度依存性、レジスト膜厚依存性等が明らかとなった。さらに、光リソグラフィにおける総合的な解像限界が第2章で得られた結果と合せて結像系によって決まることを理論的、定量的に示した。

同様に、モンテカルロ法により電子線レジストのMTFを求めた。電子線レジスト中での電子の振舞いについては既存の理論を用いたが、MTFを導出することにより、フォトレジストとの解像特性上の相違を明らかにすることができた。まず、電子線レジストはMTFの特異性に起因して、潜在的にはサブミクロン迄の解像性能を有しているものの、実際的には露光、現像等の処理プロセスに依存する面が大きく、近接効果の生じやすいことを指摘した。さらに、これらのMTFの特異性は加速電圧に大きく依存するため、目的とする寸法にしたがって最適な加速電圧が存在することを明らかにした。また、MTFのレジスト膜厚依存性、電子線プローブ径依存性等を明らかにした。

第4章では、以上の理論的MTFをまとめて記述することによって、両リソグラフィ技術の解像特性を総合的に考察した。その結果、光リソグラフィの解像特性は結像系により、電子線リソグラフィのそれはレジスト系によって決定づけられていることを明らかにした。そして、総合的に見て1 μ m前後のパターン形成においては、光リソグラフィが有利であることを明らかにした。

第5章では、ポジ型レジストの断面観察による新しいMTFの測定法を述べた。MTFの測定法はこれまで各種報告されているが、いずれも精密に加工されたテレストチャートや測定光学系、フォトマル等の電氣的、機械的な設備を要し、簡便な測定法がなかった。そこで、被測定光学系によって露光、現像されたポジ型レジストの断面形状、及び線幅の変化から実効的な像強度分布を推定

し、これからMTFを計算する方法を提案した。MTFはフーリエ変換法とコントラスト測定法の二通りの方法によって測定した。そして、測定された値が理論値にはほぼ一致していることを確かめ、本測定法の妥当性を明らかにした。

第6章では、第5章で提案した測定法を用いて光リソグラフィのMTFを実測した。コンタクト方式についてはマスク・ウェーハ間のギャップ量を把握することによってハードコンタクト方式、プロキシミティ方式のMTFの相違を明らかにすることができた。その結果、 $NA = 0.2$ の投影結像方式に比較し、ギャップ量が十分に小さいハードコンタクト方式は、極めて高いMTFを有していることを明らかにした。

第7章では、現像過程を含めた理論計算と実験から、Gaussianbeam走査型電子線露光における近接効果とそれに伴うパターン精度の低下を研究した。その結果、近接効果はレジスト膜厚の低減と電子線プローブの縮小によりある程度低減できることを明らかにした。しかしながら、後方散乱防止のためのレジスト構造の多層化等、積極的な対策を講じない限り、電子線リソグラフィによっても $1\mu\text{m}$ 以下のパターン形成は困難であることを明らかにした。

第8章では、光リソグラフィの現状性能とその限界について述べた。まず、超LSI研究組合共同研究所のステップアンドリピート縮小投影露光装置、VL-SR2をもとにさらに高性能かつ高信頼性の露光装置、NSR-2を日本光学社と協同で開発し、その諸性能を評価した。その結果、 $1.2\mu\text{m}$ 程度の設計基準の超LSIの製造が可能であることを明らかにした。また、本研究の締括りとして光リソグラフィによって達成し得る実用的な解像力の限界を理論計算によって推定した。その結果、波長 $0.4\mu\text{m}$ 前後の近紫外光による露光時で $0.7\sim 0.8\mu\text{m}$ 、 $0.2\mu\text{m}$ 程度までの遠紫外光を採用した場合でおよそ $0.5\mu\text{m}$ となることを明らかにした。また、製造技術的観点からみても、これらの理論値は実現できるであろうことを述べた。

審 査 結 果 の 要 旨

写真蝕刻法は現在の半導体工業の基本技術の一つである。デバイス構成の微細化に伴い、サブ・ミクロンの精度が要求されるようになり、技術限界の向上が必要となって来た。本論文は、レジスト材料・投影位置合わせと共に限界決定要素となる結像投影系の精度について主に研究した成果についてまとめたものであり、序論などの他、本文8章よりなる。

第1章では表現を定量化するために各段階における明暗比として規定されるコントラスト及びその変化割合としてMTF (Modulation Transfer Function) なる量を紹介し、二三の特性について論じている。

第2章では、結像系のMTFを理論的に検討した結果についてまとめており、光露光の場合と電子線露光の場合について大凡の限界に対する見解を示している。

第3章では、従来余り問題とならぬためやられていなかった、光露光の場合のフォトレジスト中の散乱によるボケに対する数値解析をモンテ・カルロ法を用いて行い、その結果からMTFを導出し、更に電子線レジストの場合についてもMTFを用いて統一的な見解を示している。このような解析により光ビーム周辺の露光量は中心から指数関数的に減少するが、深さ方向に対する変化は余りないことや吸収色素を添加すると解像度が向上することなど、また、電子線の場合、後方散乱のため、高空間周波数での解像度はよいが、低空間周波数では低いことなど、理論的な裏付けが出来ることを示したのは新しい成果である。

第4章は、前二章の結果に基づいて、光及び電子線の二系に関して総合的に論じ比較した結果をまとめたものである。先ず、電子線を用いた系では、解像特性はレジスト膜の特性によって決まるものであることを理論付け、次いで、低空間周波数のコントラストが低いために近接効果が生ずることを示した。これは新しい知見であり、総合的にみて電子線方式が決して光系を凌駕するとは言えないと言う重要な結論を示している。

第5章では、前章で得た理論的結果を実験的に実証した結果を紹介している。更に第6章は光系の、第7章は電子線系の装置について、結像投影系を含めた全体のMTFの実測結果をまとめたもので充分理論的に納得できる結果を得たとしている。第8章では、以上の結論に基づいて光系機器の現状と将来について論じている。

以上要するに本論文は、二つの写真蝕刻法方式について、その基本的な特性を统一的に理論解析し、その結果を実験的に検証すると共に二三の新しい知見をも加えることが出来たもので、電子工学に資するところが少なくない。

よって、本論文は工学博士の学位論文として合格と認める。