

外98-37

早稲田大学大学院理工学研究科

## 博士論文概要

### 論文題目

超解像技術と超高解像レジストを用いた  
光リソグラフィー技術に関する研究

#### 申請者

加門 和也

Kazuya Kamon

98年11月

L S I (Large Scale Integrated circuit) の高集積化、高機能化に支えられ、我々は高度情報化社会に暮らしている。電気炊飯器や携帯電話等の身の回りの製品から、スーパーコンピューターやロケット等国家プロジェクトに関するものまで、L S I が使われてない電気機器を見つける方が難しいほどである。より高い情報化社会を実現するため、L S I 製造技術では、ますます微細なパターン形成が要求されている。現在開発中の超L S I である 64 ~ 256 Mbit D R A M (Dynamic Random Access Memory: 隨時読み出し書き込み可能な記憶素子) では、0.2-0.3 μm のクオーターミクロノン領域の微細加工技術が要求されている。さらに、次世代の 1 Gbit D R A M では、0.15 μm の微細パターン形成が求められている。

従来、微細加工工程には、水銀ランプの g 線(436nm)や i 線(365nm)を用いた光リソグラフィー技術が用いられてきた。一括露光ができるので量産性に優れているからである。しかし、加工寸法が露光波長よりも小さくなつた現在では、いよいよ光リソグラフィー技術の限界を迎へつつある。

飽くなき L S I の微細化の要求に応えるには、大きく分けて次の二つの方法がある。一つは、KrF(248nm)からArF(193nm)、F<sub>2</sub>(157nm)、Ar<sub>2</sub>(126nm)、X線へと続く光源の短波長化の流れであり、もう一つは、変形照明法、位相シフト法、瞳フィルター法等の超解像技術の開発を通して、解像力や焦点深度 (D O F) を改善して、リソグラフィー技術の延命や、世代交代の円滑化を図る流れである。

光源の短波長化は、パターンの種類に対する汎用性が高い点で有利だが、レンズ硝材、レジスト材料、プロセス等を波長毎に改訂する必要があり、開発や設備コストが高くなる。現状では、透明性の高いレンズ材料を探すところから始めなくてはいけない。一方、超解像技術は、従来の露光装置の光学系に、フィルターやシフターを挿入することにより、レイリー限界を越えた高い解像力や広いD O Fを得る技術である。超解像技術は、従来の光学系にわずかな変更を加えるだけで済むので、設備コストが安くすむ。また、波長には依存しないので、露光波長が変更されても汎用的に使える。しかし、改善効果の大きいものにはパターンレイアウトに制約がつく場合があり、必ずしもオールマイティではない。実際のL S I 上には、大小様々なパターンが共存しているため、適用できる工程は限定されてしまう。また、最適露光条件が異なるパターンが共存した場合、十分に改善効果が引き出せない場合や、どちらかを犠牲にせざるを得ない等の問題点がある。

これらの流れは、相互に補完的な関係にあり、短波長化のみ又は超解像技術のみの開発では不十分である。いずれかに偏った開発では、5年で約1/2という急速なデザインレベルの微細化に対応できず、L S I の高集積化のトレンドは、破綻する可能性すらある。そこで、汎用性の高い超解像技術の開発や、トレードオフが発生した場合の補正技術の確立が、最近の開発テーマとなっている。また、次世代のA r F用の新レジスト材料、レンズ硝材、ハーフトーン材等、総合的な光リソグラフィー技術の開発も重要である。

本論文は、最近目覚ましい発展を遂げ、実用にも大いに寄与している超解像技術と超高解像レジストプロセスに着目する。そして、これらの新技术を用いた超微細加工技術のL

S I 製造への応用に関して、筆者が行ってきた研究成果をまとめ、次の順序で記述する。

第1章では、L S I 製造技術の背景とその動向について述べる。半導体産業の黎明期から現在まで連続と微細加工技術の中核に位置してきた光リソグラフィー技術の推移を紹介し、解像限界がL S I の最小寸法を決定していることを述べる。また、解像限界を克服するための超解像技術とレジストプロセスを位置づける。

第2章では、光リソグラフィー技術の概要と、その理論的背景について述べる。まず、部分コヒーレント結像理論を紹介し、そこから導かれるレイリー限界から、従来技術の単なる延長では、解像限界が近づいていることを示す。また、解像力と共にD O Fが重要な要素となっていることを指摘する。そして、解像限界やD O Fを拡大するために、筆者が開発した超解像技術と超高解像レジストプロセスの概要と意義を述べる。

第3章では、光リソグラフィー技術の開発を理論的に支援するため、筆者が開発した光リソグラフィーシミュレーターを取り上げる。まず、光学では部分コヒーレント結像理論に基づき光学像を計算している。さらに、ベクトルモデルの要素をスカラーモデルに取り入れ、高速性を保持したままベクトルモデル並みの計算精度を達成できる計算方法や計算例を示す。また、レジストプロセスや現像シミュレーションでは、熱拡散理論に基づく熱処理によるレジスト形状の計算例を示す。さらに、パーコレーション理論に基づくクラスターモデルを用いた酸触媒反応や現像過程、表面難溶化層の形成等の計算方法や計算例についても述べる。

第4章では、変形照明法を用いた超解像技術について述べる。まず、既存の輪帶照明法による解像力やD O Fの改善効果や各種プロセスマージンに及ぼす影響を評価した。次に、筆者は、世界で初めて2次光源の形状を最適化し、十字形、紡錘形、糸巻き形、ハーフトーンの遮光部を持つ変形照明法へと拡張した。さらに、その改善効果や汎用性を評価したところ、D O Fが2倍に拡大され、解像力も向上すると共に、各種プロセスマージンに及ぼす影響は小さいことが分かった。筆者が発明したこれらの変形照明法を、既存の位相シフト法や瞳フィルター法と組み合わせると、相乗効果によりいっそうコントラストが改善された。これらは、現在の露光装置を改造して容易に実現できる超解像技術であり、既に実用化され、産業にも寄与している。

第5章では、第4章で紹介した超解像技術のパターン依存性を無くし、汎用性を拡大するために、新たに発明した次世代超解像技術について述べる。本技術は、「マスクを2回通過する光学系を使っており、自己最適化された照明条件が光学的に発生するため、広い汎用性と高い解像力が同時に得られることを特徴としている。本章ではまず、この超解像技術を理論的に導出し、シミュレーションによりその改善効果を解析し、マスクパターン毎に適切な照明条件が形成されていることを示す。また、マスクを2回通過することによる光量ロスが若干あるが、これは一律サイジングだけで済むので問題にならないことが分かった。次に、顕微鏡を改造した露光光学系により、これら改善効果を実験的に確認した結果を述べる。さらに、アライメント精度、収差特性、光近接効果等につい

ても改善されていること、すなわち、プロセスマージンが拡大していることについて述べる。また、ハーフトーンマスクとの組み合わせにより、孤立パターンのD O Fが、拡大するという効果についても述べる。

第6章では、仕上がり寸法の高精度化や、超解像技術に伴う寸法変動を補償するためには、筆者が開発した光近接補正システムについて述べる。まず、システム全体の概念を述べた後、仕上がり寸法の予測方法や、それに基づくマスクデータの補正方法について述べる。また、高速処理のために導入した並列プロセッシングや、計算メッシュの最適化方法を紹介する。さらに、レジスト材料やレジストプロセスに依存した寸法変動要因を解析した。これらの特性をパラメーター抽出し、補正に反映することで、レジスト材料やレジストプロセスの変更にも、柔軟に対応できるシステムに拡張できる。また、マスク製造時の仕上がり特性や、光学条件の変更など、様々な変動要因に対応するための改良について述べる。最後に、パターン補正の検証方法についても述べる。

第7章では、化学增幅型レジスト等の超高解像レジストプロセスについて述べる。まず、筆者は化学增幅型レジストに適したパーコレーション理論に基づくクラスターモデルを導出し、新しいレジストプロセスモデルを開発した。次に、レジスト中の自由体積やクラスター構造を仮定し、プリベーク、P E B(Post Exposure Baking)、現像を含むモデルへ拡張した。化学增幅型レジストでは、酸触媒反応に伴う分解や架橋反応は、横よりもむしろ縦に進むので、矩形性の良いレジスト形状になることが解った。次に、レジストの屈折率変化、低速陽電子の消滅過程の実験等から、レジスト中の自由体積の存在を世界で初めて実証した。また、化学增幅型レジストでは、雰囲気中にアンモニアがあると、表面にひさし状のT-topが見られる。このT-top形成のメカニズムをクラスターモデルにより導き、シミュレーションした結果を述べる。さらに、レジストを構成する高分子の分子間相互作用が、感度に大きな影響を及ぼすメカニズムを明らかにし、Si系レジストやArFレジストの誘電率計算と感度測定により世界で初めて検証した。また、AFM (Atomic Force Microscope) によるレジスト表面観察において、クラスターモデルに特徴的なトポグラフィーを確認しクラスターモデルを検証した。

第8章では、本研究の総論として、本論文の内容を総括し、超解像技術と超高解像レジストプロセスを相乗的に用いることで、様々なLSIに高い解像力を実現できるので、 $0.2\mu m$ 以下のデバイスにも光リソグラフィーはLSI製造の主要な役割を果たす見とうしを明らかにする。