



光リソグラフィ技術による微細加工に関する研究

笹子, 勝

(Degree)

博士 (学術)

(Date of Degree)

1994-09-21

(Date of Publication)

2015-03-24

(Resource Type)

doctoral thesis

(Report Number)

乙1866

(JaLCD0I)

<https://doi.org/10.11501/3105466>

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/D2001866>

※ 当コンテンツは神戸大学の学術成果です。無断複製・不正使用等を禁じます。著作権法で認められている範囲内で、適切にご利用ください。



神戸大学博士論文

光リソグラフィ技術による
微細加工に関する研究

平成6年 8月

笹子 勝

内 容 梗 概

半導体集積回路の超LSI (Large Scale Integration) に至る高集積、高速度、低消費電力化の研究開発のスピードは、現在もなお、留まることなくつき進んでいる。16メガビットDRAM (Dynamic Random Access Memory; 随時書き込み可能な記憶装置) に代表される超LSI大容量メモリーも量産に入り、64メガビットDRAMや256メガビットDRAMもすでに試作研究発表がなされている。一方、マイクロプロセッサに代表される超LSIロジックの驚異的進歩も起因することにより、従来の産業用、コンピュータ中心の需要に加え、マルチメディアを中心とした民生用市場も大きく膨れ上がることが予想されることから、今後、ますます研究開発に拍車がかかると考えられる。この驚異的な超LSIの進展の技術的原点は微細加工技術である。さらに微細加工技術の推進の中心がリソグラフィ技術であり、このリソグラフィ技術の研究の進化そのものが半導体集積回路の歴史そのものであると言える。極論すれば、微細加工の停滞は、すなわち、半導体集積回路進展の停滞につながるため、超LSIデバイスからの微細加工技術への要求は益々厳しくなっており、1 μ mレベルの加工からサブクォータ・ミクロン以降の微細加工の極限追求までの研究が非常に重要である。

本論文は、半導体超LSI製造プロセスの最も重要な微細加工技術に関する一連の研究成果をまとめたものである。研究対象の微細加工寸法はミクロンレベルからサブクォータミクロン・レベルとし、工業的実用性の高い光リソグラフィ技術の進展に主眼を置いている。研究成果としては、二重露光法、コントラスト・エンハンスト・リソグラフィおよび表面処理プロセス/材料の研究と、短波長化による微細加工としてKrF、ArFエキシマレーザーを用いたリソグラフィ装置、プロセスそしてレジスト材料の研究である。それぞれの研究の超LSIへの応用も行なった。最後には、次世代半導体製造科学を考慮した次々世代微細加工プロセスの基礎研究についても論じた。

本論文は、全10章から成っており以下に各章毎の内容の概要を順に追って述べる。

第1章 序論

本章では、本論文のはじめとして、半導体超LSIの微細化の技術動向や微細加工に関する研究の現状について概説して、本研究を始めるに至った周囲状況、および、本研究の歴史的背景を明らかにした。さらに、本研究の概要を述べ、目的と意義を明らかにした。

第2章 リソグラフィを中心とした微細加工技術の現状と課題

本章では、まず従来より半導体超LSI製造に用いられている光リソグラフィ技術を中心とした微細加工の目的と概要を述べ、さらに、そのレジストパターン形成技術や露光技術について詳細を述べた。次に、これらの技術の現状の動向を述べると共に、微細加工を達成する上でのそれぞれの意義、有効性を論議し、課題を明らかにした。

第3章 二重露光法による1 μ mパターン微細加工

この章では、1 μ m領域の微細パターン形成技術、すなわち、レジストプロセス側からのアプローチとして、考察を進めてきた二重露光法 (DEM: Double Exposure Method) の研究を述べる。

本研究で開発したDEMのプロセスフローは、段差を有する基板上に第1層ポジレジストを塗布し、全面に全波長領域の紫外線を照射し完全に感光反応を引き起こす。次に表面処理した後、第1層ポジレジストと同一の第2層ポジレジストをさらに重ねて塗布した後、縮小投影露光法により第2回目の露光をレチクルを用いて選択的に行い、第1層と第2層を同時に1回の現像工程でパターン形成するものである。

このDEMプロセスは、第2層の感光反応した膜とその直下の全面感光した第1層膜により、第1層、第2層の界面まで現像が進行し、到達したと同時に現像が進む。その結果、垂直もしくは少しアンダーカット気味の高アスペクト比の形状が得られることになる。

すなわち、光リソグラフィに対してDEMプロセスが次の点で有効であることがわかった。光リソグラフィ、特に縮小投影露光法を用いて段差上に限界解像度 $0.8\mu\text{m}$ のパターンを寸法変化なく形成することができた。また、ポジレジストを2層とするため下地基板の反射の影響をうけにくい。特に現プロセスにおいて難しいAI配線の微細化も可能であった。さらに、パターン形成には最上層の未露光膜のみが有効となるため、縮小投影光学系の浅い焦点深度に対して余裕度が高く、高アスペクト比パターンを形成できた。しかも、三層構造レジスト法など従来の多層レジスト法より工程が簡単で、ドライエッチング、CVD工程が不要で高スループットを達成した。

また、DEM法は、シミュレーション解析によっても、微細パターン形成効果を有していることが確認された。

DEM技術は、 $1\mu\text{m}$ からサブミクロン領域のリソグラフィとして、プロセスが簡易であるという利点を生かして、大いに期待できるものである。

第4章 コントラスト・エンハンスド・リソグラフィによる

サブミクロン・パターン微細加工

本章では、サブミクロン微細パターン形成方法のうち、非常に有力であり、かつ、簡易的な方法であるコントラスト・エンハンスド・リソグラフィ (CEL: Contrast Enhanced Lithography) の研究について論じる。

CELは、レジスト上にCEL材料を塗布した後に露光を行うことが、その特徴である。CEL材料は、光退色性試薬を主成分とすることから、入射光のうち光強度の弱い光は、CEL膜がこれを吸収してレジストまで到達せず、また、光強度の強い光は、CEL膜を退色させてレジストまで到達して、これを露光することになる。従って、CEL材料は、入射光のうち光強度の強い成分のみレジストに入射させるというコントラストを増強する効果を有することになる。コントラストの向上した光は、レジストの解像度向上につながることになる。

コントラスト・エンハンスド・リソグラフィについて、その原理を含めて、工程を簡略化するために開発した水溶性のg線、i線用CEL材料 (WSP-g, WSP-i: Water Soluble Photopolymer) を用いた検討に関して論じた。

結果としては、g、i線リソグラフィともWSPを用いることにより、パターンの解像性・形状の向上、露光エネルギー・焦点深度変動に対するパターン寸法変動の低減、マスク忠実性の向上などの利点を確認され、それぞれのリソグラフィにとって非常に有益であることがわかった。

これらの結果については、計算機シミュレーションによって解析し、CELによるサブミクロンからハーフミクロンのパターン形成に対する指針を得た。

水溶性CEL材料を用いたコントラスト・エンハンスド・リソグラフィは今後のサブミクロン・リソグラフィ技術の一角を担うと考えられる。

第5章 レジスト表面処理技術によるハーフミクロン・パターン微細加工

本章では、単層レジストの性能を簡易的な方法で向上させるアルカリ表面処理法 (HARD: High Aspect Ratio Resist by Alkaline Disposal) を考案し、i線リソグラフィと併用したハーフミクロン領域の高コントラスト・レジストパターン形成について論じる。

HARD法によるパターン形成方法は露光前にアルカリ水溶液処理を行う工程が加えるだけという簡易的なプロセスを実現している。

結果として、HARD法により、レジストパターン形状、パターン制御性が著しく向上し、 $0.5\mu\text{m}$ までの良好なパターン形成が可能となった。これは、レジスト表面付近の現像液に対する難溶化層の形成によるものであることが解析できた。また、この方法は、CELやエキシマレーザー・リソグラフィとも良く併用でき、その効果が十分発揮できると考えられる。

HARD法は、そのプロセス簡易性の他に、高い再現性やコストの低さなどから、工業的に非常に有用であると考えられ、i線レジストの高性能化とあいまって、ハーフミクロン領域の微細加工に有望である。

第6章 KrFエキシマレーザー露光によるサブハーフミクロン・パターン微細加工

光リソグラフィの露光装置側からのアプローチとして、遠紫外光であるエキシマレーザーによる微細加工技術が、短波長化による解像度向上に有効である。エキシマレーザーによるパターン形成はパルス露光であり、従来用いられてきた高圧水銀灯によるものとは異なるが、レーザー特有のスペckルや照射むらの問題もなく、レジストパターン形成が可能である。

KrFエキシマ・レーザー露光は、生産レベルにおいてもサブハーフミクロン領域のパターン形成が、従来のi線ステッパーの高開口数レンズよりも、簡単に得られることが予測されている。本章では、次世代の超LSI製造の担い手として、KrFエキシマレーザー・リソグラフィの可能性を、装置構成とレジスト材料の両者の基礎から実証する。

結果として、エキシマレーザーの本来の特性を損なわずに、レーザー波長バンド幅を4pmの狭帯域化レーザーと単色レンズを開発し、実験露光装置を試作し、この装置を用いて単層レジストで0.4 μ mのパターン転写が可能であることを確認した。また、レジスト形状の改善のため高透明性レジストを開発し、垂直形状に近いサブハーフミクロン・パターンを形成した。

今後の課題として、エキシマレーザーの高出力化と長寿命化、ステッパーの高精度アライメントの実現、レジスト性能の高感度化、高解像度化など実用化に向かって研究課題が残る。

第7章 KrFエキシマレーザー・リソグラフィによる

クォータミクロン・パターン微細加工

この章では、第6章のKrFエキシマレーザー・リソグラフィの課題を解決し、クォータミクロン・レベルの微細加工領域への研究を論ずる。その研究成果はエキシマレーザーに偏光結合を導入したPCR (Polarization Coupled Resonator) レーザーと、化学増幅型の原理を導入したレジストが主構成である。同時に、高精度アライメントを実現したスルー・ザ・レチクル方式を取り入れKrFエキシマレーザー・ステッパーを試作し、0.35 μ mルール・デバイス、とりわけ64M DRAM開発に、研究成果を基にしたKrFエキシマレーザー・リソグラフィ技術を応用することにより、可能であることを実証した。

さらに、高感度、高解像度化そして高安定化の観点からレジスト材料設計を進め、0.25 μ mデザイン・ルールの超LSIのリソグラフィ・プロセスに使用可能なKrFエキシマレーザー・リソグラフィ対応化学増幅型ポジレジストASKA (Alkaline Soluble Kinematics Acid generation positive resist) を開発した。レジストの性能は、0.225 μ mの解像度、30mJ/cm²の感度と世界で前例のないものを示した。また、化学増幅型の課題であった安定性に関して、レジスト溶媒、雰囲気そして基板との反応を検討することで180分以上の引き置き安定性を得た。同時にレジストの耐熱性を向上させるため、新しいレジストキュア法を提案した。

本研究で開発したレーザー、ステッパーおよびレジストは、0.25 μ m超LSI実現のため有用である。今後、KrFエキシマレーザー・リソグラフィ技術のプロセスの簡素化と低コスト化を計るためには、近接効果や多重干渉効果の影響を受けないブリーチング効果の導入が急がれる。

また、焦点深度と解像度の改善のため、変形照明に代表される超解像技術が近年有望である。しかしながら、超解像技術にはLSIパターン・レイアウトに依存する光近接効果が課題であった。

本章の最後に、解像度向上のための超解像の課題を改善する補助パターン配置技術をKrFエキシマレーザー・リソグラフィに応用した結果を論じる。

第8章 ArFエキシマレーザー露光によるサブクォータミクロン・パターン微細加工

本章では、ArFエキシマレーザー縮小投影レンズとして、レンズの透過率を向上するために非球面レンズを有する投影レンズ光学系を提案した。本非球面投影レンズを実現するには、 $\lambda/50$ 以下の高精度非球面レンズ加工が要求されており、本研究では偏心マイクロ・ポリッシング方法を用いたオン・マシン計測研磨装置を試作した。本オン・マシン計測研磨装置により非球面形状精度 $\lambda/10$ 以下、表面荒さ5nm以下が達成できたが、非球面形状精度 $\lambda/50$ 以下を実現するために、研磨パターンの最適化とポリシャー耐久性、測定再現性の向上が必要である。

さらに、ArF光に透明性の高い芳香族基を除いたポリ・ノルボニル・メタクリレート樹脂と酸発生剤と

しての脂肪族スルフォニル化合物からなる化学増幅型ポジレジストを合成しサブクォータミクロン・パターン形成の結果を得た。

ArFエキシマレーザーでは、KrFに比べて未だ実用化において越えなければならない技術的問題が多い。例えば、ArFレーザー光の長寿命化、ArF光の大気中での吸収の問題とレジスト材料の高性能化の問題等が挙げられ、未だ研究初期段階である。今後、ArFエキシマレーザー・リソグラフィの活発なる研究により、大規模なシステム・オンチップ・ロジックやIG DRAM以上に対応するサブクォータミクロン微細加工の実用化が期待される。

第9章 次々世代リソグラフィによる超微細加工

本章では、21世紀を睨んだリソグラフィ技術の微細加工はどうあるべきかの、1つの見解を論じた。将来の超LSIの半導体製造技術は現状の延長線上において、その経済性は勿論のこと、科学的見地から分子、原子レベルのゆらぎと装置機械の稼働安定性を無視できなくなるのは明白であり、通用しがたくなる。微細加工技術分野、とりわけリソグラフィ技術も、さらに細部に渡り科学的究明をし、現象をプロセス、装置の両面からモデリングすることにより、プロセス制御していく事が要求されてくる。一方、半導体集積度は微細加工の進展とともに設計も複雑多岐となり、システムが巨大化してこよう。従って、製造技術も設計サイドにかなりの範囲にデザインインを追求せねば、本当の意味のシステム・オンシリコンの完成はありえない。本来、リソグラフィ技術は設計デザインを忠実に再現することを研究主眼に置いてきたが、前述のゆらぎ、つまり、バラツキ増大と複雑化に対応していくことがせまられよう。

そこで、この将来を考慮し、本章ではリソグラフィの最も物理定量化されていないウェット現象をドライ化したシリレーションの研究と、設計データを忠実に再現するため、リソグラフィ・シミュレーションをベースに、微細加工結果を予測することにより、設計データを逆に修正する研究について論じた。

本章の研究は、まだ実用領域までに至っていないが、今後の微細化限界の追及とともに今後の新しい研究指針となるものである。

第10章 総括

本研究では、光リソグラフィ技術における微細加工の進展を、レジストプロセス、材料側からと露光装置側からの両面から検討を行なった結果を論じた。

プロセス・材料側からのアプローチであるDEM法では、g線ステッパーを併用して、実段差上での1 μ m以下の微細加工を実証した。また、プロセス簡易的な有用性を確認した。

コントラスト・エンハンスド・リソグラフィはこの技術の主要材料である水溶性CEL材料（WSP）の開発・最適化を行い、g線とi線のリソグラフィに関してWSPを用いてその解像性、パターン形状、露光エネルギー、焦点深度変動に対するパターン線幅の変動性、マスク忠実性などについての検討を行い、WSPの使用によるサブミクロン・パターン形成の有用性を確認した。

他のプロセス側からのアプローチである、HARD法を開発し、i線リソグラフィに応用してハーフミクロン領域の微細加工に対する知見が得られた。

露光装置を主とするアプローチは、KrFエキシマレーザー・リソグラフィについて研究を行った。内容としては、ステッパーの構築技術、レジスト評価そしてエキシマレーザー・レジストの開発である。これらの技術を用いることにより、サブハーフ・ミクロン領域の微細パターン形成が可能であることを証明した。また、KrFエキシマ・レーザー・リソグラフィによる実デバイス製造の容易性をi線リソグラフィに比較して論じた。

さらにKrFエキシマレーザー・リソグラフィをクォータミクロン領域へ進展すべく、長寿命高出力エキシマレーザー、スルー・ザ・レチクル方式のステッパーおよび化学増幅型レジストを開発してクォータミクロン・レベルのデバイスに応用し、実用性を実証した。

また、光リソグラフィの限界を追及すべく、さらに短波長のArFエキシマレーザー・リソグラフィの縮小レンズおよび化学増幅型レジストを設計試作し、サブクォータ・ミクロン領域の可能性を見いだした。

最後に、次世代の半導体製造科学に立脚したリソグラフィ技術の研究を行ない、さらなる微細化限界の

追及とともに今後の新しい研究指針を考察した。

今後、半導体産業は微細化限界と物理動作限界の極限領域に向けて、ますます活発化し、世の中の情報革命を支えるシステムULSI (Ultra Large Scale Integration) を実現すべく発展するものと確信する。このような半導体産業の主役である微細加工技術には、本研究の技術が有効でかつ、不可欠のものとなると考えられる。

本研究の成果が、今後のギガビット・メモリーやシステム・オンシリコンに活用され、半導体産業、製造業しいては世界の繁栄につながることを、切に希望し、確信する。

リソグラフィ技術のさらなる発展のためにも、本研究の一層の進展を行う考えである。

最後に、謝辞、参考文献、研究業績一覧を記し、終わりとする。

目 次

第1章 序論	1
1.1 はじめに	1
1.2 半導体超LSI微細化の要求	1
1.3 微細加工に関する研究の歴史と現状	2
1.4 本研究の目的	4
1.5 本論文の構成	5
第2章 リソグラフィを中心とした微細加工技術の現状と課題	7
2.1 緒言	7
2.2 光リソグラフィの変遷	7
2.3 光リソグラフィの解像度	8
2.4 プロセス・ファクタ	9
2.4.1 レジスト材料	
2.4.2 多層レジスト技術	
2.5 レンズ開口数	13
2.6 露光波長	14
2.7 結言	15
第3章 二重露光法による1 μm パターン微細加工	16
3.1 緒言	16
3.2 二重露光法 (DEMプロセス)	16
3.2.1 DEMの塗布特性	
3.2.2 DEMにおける2層膜の評価	
3.2.3 DEMによるパターニング形成	
3.2.4 まとめ	
3.3 二重露光法によるレジスト断面形状の解析	24
3.3.1 はじめに	
3.3.2 DEMプロセスの最適化	
3.3.3 DEMのシミュレーション	
3.3.4 DEMプロセスの解析	
3.3.5 シミュレーションと実験との比較	
3.3.6 シミュレーションによるプロセスの設計と最適化	
3.3.7 DEMの解像限界	
3.3.8 まとめ	
3.4 結言	33
第4章 コントラスト・エンハンスド・リソグラフィによる サブミクロン・パターン微細加工	34
4.1 緒言	34
4.2 CELの原理	34
4.3 CELの研究動向	34

4.3.1	CEL材料	
4.3.2	CELによるパターン形成	
4.3.3	CELのシミュレーション解析	
4.3.4	まとめ	
4.4	g線用水溶性CEL材料を用いたリソグラフィ	36
4.4.1	はじめに	
4.4.2	WSP-gのコントラスト・エンハンス効果	
4.4.3	WSP-gのg線ステッパーにおけるパターン形成への応用	
4.4.4	結果と考察	
4.4.5	まとめ	
4.5	i線用水溶性CEL材料を用いたリソグラフィ	43
4.5.1	はじめに	
4.5.2	WSP-iの材料構成	
4.5.3	結果と考察	
4.5.4	まとめ	
4.6	シミュレーションによるCELの解析	48
4.6.1	はじめに	
4.6.2	CELの解析手法	
4.6.3	CELの可能性	
4.6.4	まとめ	
4.7	結言	53
第5章 レジスト表面処理技術によるハーフミクロン・パターン微細加工		54
5.1	緒言	54
5.2	アルカリ表面処理法 (HARD)	55
5.2.1	HARDによるパターン形成	
5.2.2	HARDの解析	
5.2.3	HARDと他プロセスとの併用	
5.3	結言	56
第6章 KrFエキシマレーザー露光による サブハーフミクロン・パターン微細加工		58
6.1	緒言	58
6.2	エキシマレーザー・リソグラフィの研究動向	58
6.2.1	はじめに	
6.2.2	エキシマレーザーに用いる光源	
6.2.3	まとめ	
6.3	KrFエキシマレーザー・ステッパーの構築技術	60
6.3.1	はじめに	
6.3.2	KrFエキシマレーザー露光装置の構成	
6.3.3	KrFエキシマレーザー露光装置の光学システム	
6.3.4	新KrFエキシマレーザー・ステッパーの特性	
6.3.5	まとめ	
6.4	KrFエキシマレーザーによるレジスト評価	67
6.4.1	はじめに	

6.4.2	レジスト評価条件	
6.4.3	レジスト評価結果	
6.4.4	まとめ	
6.5	KrFエキシマレーザー・レジストの開発	75
6.5.1	はじめに	
6.5.2	実験条件	
6.5.3	結果と考察	
6.5.4	材料特性	
6.5.5	まとめ	
6.6	エキシマレーザー・リソグラフィとi線リソグラフィの比較	82
6.6.1	はじめに	
6.6.2	シミュレーションによる比較	
6.6.3	実験による比較	
6.6.4	まとめ	
6.7	結言	85

第7章 KrFエキシマレーザー・リソグラフィによる

	クォータミクロン・パターン微細加工	86
7.1	緒言	86
7.2	リソグラフィ対応エキシマレーザー装置課題	86
7.2.1	エキシマレーザーの動作原理	
7.2.2	エキシマレーザー光源の課題	
7.3	KrFエキシマレーザー・リソグラフィ対応光源	89
7.3.1	狭帯域化方式	
7.3.2	PCRレーザーの構成と動作	
7.3.3	PCR狭帯域化エキシマレーザーの特性	
7.4	KrFエキシマレーザー・ステッパーの開発	93
7.4.1	はじめに	
7.4.2	KrFエキシマレーザー・ステッパーの仕様	
7.4.3	高精度アライメント光学系	
7.4.4	まとめ	
7.5	化学増幅型ポジレジストの開発	96
7.5.1	化学増幅型のコンセプトと課題	
7.5.2	化学増幅型レジストASKA	
7.5.3	ポジ型化学増幅型レジストの特性	
7.5.4	ポジ型化学増幅レジストの64M DRAMへの適用	
7.5.5	まとめ	
7.6	KrFエキシマレーザー・リソグラフィのクォータミクロン・デバイスへの挑戦	102
7.6.1	はじめに	
7.6.2	化学増幅型の課題	
7.6.3	化学増幅型レジストASKAの高性能化	
7.6.4	高性能ASKAのリソグラフィ特性	
7.7	KrFエキシマレーザー・リソグラフィ・プロセスの開発	111
7.7.1	はじめに	
7.7.2	レジストプロセス	
7.7.3	耐熱性向上プロセス	

7.8	サブクォータミクロン・パターン形成の可能性	116
7.8.1	KrFエキシマレーザー・リソグラフィと超解像	
7.8.2	まとめ	
7.9	結言	122
第8章	ArFエキシマレーザー露光による サブクォータミクロン・パターン微細加工	125
8.1	緒言	125
8.2	ArFエキシマレーザー露光の可能性	125
8.2.1	はじめに	
8.2.2	ArFエキシマレーザー・ステッパーのシステム・コンセプト	
8.2.3	光学システム	
8.2.4	狭帯域化ArFエキシマレーザー	
8.2.5	パターン形成	
8.3	ArFエキシマレーザー非球面レンズ露光技術	128
8.3.1	はじめに	
8.3.2	ArFエキシマレーザー用非球面投影レンズ	
8.3.3	非球面投影レンズ加工	
8.4	ArF化学増幅型レジスト	134
8.5	結言	135
第9章	次々世代リソグラフィによる超微細加工	136
9.1	緒言	136
9.2	シリレーション・プロセス	136
9.2.1	はじめに	
9.2.2	実験方法	
9.2.3	シリル化実験結果	
9.2.4	シリル化プロセスと位相シフト法の組み合わせ	
9.2.5	まとめ	
9.3	リソグラフィ・シミュレーションによるパターン補正	142
9.3.1	はじめに	
9.3.2	光近接効果	
9.3.3	補助パターンの効果	
9.3.4	補助パターンと超解像の組み合わせ	
9.3.5	補助パターン自動発生	
9.3.6	補助パターン自動発生の問題点	
9.3.7	まとめ	
9.4	今後の展望	146
第10章	総括	148
謝辞		150
参考文献		151
研究業績一覧		159

第1章 序 論

1.1 緒言

近年の半導体集積回路の発達は目ざましく、その結果、この集積回路はいまや集積化電子システムと称した方がふさわしくなっている¹⁻¹⁾。そのシステム規模はLSIからVLSIへと拡大し、素子数が100万個を越えるULSIに発展し21世紀初頭にはULSIシステムそのものが電子機器システムとなることが予想される。この進展は社会に対しても大きな影響を与え、今日の高度情報化社会を出現させたと言っても過言ではない。映像と通信という情報の伝達手段の発達は地球を相対的に狭くし、地球規模での高度な情報処理の必要性を高めた。その高度化をハードウェアの面から支えたのは、集積回路に他ならない。

VLSIやULSIに総称される超LSIに至る高集積、高速度、低消費電力化の研究開発のスピードは、現在もなお、留まることなくつき進んでいる。16MビットDRAM¹⁻²⁾ (Dynamic Random Access Memory; 随時書き込み可能な記憶装置)に代表される超LSI大容量メモリーも量産に入り、64MビットDRAM¹⁻³⁾や256MビットDRAM¹⁻⁴⁾もすでに試作研究発表がなされている。一方、マイクロプロセッサに代表される超LSIロジックの驚異的進歩¹⁻⁵⁾も起因することにより、従来の産業用、コンピュータ中心の需要に加え、マルチメディアを中心にした民生用市場も大きく膨れ上がることが予想される¹⁻⁶⁾ことから、今後、ますます研究開発に拍車がかかると考えられる。この驚異的な超LSIの進展の技術的原点は微細加工技術である。さらに微細加工技術の推進の中心がリソグラフィ技術であり、このリソグラフィ技術の研究の進化そのものが半導体集積回路の歴史そのものであると言える。極論すれば、微細加工の停滞は、すなわち、半導体集積回路進展の停滞につながるため、超LSIデバイスからの微細加工技術への要求は益々厳しくなっており、1 μ mレベルの加工からサブクォータミクロン以降の微細加工の極限追求までの研究が非常に重要である。

本論文は、この様な半導体超LSI製造プロセスの最も重要な微細加工技術に関する一連の研究をまとめたものである。研究目的の微細加工の寸法はミクロン・レベルからサブクォータミクロン・レベル以降とし、工業的実用性の高い光を用いた光リソグラフィ技術の進展に主眼を置いている。本章では、本論文のはじめとし、まず半導体超LSI微細化の技術動向について概説した後、本研究に至った周囲状況、および本研究の目的について述べる。また、最後に本論文の概要を説明する。

1.2 半導体超LSI微細化の要求

半導体シリコンデバイスには大きく分けてMOS(Metal Oxide Semiconductor)デバイスとバイポーラ(Bipolar)デバイスがあるが、半導体微細加工すなわち集積度の歴史は、MOSデバイスにおけるスケーリングの歴史が基本である。MOSデバイスは、1974年のDennardら¹⁻⁷⁾によって発表されたスケーリング則に沿ってほぼ開発されてきている。MOSデバイスの中で最も代表的かつ最先端デバイスはMOSメモリーであった。MOSメモリーは最初の開発以来20年近くを経過したが、その主要加工寸法の推移は図1.1に見るように、世代更新毎にそのときの最先端半導体製造技術をもって設計生産されてきた。このトレンドが今日以後も継続的に成立するか否かの議論は、微細加工技術の進展にかかっている。

ここで、超LSIデバイスからの要求と限界を簡単にまとめ、本研究の主眼である微細加工技術の最終ゴールを見定めてみたい。

従来、MOS電界効果トランジスタの微細化限界は0.2 μ m程度と言われてきたが¹⁻⁸⁾、その主な理由はゲート酸化膜の薄膜化限界を5nm程度と推定したことによっている。近年、ゲート酸化膜は3nm程度までは障壁高さ等の物性値も変わらず、直接トンネルによるゲートリーク電流も実用上無視できることが明らかにされた¹⁻⁹⁾。これにともない、MOS電界効果トランジスタ構造はさらに0.1 μ m以下まで微細化できる推定¹⁻¹⁰⁾がされるようになってきた。単体MOS電界効果トランジスタが微細化できても、そのしきい値電圧

がバラついているとLSIとして動作はしない。LSIの回路動作を保証するためには、LSI内のMOS電界効果トランジスタのしきい値電圧偏差は10%以内が要求される。これを達成するためには、ゲート長の微細加工精度も同程度が必要であり、今後の最も大きな課題となる。さらにLSIの微細加工のもうひとつの課題はそのデザインルールを決定する、各層間のアライメント精度であり、最小微細寸法の1/3から1/4程度が要求され、微細化とともに同時に達成しなければならない課題である。そして、近年とりざされてきた超LSIの製造コストの問題¹⁻¹¹⁾である。この問題は微細加工だけの問題でなくLSIシステム・トータルでコストをとらまえるものであるが、微細化限界においては歩留りを科学したクリーン化技術を含めシミュレーション技術とからめたフィードフォワード制御技術¹⁻¹²⁾など今後の大きな課題と言える。表1.1に超LSIデバイス製造プロセスからの微細加工技術の要求をまとめた。

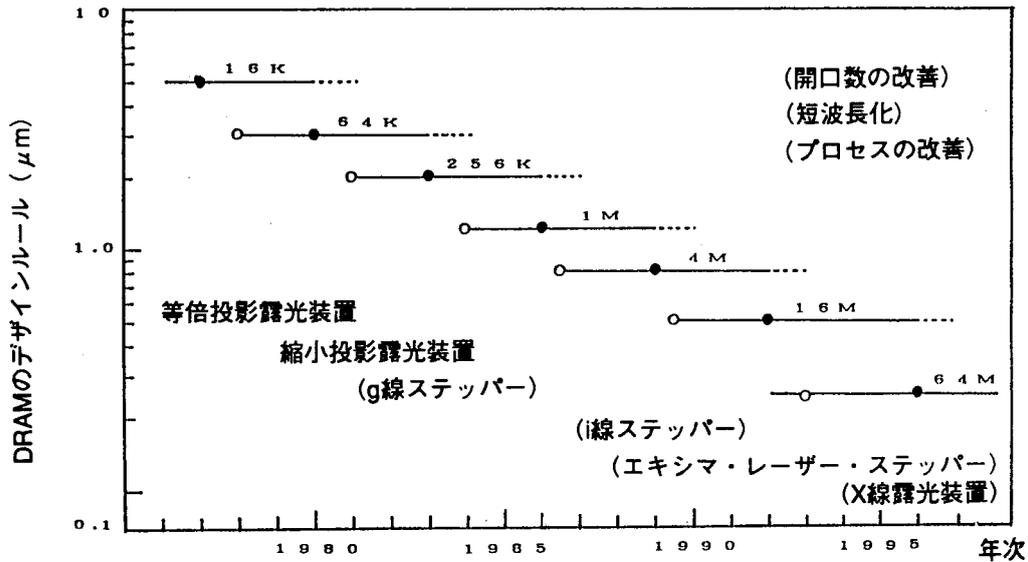


図1.1 MOSメモリーにおける主要加工寸法の推移

表1.1 超LSIデバイス製造プロセスからの微細加工技術の要求

DRAM集積度	1M	4M	16M	64M	256M	1G	4G
年次		88	91	94	97	2000	2003
寸法(μm)	1.2	0.8	0.5	0.35	0.25	0.18	0.12
光源	G線	G線	I線	I線/KrF	KrF	ArF	X線
アライメント精度(μm)	0.22	0.18	0.15	0.12	0.08	0.06	0.04
焦点深度(μm)	2.0	2.0	1.5	1.5	1.2	0.9	
寸法ばらつき(μm)	±0.12	±0.08	±0.05	±0.035	±0.025	±0.015	
レジスト感度(mJ/cm ²)	200	150	100	80	30	10	
測長再現性(μm)	0.03	0.02	0.01	0.008	0.005	0.004	
レジスト膜厚(μm)	1.5	1.2	1.2	1.0	0.7	0.5	
デバイス段差(μm)	1.0	0.8	0.5	0.35	0.25	0.16	0.1

1.3 微細加工に関する研究の歴史と現状

微細加工においては、リソグラフィ技術とプラズマエッチング技術から成り立つ。プラズマエッチング技術については、プロセスの微細化にともない、すでにプラズマ照射損傷の少ないマグネトロンRIE (Reactive Ion Etching)、ECR (Electron Cycrotron Resonance) イオンビームエッチング、ヘリコン波プラズマエッチング等のドライエッチング技術がほぼ完成^{1-13~17)}されており、その物理学の解明が主流であり加

工上の課題は少ないと言える。一方、リソグラフィ技術は微細加工寸法を直接左右するため、逆説的に言えば限界はありえないもので永続的な研究改良が求められる。ここで、リソグラフィ技術の歴史を振り返って見たい。

リソグラフィのリソとは「石」を意味し、グラフィとは書写に関する学問、方法等を示し、例えば、フォトグラフィ（写真術）、ジオグラフィ（地理学）等がある。リソグラフィは、直接的には石版印刷を指し、さらに印刷術全てをを指すことがあるが総じてプリンティングという語が良く使われている。このリソグラフィという言葉がなぜ半導体の微細加工技術の指す用語として使用されたか、定かではないが、1970年頃からである^{1-18,19)}。推測するに工程的に石版印刷と類似していることから使われたのであろう。

歴史的¹⁻²⁰⁾にリソグラフィとして最初に工業化したのは、1815年にフランスのJ. N. Niepseがアスファルトが光に感光して不溶化することを利用し、印刷用の凸版を作成したのが始まりである。1852年には、F. Talbotが重クロム酸とゼラチンの混合液を光硬化させ、グラビア用の凹版を製作した。1942年には、英国のEislerがプリント配線を発明した。1948年には、ベル研究所のW. Shockleyらによるトランジスタの発明があった。この2つの発明の後に、素子の小型化、高密度化が急速に発展しており、これらが今日のLSI時代の原点となった。

1944年に、ドイツKalle社のO. Susが、ナフトキノンジアジド化合物の光転移反応を発表しており、さらに1949年には、前述材料とノボラック樹脂を組み合わせた感光材料（レジスト）を開発した。驚くべきことに、このレジストは今日の超LSI用レジストの主流となっているポジ型レジストと基本構成において何ら変わっていない。しかし、それが半導体の分野で本格的に使用され始めたのは、 $2\mu\text{m}$ レベルの微細加工の幕開けの1970年代後半である。

1954年には、米国のEastman Kodak社のL. M. MinkらがPVAケイ皮酸エステルを発表した。これはネガ型レジストであり、1960年代後半まで、ほとんどのレジストがこのタイプで占められていた。それに代わったのがゴム系レジストで、1958年にEastman Kodak社のJ. J. Saguraらによって開発された。これらもネガ型レジストであり、ネガ型としては性能も良く、ゲル状物質の除去が容易ということもあり、その基本組成は、今日に至るまでネガ型の主流となっている。1957年頃には、リソグラフィ技術が半導体の製造に広く用いられるようになり、1960年にはプレーナ技術の発表およびMOS型トランジスタの発表があり、その後IC、LSIと急速に発達する契機となった。

1960年代に入ると、早くも、光リソグラフィによる限界を越えるため電子ビームリソグラフィの研究の芽生えが見られ、1960年代半ばには、日本の電気試験所（現電総研）が初歩的な電子ビーム露光装置を試作している。この技術がマスク製作用として本格的に実用化されたのは、1970年代中頃である。

1965年ごろからLSIの研究開発が米国で行なわれ始め、それが1970年のIntel社の1Kビットメモリー発売で結実し、LSI時代の幕開けとなった。1971年には、同じくIntel社の4ビット・マイクロコンピュータが発売された。1970年代に入ると、LSIの発展のためにより高度な微細化が必要となり、リソグラフィの研究開発が一段と加速された。この段階から、まさにマイクロリソグラフィの研究開発が本格的にスタートした。以後の微細加工の進展の主役は光リソグラフィの革新の歴史そのものと言えるが、その詳細は次章にて述べる事にし、現在に至る半導体微細加工の経緯を次に続ける。

1970年代は微細加工技術にとって、原点の種々のリソグラフィの研究開発が登場した。1975年にはIBM社から $1.2\mu\text{m}$ のデザインルールを用いた8Kビットメモリーが発表された。1ないし $1.2\mu\text{m}$ パターンによるメモリー製造は、今日でこそ、超LSIの設計ルールとして過去のものとして考えられるが、当時としては、驚異的であり、かつ、電子ビーム・リソグラフィを用いたことでセンセーショナルであった。また、反射型投影露光、X線や遠紫外線露光が登場したのもこの頃である。その後、1979年には64KビットDRAMが反射型投影光リソグラフィで開発された。1977年に実用化された、縮小投影型露光装置（ステッパー）による光リソグラフィの実用化により、1982年には、当時光リソグラフィの壁と言われた $2\mu\text{m}$ を破った、しかも、大容量化もあいまって256KビットDRAMが、また、1985年には1MビットDRAMと約 $1\mu\text{m}$ の微細加工が超LSI上で実現された。

ステッパーの出現のため、電子ビームによる直描技術¹⁻²¹⁾やX線リソグラフィ¹⁻²²⁾は、必ずしも直ちに必要とされる技術ではなくなり、開発への実用化は先送りされた。半導体産業の歴史を振り返れば、この20数年間の急激な微細化トレンドは、前述のごとく光リソグラフィの変遷と進歩であることは言うまでもな

い。その光リソグラフィにおけるの軸はレジストおよびプロセスと露光装置の研究による成果に寄るところが大きい。

これまで述べてきたように、光リソグラフィを用いた半導体微細加工は現在 $1.0\mu\text{m}$ の壁を乗り越えたサブミクロン超々LSIの量産が実現され、いままさにハーフミクロン時代の量産化の幕開けと言える。

表1.2にリソグラフィ技術と半導体集積回路の歴史¹⁻²⁰⁾をまとめた。

表1.2 リソグラフィ技術の歴史

年	半 導 体	リ ソ グ ラ フ ィ
1800 ~ 1940		<ul style="list-style-type: none"> ○ Niepse, アスファルトの感光不溶化を印刷(製版)へ応用(1815) ○ Talbot, 重クロム酸+ゼラチンを製版へ応用(1852)
1940 ~ 1950	<ul style="list-style-type: none"> ○ トランジスタの発明(1948) 	<ul style="list-style-type: none"> ○ Eisler, プリント配線を発明(1942) ○ Kalle社, O.Süsノボラック樹脂を用いた感光材料を開発(1949)
1950 ~ 1960	<ul style="list-style-type: none"> ○ トランジスタラジオ発表(1955) 	<ul style="list-style-type: none"> ○ Kodak社 Minsk, PVA ケイ皮酸エステルネガ型フォトレジスト(KPR)開発(1955頃) ○ Kodak社 ゴム+感光材料からなるネガ型フォトレジストを開発(1958) ○ 電子線による微細加工の提唱(1958)
1960 ~ 1970	<ul style="list-style-type: none"> ○ Hoerni, プレーナ技術を発表(1960) ○ ベル研, モス型トランジスタを発表(1960) ○ 集積回路実用化(1963~1964) ○ LSIに関する研究開始(1965頃) 	<ul style="list-style-type: none"> ○ フォトエッチング技術の普及 ○ 電子線微細加工実験(1961) ○ 電子線露光装置出現(1967) ○ IBM, PMMA 電子線レジスト発表(1968)
1970 ~ 1980	<ul style="list-style-type: none"> ○ Intel, 1Kbitメモリー発売(1970) ○ Intel, 4bitマイクロコンピュータ発売(1971) ○ IBM 8Kbitメモリー(最小寸法$1.2\mu\text{m}$)発表(1975) ○ 超LSI共同研究組合発足(1976) 	<ul style="list-style-type: none"> ○ プラズマエッチング(1972頃) ○ X線露光発表(1972) ○ 遠紫外線露光発表(1975) ○ RIEの発表(1974~1976頃) ○ シンクロトン照射発表(1976) ○ 電子ビーム露光実用化(1977頃) ○ GCA社, ステッパーを発表(1977) ○ イオンビーム露光発表(1979)
1980	<ul style="list-style-type: none"> ○ VHSIC計画発足(1980) ○ 256KdRAM発表 ○ 1MdRAM発表 	<ul style="list-style-type: none"> ○ ステッパー普及 ○ I線ステッパー開発

1.4 本研究の目的

本研究では、以上述べてきたような背景により、 $1\mu\text{m}$ 以下から $0.2\mu\text{m}$ 領域の微細加工限界を研究、追求すべく、特に紫外線や遠紫外線を用いた光リソグラフィ技術によって達成することを目的とした。検討はレジストプロセス技術あるいはレジスト材料からのアプローチと、露光装置からのアプローチの両者から行ない、計算機シミュレーション技術等も駆使し実際の超LSI上においても検証を行なった。

本研究対象である、光リソグラフィ技術は前章1.3にも述べた歴史的背景のほか、工業的、経済的、つまり量産性に非常に優れた技術であるため、その微細加工能力を進展させ、より汎用的に簡易的に使用実現することは、今後のシステムULSI時代に大きな価値がある。

本研究は、光リソグラフィ技術の微細化限界¹⁻²³⁾を追求すべく、g線ステッパーによる解像限界である $1\mu\text{m}$ 微細加工をLSIの実段差基板上で実現するため、レジストを多層構造にした二重露光法¹⁻²⁴⁾プロセスを開発し、そして、 $1\mu\text{m}$ の微細化の壁を破るため、光露光の解像度や焦点深度を改善するコントラスト・エンハンスト・リソグラフィ技術のプロセスおよび材料を開発し¹⁻²⁵⁾、さらに、短波長露光であるi線を用いたハーフミクロン・パターンの微細加工を実現するための表面処理プロセス技術¹⁻²⁶⁾を検討した。最後に、光リソグラフィ技術による超微細加工の実現に、最も可能性の高い短波長エキシマレーザー光源¹⁻²⁷⁾を採用し、露光装置¹⁻²⁸⁾、レジスト¹⁻²⁹⁾およびプロセス¹⁻³⁰⁾を研究し、光リソグラフィの限界を明らかにすること¹⁻³¹⁾を試みた。同時に、未来半導体生産システムを考慮したリソグラフィ技術を考察し^{1-32~34)}、本研究の目的を完遂することにした。

1.5 本論文の構成

本論文は、全10章から成っており以下に各章毎の内容の概要を順に追って述べる。

第1章序論では、本論文のはじめとして、半導体超LSIの微細化の技術動向や微細加工に関する研究の現状について概説して、本研究を始めるに至った周囲状況、および、本研究の歴史的背景を明らかにした。さらに、本研究の概要を述べ、目的と意義を明らかにした。

第2章では、まず従来より半導体超LSI製造に用いられている光リソグラフィ技術を中心にした微細加工の目的と概要を述べ、さらに、その露光装置やレジスト材料の種類、レジストパターン形成技術について詳細を述べた。次に、これらの技術の現状動向を述べると共に、微細加工を達成する上でのそれぞれの意義、有効性を論議し、課題を明らかにした。

第3章では、第2章の課題に基づき、 $1\mu\text{m}$ 領域の微細パターン形成技術のレジストプロセス側からのアプローチとして、考案・考察を進めてきた二重露光法（DEM: Double Exposure Method）の研究を述べる。特にg線ステッパーを用いて段差上に限界解像度 $0.8\mu\text{m}$ のパターンを寸法変化なく形成できることを実証する。

また、シミュレーション解析によって微細パターン形成効果を確認し、二重露光法は、 $1\mu\text{m}$ からサブミクロン領域のリソグラフィとして、プロセス的に簡易であるという利点を生かして期待できることを論じる。

第4章では、プロセス側のアプローチであるサブミクロン微細パターン形成方法のうち、簡易的な方法であるコントラスト・エンハンスド・リソグラフィ(CEL: Contrast Enhanced Lithography)について論じる。新たに開発した水溶性のCEL材料を用いた検討に関して詳細を述べ、g, i線リソグラフィとも水溶性CEL材料を用いることにより、パターンの解像性・形状の向上、露光エネルギー・焦点深度変動に対するパターン寸法変動の低減、マスク忠実性の向上などの利点が確認され、それぞれのリソグラフィにとって非常に有益であることを示し、計算機シミュレーション解析により、CELによるサブミクロンからハーフミクロンのパターン形成に対する可能性を検証する。

第5章では、単層レジストの性能を簡易的な方法で向上させるアルカリ表面処理法（HARD: High Aspect Ratio Resist by Alkaline Disposal）を考案し、i線リソグラフィと併用したハーフミクロン領域の高コントラスト・レジストパターン形成について論じる。HARD法は、そのプロセス簡易性の他に、再現性やコストの低さなどから、工業的に非常に有用であると考えられ、i線レジストの高性能化とあいまって、ハーフミクロン領域の微細加工技術に有望であることを明らかにする。

第6章では、光リソグラフィの露光装置側からの短波長露光のアプローチとして、KrFエキシマレーザーのサブハーフミクロン領域の微細加工の可能性を、装置構成とレジスト材料の両者の基礎から実証する。

第7章では、最初に $0.35\mu\text{m}$ ルールデバイス、64M DRAM開発に、研究成果を基にしたKrFエキシマレーザー・リソグラフィ技術を応用することにより、可能であることを実証する。さらに、高感度化、高解像度化そして高安定性化の観点からレジスト材料設計を進め、 $0.25\mu\text{m}$ デザインルールの超LSIのリソグラフィ・プロセスに使用可能なKrFエキシマレーザー・リソグラフィ対応化学増幅型ポジレジストの詳細を述べる。章の最後に、プロセス余裕度を向上させる超解像技術の課題を改善する補助パターン配置技術をKrFエキシマレーザー・リソグラフィに応用した結果について論じる。

第8章では、サブクォータミクロンの微細加工の研究として、ArFエキシマレーザー縮小投影レンズに、レンズの透過率を向上するために非球面レンズを有する投影レンズ光学系を開発し、さらに、ArF光に透明性の高い化学増幅型ポジレジストによるサブクォータミクロン・パターン形成を行った結果を論ずる。

第9章では、21世紀を睨んだリソグラフィ技術の微細加工はどうあるべきかを論じた。まず、リソグラフィの最も定量化されていないウェット現像をドライ化したシリレーションの研究と、設計データを忠実に再現するためリソグラフィ・シミュレーションをベースに、リソグラフィ結果を予測し設計データを修正する研究について論ずる。

最後に、第10章では本研究のまとめと今後の展望として総括して述べる。

図1.2に、本研究の体系を微細加工トレンドを考慮してまとめた。

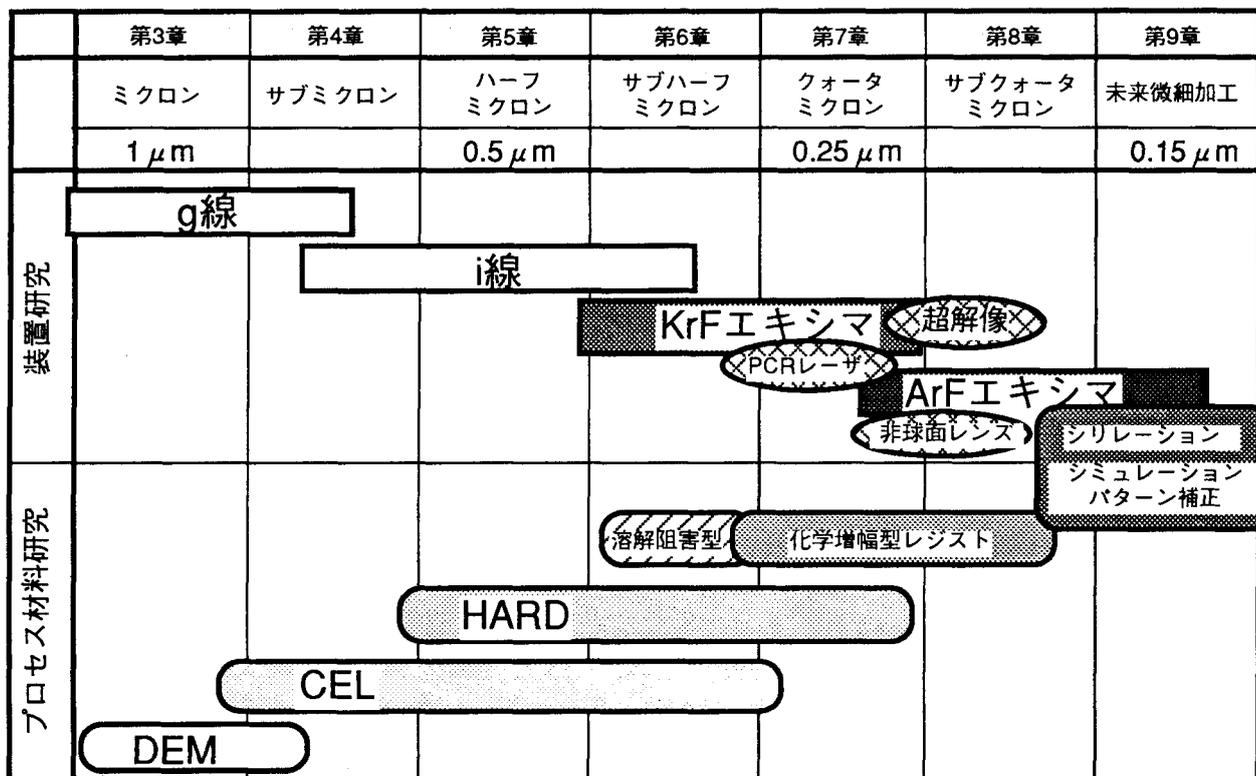


図1.2 本研究の体系図

第2章 リソグラフィを中心とした微細加工技術の現状と課題

2.1 緒言

超LSIに至る高集積化の開発はめざましく、その進展はリソグラフィ技術改良の歴史そのものであった。その中でも光を用いた光リソグラフィは、その経済性の理由から半導体LSIの量産に最も適するため盛んに用いられ、さらに改良のための研究開発が現在もなお行なわれている。

現在、16M DRAM²⁻¹⁾がいよいよ量産段階に入り、そのデザインルールは0.5 μ mと言うハーフミクロンの微細加工が実現されている。さらに各社が初期の開発試作をした64M DRAM²⁻²⁾では、0.5 μ mの壁を破る0.4 μ mというサブハーフミクロン時代に突入している。しかもその製造あるいは試作がすべて光リソグラフィで行なわれていることから、その重要性、有効性が理解できる。さらに、クォータミクロン時代の主役である256M DRAMに至っては、研究開発のターゲットはいかに光リソグラフィで実現するかという点にあると言っても過言でない。

なぜこのように光リソグラフィが有望視され、かつ使用されていくのであろうか。もちろん、光リソグラフィに代わる他のリソグラフィ技術は、いつの時代にも提案され研究が続いている。その代表は、電子ビーム²⁻³⁾とX線リソグラフィ技術²⁻⁴⁾であろう。しかしながら、電子ビームリソグラフィでは、その性格上一括転写が難しく、描画速度が劣りスループットが悪いという欠点がある。そのため、現在ではウェハ直接描画露光よりも、マスク、レチクル製作に使用されているのが現状である。しかしながら、多様化する半導体超LSIニーズから、個別半導体(ASIC: Application Specification Integrated Circuit)分野の製造で、微細パターン追求でなく開発商品化のTAT (Turn Around Time) を縮小するために、使用する用途が出てきている。また、最近では描画速度を改善するため、セル/ブロック電子ビーム露光²⁻⁵⁾と呼ぶ、ビーム成型部に規則的なステンシルマスクを用いて、DRAMのような規則的パターンの描画面積を稼いで描画速度を増すものである。但し、いまのところ先行する研究開発のデバイスに使用するケースが多く、量産ベースに電子ビーム・リソグラフィを使用するには、相当な技術的ブレイクスルーが必要である。

一方、X線リソグラフィについては、早くから光リソグラフィの次の担い手として有望視されていた。X線はその波長領域が数Åから数10Åということで微細化が可能など、それなりの特徴を持っている。しかし初期の研究レベルでは金属に電子ビームを照射してX線を得るポイントX線源では、そのパワーと半影はけの影響でサブミクロン・デバイスに耐えるには非常に難しい評価を得ていた。現在ではパワー向上のため各種の線源が研究され、プラズマX線源や将来的なシンクロトロン放射光 (SOR: Synchrotron Orbital Radiation) を用いた露光が研究されている²⁻⁶⁾。しかしながら、X線露光の最大の問題点は、その性格上縮小投影が非常に難しいため、マスク製作に高い精度が要求されることである。つまり、ウェハ露光以上の精度が要求される上、X線遮光性の高い物質を用いて高品質のマスクをつくらねばならないなど、未解決な問題が残っており、位置付けとしてはより未来の技術といえる。このように、他のリソグラフィ技術が光リソグラフィ技術を越えられない現在、光リソグラフィをいかに延命できるかが、今後、超LSIの発展に与える影響は大きいのである。図2.1に、現在までと今後のデザインルールと露光技術の推移について示す。

本章では、光リソグラフィの限界はどこか²⁻⁷⁾について、その変遷と原理に触れ現状と課題について述べる。

2.2 光リソグラフィの変遷

光露光技術には大きく分けて3種類、コンタクト、プロキシミティそしてプロジェクション・タイプがある。

コンタクト露光²⁻⁸⁾はレジストを塗布したウェハを直接マスクに密着させて露光する方法であり、半導体

集積回路製造の初期の時代から3 μ mルール程度までの製造に用いられていた。コンタクト露光では0.5 μ m以下のレジストパターンが形成されたという報告もあり、解像度では非常に優れている。しかしながら、コンタクト露光では欠陥が多く歩留まりが向上しないという問題があった。

そこで登場してきたのが、プロキシミティ露光²⁻⁹⁾である。これは、マスクとウェハを10から25 μ m幅にギャップをあけて露光する方法である。このギャップによってマスク欠陥を減少させ、歩留まりを向上させようというものであった。しかしながら、このギャップによりフレネル回折領域が発生し、解像度は劣化する。解像度は $(\lambda g)^{1/2}$ で決定される。ここで λ は露光波長、 g はマスク・ウェハ間ギャップである。ちなみに解像度は2から4 μ mであった。

そして第3の方法として登場してきたのが、同様にマスクダメージを防ぐためのプロジェクションタイプである。プロジェクションタイプは反射等倍式²⁻¹⁰⁾と屈折縮小式²⁻¹¹⁾に分けられる。反射等倍式はスキヤニング・プロジェクションとも呼ばれ、オフナー型の大型反射ミラーの色収差の少ない領域にマスクイメージを等倍に投影し、ウェハに走査しながら結像するものである。解像度は1.5 μ m程度まで達成された。この時代から露光装置は高価になり、設備投資に占めるリソグラフィ・ツールの割合が飛躍的に増大してきた。そして、現在、最も主流として使用されるのが屈折縮小式のステッパーといわれる方式である²⁻¹²⁾。この方式では、縮小した光学系を組めることと、1チップ毎にアライメントが可能のために高精度な合わせができるという利点がある。現在では、このハード的な手法が主流である。なお、この第3の方式の解像度は回折限界で決定される。回折限界(Diffraction-Limited)は、大体 $0.5(\lambda/NA)$ で示される。ここでNAは、プロジェクション光学系の開口数(Numerical Aperture)である。さらに、焦点深度は $\pm \lambda/2(NA)^2$ で示される。この理論とステッパーの現状と課題について次節で詳しく述べる。

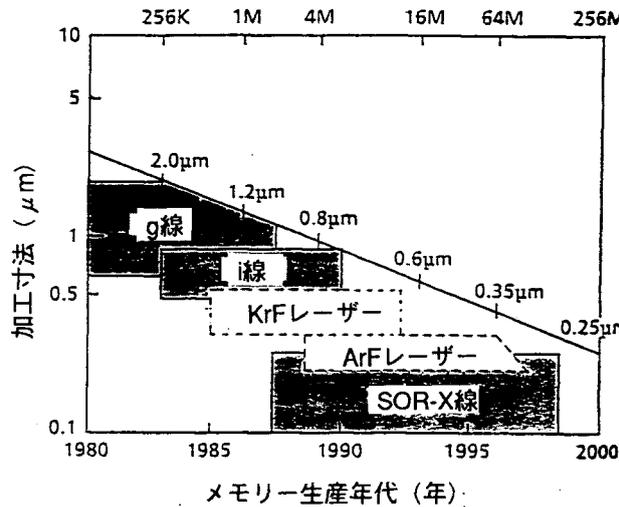


図2.1 今後のデザインルールと露光技術の推移

2.3 光リソグラフィの解像度

光フォトリソグラフィ、特にプロジェクションタイプの解像度(R: Resolution)は古典的なRayleighの法則で、かつ経験的な次式で示される。

$$R = k \lambda / NA \quad (2.1)$$

ここで、 k はプロセス、レジストの性能によって決定される定数、 λ は露光波長であり、NAは前述したようにレンズの開口数である。 k 項はプロセスファクタ、 λ/NA は光学指数とも呼ぶ。

一方、焦点深度(DOF: Depth of Focus)は同様に、

$$DOF = \pm \lambda / 2(NA)^2 \quad (2.2)$$

で与えられる。

図2.2 (a) に、プロセスファクタ k を0.8にした時のレンズ開口数と解像度の関係を示す。図中の●印は、現在まで公表されているステッパーレンズの値を示している。図中には示されていないが、ステッパーレ

レンズの露光サイズが大面積であることも重要である。(2.1)、(2.2)式から明かのように、NAの増大によって解像度を向上させることが出来るが、超LSIチップに必要な大面積露光エリアがまかなえる高品質なレンズ加工は一般に難しく、NAの増大にだけ頼るわけにいかない。さらに、焦点深度はNAの増大と共に減少するので、NAをただ単に増大するのは量産上問題がある。

一方、露光波長を短波長化することによって解像度を上げることが出来る。現在のステッパーは、高圧水銀ランプの発光スペクトルのg線(436nm)、i線(365nm)、そして遠紫外線光源として有望なエキシマレーザの発振光のKrF(248nm)、ArF(193nm)の波長を利用して設計されている。g線ステッパーはサブミクロンルールの量産露光装置として脚光を浴び、高NA化もほぼ限界の0.6にまで達し、ほぼ主役交代の時期にある。現在では、i線ステッパーの量産工場への導入は開始されて間もなく、サブハーフミクロンからハーフミクロンのデザインルールに対応されているのが現状である。しかし、365nm以下の波長では、色補正をするための光学ガラス材料の選択の制限により、良質なレンズの製造が難しくなる。

ところで、光学指数とともに重要なのが、(2.1)式のプロセスファクタ k である。プロセスファクタ k を0.6にしたときの解像度とNAの関係を図2.2 (b) に示す。 k ファクタを小さくすることで波長に関係なく解像度を向上できるため、この面からのレジストプロセスの研究が盛んである。

しかしながら、光リソグラフィは前述の解像度とともに、露光面積が大きくなければならず、かつ、アライメント精度も向上させなければならない。特に、アライメント精度は、いかなるリソグラフィ技術にも共通であり、光リソグラフィに限らず重要な問題である。

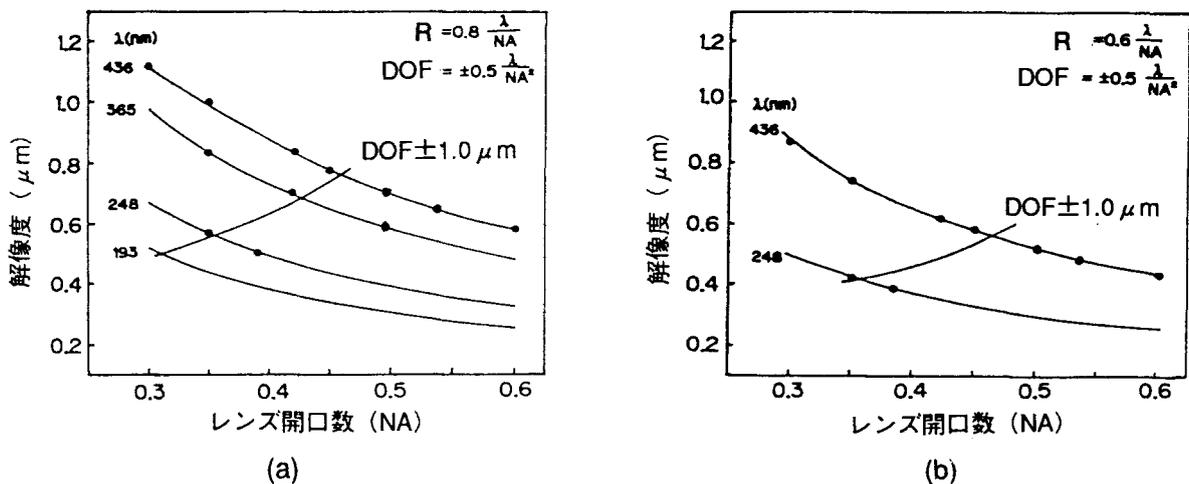


図2.2 レンズ開口数、波長による解像度、焦点深度の関係 (a) $k=0.8$ 、(b) $k=0.6$

2.4 プロセス・ファクタ

2.4.1 レジスト材料

サブミクロン・パターン形成用レジストに必要なとされる特性は、微細加工を高スループットで形成できることである。つまり、感度、解像度、および耐ドライエッチ性が高く基板への密着性も高いことが要求される。また、現在の主流は露光部分が現像液に溶解するポジ型である。図2.3にポジ型およびネガ型レジストのプロセスフローを示す。

ネガ型レジスト²⁻¹³⁾は一般的に環化ゴム系の樹脂とビスアジド系化合物とを混合し、有機溶剤に溶かしたもので、ビスアジド系化合物が露光により感光して架橋や重合が生じて、キシレン等の有機溶媒系現像液に対して不溶化する。図2.4にそのモデルを示す。ビスアジド化合物は光により窒素を放出して活性なナイトレン基を形成し、ゴム分子間で架橋する。すなわち、ネガ型レジストでは露光部分が架橋剤により

網目構造になって硬化し、露光部分と未露光部分の現像液に対する溶解差を利用してパターン形成がなされる。従って、感度が高く、耐ドライエッチング性の優れたものが得られるが、微細加工用としては、一般に解像度に問題がある。解像度が劣るのは現像時に露光部分が現像液を吸収して膨潤するためである。

ポジ型レジスト²⁻¹⁴⁾は、露光によりポリマーが分解したり溶解阻害剤が分解して、露光部分が現像液に可溶となる性質を利用するものである。一般に、キノンジアジド系の感光剤とアルカリ可溶性のノボラック樹脂とを混合し、有機溶剤に溶かしたものが使用されている。混合物そのものは現像液であるアルカリ水溶液には不溶性であるが、露光により図2.5に示すようにキノンジアジドが分解された後インデン・カルボン酸が形成され、アルカリ水溶液に可溶性となる。従って、高解像性が得られ易く、また、未露光部の分子量が高いためネガ型のような膨潤が発生しないメリットがある。

i線ポジレジストの性能は1989年より現在にかけて飛躍的に改善された²⁻¹⁵⁾。その開発経緯はg線レジストの高性能化の成果が活用された。ただし、i線領域では感光体の光吸収が増加するため、図2.6に示すように一般的に感光体のベンゼン・フェノンの吸収を避け一部に感光基を導入したノボラック樹脂を用いることで最適な透明度とブリーチング性を持たせている。

しかしながら、短波長エキシマレーザー露光用として、使用可能なレジストは現状市販されておらず、活発に研究開発が進められている段階である。

現在市販されているナフトキノンジアジド・ノボラック樹脂系のポジ型遠紫外線レジストは、KrFエキシマレーザーに強い吸収を示すために良好なレジストパターンは得られない。この原因は、レジストに用いられるベースポリマー（樹脂）自身が露光光に対して大きな吸収を持っているか、レジスト中の感光剤の光反応性が良くないことにある。

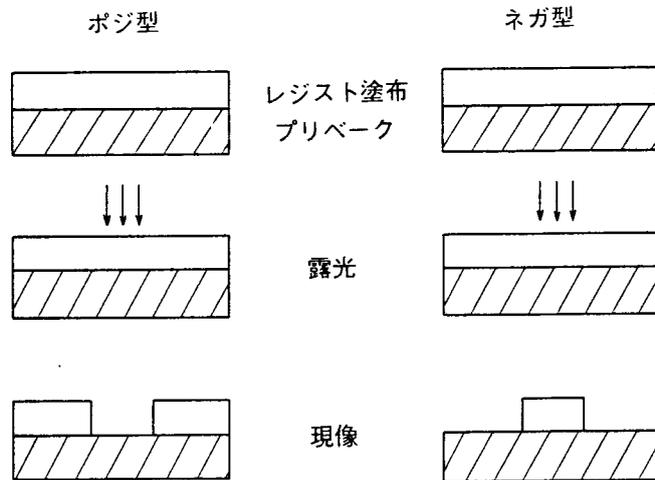


図2.3 ポジ型およびネガ型レジストのプロセスフロー

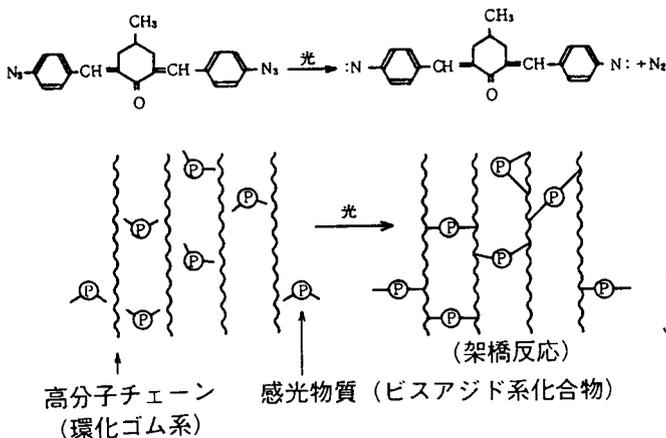


図2.4 ネガ型レジストの反応モデル

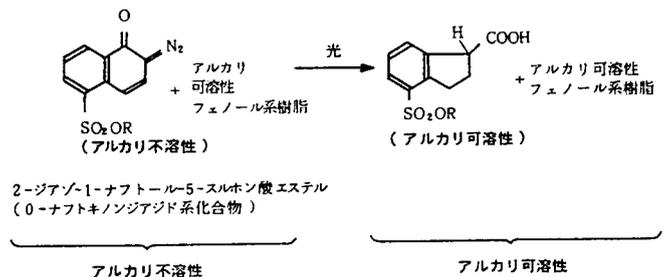


図2.5 ポジ型レジストの反応モデル

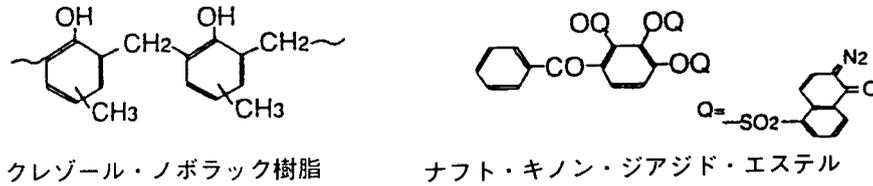


図2.6 ポジ型レジストの高性能化のアプローチモデル

2.4.2 多層レジスト技術

前節のように、現状の光ステッパーで、レンズ開口数の向上によりサブミクロン領域のパターンが得られてきていることがわかった。一方、プロセス・ファクタ k は、プロセス・レジストの性能と下地基板の材料と段差によって決定される。

焦点深度を浅くせず解像度を向上させるには単層レジストから多層レジスト技術への展開が有効である。多層レジストはプロセスファクタを向上させることが可能である。本来、レジストには十分な解像度があるが、実際のプロセスでは、基板からの定在波の発生、基板段差からの乱反射やレジスト膜変動等により、パターン寸法が変化し解像度は低下する。この問題点を解決し、さらに解像度を高めるのが多層レジストである。

多層レジストを大別すると、ドライエッチングを使用してパターンを転写する方法と、従来からのウェット式の現像によって転写する方法に分けられる。代表的な多層レジストシステムを列挙すると以下の通りである。

○ドライ現像タイプ

- (1)3層レジストシステム(TLR : Tri-Layer Resist)²⁻¹⁶⁾
- (2)Si含有2層レジストシステム²⁻¹⁷⁾
- (3)シリル化レジストシステム²⁻¹⁸⁾

○ウェット現像タイプ

- (1)PCMレジストシステム(PCM : Portable Conformable Mask)²⁻¹⁹⁾
- (2)イメージリバーサル(IR : Image Reversal)²⁻²⁰⁾
- (3)反射防止膜プロセス(ARC : Anti Reflection Coating)²⁻²¹⁾

図2.7に体系的に多層レジストシステムのプロセスフローを示す。

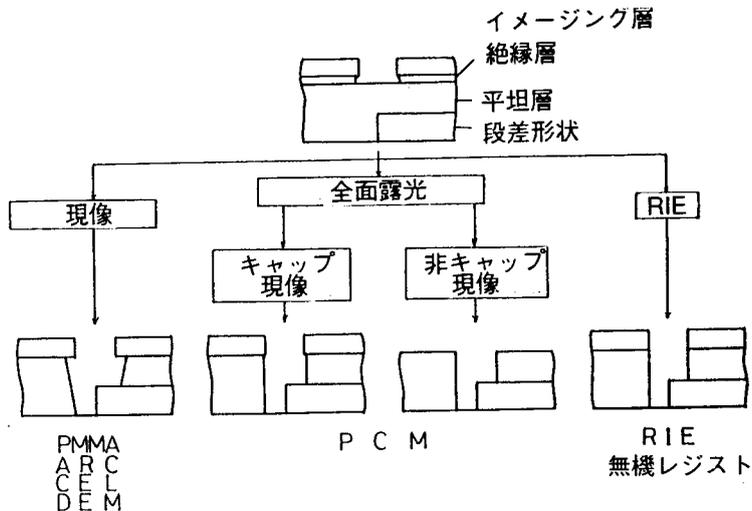


図2.7 多層レジストシステムのプロセスフロー

多層レジスト技術を用いた微細パターン形成技術としては、IBMのHazkis, Tai^{2,22,23)}らによる3層レジスト法が最も著名である。これは、下地平坦化層上にSiO₂の層を形成し、その上の薄いレジスト層を解像良くパターン形成した後、これをマスクとして中間層であるSiO₂の層をドライエッチング、さらにこのSiO₂のパターンをマスクとして下層をエッチングして最終のパターンを形成するという方法である(図2.8)。図2.9には実際に3層レジスト技術によりパターン形成したSEM写真を示すが、非常に高アスペクト比なパターン形成が可能である。

この方法によれば、下地基板の段差に関係なく、しかも高解像のパターン形成が制御可能となるが、ドライエッチングの条件により非常にパターンの形状・寸法などの管理がむずかしく、生産性も極端に低下することから、実際の生産には導入が非常に難しい。

この3層レジスト法の複雑さを低減するものが2層レジスト法である。2層レジスト法の1つの案は、3層レジスト法の如き中間層を使用せずに、直接Siの含有したレジストを形成する方法である^{2,24,28)}。この方法によれば、上層のSiを含有したレジストが下層の下担化層をエッチングする際にSiO₂化して下層のマスクとなるために、3層レジスト法に比べて、エッチング工程が1つ減ることになるが、依然としてスループットの低下等は避けられない(図2.10)。

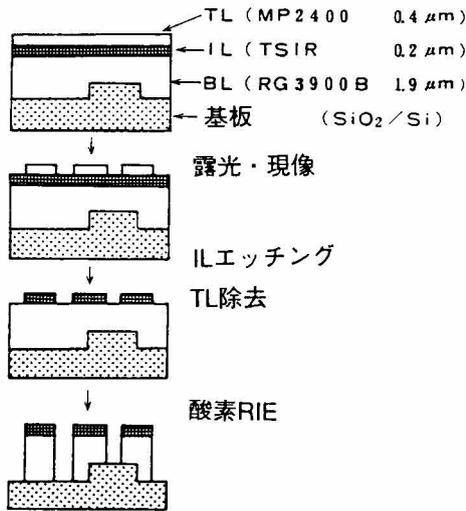


図2.8 3層レジストのプロセスフロー

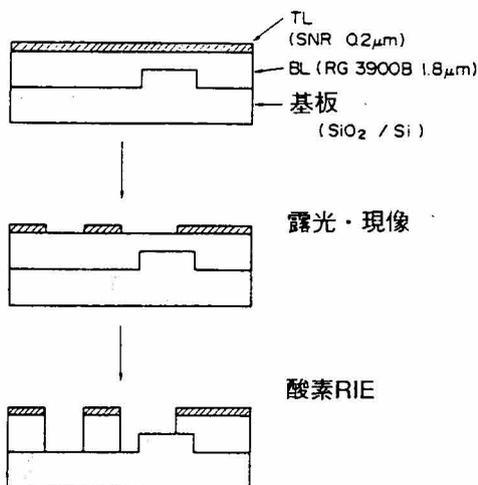


図2.10 Si含有2層レジストのプロセスフロー

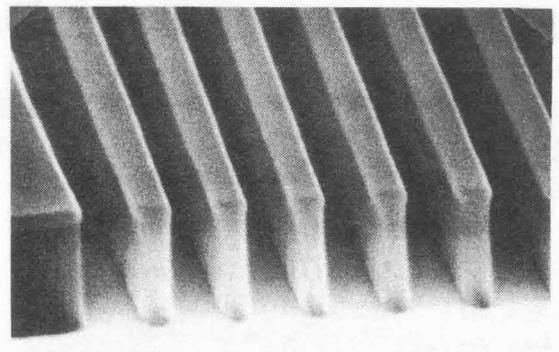


図2.9 3層レジスト技術による0.5 μm L&SパターンのSEM写真

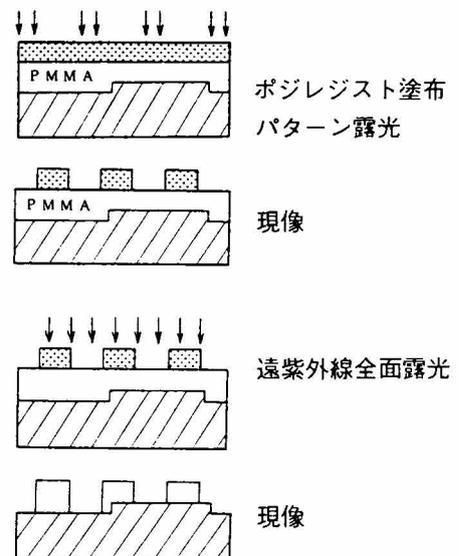


図2.11 PCMプロセスのプロセスフロー

このような、エッチング工程の入った複雑なプロセスを回避する2層レジスト法はIBMのB. J. Lin²⁻²⁹⁾により始められた。この方法は、図2.11に示す如く、下層に遠紫外線レジスト、上層に紫外線レジストを形成し、上層の紫外線レジストのパターン形成後、上層パターンをマスクとして遠紫外線を一括照射して現像し、上・下層の2層レジストを形成するものである。

この方法は、前述の様なプロセス的複雑さは低減されるものの、上・下層の混合や上層パターンの遠紫外線マスクとしての不備などの問題点がある。

E. Ailingら²⁻³⁰⁾は単層レジストでの高解像性を目的とした、イメージ・リバーサル法を考案した。この方法は、通常の露光後にアンモニア処理を施して、ポジ型レジストの露光部に生じたカルボン酸を消去し、続いて行う紫外線全面照射・現像により、パターンの反転したネガ型のパターンを得るものである²⁻³¹⁾

(図2.12)。この方法は、アンモニア処理に時間がかかり生産性が低下し、また、パターンのプロファイルが高解像ではあるものの逆テーパ状となるという問題点がある。最近では、アンモニア処理の代わりにポストバークのみでイメージ・リバーサルが可能なレジストも開発されているが、パターンの逆テーパ現象やポストバークや紫外線全面照射の条件の設定が難しいという問題点が存在する。

以上、述べたように従来の微細パターン形成に対応するレジストプロセスは、それぞれ独創的であるが、実デバイス製造には不利な点が散存していたことは上記の通りである。

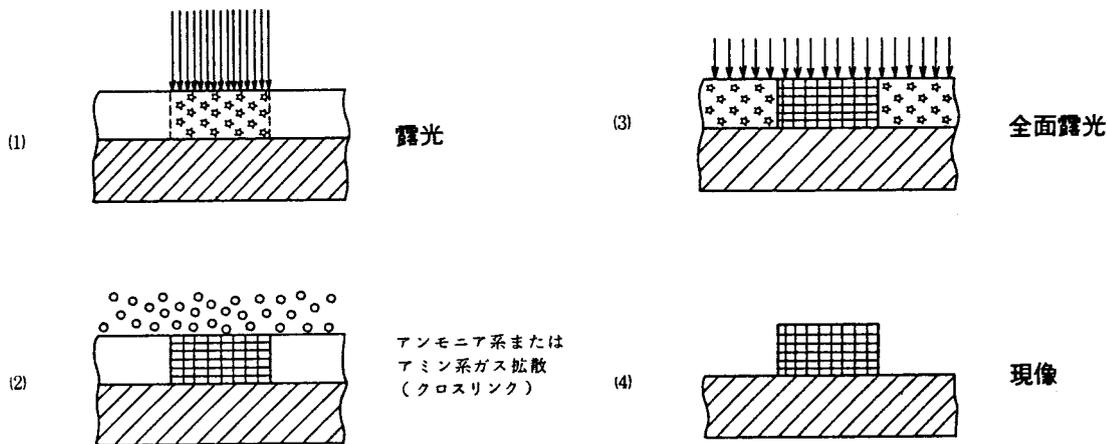


図2.12 イメージ・リバーサル法のプロセスフロー

2.5 レンズ開口数

レンズの開口数NAはどこまで高くできるのであろうか。この解答をだすのは非常に難しい。理由としては、レンズ加工は習熟度曲線のように、ある値まで期間を費やせば達成されてきたという実績があるからである。

現在、市販されている、20mm□以上の実用的な露光面積を持ち最も高い解像力を持つ投影レンズは、g線を使用するNA=0.54で、0.4μmパターンが得られている。図2.13に、その電子顕微鏡(SEM)写真を示した。ここで、説明をあえて加えておくがあくまでも平坦な基板上でのチャンピオンデータであり、その寸法でそのまま実デバイスに適用することは、デバイス上の段差や反射を考慮すると非常に難しい。しかしながら、このデータは、波長よりも狭いということで驚きの結果といえる。当然のことながらg線リソグラフィ対応の高性能レジストの改善によるところが大きい。レンズ設計と加工技術の改善により、20mm□、NA=0.6が最終的な限界と思われる。その達成には時間と習熟がかかるが、レンズ性能は着実に進歩してきている。

一方、i線投影レンズでは、g線に比べて短波長になった分、レンズ材料での高い透過率の硝材が少なく

なるため、設計が難しくなるので、g線レンズより開発が遅れているのが現状で、近年まで20mm \square の露光面積を有するi線ステッパの出現がなかった。しかし、最近ようやく20mm \square 、NA=0.50の性能をもつものが市販されてきた。図2.14に、そのステッパによるレジスト写真を示した。0.35 μ mパターンを解像しているのがわかるが、i線露光によるそのレジストの形状を比べると、レジストの吸収が増えるため悪い。しかしながら、g線、i線の優位性については、高NA化、大面積化にg線のほうが有利であるが、レンズ加工とレジスト性能の技術的バリアを乗り越えれば、g線に比べて15%以上解像度が向上し、かつ、焦点深度も深いi線の方が主流になるであろう。i線レンズのNAの限界もg線と同様に0.6と予測される。

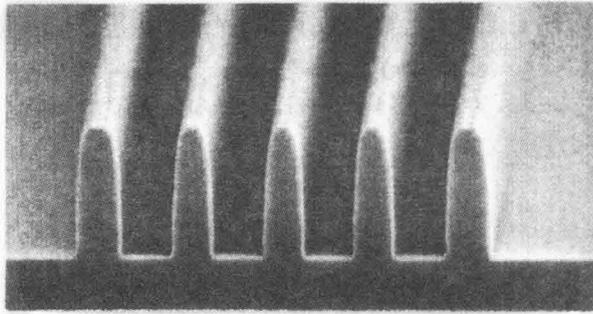


図2.13 g線ステッパ (NA=0.54) による
0.4 μ m L&SパターンのSEM写真

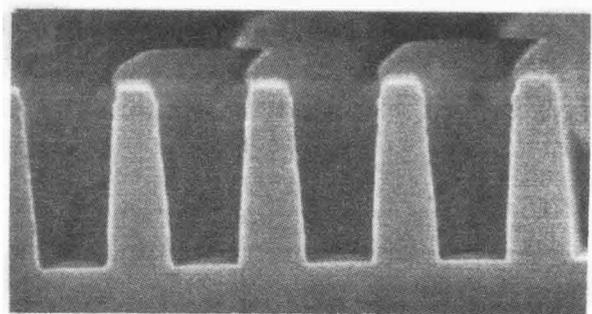


図2.14 i線ステッパ (NA=0.50) による
0.35 μ m L&SパターンのSEM写真

2.6 露光波長

エキシマレーザーを用いたリソグラフィ技術は、光での限界といわれていた0.5 μ m以下の微細加工が可能なることにより、近年注目されている。エキシマレーザー露光では、露光波長が極めて短いため、露光光源として超高圧水銀灯のg線やi線を用いた従来型ステッパと比較して格段に高い解像度が期待できる。

例えば、すでに開発されているエキシマレーザーでも、波長は193nm (ArF)、248nm (KrF)、308nm (XeCl) 等があり、ArFレーザーを用いれば最大解像度は0.15 μ m程度まで期待できる。また、光学レンズの使用による縮小投影露光が可能なること、マスク製作が容易なること、スループットが高いこと等々数々のメリットがある。従って、エキシマレーザーを用いた露光装置は、サブミクロン・レベルの微細加工に極めて有望である。

短波長で高出力が得られるエキシマレーザーをリソグラフィに応用しようという試みは、既に数多くなされている。例えば、密着露光法としてはK.Jainら²⁻³²⁾のXeClレーザー(308nm)を用いたものや、H.G.Craigheadら²⁻³³⁾のF₂レーザー(157nm)を用いたものがあり、それぞれの新しい露光技術としての可能性を詳しく検討している。また、投影露光の例としては、中瀬ら²⁻³⁴⁾のXeClレーザーと従来より反射投影露光装置に採用されているオフナー形反射光学系を用いたもの、あるいはD.J.Ehrlichら²⁻³⁵⁾の、ArFレーザー(193nm)とSchwartzchild形反射対物ミラーを用いたものがある。

反射光学系では、色収差補正の必要がなく反射ミラーもAl蒸着膜が利用でき、短波長化が比較的容易に行える特徴があるが、縮小系の光学系によるステップ・スキャン方式が考えられるが、装置が非常に複雑になる。

屈折レンズ形縮小光学系を用いたエキシマレーザー・ステッパを実現するには、大きく分けて二つの方法がある。その一つは、従来のステッパと同じく色収差補正方式による縮小レンズに、単に、露光光源として超高圧水銀灯の代わりにエキシマレーザーとを組み合わせたものである。この方式には、既に、G.M.Dubroeuqら²⁻³⁶⁾のKrFレーザー(248nm)と紫外線顕微鏡の対物レンズを用いたもの(図2.15)や中瀬ら

²⁻³⁷⁾のものがある。ところが色収差補正方式は、レーザーのスペクトル分散に対する自由度はあるが、硝材の制限などにより大面積露光用のレンズ設計が難しく、16M DRAMなどのメモリーデバイス製作に必要とされる20mm \square 以上となると、実現の可能性が小さいと思われる。

他の一つは、単色設計による縮小レンズと、露光光源として、単色光に近いレーザー光源とを用いたものである。この技術分野は未踏の領域である。

なお、残された問題としてアライメント精度の向上がある。次世代の超LSIには、実用レベルで0.35 μ mの解像度と $\pm 0.1 \mu$ mのアライメント精度が要求されている。従って、今後この露光装置を生産工程に導入していくためには、アライメント精度の向上が必須であろう。

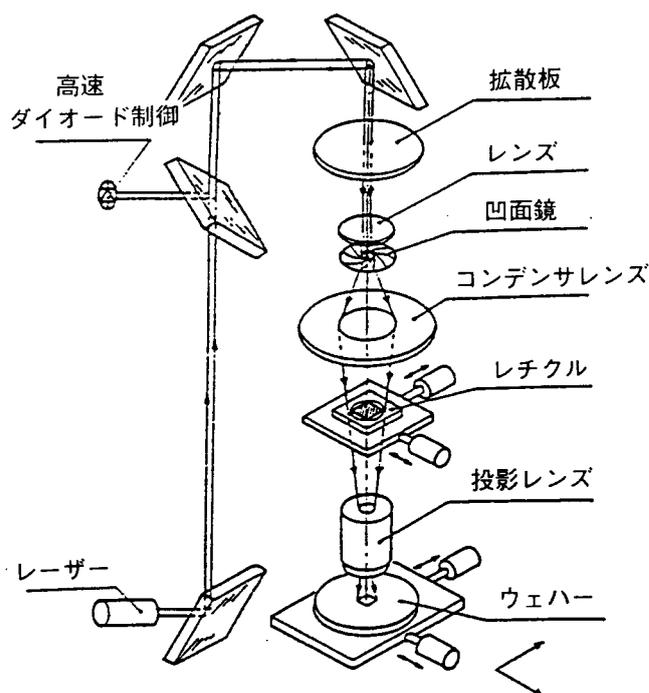


図2.15 Debroeucq²⁻³⁶⁾らの発表したKrFエキシマレーザー縮小投影光学系

2.7 結言

従来より半導体超LSI製造に用いられている光リソグラフィ技術を中心とした微細加工の目的と概要を述べ、さらに、その露光装置やレジスト材料の種類、レジストパターン形成技術について詳細を述べた。次に、これらの技術の現状動向を述べると共に、微細加工を達成する上でのそれぞれの意義、有効性を論議し、課題を明らかにした。また、光リソグラフィの限界はどこかについて、その変遷と原理に触れ現状と課題について論じてきた。

光リソグラフィの解像性を決める露光という観点から、ソフト面でのプロセス・ファクターとハード面での露光装置の光学指数、つまり、レンズ開口数と波長のそれぞれの進展が、サブミクロン以下の微細加工にブレークスルーを与えることがわかった。

本研究では、プロセス・材料面と露光装置面での両方から研究を進め微細パターン形成の新しい微細加工技術の試みを行なうことが、非常に重要であることがわかった。

第3章 二重露光法による1 μ mパターン微細加工

3.1 緒言

本章では、リソグラフィ技術のパターン微細加工としてのソフト面、すなわちレジストプロセス側からのアプローチとして、二重露光法 (DEM: Double Exposure Method)^{3)~4)}に関する技術の研究を述べる。

従来の光を用いる縮小投影露光技術では、1 μ m以下の微細パターン形成にレンズの高性能化や、露光波長の短波長化によって限界を追求する開発が行われている。しかし、露光面積や焦点深度などの点で難点がある。また他に、光以外の放射線、例えば電子線、X線、イオン線などのリソグラフィがあるが、その実用性、経済性を考慮すると技術的に難しい課題を持っている。

さらに現実の素子形成プロセスを考えてみれば、光リソグラフィあるいは他のリソグラフィにおいても、装置あるいは物理的限界解像度を実際の超LSIの基板上に形成することは困難である。その問題点は、実デバイス上には多種多様な形状の段差や、複数の膜の重なりによる凹凸などのいわゆる表面形状が露光性能を低下させることである。本研究の実験データでは、基板に0.5 μ m以上の段差があると1 μ m領域のパターン精度は10%以上となりその精度の低下は超LSIにとって致命的である。したがって、表面平滑性は微細化には不可欠の要素となっている。この平滑性は、高密度微細化の一途をたどる超LSIプロセスにとって今後必須の技術となることが予想される。

この問題点を解決するものとして、第2章でも述べたように、2層あるいは3層構造の種々の多層レジスト技術が提案され、プロセス検討が進められている。しかしながら、工程の複雑さなどから実際のプロセスに導入されるのは難しい。本研究は従来の多層レジスト法に比較し、工程が簡単でかつ表面形状に影響されず、1 μ mからサブミクロン領域の高アスペクト比パターン形成が可能な二重露光法(DEM)について検討し、その結果や考察を計算機シミュレーションを含めて述べる。

本論の構成としては、「緒言」に続いて、「二重露光法 (DEM)」「二重露光法 (DEM) によるレジスト断面形状の解析」の各論を述べ、最後に「結言」としたい。本研究では、従来の微細パターン形成方法の長所・短所を踏まえて、研究段階のみならず、半導体製造の工業的に使用可能であるような簡易で高性能のプロセスを構築し、その効果や理論的な考察を次章以降で論じていくことにする。

3.2 二重露光法 (DEMプロセス)

DEMプロセスの特徴を明らかにするために一般的な多層レジストのプロセスフローとDEMプロセスフローを比較し、各方法の工程数について着目して説明する。多層レジストの工程数は $[L^lE^mP^n]$ であらわされる。Lはレジスト層、Eは露光、Pはパターンニング (現像やドライエッチなど) であり、l、m、nはそれぞれ回数を示している。図3.1(a)の3層レジストは、 $L^3E^1P^3$ であり、(b)の2層レジストは、 $L^2E^2P^2$ か $L^2E^1P^2$ の2種類がある。ちなみに単層レジストでは、 $L^1E^1P^1$ で表され、全工程数 (l+m+n) は3工程であるのに対して、多層レジストは5~9工程と増大する。3層レジスト法では、プラズマデポジットやRIE工程、2層レジスト法は、2種類の光源などが必要で、総合的にプロセスが複雑であり、スループットおよび生産性が低下している。

一方、DEMプロセスの工程数は、 $L^2E^2P^1$ とあらわされパターンニング工程が1回で済む簡略化されたプロセスである。

本研究で開発したDEMのプロセスフローを図3.2に示す。段差を有する基板上に第1層ポジレジスト (t_{R1} ; μ m) を塗布し、全面に全波長領域の紫外線 (E_1 ; mJ/cm^2) を照射し完全に感光反応を引き起こす。次に表面処理した後、第1層ポジレジストと同一の第2層ポジレジスト (t_{R2} ; μ m) をさらに重ねて塗布した

後、g線ステッパーにより第2回目の露光 (E_2 ; mJ/cm^2) をレチクルを用いて選択的に行い、第1層と第2層を同時に1回の現像工程でパターン形成する。実験に使用した第1, 2層ポジレジストはMPS-1400 (Shipley社製) を使用した。

このDEMプロセスは、第2層の感光反応した膜とその直下の全面感光した第1層膜により、第1層、第2層の界面まで現像が進行し、到達したと同時に現像が進む。その結果、垂直もしくは少しアンダーカット気味のプロファイルが得られる。(図3.3)

一方、同一ポジレジストを2層に重ねて塗布するため、互いの同溶媒による溶解によって膜厚の減少や均一性が低下する性質がある。そこで、第1層ポジレジストに各種の表面処理を施し多層膜の塗布性、膜質を分析しパターンニング特性を評価した。その結果を以下に示す。

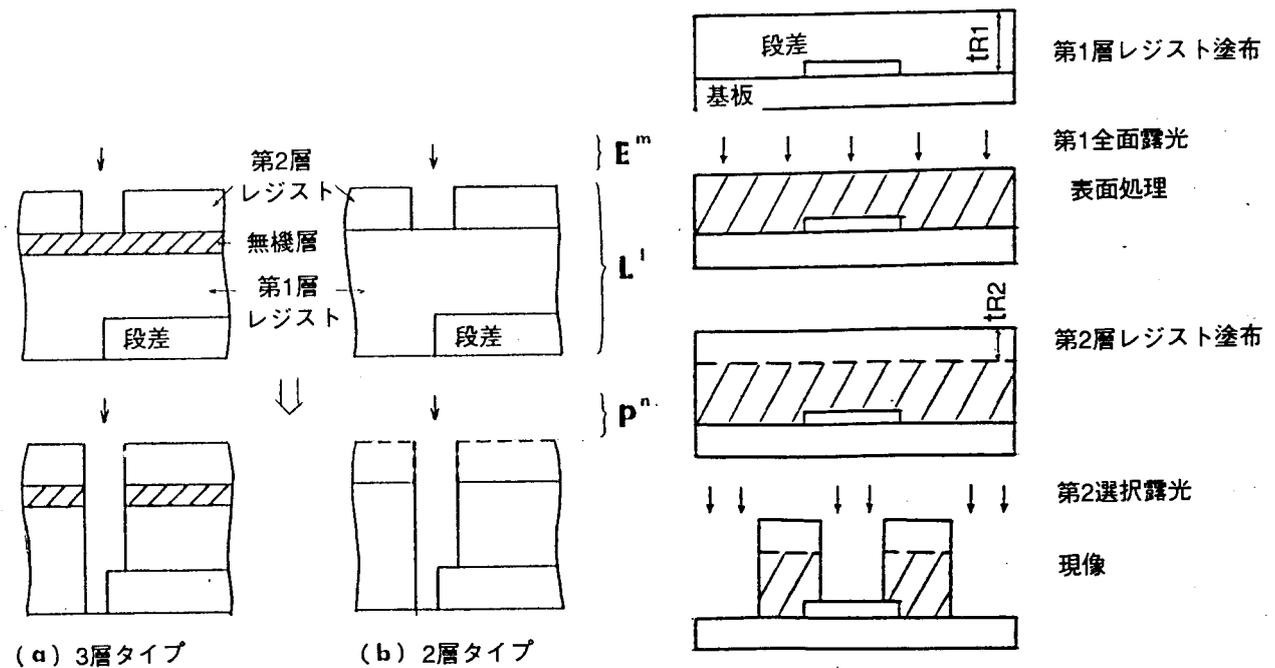


図3.1 多層レジストのプロセスフロー
(a) 3層、(b) 2層

図3.2 DEMのプロセスフロー

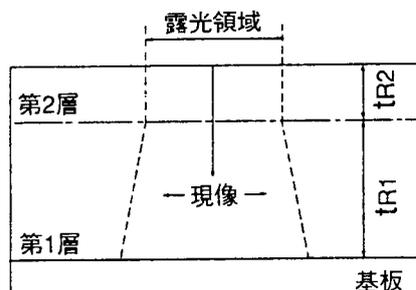


図3.3 DEMプロセスによる仮想モデル

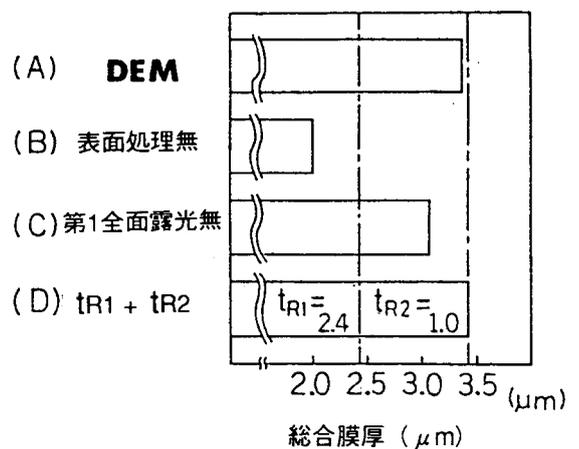


図3.4 DEMプロセスの膜厚特性

3.2.1 DEMの塗布特性

図3.4はDEMプロセスでの第1層 (t_{R1}) を2.4 μ m、第2層 (t_{R2}) を1 μ m (Si基板へ塗布時の換算膜厚) 塗布した後の総合膜厚を示した。各々、DEMプロセス(A)、表面処理を省略(B)、第1回目の露光を省略(C)、第1、2層の合計(D)の結果を示す。試料(B)および(C)の両者はともに溶解と思われる膜厚の減少と均一性の低下が発生している。特に全面露光を施し、かつ表面未処理の試料(B)は膜厚損失が非常に大きく均一性の低下が著しい。一方、DEMでは膜厚の損失が500Å以下であり、第1・2層の互いの溶解は少ない。

図3.5は、DEMプロセスにおける第1、2層 ($t_{R1}+t_{R2}$) の膜厚比による総合膜厚特性を示した。 $t_{R1} > t_{R2}$ の条件では、 t_{R1} と t_{R2} とのほぼ完全な和となっており、溶解と考えられる膜厚の減少はみられない。一方、 $t_{R1} \leq t_{R2}$ の条件では溶解と考えられる膜厚の減少が発生している。また均一性についても、図3.6に示す通り、塗布ムラは観測されずバラツキ σ 値は170Åで微少であった。

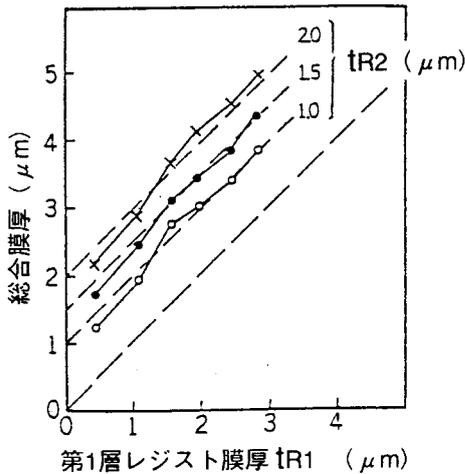


図3.5 第1、2層の膜厚比による総合膜厚特性

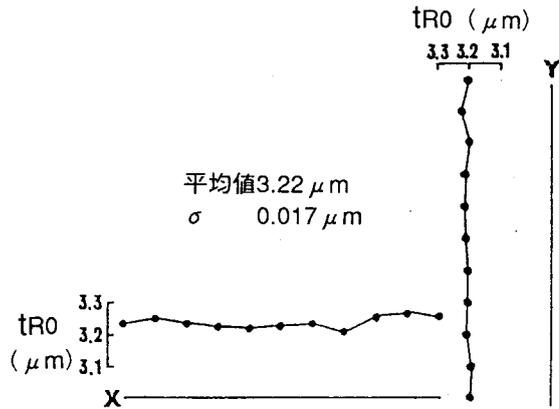


図3.6 DEMプロセスの膜厚均一性

3.2.2 DEMにおける2層膜の評価

DEMの現像特性を図3.7に示した。第1層と第2層の膜厚比を変化させ、第2回目の露光は施さず、直接現像したものである。図3.7より、特性は2タイプに分類されることがわかる。タイプIIである $t_{R1} \leq t_{R2}$ では感光反応した t_{R1} の効果が少なく、現像レートはなだらかに遅く推移するが、タイプIである $t_{R1} > t_{R2}$ では現像時間が5分程度のところまで、未露光のレジストの現像速度 (t_{R2}) を示し、以後5分以降急速な現像速度を示し感光したレジストの現像特性 (t_{R1}) となっている。このことは第1層、第2層が分離されていることを表している。

DEMプロセスによる照射特性を図3.8に示す。横軸には第2回目の選択露光エネルギー E_2 を示した。

DEMでは第2回目の選択露光は第2層目のみを感光すればよく、総合膜厚を従来法の3倍形成しても従来法とほぼ同等のエネルギーでパターン形成できることがわかる。さらに t_{R2} が単層レジストと同じ膜厚でもしきい値エネルギーが少なくして現像できるのは、第2層目塗布時に第1層目と第2層目との界面で、ある程度の混合あるいは拡散が生じ、実質的に未感光の第2層目膜厚が少なくなっているためと考えられる。

以上、DEMでは現像、照射特性より、第1層、2層の膜厚比で膜質が異なることがわかる。

図3.9に紫外分光特性を示した。436nmでの透過率の高い順は、感光単層レジスト、未感光単層レジストでDEMではさらに低くなる。下部層である第1層レジストに400nm前後に吸収帯を有する染料を含有させたDEM膜では非常に良く透過率が低下することがわかる。これによるとDEMの透過率は単層レジストの透過率より低くすることができるので下地基板からの反射の影響をうけにくくなることを示している。

図3.10は、436nmでの各膜厚による透過率特性を示した。単層レジストの露光、未露光膜単体と $t_{R2} 1.0 \mu$ m一定で t_{R1} を変化させたDEM膜を比較すると、DEMの透過率は未露光膜と露光膜との透過率との積はほぼ一致しており、紫外分光からの分析では $t_{R1} > t_{R2}$ 条件で溶解は認められない。

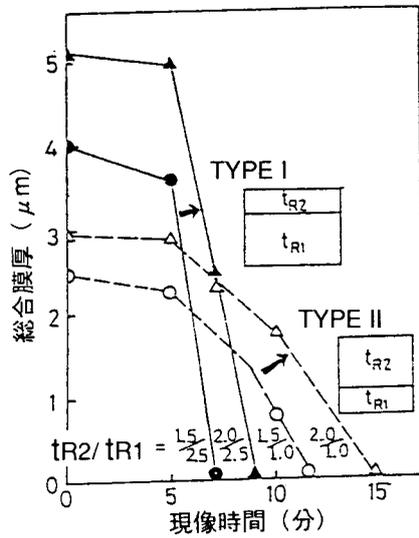


図3.7 DEMプロセスの現像特性

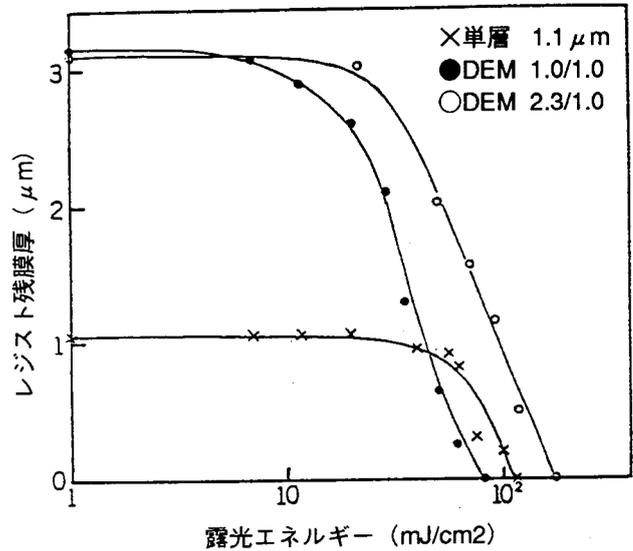


図3.8 DEMプロセスの照射特性

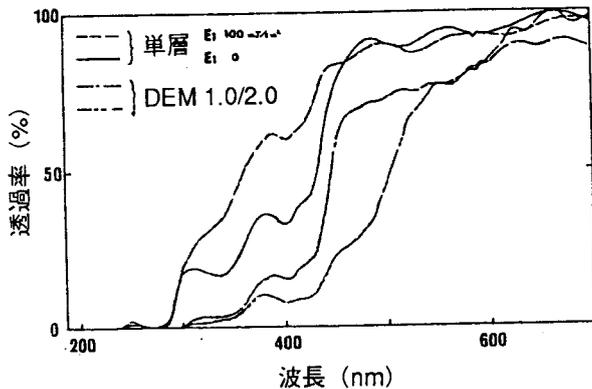


図3.9 DEMプロセスの紫外分光特性

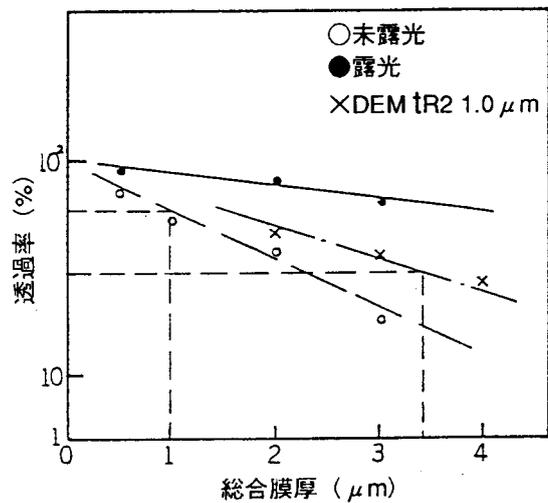


図3.10 DEMプロセスの透過率特性

3.2.3 DEMによるパターンニング形成

(1) シミュレーション

次に実際のパターン形成について説明する。図3.11に、単層レジストとDEMの上層である第2層レジストの断面をシミュレーションした結果を示した。これはU.C.大バークレー校のOldhamらによって開発されたリソグラフィ・シミュレータ“SAMPLE”^{3,5)}による。入力パラメータはDillら^{3,6)}による値を入力した。

“SAMPLE”自体、DEMプロセスである2層膜のシミュレーションはできないが、上層部の形状比較より近似して計算した結果、定在波の影響が少なく、かつ現像時間も短時間である傾向がわかる。

図3.11の入力パラメータは、Dillらによる値 [AZ1350J(Shipley社製), AZデベロッパ(1:1)] であるため、実際の使用したレジストと現像液のパラメータを入力し、下地膜厚 (t_{R1}) を変化させシミュレーションし、最適化した結果を図3.12に示した。同様に下地膜厚 t_{R1} が厚くなると、横方向への現像反応が速度と定在波の影響が少なくなる傾向は変わらなかった。

なお、シミュレーションについてのDEMの解像性は後節でさらに詳しく論じたい。

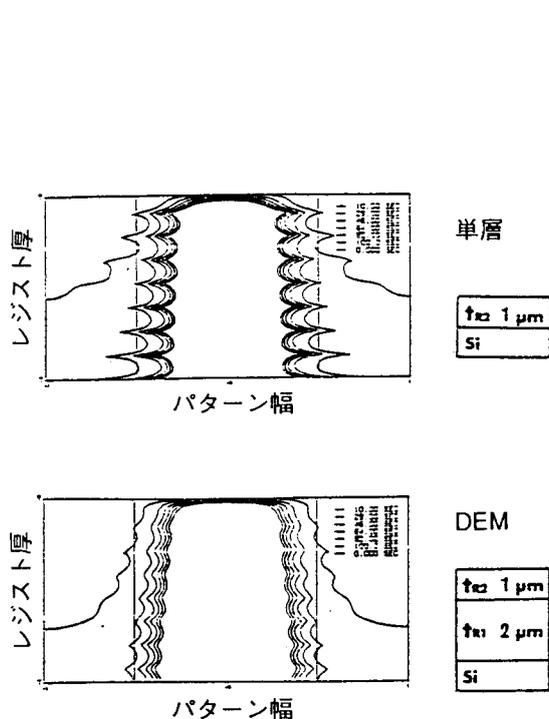


図3.11 DEMプロセスの形状シミュレーション

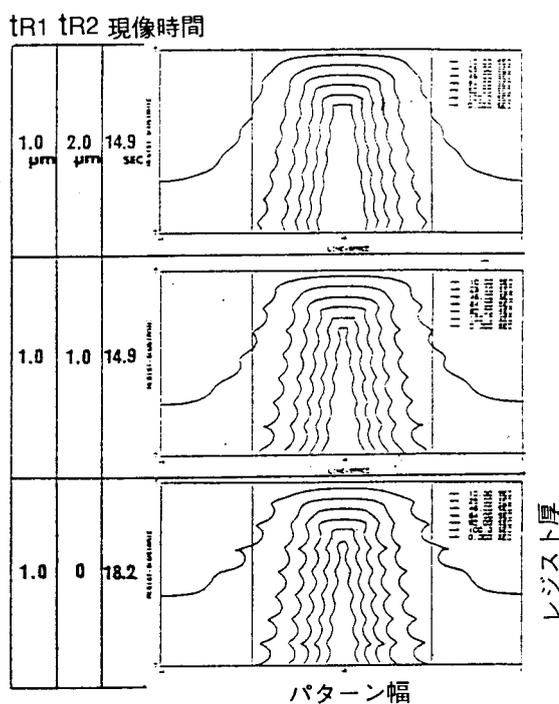


図3.12 第1層膜厚によるDEMプロセスのレジスト形状シミュレーション

(2) 現像条件

図3.13に、現像後のSEM断面写真を示した。 $t_{R1} > t_{R2}$ では溶解がないため逆テーパ現象がみられ、 $t_{R1} \leq t_{R2}$ では溶解によりなだらかなエッジの傾斜がついた断面となり、現像特性と一致した結果となった。

図3.14に1.0 μ mライン・アンド・スペース（以降、L&S）パターンのパターン断面SEM写真を示した。微細なるパターンのL&Sパターンにおいても図3.13と同様な現象が発生する。特に、 $t_{R1} > t_{R2}$ での逆テーパ現象は現像時間に大きく依存し、かつ下層である第1層レジストの現像速度が大きいため、現像時間の余裕度が狭くなるためにパターン幅の制御性が難しく、過剰現像にするとリフトオフされることがある。このため1ステップ現像法では限界があると考えられる。

垂直なパターン形状と大きなプロセス余裕度をもつ現像法にするため、2ステップ現像法を行った。2ステップ現像法は第1層、2層に対する現像レートを途中段階で連続的に切り替える方法である。

再度、“SAMPLE”によってシミュレーションした結果を図3.15に示した。DEMの第2層目のみ注目し、最初に現像速度の大なる現像によって計算(a)し、第1層、2層の界面が露出した時間(b)の形状から、現像速度の小なる現像によって計算した(c)。これより第2ステップ目の現像により長時間処理しても上層である第2層レジストはほとんど変形していないことがわかる。

一方、実験値を図3.16に示した。これは第1ステップの現像時間による露光エネルギー (E_2) と残存膜厚の特性である。膜厚の測定位置は5 μ m以上のスペース部とした。図3.16の残存膜厚と第2ステップの現像速度により第2ステップの現像時間を定めた。図3.17は2 μ mL&Sパターンでの第1ステップ現像後(a)、第2ステップ現像後(b)のSEM写真を示し、右部に模式図を示した。これによると第2層（上層）のレジスト形状に変化がなく、かつ第1層（下層）レジストは垂直形状で推移したのがわかり、1ステップ現像法による逆テーパ現象は発生しなかった（図3.18）。

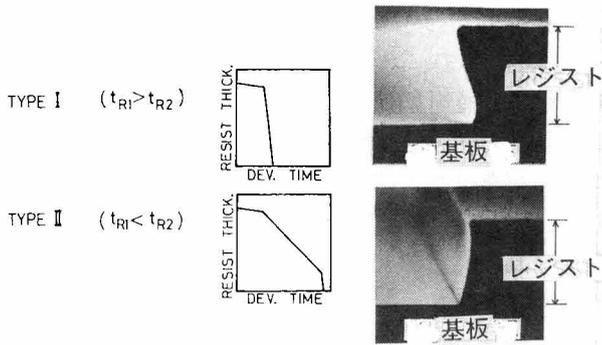


図3.13 DEMプロセスによるレジスト断面形状

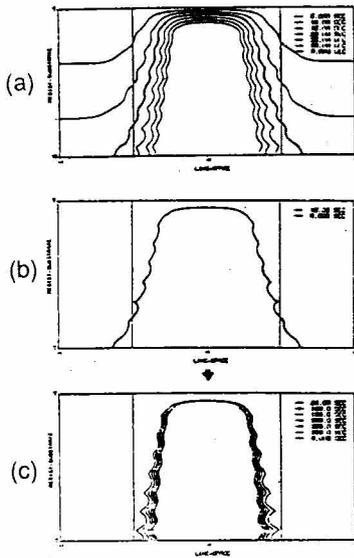


図3.15 2ステップ現象によるDEMプロセスの形状シミュレーション

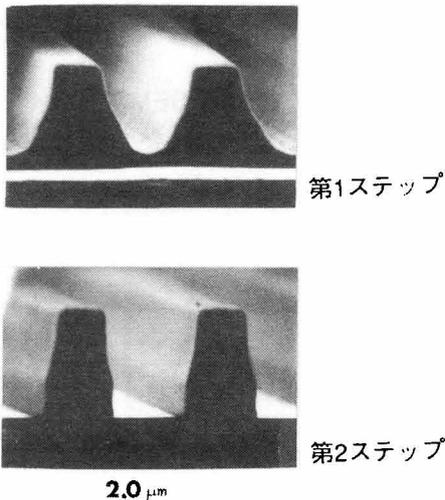
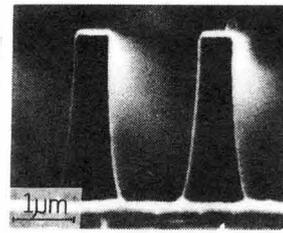
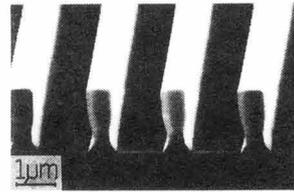


図3.17 1、2ステップ現象による2 μ mL&SパターンのSEM写真



($t_{R1} < t_{R2}$)



($t_{R1} > t_{R2}$)

図3.14 DEMプロセスによる1.0 μ mL&SパターンのSEM写真

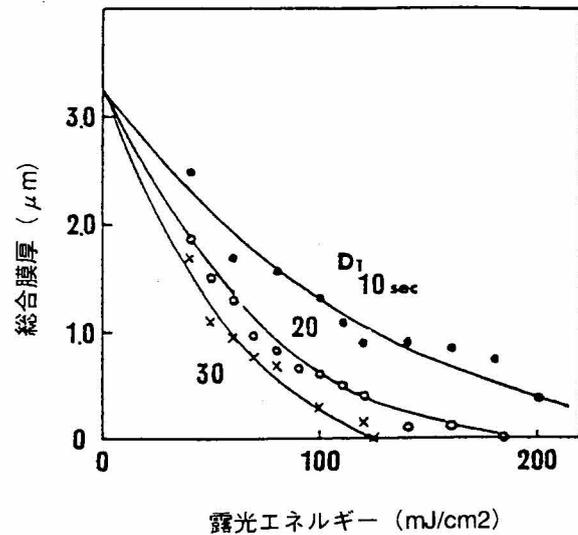


図3.16 1ステップ現象による残膜特性

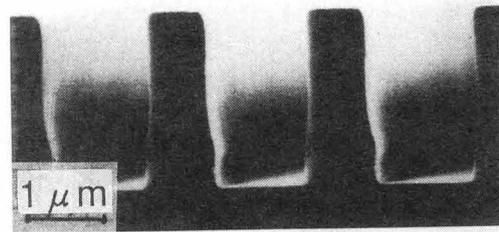


図3.18 2ステップ現象DEMプロセスの1 μ mL&SパターンのSEM写真

(3) 段差上へのパターニング

第1層と第2層目の膜厚比を変化させた場合の1 μ m段差を有する基板上に平行に形成されたパターンの断面SEM写真を図3.19に示す。基板段差はドライエッチングによりSiをエッチングして形成した。レジストパターンは1 μ m L&Sパターンである。上部写真は $t_{R1} \leq t_{R2}$ の条件で、パターン端部の傾斜角が小さくなっているが、下部写真の $t_{R1} > t_{R2}$ ではパターン端部の傾斜角がほぼ垂直に近い良好な高アスペクト比パターンが形成されている。以上のように、 $t_{R1} > t_{R2}$ の条件では段差上の寸法と平坦部でのレジスト寸法にも差がなく、下地段差による影響はない。垂直段差にも同様な効果があった(図3.20)。

図3.21は多結晶Si凸部段差を有する基板にAlを蒸着後、その凸部段差間隙へ単層レジスト法とDEMプロセスとによるパターンを平行に形成し、凸部段差側面からの光の反射によるレジストパターン形状の変化をみた光学写真であり、さらにレジストをマスクしてAlをドライエッチした後の表面光学写真である。

これによると従来法である単層レジスト1.5 μ m厚さのものは2 μ m以下のパターン幅で断線が生じているが、DEMプロセスでは下地の反射によるパターンにおいて、下地の反射による影響はまったくないことがわかる。

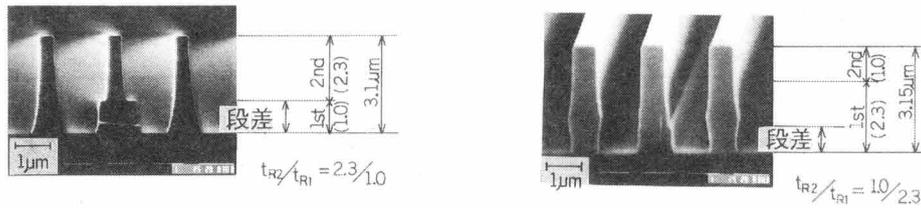


図3.19 水平1 μ m段差上のDEMプロセスによる1 μ m L&SパターンのSEM写真

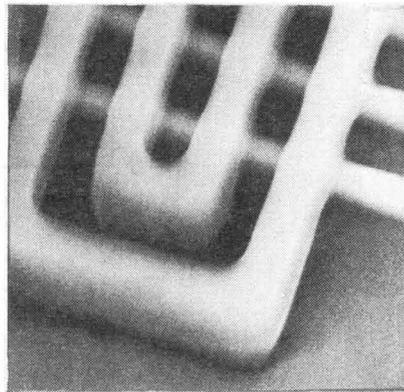


図3.20 垂直1 μ m段差上のDEMプロセスによる1 μ m L&SパターンのSEM写真

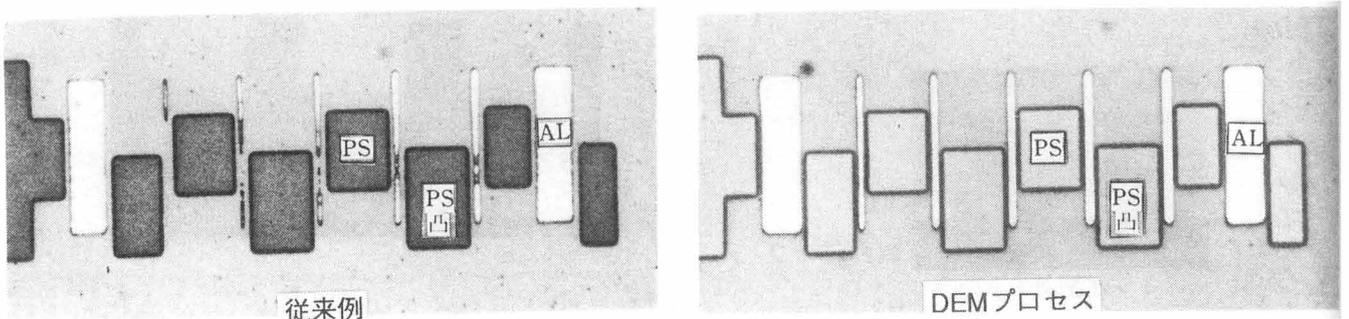


図3.21 水平段差間隙にDEMプロセスによってパターニングした光学写真

(4) アライメント精度

多層レジストの弱点として、厚いレジスト層となるため基板マークの信号を解析しにくくなりアライメント精度の劣化を招く可能性がある。特にアライメントに使用する波長はその精度に大きく依存する。図3.22には、SiO₂ 500Åの段差のマークに対して白色光のグローバルアライメントの結果を示した。白色光によるため基板からの反射信号は影響されないため単層レジスト、DEMプロセスともに良好なデータを示した。しかし、紫外線によるダイ・バイ・ダイ・アライメントでは、その精度(3 σ)が低下した。アライメントの照明系、アライメントマークの改良などが今後の課題となった。

(5) 寸法制御

図3.23に1 μ mのコンタクトホールの露光エネルギー依存性を示した。単層レジスト法における1 μ m解像エネルギーは200mJ/cm²必要とするのに対し、DEMでは約半分の80~100mJ/cm²と少なく、さらに2ステップ現像法では1 μ m付近での線幅制御性も向上した。

グローバル・アライメント

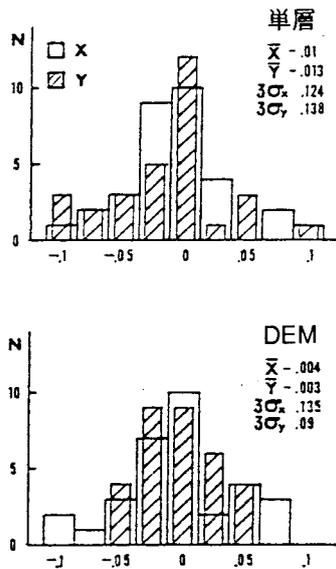


図3.22 DEMプロセスによるアライメント特性

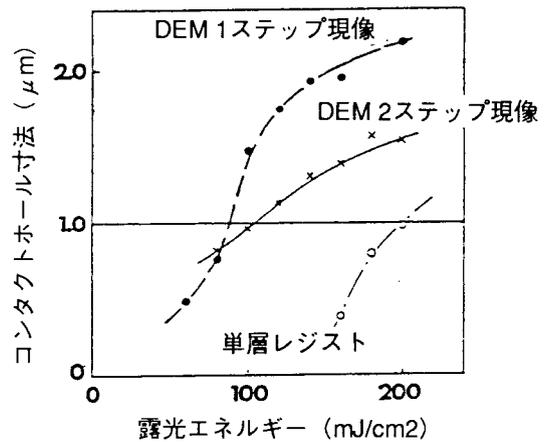


図3.23 DEMプロセスによる1 μ mコンタクトホールの露光エネルギー依存性

3.2.4 まとめ

以上のように光リソグラフィに対してDEMプロセスが次の点で有効であることがわかった。

- (1)光リソグラフィ、特にg線ステッパーを用いて段差上に限界解像度0.8 μ mのパターンを寸法変化なく形成することができた。
- (2)ポジレジストを2層とするため下地基板の反射の影響をうけにくい。特に現プロセスでも難しいAl配線の微細化も可能であった。
- (3)パターン形成には最上層の未露光膜のみが有効となるため、縮小投影光学系の浅い焦点深度に対して余裕度が高く、高アスペクト比パターンを実施できた。
- (4)三層構造レジスト法など従来の多層レジスト法より工程が簡単で、ドライエッチング、CVD工程が不要で高スループットを達成した。

この技術は簡易的でしかも安定性良く高コントラスト・パターンを形成できることから、工業的にも非常に有用であると考えられる。

3.3 二重露光法によるレジスト断面形状の解析

3.3.1 はじめに

本研究では、先に、工程が簡単で高いアスペクト比のパターン形成が可能な二重露光法（DEM）を論じた。しかしながら、多層構造における複雑な露光・現像条件の設定は、容易ではないために、理論的解析の導入は必須である。

そこで、計算機シミュレーションによって、DEMプロセスを解析し、さらにプロセスの設計も試みた。特に、ここではDEMプロセスのうち、2回現像を用いる方法の解析を行った。

3.3.2 DEMプロセスの最適化

本章で考案したDEMプロセスによって得られたレジスト断面形状は、垂直性・寸法精度に優れ、また、段差部でのパターン偏差が少ない。また、ドライエッチング等を用いる方法に比べてスループットがよい。

DEMプロセスは、以上の特徴をもつ技術であるが、

1) 1層目レジストは第1回目の露光で十分反応していると思われるにもかかわらず、現像は等方性とならず、ほぼ垂直に進行している。

2) 現像液の切替の時間制御が必要で、これが不適切であると解像しない。

3) 露光現像条件の設計・最適化を行おうとした場合、関係するファクターが多く、試行を重ねる必要がある。

等の問題点がある。これらの問題点を解決すべく、DEMプロセスのメカニズムを定量、定性的に解析する必要があった。

3.3.3 DEMのシミュレーション

ここでは、U.C.大パークレー校が開発したプロセスシミュレーター“SAMPLE”³⁻⁵⁾を、二層構造・二重露光に対応できる様に改造する事によって、DEMプロセスの解析を行った。

次にシミュレーション手法について簡単に述べる。“SAMPLE”では、

1) 光学系を透過した光がレジスト表面を照射する光の強度分布を計算する過程

2) レジストに入射した光と、レジスト内の感応基との相互作用を計算する過程

3) 光と反応したレジストの溶解速度を求め、現像の進行によるレジスト断面形状の経時変化を計算する過程

の3つに大きく分けられる。

ここでは、2)及び3)の計算過程を変更して行なった。

(1) レジストと光の相互作用

“SAMPLE”では、ジアゾ系レジストと光の相互作用について、Dillら³⁻⁶⁾の提案したモデルを用いている。ここで扱うジアゾ系レジストのメカニズムについて、図3.24を用いて簡単に説明する。

ジアゾ系レジストでは、ナフトキノンジアジドと呼ばれる感応基（Inhibitor）が光と反応して、ケテンに変化し、さらにカルボキシル基を持つ物質に変化する。

この際に、ナフトキノンジアジドは光を吸収し、反応したレジストは光の透過率が增大するいわゆるブリーチング現象が起こる。

ここで、レジスト中での深さ x における t 時間後の、光の強度を $I(x, t)$ 、感応基の正規化された濃度を $M(x, t)$ とおくと、

$$\frac{\partial I(x, t)}{\partial x} = -I(x, t)[AM(x, t)+B]$$

$$\frac{\partial M(x, t)}{\partial t} = -I(x, t)M(x, t)C \quad (3.1)$$

という関係式が与えられる。

これに初期値を与えて解くことにより、露光後のM, Iを求めることができる。

さらに基板からの反射の影響と、入射強度分布を考慮することにより、レジスト中でのMの二次元的な分布が求められる。

ここでは、レジストを多層に持つことができ、各層毎にMの初期値を与えられる様にした。

実際の計算では、第2回目の露光によるMの変化を計算する時に、第1層目レジストのMの初期値として、第1回目に全面露光されたときの平均的なMの値を与えて計算した。

(2) 露光パラメータの算出

(3.1)式において用いられるパラメータA, B, Cは、単層レジストの光の透過率Tの時間変化を求めることによって、

$$A = \frac{1}{d} \ln \left[\frac{T(\infty)}{T(0)} \right]$$

$$A = -\frac{1}{d} \ln T(\infty)$$

$$C = \frac{A+B}{AI_0T(0)\{1-T(0)\}} \frac{dT(0)}{dt} \quad (3.2)$$

と表せる。

ここでは、レジストの透過率の時間変化Tを測定することにより、レジストの露光パラメータA, B, Cを求めた。

表3.1にその結果を示す。

表3.1 レジストの"A,B,C"パラメータ

波長 λ [μm]	A [μm ⁻¹]	B [μm ⁻¹]	C [cm ² /mJ]
0.365	0.92	0.31	0.05
0.405	0.97	0.11	0.05
0.436	0.50	0.04	0.03

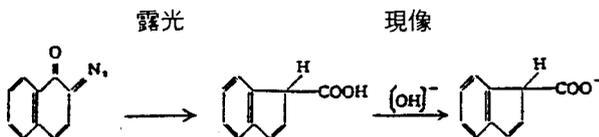


図3.24 Dillの提案したジアゾ系レジストの反応モデル

(3) レジストの溶解速度

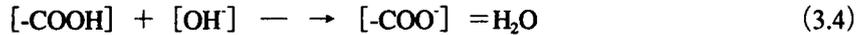
Dillらによると、光と反応したレジストの溶解速度Rは、

$$R = \exp[(E_1 + E_2 + E_3)M^2] \quad (3.3)$$

とした実験式^{3,6)}を用いている。

ここでは、簡単な理論式により、Mの広いレンジに渡って適応できるモデルを導入した。

再び図3.24を用いて、レジストの溶解現象を説明する。光と反応して生成されたカルボキシル基は、アルカリ性現像液の水酸基と反応し、カルボキシル基の陰イオンとなって解離し溶ける。その反応は、



と表わせる。

カルボキシル基の濃度は、Mを用いると(1-M)と表せ、アルカリ現像液の濃度をNとすると、反応速度は一般に(1-M)^α・N^βに比例すると近似できる。ここで、α・βは反応次数である。

したがって、レジストの溶解速度Rは、

$$R = R_0(1-M)^\alpha + R_b \quad (3.5)$$

と表すことができる。ただし、R₀はN^βと比例し、R_bは未露光時の溶解速度である。

図3.25にDEMに用いている現像液の、Mに対するRの実験値、並びに(3.5)式にフィットさせた場合の計算値を示す。

ここで実験値は、露光したレジスト中でのMをあらかじめ計算で求め、レジストを現像した場合の各深さに於ける現像速度Rとを対応させて求めた。

実験より求めたα、R₀、R_bの値を表3.2に示す。ここで、現像液1、2は、アルカリ規定度の異なる同一材料のものである。

グラフからわかる様に、Mの幅広い範囲に渡ってRを表わすことができる。ここでは、この溶解モデルを用いて計算を行なった。

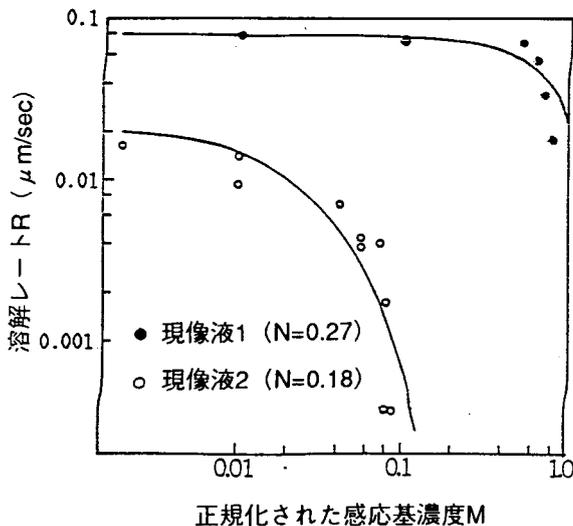


図3.25 現像溶解速度計算結果

表3.2 感応基濃度による
現像速度特性の反応次数

	N	α	R ₀ [μm/sec]	R _b [μm/sec]
現像液1	0.27	0.5	0.08	0.0025
現像液2	0.18	32.0	0.021	0.0

3.3.4 DEMプロセスの解析

以上の様な形態のシミュレーターを用いて、DEMプロセスのメカニズムを解析した。

まず、シミュレーションによってDEMのメカニズムを明らかにする為に、通常の露光による場合と、第1層目がわずかに露光された場合(M=0.8)の仮想的なプロセスについて比較する。

図3.26にシミュレーション結果を示す。DEMの場合、第1回目の露光で第1層目の反応が促進し、Mの値がバイアスされた形となり減少する。第2回目の露光で、第1層目の多重露光部反応が更に進むため、Mの分布は通常の露光による場合と比べ、第1層目レジスト中で減少した形となる。

この際に、第2層目レジストが解像する適切な露光量が与えられ、同時に第1層目レジストの露光部と未露光部で、現像液に対する選択性があれば、解像できることになる。

図3.27に以上のことがらを模式的に示す。従来の単層レジストでは、十分反応できなかったレジストの

下層が、多重露光により下層部がバイアスされる事により、厚いレジストに対しても少ない露光量で解像しうることがわかる。

さらに、通常の露光法では実現できなかった垂直もしくはアンダーカット状に近い断面形状を得ることも可能であると予想される。

しかし、先にも述べたように、第1層目の現像に対しては、多重露光部分と、そうでない部分とで、現像液に選択性を持たせる必要がある事がわかった。

この様に、露光、現像条件の設定により、断面形状がコントロールできることがわかった。

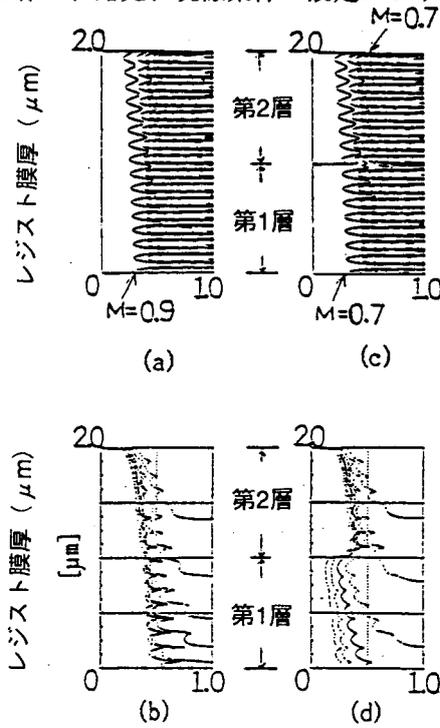


図3.26 1 μ mL&Sパターンのインヒビター分布とレジスト形状シミュレーション
(a)M濃度分布、(b)パターン形状
(c)DEMのM濃度、(d)DEMパターン形状

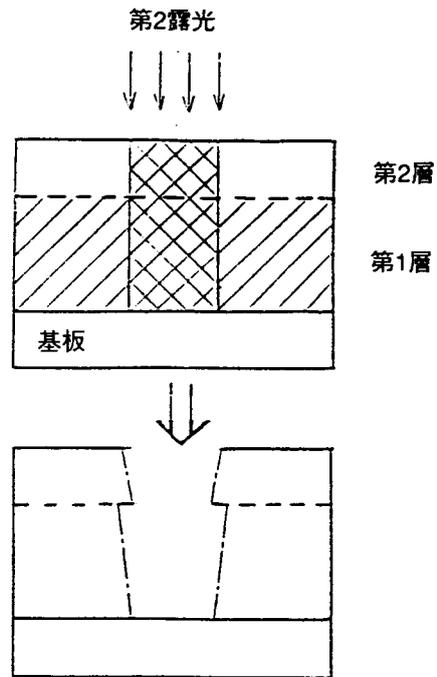


図3.27 DEMプロセスのメカニズム

3.3.5 シミュレーションと実験との比較

次に従来のDEMプロセスについて、先に求めた露光パラメータ、現像パラメータを用いてシミュレーションを行ない、実験と比較した。

図3.28に1.25 μ mL&Sパターンの露光を行なった場合のシミュレーション結果を示す。

従来のDEMプロセスでは、第1回目の全面露光でMを0.12程度まで減少させた後、第2回目の露光を行なっている。第2回目露光後のMの分布は図3.28 (a) に示す様になる。

ここで、Mが0.7付近で溶解度が変化する特性を持つ第1の現像液で第2層目を現像後、続いてMが0.08付近で溶解度が変化する特性を持つ第2の現像液で第1層目を現像することにより、パターンが形成される。これら一連の現像に於けるレジスト断面形状の時間変化のシミュレーション結果を図3.28 (b) に示す。

第1層目の現像では、現像液の特性により、Mが0.08付近を境として現像の進行が遅くなる為、この場合にはM=0.1の等高線に従うほぼ垂直な断面が形成されている。

レジスト断面形状の時間変化の実験とシミュレーションとの比較を図3.29に示す。実験とシミュレーションとでその傾向がよく一致してくることがわかる。

実験とシミュレーションでは、レジスト中央部のくびれの位置が異なっている。これは第1層目レジストと第2層目レジストとが混ざりあい、感応基が下層にまで及んでいるためと考えられる。

そこで、第2層目レジストを塗布後の試料をエッチングし、レジストの各深さでの溶解速度を調べた。その結果を図3.30に示す。

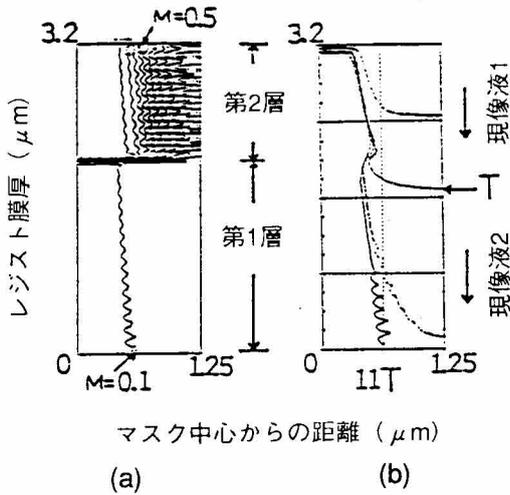


図3.28 1.25 μm L&Sパターンのレジストシミュレーション (a)M濃度分布、(b)レジスト形状

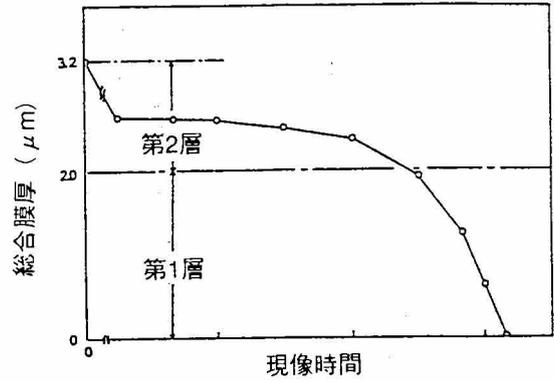


図3.30 DEMプロセスによる現像時間に対するレジスト残膜特性

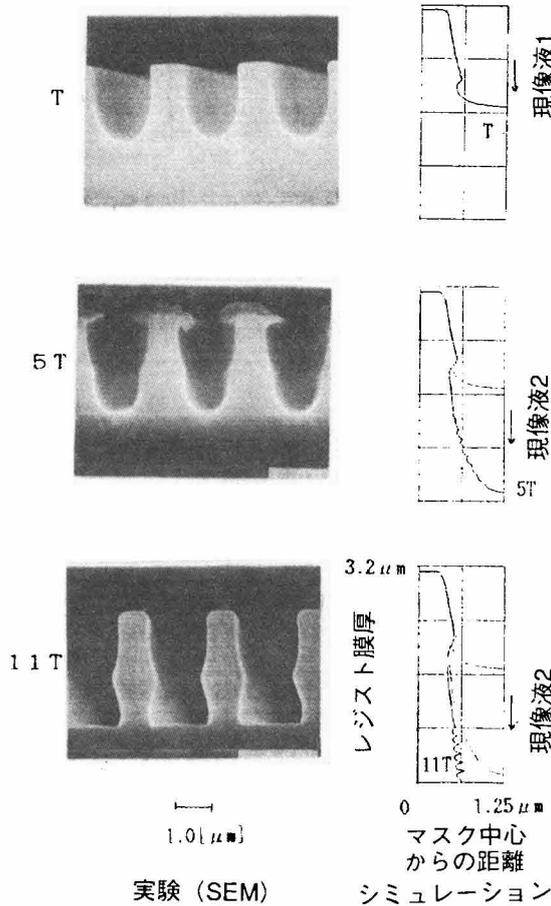


図3.29 DEMプロセスによる現像時間に対する実験、シミュレーションの1.25 μm L&Sパターン形状

溶解速度は、第1層目と第2層目の境界領域で、段階的に変化しており、層間の混合があると思われる。この為に、シミュレーション上で誤差が生じたものとする。

次にDEMプロセスで、第1回目の露光が過大になった場合のシミュレーション結果を図3.31に示す。

第1回目の過剰露光により、第1層目の現像が等方的に進行し、第2層目がはく離し解像しない事が予測され、実験的にも確かめられた。

従って、本研究においては当初第1層目は完全に感光されていたものと考えていたが、実際には未だ感光性が残された状態の露光であり、第2回目の露光で、ほぼ完全に感光反応が引き起こされていたものであることがわかった。

次にDEMプロセスで、現像液の切替が不適切であった場合のシミュレーション結果を図3.32に示す。

第1の現像液によるオーバーエッチによってこの場合も第1層目の現像が等方的に進行し第2層目がはく離し解像しないことが予測され、実験的にも確かめられた。

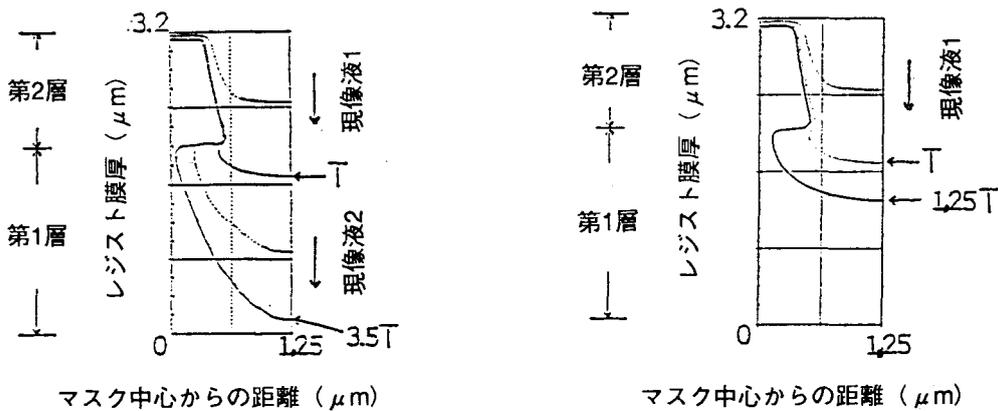


図3.31 第1回露光が過大となった場合の1.25 μm L&Sパターンのシミュレーション

図3.32 現像液切り替えが不適切になった場合1.25 μm L&Sパターンのシミュレーション

3.3.6 シミュレーションによるプロセスの設計と最適化

DEMプロセスでは先に述べた様に、2段階に分けた現像を行っており、露光量及び現像液の切り換え時間を管理する必要がある、これを誤ると解像しない。そこで1つの現像液による安定したDEMプロセスの設計を試みた。

その為に、図3.25に示した2つの現像液の中間的な特性で $M=0.5$ 付近で溶解速度が変化する特性を持つ第3の現像液を仮定する。その現像特性を図3.33の点線で示す。

そこで第1層目の M のバイアス値を $M=0.6$ とし、これに相当する第1回目の露光を行なう。次に第1層目の M の値が露光部で 0.5 以下、未露光部で 0.5 以上になる様に第2回目の露光を行なう。

この様にして設計した1.25 μm L&SパターンのDEMプロセスのシミュレーション結果を図3.34に示す。図に示す様に、垂直性のよいパターンの解像が予測できる。

次に、上記の現像液を作るべく、先の2つの現像液の中間的な濃度の第3の現像液を合成しその特性を調べた。図3.33に▲印でその実験結果を、実線で(3.5)式を用いてフィッティングした計算値を示す。また、求められたレジストの現像パラメータを表3.3に示す。

これを用いてシミュレーションした結果を図3.35に示す。図に示される様に、垂直性のよいパターンを形成できる事が予測できる。

シミュレーション結果に基づいて実験を行なった場合の、レジスト断面形状の時間変化の実験とシミュレーションとの比較を図3.36に示す。両者はよく一致している事がわかる。

また、このプロセスによれば、第1層目と第2層目の M の値の差が従来のプロセスに比べて小さいので、層間の混合の程度が小さく、レジスト断面形状のくびれの位置もシミュレーション結果とよく一致してい

る。

図3.37に、このプロセスの段差に対する適応性をシミュレーションした結果を示す。

1.0 μm の段差に対してこのプロセスで対応できることがわかる。実際に1.2 μm ルールの超LSIプロセスに適応したところ通常の単層レジスト法に比べ、段差部に影響されず、しかも垂直性の良いパタンが形成できた。

この様に、シミュレーションを用いて、1つの現像液によっても露光現像条件を最適化すれば、ファインパターンの形成が可能であることがわかった。

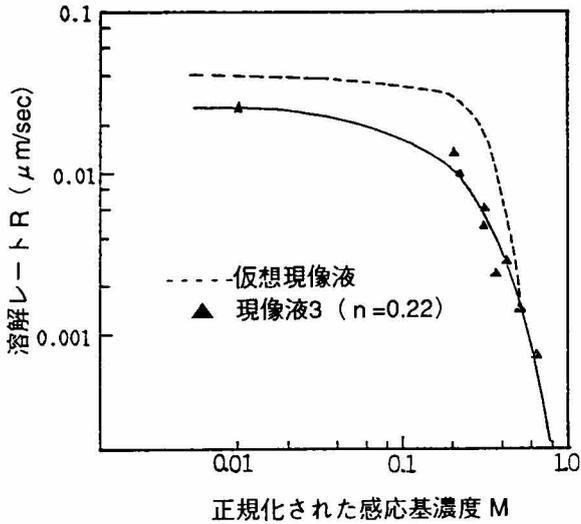


図3.33 最適化された第3の現像液のM濃度と溶解速度特性

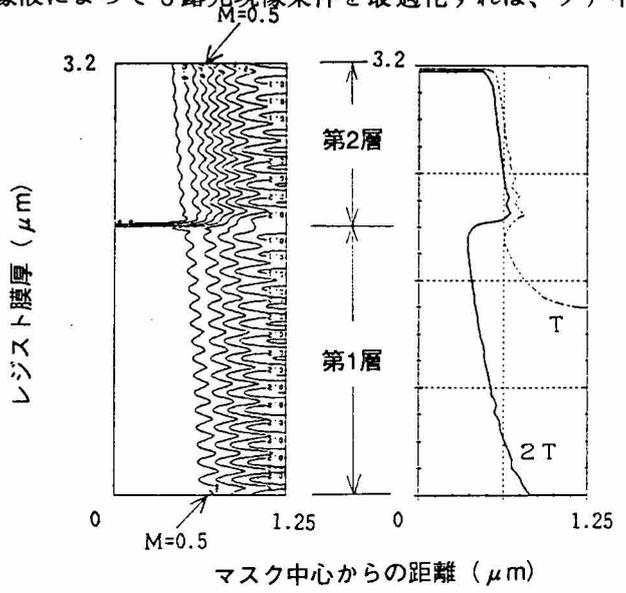


図3.34 DEMプロセスによる1.25 μm L&Sパターンのシミュレーション(a)M濃度分布、(b)レジスト形状

表3.3 最適化された第3の現像液のパラメータ

	N	α	Ro [$\mu\text{m}/\text{sec}$]	Rb [$\mu\text{m}/\text{sec}$]
現像液 3	0.22	4.0	0.027	0.0

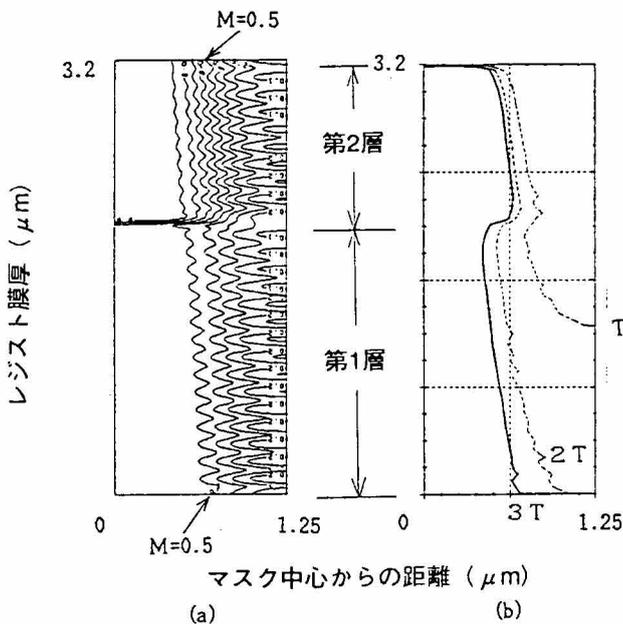


図3.35 改良DEMプロセスによる1.25 μm L&Sパターンのシミュレーション(a)M分布、(b)レジスト形状

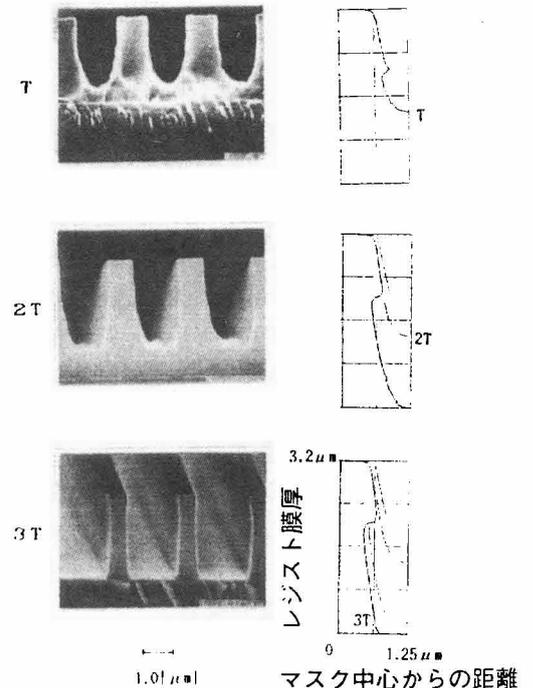


図3.36 改良DEMプロセスによる実験とシミュレーションのパターン形状の比較

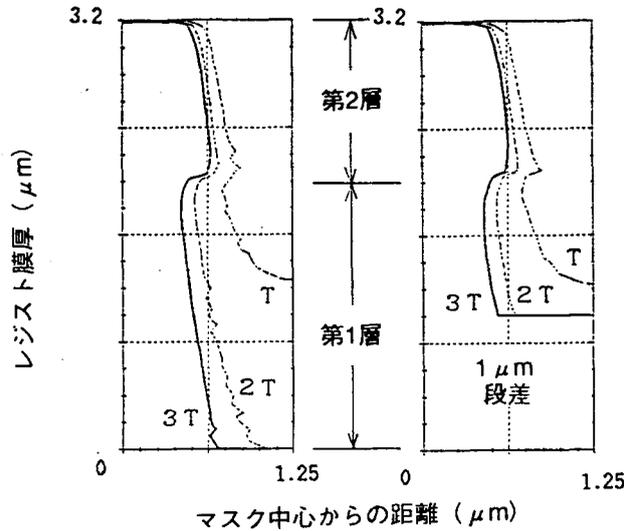


図3.37 プロセス段差上のシミュレーション結果

3.3.7 DEMの解像限界

ここでは、シミュレーションによってDEMの解像限界を推論した。

図3.38に0.75 μm L&Sパターンの露光を行なった場合のシミュレーション結果を示す。この場合、現像は第3の現像液を用い、露光量を変化させて条件設定を行なった。図に示される様に、露光量を最適化する事により、段差のある基板に対しても0.75 μm の良好なパタン形成ができる事が予測できた。

さらに、光学系の解像限界に近い0.6 μm L&Sの露光を行なった場合についてシミュレーションを行った結果、この光学・レジスト/現像系では0.6 μm は解像できない事がわかった。

そこで、レジスト系を1.0/1.0 μm の2層構造とし、更に2段階現像によって現像する現像系のプロセスで、0.6 μm の解像の可能性をシミュレーションによって調べた。

ここでは、第2層目の現像を第3の現像液によって行ない、第1層目は、シミュレーションより求められたMの分布に基づいて、第1層目が十分解像できる様な仮想的な第4の現像液を用いる事にした。現像液の特性は式(3.5)に従うものとして、現像パラメータを仮定した。この現像液の特性を図3.39に示す。現像液の濃度は、図3.40に示す様に第1~3の現像液の特性を内挿して予想した。

以上の様なレジスト/現像液系を用いて、露光量を最適化した場合のシミュレーション結果を図3.41に示す。図に示される様に、段差のある基板に対しても0.6 μm の良好なパターン形成ができることが予測できた。

この様に、DEMプロセスでは、光学系で定まる解像限界近くに於いても、露光・現像条件を適切に設定する事により、高いアスペクト比を持ち、段差に影響されないパターン形成が可能であることが予測できた。

3.3.8 まとめ

多層構造が扱えるシミュレーションを開発し、DEMプロセスの解析を行なった結果、そのメカニズムがバイアス露光による下層部の反応の増進であることがわかった。

さらに、シミュレーションによる新プロセスの設計を試みた結果、良好なパターンが得られることが確かめられた。また、DEMの解像限界は、光学系による解像限界近くまでであることが予測できた。

このようなDEMの解析技術により、簡易的な2層レジスト法であるDEM法をサブミクロン・リソグラフィとして構築することが容易になり、生産レベルでのDEM法の安定した使用に寄与することができた。

今後は、さらに高NA化や短波長化するリソグラフィでのDEMの解析を検討していくことが課題である。

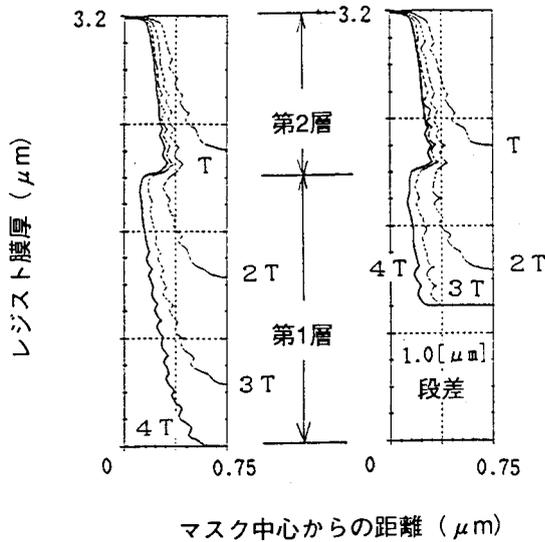


図3.38 改良DEMプロセスによる0.75 μm L&Sパターンのシミュレーション(a)M分布,(b)レジスト形状

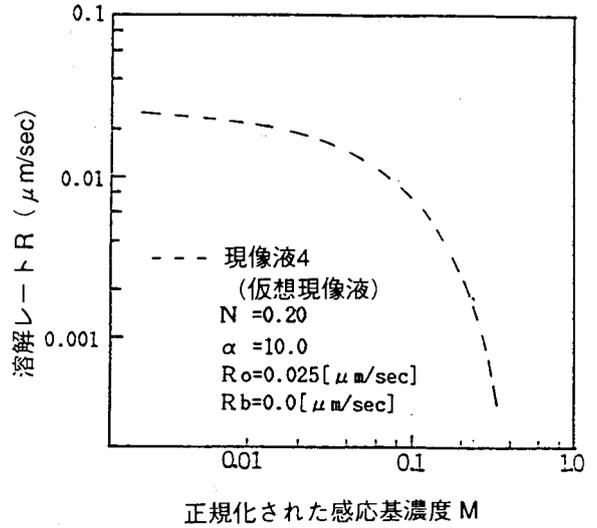


図3.39 最適化された第4の現像液のM濃度と溶解速度特性

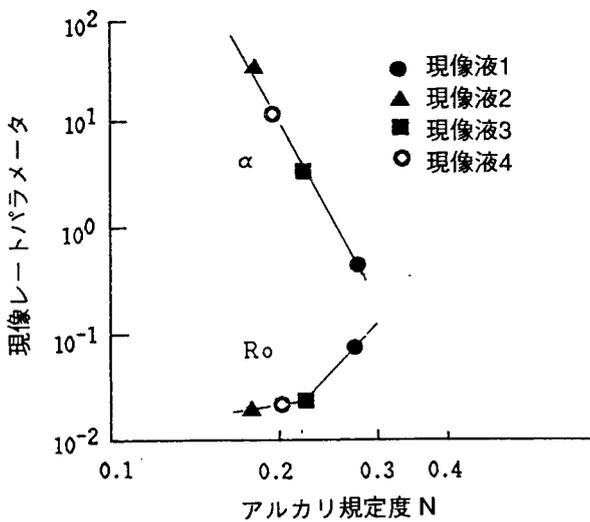


図3.40 現像液特性

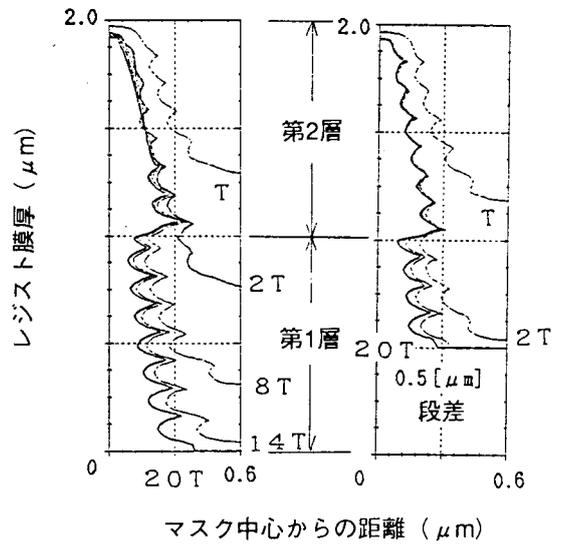


図3.41 改良DEMプロセスによる0.6 μm L&Sパターンのシミュレーション(a)M分布,(b)レジスト形状

3.4 結言

レジスト・プロセス側より、 $1\mu\text{m}$ からサブミクロン領域の微細加工を目的に二重露光法（DEM）を開発し、そのプロセス性能について研究した。また、リソグラフィ・シミュレータを改良し、DEMプロセスの解析と限界について論じた。

DEMプロセスは、従来、単層レジスト・プロセスでは成しえなかった実段差上でのg線リソグラフィの解像度の向上を計り、しかも、従来提案されていた多層レジスト・システムの工程の複雑さや、スループットの低下を回避し、従来設備でプロセスを実現可能であるという大きな微細加工技術としてのブレークスルーが計られた。

DEMプロセスは、多層レジスト分野で新しい境地を切り開いた技術であり、高段差を有する超LSIデバイスや半導体以外の磁気ヘッドや光ファイバー素子の製作に有用であると位置付けられる。

第4章 コントラスト・エンハンスト・リソグラフィによる サブミクロン・パターン微細加工

4.1 緒言

本章では、第2章で述べたレジストプロセスすなわち、ソフト面での微細パターン形成方法のうち、非常に有力であり、かつ、簡易的な方法であるコントラスト・エンハンスト・リソグラフィの研究について論じる。

コントラスト・エンハンスト・リソグラフィ (CEL: Contrast Enhanced Lithography) は1982年に初めて米国GE社のB.F.GriffingとP.R.Westによって発表された技術^{4.1)}であり、レジストに入射する光のコントラストを向上させて、レジストパターンの解像性や形状を向上させるものである。本研究では、このようなCEL技術のうち、特に本研究で開発したプロセス的に簡易な水溶性CEL材料を用いた技術^{4.2)}について論じる。

本章の構成としては、「緒言」に続いて「CELの原理」「CELの研究動向」により一般的なCEL技術の概論の後、本研究の水溶性CEL材料を「g線用水溶性CEL材料を用いたリソグラフィ」「i線用水溶性CEL材料を用いたリソグラフィ」「シミュレーションによるCELの解析」に分けて論じ、最後に「結言」とする。

4.2 CELの原理

CELは、レジスト上にCEL材料を塗布した後に露光を行うことが、その特徴である。CEL材料は、後章で述べるように光退色性試薬を主成分とすることから、入射光のうち光強度の弱い（光コントラストの低い）光は、CEL膜がこれを吸収してレジストまで到達せず、また、光強度の強い（光コントラストの高い）光は、CEL膜を退色させてレジストまで到達して、これを露光することになる。

このようにCEL材料（CEL膜）は、入射光のうち光強度の強い成分のみレジストに入射させるというコントラスト・エンハンスト効果を有していることがわかる。コントラストの向上した光は、レジストパターンのコントラスト向上につながることになる。

図4.1は、以上述べたCELの原理を簡単にあらわしている。CEL膜入射前後の光プロファイルにおいて、マスクエッジからマスク下のコントラストの低い光は、それがCEL膜通過後により光強度が弱くなり、反対に、マスク開口部のコントラストの高い光はそれがCEL膜通過後により光強度が強くなっていることがわかる。

4.3 CELの研究動向

4.3.1 CEL材料

CELは、4.1章で述べたようにGE社のGriffingらによって発明され、その後本研究以外に、Aero Space社のHalle^{4.3)}、東芝の仁木^{4.4)}、日立の内野^{4.5,6)}、沖の海部^{4.7,8)}、日電の遠藤^{4.9)}らによって研究が進められている。CELはその材料によってほとんどこの技術が決定されるので、各研究者ともこの材料開発に労力を費やしている。

一般に、CEL材料は、光退色性試薬とマトリックス・ポリマーおよびこれらを溶解させる溶媒を主成分としている。

光退色性試薬はCEL材料の中核をなすものであり、露光光に対する露光前後の透過率変化の大きいもの

が一般に用いられている。この試薬は、今までの研究動向から、ニトロ化合物^{4-1,10)}、ジアゾ化合物⁴⁻²⁻⁸⁾、スチリル・ピリジン化合物⁴⁻⁹⁾に分類される。いずれの材料もg線光またはi線光に適したものであり、その吸収ピークの移動はそれぞれの化合物の置換基により、最適化されることが知られている⁴⁻¹¹⁾。また、その化合物の性質から後者2種は水溶性であり、従ってCEL材料は水溶性CEL材料となることが特徴である。表4.1に、これらの光退色性試薬の光反応による光退色作用の機構をまとめた。これらの化合物の中では、ジアゾ化合物が最も反応速度（感度）が良く、スチリル・ピリジン化合物は2量化反応であるために最も感度が悪い。反面、ジアゾ化合物は水中で分解が早いという欠点もある⁴⁻¹²⁾。

マトリックス・ポリマーと溶媒については、CEL材料のCEL効果の阻害の要因とならないように、露光光に対して透明性の高いものが用いられている。特に、水溶性CEL材料のマトリックス・ポリマーとしては、CEL膜の露光後の除去という点から、水やアルカリ水溶液に対して溶解性の良好であることも考慮して、ポリビニル・アルコール⁴⁻⁹⁾、ポリビニル・ピロリドン⁴⁻³⁻⁸⁾、本研究のプルラン^{4-2,13,14)}、ポリスチレン・スルホン酸^{4-15,16)}などが使用されている。

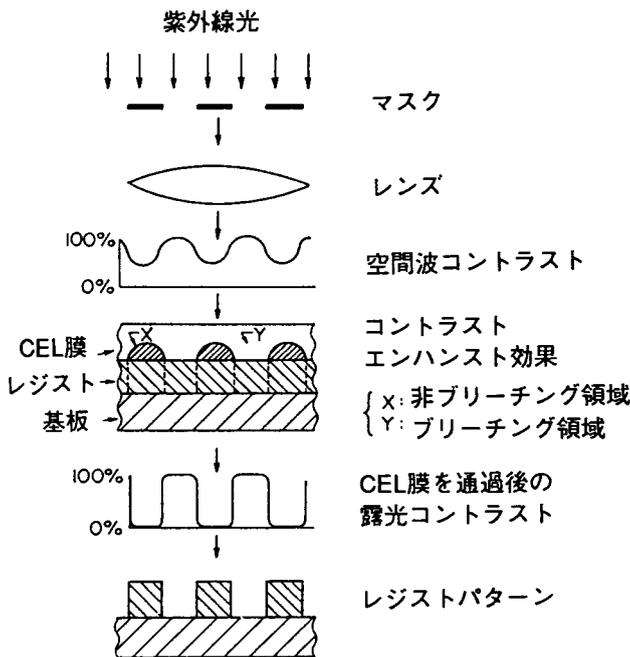


図4.1 CELの原理

表4.1 光退色性試薬の光反応による種類

光退色性試薬	反応機構	研究機関
ニトロ化合物	<chem>Ar-CH=N+(O-)-Ar' <->[hv] Ar-CH=N-Ar'</chem>	GE 沖・富士薬品
ジアゾ化合物	<chem>R-C6H4-N2+X- <->[hv] R-C6H4-N2</chem>	AERO SPACE 松下電芝 日立 沖・富士薬品
スチルベン化合物	<chem>Ar-CH=CH-C6H4-N+(R)X- <->[hv] Ar-CH=CH-C6H4-N+(R)X-</chem> の光二重化	日本電気・東洋合成

4.3.2 CELによるパターン形成

CELによるパターン形成の特徴については、その原理から得られるパターン解像性・形状の向上⁴⁻¹⁷⁾の他に、GE社のWilliamsら⁴⁻¹⁸⁾によって露光量・現像時間の変動に対するパターン寸法変動の低減、Philips社のBlancoら⁴⁻¹⁹⁾によって焦点深度の変動に対するパターン寸法変動の低減などのパターン線幅に対する良好な効果も報告されている。

なお、CEL材料を用いたパターン形成方法は、それが非水溶性であるか水溶性であるかによって異なり、それぞれの場合について図4.2、図4.3に示す。

非水溶性CELの場合には、図4.2に示すようにレジスト上に塗布する際に混合が起こる恐れがあり、また、除去に際しても有機溶媒によるCEL膜の除去が必須となり、この際に下層レジストを損傷するという問題点⁴⁻¹⁾もある。これに比べて、水溶性CEL材料の場合には、レジストとの混合も起こらず、また、CEL膜の除去に際しても、レジストの現像と同時に進行することができるという工程簡易化と安定化という有利点が存在することになる⁴⁻²⁾。

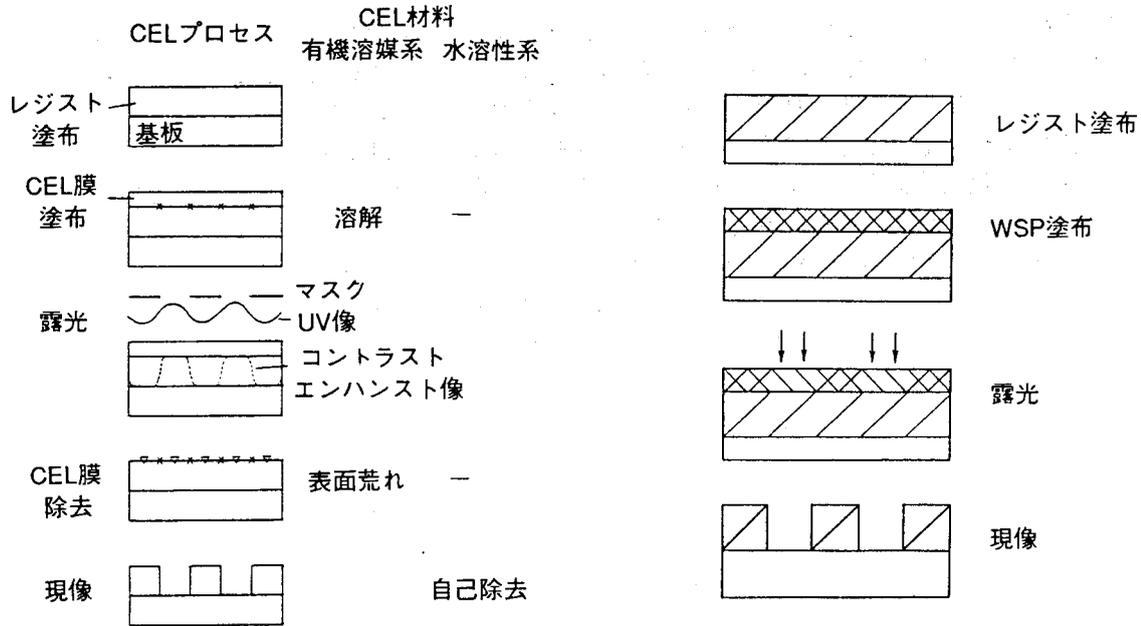


図4.2 非水溶性CEL材料によるCELプロセスフロー 図4.3 水溶性CEL材料によるCELプロセスフロー

4.3.3 CELのシミュレーション解析

CELの計算機シミュレーションは、主にUC大パークレー校のOldhamらによって開発されたSAMPLE⁴⁻²⁰⁾を改良したプログラムを用いることにより行われる。これはCEL材料を使用するレジスト材料の光反応特性 (IBM社のDillら⁴⁻²¹⁾によって提唱されたABCパラメータ) と現像液に対するレジストの溶解特性および露光に用いる光学系の特性 (露光波長、レンズのNA) により求められるものである。今までに東芝の中瀬ら⁴⁻²²⁾によってCELによるパターン形状の向上、HP社のO'toole⁴⁻²³⁾によってCELによる焦点深度変動に対する寸法変動の低減などの効果が、シミュレーションを用いて解析・確認されている。

4.3.4 まとめ

CEL技術に関する材料、プロセス、シミュレーションに関して、多くの論文が報告され、その技術についての概略がうかがえている。

次章以後では、本研究で行った水溶性CEL材料によるリソグラフィによりこれら先在する技術との比較対比を行い、また、それらに欠けているCELに関する種々の検討 (CEL材料の最適化、水溶性CEL材料による効果の定量的評価、水溶性CEL材料によるプロセスのシミュレーション解析など) を進めることにする。

4.4 g線用水溶性CEL材料を用いたリソグラフィ

4.4.1 はじめに

g線による露光は、第2、3章でも述べたように、現在最も汎用化しているものであり、従ってこの露光に適したCEL技術を開発することは、即生産レベルで用いられる可能性があることを意味している。

g線露光は、その波長が大であり解像性にとって不利である現状を打解するために、ステッパメーカーは高NA化を推進しており、g線露光による微細パターン形成の推進という点でもCELは非常に有用である。また、高NA化に伴う焦点深度減少にもCELは有効に対応できる。

本研究では、ジアゾ化合物である4-ジメチルアミノ・ナフマタレン・ジアゾニウム・クロライド塩化亜

鉛塩とプルランを主成分とするg線用の水溶性CEL材料（WSP-g： Water-Soluble Photopolymer for g-line ^{4-24,25}）について、まずその材料的なコントラスト・エンハスト効果の大きさがどのようにレジストパターン形成に影響を及ぼすかを検討することにした⁴⁻²⁶。レジスト・パターン形成については主に、露光量・焦点深度の変動に対するCELの効果の程度を求めることにした。

次に、材料を最適化したWSP-gを用いて、異なるNAをもつステッパーでの解像性や露光量、焦点深度の変動に対するパターン線幅の変動性、マスク寸法とパターン寸法の関係（マスク忠実性）などについての検討を行った。

4.4.2 WSP-gのコントラスト・エンハスト効果

本研究に用いた水溶性CEL材料WSP-gは、光退色性試薬ジアゾ化合物である4-ジメチルアミノ・ナフタレン・ジアゾニウム・クロライド塩化亜鉛塩（図4.4）とポリマーであるプルラン（林原生物化学研究所製；分子量3.9万）の10%水溶液を室温で混合溶解することにより調整した。

CEL材料調整においては、光退色性試薬と溶解性の良いポリマーの適応が重要であるが、本研究においては、水溶性であるプルラン⁴⁻²⁷（林原生物化学研究所製）を選定した。プルランの構造は、マルト・トリオース（グルコース3分子が α -1, 4結合）が規則正しく α -1, 6結合したものであり、図4.5に示した。プルランはバイオ・テクノロジーによって調製されている。

プルランの特徴は以下に示す如くであり、水溶性CEL材料のメインポリマーとしては最適である条件が列挙されている⁴⁻²⁸。

- 1) 水に対して極めて易溶性で中性。
- 2) 有機溶媒に不溶。
- 3) ゲル化、老化など、チクソトロピー性を示さない。
- 4) 粘度がpHに対して安定である。
- 5) 紫外領域における透明性が高い。
- 6) 培養時の条件を変えることにより分子量が数万から数百万まで任意に制御できる。
- 7) 他の試薬を混入しやすい。 以上の特徴をもつプルランは、これを膜としたときにも吸湿性や結晶性などを示さず、以下に示すようにCEL膜として有効に利用できることがわかった。

本研究において一般に、ジアゾ系化合物の紫外吸収はプルラン水溶液中で3~5nm長波長側に移動することを見出し、本ジアゾ化合物の場合も5nm移動し、10%プルラン水溶液中でその最大吸収ピークは420nmとなった。

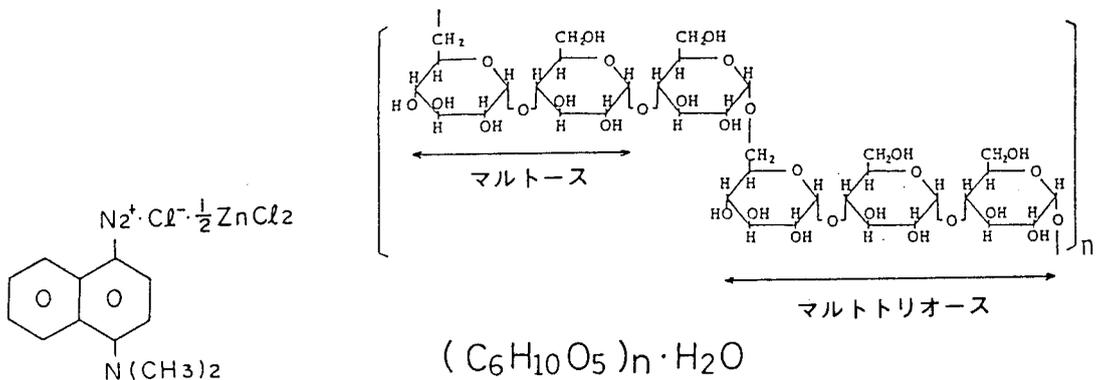


図4.4 WSP-gの光退色性試薬の化学構造

図4.5 プルランの化学構造

本研究では、WSP-gのコントラスト・エンハンスト効果の大きさの指針として、光退色試薬のCEL材料中における濃度の高さを挙げた。CEL材料の光退色試薬の濃度は、CEL材料のコントラスト・エンハンスト効果の目安であるA値に直接影響を及ぼすからである。即ち、A値は、Dillらによって提唱され、以下の式によりあらわされる感光性膜の露光前後の透過率の比である。

$$A = \frac{1}{d} \ln \frac{T(\infty)}{T(0)} \quad (4.1)$$

上記の式中でdは感光性膜の膜厚、T(0)はその膜の露光前の透過率、T(∞)は露光後の透過率である。上式で感光性膜がCEL膜であるとすれば、A値が大きいくほど、CEL膜はコントラストの強い光しか通過させないことになり、コントラスト・エンハンスト効果は向上する。そこでCEL材料の光退色性試薬の濃度が大きであるほどT(0)が小さくなりA値は向上することになる。なお、光退色性試薬の濃度によってT(∞)は全く変化しないことは本実験の過程で確認した。これはジアゾ化合物の光退色性は全くその試薬の量には依存していないことに相当している。

以上の理論に基づき、コントラスト・エンハンスト効果の異なる、即ち、A値の異なる水溶性CEL材料(WSP-g)の調整を行った。これは、10%プルラン水溶液に対して光退色性試薬である4-ジメチルアミノ・ナフタレン・ジアゾニウムクロライド塩化亜鉛塩の重量比を変えることにより行った。CEL材料の調整に関してはA値が約10を基準とし、その前後のものを試作するという指針に基づいた。表4.2に、10%プルラン水溶液に対する4-ジメチルアミノ・ナフタレン・ジアゾニウムクロライド塩化亜鉛塩の添加量割合(%)及び、その時に得られた436nmにおけるA値を記した。なお、ここではWSP-gの膜厚はほとんどプルラン水溶液の濃度に依存し、すべての場合につき、0.25 μmであった。また、それぞれのA値のWSP-gの紫外分光曲線を図4.6に示した。

なお、表4.3に、図4.7の各WSP-gの露光量に対する透過率の変化を表す曲線により求められる本研究で用いたCEL材料のB、C値を示す。B、C値は、光反応化合物の退色効果を表す定数であり以下の式により計算される。

$$B = -\frac{1}{d} \ln T(\infty)$$

$$C = \frac{A+B}{A I_0 [1-T(0)]} \frac{dT}{dt} \quad (4.2)$$

ここでT(0)はCEL膜の露光前の透過率、T(∞)は露光後の透過率、I₀は露光強度、dT/dtは単位時間あたりの透過率変化、dはCEL膜厚である。

表4.3より、他の光反応化合物であるたとえばレジストのB、C値に比べて各CEL材料のB値は小さく、C値は大きいことがわかり、本研究で用いたCEL材料としての性能が証明される。表4.3で示したB値については、ポリマーであるプルランの透明性、C値については、光退色性試薬であるジアゾ化合物の量子収率の良さがそれぞれCELの効果に寄与していると考えられる。

4.4.3 WSP-gのg線ステッパーにおけるパターン形成への応用

(1) はじめに

前章で、g線用水溶性コントラスト・エンハンスト材料(WSP-g)のコントラスト・エンハンスト効果について論じたが、本節では、WSP-gの材料的改良と、これをg線ステッパーに用いた場合のパターン形成についての諸特性について述べる。

(2) CEL材料について

本節では、前節で述べたWSP-gの組成を最適化するために、ポリマーとしてポリビニル・ピロリドン

(東京化成製；分子量36万)を追加した。最適化した重量組成は4-ジメチルアミノ・ナフタレン・ジアゾニウム・クロライド塩化亜鉛塩：プルラン：ポリビニル・ピロリドン：水=2：4：1：45となった。

この組成は、WSP-gのコントラスト・エンハンスト効果が最も顕著となるように前節で述べた如く光漂白試薬の量を最大とし、また、露光時の発泡の量を最小限とするようにガス透過性の良いポリビニルピロリドンの量を決定したものである^{4,29,30)}。

WSP-gの紫外分光特性は島津UV-265FS紫外線分光器により、WSP-gの膜厚はDEKTAK-IIA (Sloan Technology社)によりそれぞれ測定した。

表4.2 各WSP-gのA値

プルラン水溶液中のジアゾ量 (%)	A (μm^{-1})
2.5	6.6
3.5	9.3
5.0	12.6

表4.3 各WSP-gのB、C値

A	B (μm^{-1})	C (cm ² /mJ)
6.6	0.33	0.006
9.3		0.004
12.6		0.003

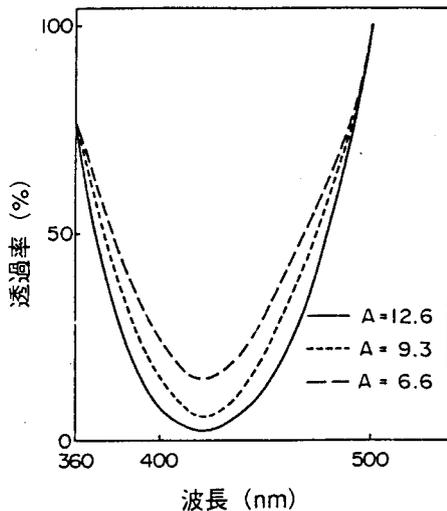


図4.6 WSP-gの紫外分光特性

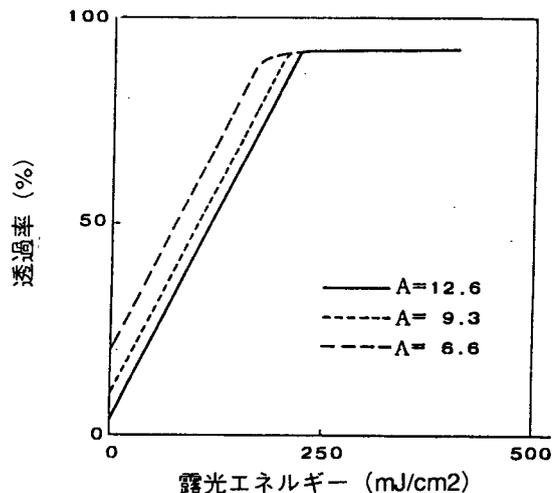


図4.7 各WSP-gのブリーチング特性

(3) 実験

WSP-gを用いたパターン形成としては、レジストの感度特性、解像特性、パターン線幅制御についての検討を行った。

WSP-gの膜厚は0.15 μm 、レジストは1.2 μm 厚のMPS-1400 (Shipley社製)であり、現像はMF-319 (Shipley)にて60秒間の浸漬により行った。

露光はg線ステッパにより行い、OPTIMETRIX8010 (OPTIMETRIX社製; NA0.32)、LD-5010 (日立; NA0.38)、NSR1505G4C (ニコン; NA0.42)の3種により行った。

パターン線幅についてはMEA-3000電子線測長機 (明石製作所)により測定した。

4.4.4 結果と考察

(1) WSP-gの紫外分光特性

改良したWSP-gのUV分光特性を図4.8に、また、これから得られるABCパラメータを表4.4に示す。図4.8より、WSP-gは436nm付近(425nm)に吸収ピークを持っており、大きい光退色作用を示していることがわかる。また、ABCパラメータからも、WSPのA、C値は大きく、B値は十分小さいことからWSP-gのコントラスト・エンハンスト効果が大きいことが理解できる。

(2) WSP-gを用いたレジストの感度特性

図4.9は、WSP-gの使用の有無によるMPS-1400の感度特性図であり、また、表4.5は、図4.9の結果を要約したものである。

表4.5中では γ は以下の式により定義した。

$$\gamma = \frac{1}{\log(E_{20} + E_{80})} \quad (4.3)$$

ここで、 E_{20} はレジスト残膜が初期膜厚の20%となるときの露光エネルギー、 E_{80} はレジスト残膜が初期膜厚の80%となるときの露光エネルギーである。

これらの図表から、WSP-gを用いることにより41.6%の γ 値の向上と未露光部レジストの残膜率上昇がうかがえる。さらに、残膜が0となるときの露光エネルギーで定義されるしきい値エネルギーはWSP-gの使用によってもわずか(3.6%)しか上昇しないことがわかった。

これらのWSP-gの結果は、高感度で高アスペクト比のパターンを得られることを示唆するものである。なお、WSPを用いた場合の高感度化は表4.4のC値が大きいという事実からも理解できる。

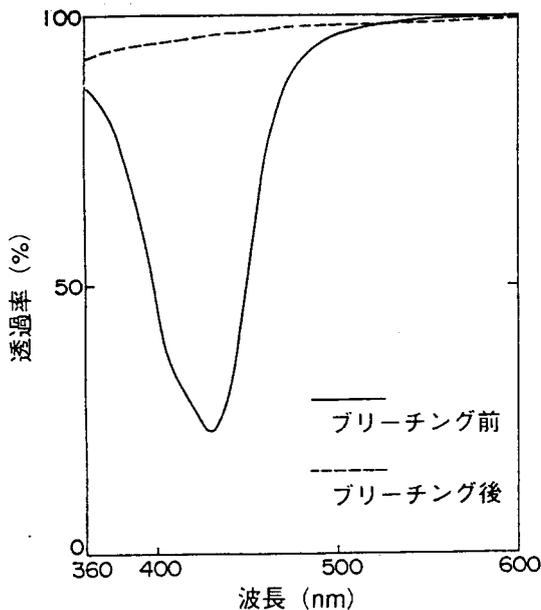


図4.8 改良したWSP-gの紫外分光特性

表4.4 改良したWSP-gのA、B、C値

A (μm^{-1})	B (μm^{-1})	C (cm^2/mJ)
9.66	0.25	0.042

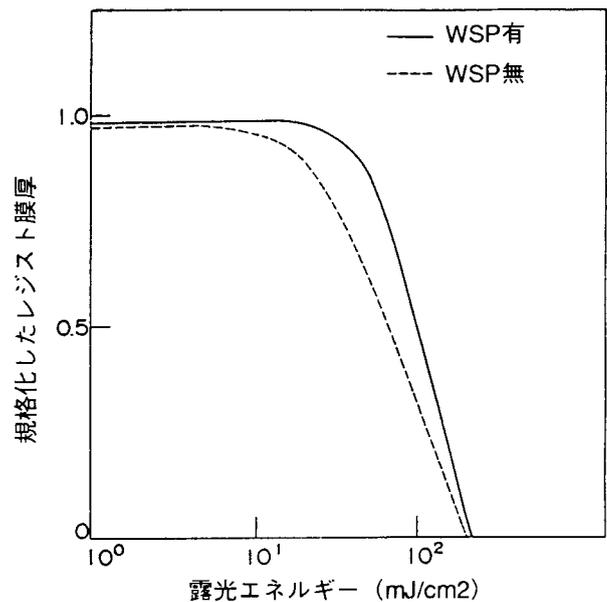


図4.9 WSP-gの感度特性

表4.5 WSP-gの γ 、感度

	MPS-1400		
	γ	感度 (mJ/cm^2)	未露光部のレジスト膜減り(%)
WSP有	3.32	140	3.0
WSP無	4.70	145	2.0

(3) WSP-gを用いたパターン解像性

図4.10は、NAが0.32, 0.38, 0.42のそれぞれのステッパーを用いてWSP-gのあるなしによってMPS-1400のパターンを形成した場合の例である。それぞれの場合についてWSPを用いることにより、パターン形状とレジスト残膜性が向上している。特に、NA0.32の場合には、解像性についても向上(0.8 μm)している。

これらのSEM写真の結果をまとめたものが表4.6である。表4.6より、WSP-gは用いたステッパーの光学系のNAを向上させる、即ち、WSP-gの使用はNAの小さいステッパーの性能向上を大きくもたらせるということが言える。

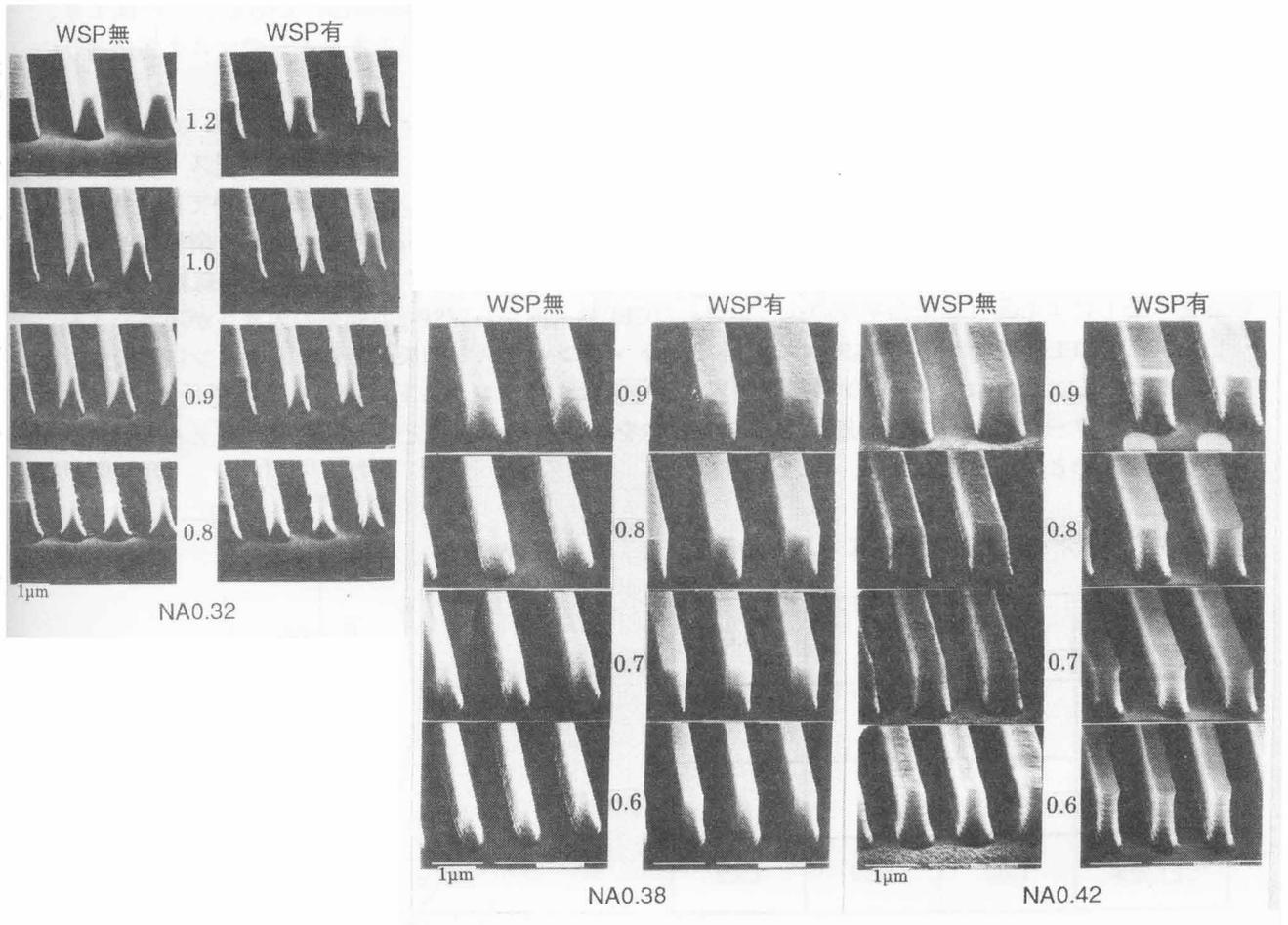


図4.10 g線ステッパ (NA=0.32、0.38、0.42) における WSP-gを用いたレジストパターンのSEM写真

表4.6 パターン解像性のNA依存

◎良 ○普通 △不良

CEL \ N.A.	0.32		0.38		0.42	
	WSP無	0.9	△	0.6	△	0.6
WSP有	0.8	○	0.6	○	0.6	◎

(4) WSP-gを用いたパターン線幅制御

NA0.42のg線ステッパーによる所望のパターン線幅±0.1μmの露光エネルギー余裕度を表4.7にあらわした。この表中で、CEL効果度は、WSP-gありなしによる露光エネルギー余裕度の比で定義される。この表からも、各線幅における、WSP使用による露光エネルギー余裕度とCEL効果度の値の大きさは、WSPがパターン線幅制御に有効に適用されたことを示唆している。

図4.11は、パターン線幅とマスク線幅のリニアリティ特性をあらわしている。この図において、露光エネルギーは、WSP-g使用の場合が290mJ/cm²、単層レジストの場合が240mJ/cm²である。この図より、WSPを用いることにより、0.6μmから1.0μmまでのパターンを同一露光エネルギーでマスク線幅通りに正確に形成でき、マスク忠実性が良好であることが理解できる。

図4.12は、パターン線幅と焦点深度の関係をあらわしており、パターン形成の条件については、NA0.42のg線ステッパーを用いている。この図より、WSPを用いたプロセスは、通常の単層レジストに比べて焦点深度変動に対するパターン線幅を維持することができることがわかる。この結果については、さらに表4.8で異なるパターン線幅についてもまとめて示した。所望の線幅±0.1μmの焦点深度の余裕度という観点からあらわしたこの表からも、WSP-gの優位性があらわれており、また、それぞれの線幅において、WSPありなしによる焦点深度余裕度の比で定義したCEL効果度からWSP-gの効果の大きさが理解できる。

また、このCEL効果度から、WSP-gのコントラスト・エンハンスト効果が微細なパターンほど大きくなることがわかる。これは、パターンの解像限界においては、通常レジストに対する入射光のプロファイルが、大きいパターンに比べて、一層悪くなり、WSPを用いたプロセスとの入射光プロファイルの差が大きくなったためと考えられる。

表4.7 WSP-gにおける露光エネルギー余裕度

パターン幅 CEL (μm)	1.0	0.8	0.6
WSP無	75	70	60
WSP有	100	90	78
CEL効果	1.33	1.29	1.29

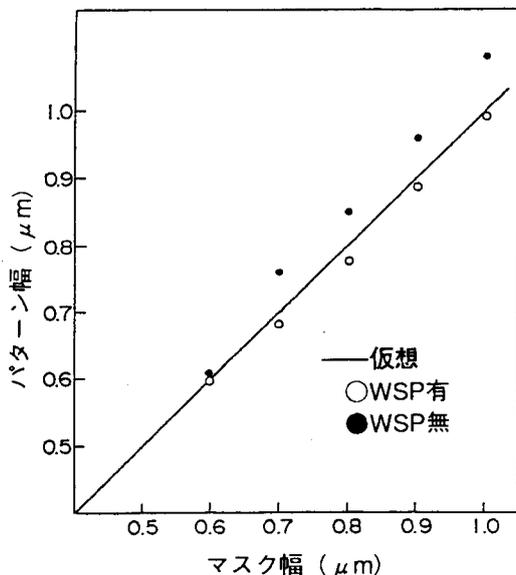


図4.11 WSP-gにおけるリニアリティ特性

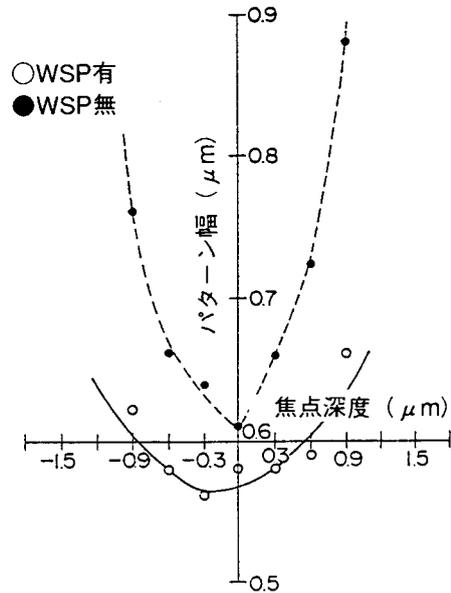


図4.12 WSP-gにおける焦点深度特性

表4.8 所望の線幅の焦点深度余裕度

パターン幅 CEL (μm)	1.0	0.8	0.6
WSP無	3.6	2.8	1.1
WSP有	4.4	3.8	1.8
CEL効果	1.22	1.36	1.64

(5) まとめ

材料的に改良を加えたWSP-gはレジストパターンの形状、解像性やパターン線幅の制御に対してのg線露光に対して多くの利点を持っていることがわかった。また、WSP-gの感度の良好さやそのプロセス的簡易性は、生産性の面でも非常に有効である。

4.4.5 まとめ

g線用の水溶性CEL材料 (WSP-g) についてのリソグラフィについて論じた。

WSP-gは光退色性試薬として4-ジメチルアミノ・ナフタレン・ジアゾニウム塩化亜鉛塩を用い、ポリマーとしてプルランさらにはポリビニル・ピロリドンという構成により材料最適化が行われた。

コントラスト効果 (A値) の異なるWSP-gのパターン形成に関する検討により、A値が約10のWSP-gは、露光量の変化に伴うパターン寸法変動・パターン形状、焦点深度の変化に伴うパターン形状、焦点深度余裕量などの点で特に優れていることが、わかった。

このようなA値が10程度のWSP-gを用いて、種々のパターン形成を試み、ステッパーNAの相違によらず、パターン形状や解像性が向上し、また、露光エネルギーや焦点深度の変動に対するサブミクロン・パターン線幅変動の低減やマスク寸法とパターン寸法の同一性 (マスク忠実性) においても良好な特性が得られた。

以上のことから、g線用水溶性CEL材料 (WSP-g) は、その感度の良好さなども考慮して、十分工業的に使用できることがわかった。

即ち、WSP-gはg線露光による実際のデバイス製造を通常の単層レジスト・プロセスに比べて大幅にたやすいものとすることができ、WSP-gを用いたリソグラフィがサブミクロン・リソグラフィの主要技術の一つとなると思われる。

4.5 i線用水溶性CEL材料を用いたリソグラフィ

4.5.1 はじめに

i線による露光は、第2章で述べたように、その短波長性による解像力の向上と焦点深度の増大という利点があり、近年多くの研究がなされている⁴⁻³¹⁻³⁵⁾。

i線露光にCELを利用することは、i線露光の解像性の高さや焦点深度の低下をカバーすることが可能であると予測され非常に微細なパターン形成が望める。

本研究では、ジアゾ化合物である4-モルフォリノ・ベンゼン・ジアゾニウム・クロライド塩化亜鉛塩とポリパラ・スチレン・スルホン酸を主成分とするi線用の水溶性CEL材料 (Water-Soluble Photopolymer for i-line ; WSP-i)⁴⁻³⁶⁻³⁸⁾についての材料特性についての検討を行った。

そして、さらにこの材料特性のうち、WSP-iの保存安定性の改良を材料的に行い、これを用いて、レジスト・パターンの解像性、高 γ レジストへの適用や、露光量、焦点深度変動に対するパターン線幅の変動性、マスク寸法とパターン寸法の関係 (マスク忠実性) などについての検討を、ステッパーNAによる比較を含めて、行った。

4.5.2 WSP-iの材料構成

新しいWSP-iでの組成としては、ポリマーとしてポリパラ・スチレン・スルホン酸 ($M_w=54300$, $M_w/M_n=2.19$) (図4.13 (a)) を、光退色性試薬としては、4-モルフォリノ・ベンゼン・ジアゾニウム・クロライド塩化亜鉛塩 (図4.13 (b)) を用いた。これらは、それぞれ、従来のWSP-iの保存安定性とコントラスト効果を向上させるという目的により選定した。

まず、新しいWSP-iのコントラスト効果を最大とするために、CEL材料中の光退色試薬濃度を最大とす

(2) CEL材料の分光特性

図4.15にWSP-iのi線露光前後のUV分光を示す。WSP-iの膜厚は $0.15\mu\text{m}$ であり、光退色に必要なエネルギーは $150\text{mJ}/\text{cm}^2$ であった。この図より、WSP-iでは 365nm 付近で急速で大きい透過率変化を示し、CEL材料として効果的な特性が理解できる。

実際にABCパラメータを測定すると、表4.9の如くとなった。この表より、A、C値は適度に大きくB値は小さいことから、このWSPでは、入射光のコントラスト向上に十分な能力があることがわかる。

(3) WSP-iを用いたレジストの感度特性

WSP-iを用いたMPS-1400の感度特性を図4.16にそのまとめを表4.10に示した。高いコントラスト効果 ($\gamma = 3.02$) とレジスト膜減りの減少 (2.0%) から、WSP-iを用いたプロセスはわずかな感度の低下 (31.7%) で、高コントラスト・高解像のパターン形成を示唆している。

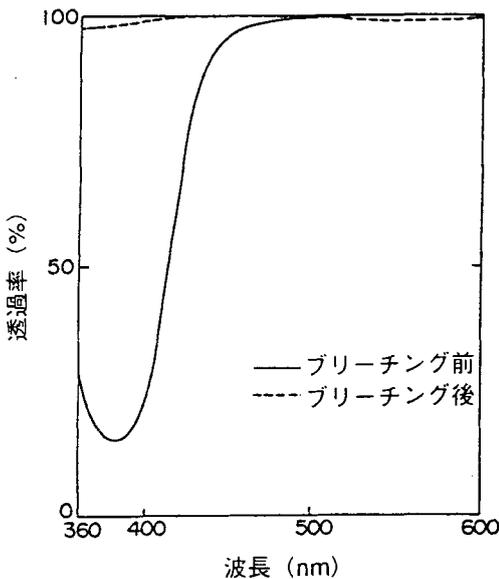


図4.15 WSP-iの紫外分光特性

表4.9 WSP-iのA、B、C値

A(μm^{-1})	B(μm^{-1})	C(cm^2/mJ)
10.01	0.15	0.078

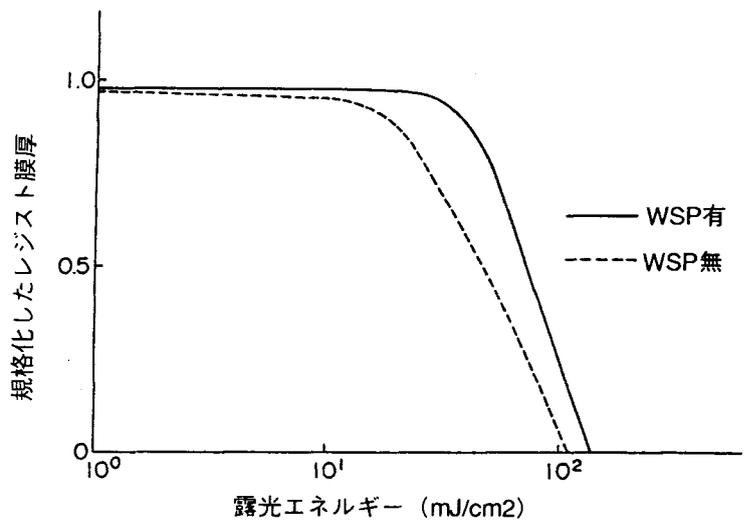


図4.16 WSP-iの感度特性

表4.10 WSP-iの感度

	コントラスト	感度 (mJ/cm^2)	未露光部の膜減り量 (%)
CEL無	2.06	104	3.0
CEL有	3.02	137	2.0

(4) パターン形状と解像性

図4.17は $0.5\mu\text{m}$ から $0.8\mu\text{m}$ までのL&Sパターン (MPS-1400, $1.5\mu\text{m}$ 厚) を示している。WSP-iを用いることにより、 $0.5\mu\text{m}$ のパターン解像が可能となり、また、それぞれのパターンの形成が向上し、膜減りの低減が実現された。コンタクトホール・パターン (図4.18) についても同様の効果がうかがえ、WSP-iにより通常レジストの解像度を $0.1\mu\text{m}$ 上回る、 $0.6\mu\text{m}$ のパターン形成が可能となり、また、その形状もコントラストが向上した。

さらに、高解像レジストであるHPR-1182⁴⁴⁰⁾ ($1.5\mu\text{m}$ 厚) を用いることにより、 $0.5\mu\text{m}$ から $0.8\mu\text{m}$ までのより高アスペクト比のパターンが得られた (図4.19)。

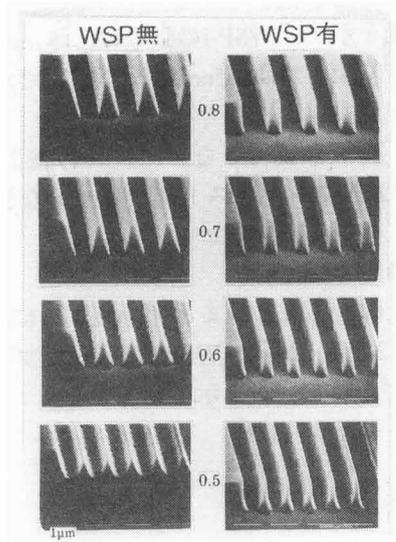


図4.17 WSP-iによる0.5から0.8 μm L&SパターンのSEM写真 (MPS-1400レジスト)

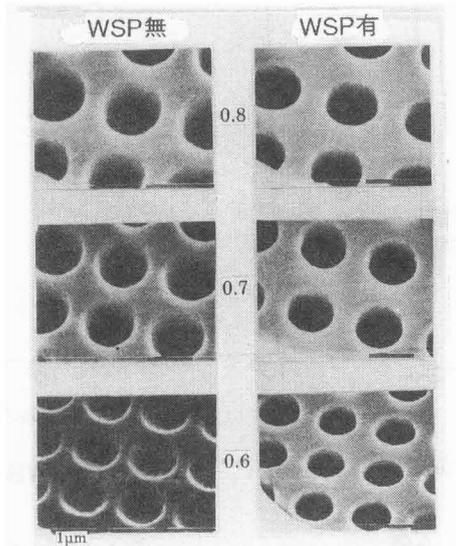


図4.18 WSP-iによるコンタクトホールのSEM写真

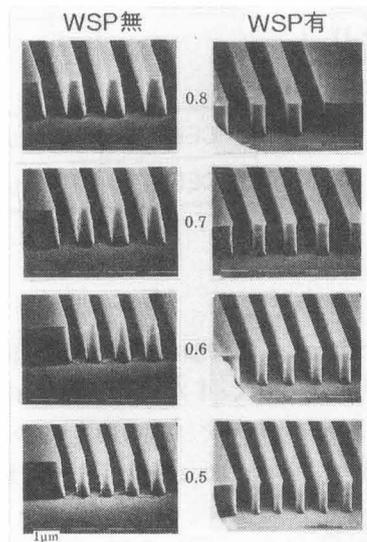


図4.19 WSP-iによる0.5から0.8 μm L&SパターンのSEM写真 (HPR1182レジスト)

(5) パターン線幅制御性

図4.20, 図4.21はそれぞれNA0.42のステッパを用いた場合の0.6 μm パターンの露光エネルギー及び焦点深度の変動に対する変動性についての図である。

これらの図より、WSP-iはパターン線幅変動に対して良好なコントラスト向上作用を示していることがわかる。WSP-iを用いることにより露光エネルギーに対するパターン線幅の変動は低減する。また、WSP-iを使用したプロセスは、通常の単層レジストに比べて、焦点深度の変動に対するパターン線幅を維持させ、焦点深度幅を増大させる。

さらに、高NA (NA0.42) のステッパの使用に伴う焦点深度幅の低減という問題に関しても、WSP-iはこれを解決することがわかる。WSP-iの使用によりNA0.42のステッパを使用した場合の焦点深度は単層レジストの場合に比べて大きく増大し、NA0.35のステッパ使用時と近づいていた。

図4.22は、マスク線幅とパターン線幅のリニアリティ特性を、NA0.42のステッパを用いて示している。使用したレジストは1.5 μm 厚のMPS-1400であり、WSP-iを用いた場合の露光エネルギーは217 mJ/cm^2 、単層レジストの場合には173 mJ/cm^2 である。

図4.22より、WSP-iを用いることにより、0.5 μm から1.0 μm までのパターン転写がマスク線幅を忠実に再現できることがわかった。このようなWSP-iの性能は、実際のデバイス製造の歩留まりと生産性の向上ができることを示唆しているものである。

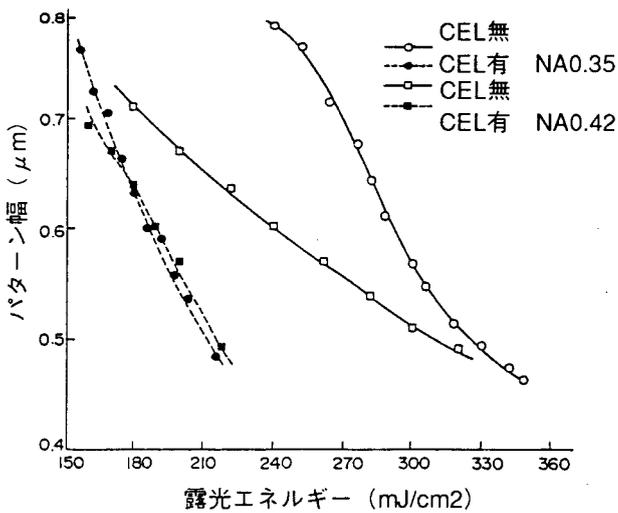


図4.20 WSP-iによる露光特性

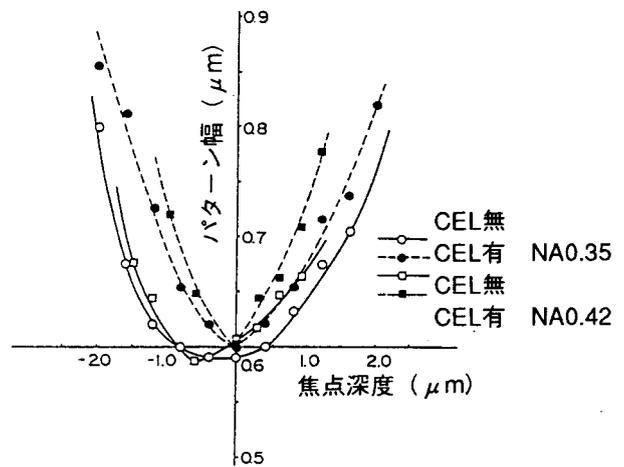


図4.21 WSP-iによる焦点深度特性

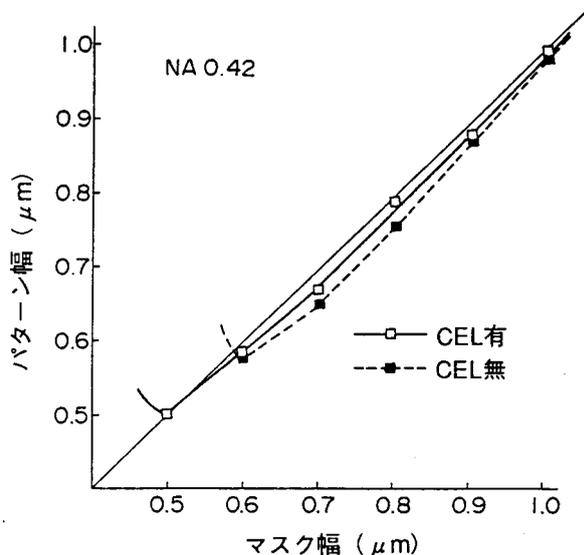


図4.22 WSP-iによるリニアリティ特性

(6) まとめ

コントラスト・エンハンスト効果と保存安定性を改良したWSP-iを考案した。WSP-iは、その光退色性試薬である4-モルフォリノ・ベンゼン・ジアゾニウム・クロライド塩化亜鉛塩と、ポリマーであるポリパラ・スチレン・スルホン酸の働きにより、6ヶ月以上の保存安定性とA値10という良好な結果を得た。

この新しいWSP-iを用いることにより、パターン解像性・形状、パターン線幅制御性が $0.5\sim 0.6\mu\text{m}$ まで良好となった。

4.5.4 まとめ

i線用の水溶性CEL材料 (WSP-i) についてのリソグラフィについて論じた。

保存安定性の改良したWSP-i (4-モルフォリノ・ベンゼン・ジアゾニウム・クロライド塩化亜鉛塩とポリパラ・スチレン・スルホン酸を主成分) は6ヶ月以上の室温保存が可能であることがわかった。このWSP-iを用いて、 $0.5\sim 0.6\mu\text{m}$ のパターン解像性やマスク忠実性の良好な特性を得た。

以上のことから、i線用水溶性CEL材料はサブミクロン領域のパターンまで形状良く形成するとができ、超LSIである16M DRAM製造においても特に大きな力を発揮することが予想される。

4.6 シミュレーションによるCELの解析

4.6.1 はじめに

4.4、4.5章で水溶性CEL材料 (WSP-g、WSP-i) の材料特性及びレジストパターン形成への応用について論じてきたが、実際のCELのプロセス適用には計算機シミュレーションによる解析が有効である^{441~444}。

ここでは、CELに於けるCEL膜の露光特性の解析を中心として、CELによるサブミクロン・リソグラフィの可能性について解析した。

4.6.2 CELの解析手法

(1) CELの解析

CEL膜中での正規化された感応基濃度をM、光強度をIとすると、

$$\begin{aligned} \frac{\partial I(x, t)}{\partial x} &= -I(x, t)[AM(x, t)+B] \\ \frac{\partial M(x, t)}{\partial t} &= -I(x, t)M(x, t)C \end{aligned} \quad (4.4)$$

で表わせる。

ここでA, B, Cは、薄膜の光透過率を表すパラメータで、CEL膜の特性を表現している。

ここでCELを透過した光の透過率Tは、CEL膜厚をdとして

$$T(t) = \exp\left[-\int_0^d \{AM(x, t)+B\} dx\right] \quad (4.5)$$

と表わせる。また、式 (4.4) により

$$\begin{aligned} A &= \frac{1}{d} \ln\left[\frac{T(\infty)}{T(0)}\right] \\ B &= -\frac{1}{d} \ln T(0) \end{aligned} \quad (4.6)$$

となる。

図4.23に、本研究で試作したCEL膜の光透過特性をDillの提案したモデルを用いて解析した結果を示す。図に示す様に光透過特性がよく表現できている事が判る。

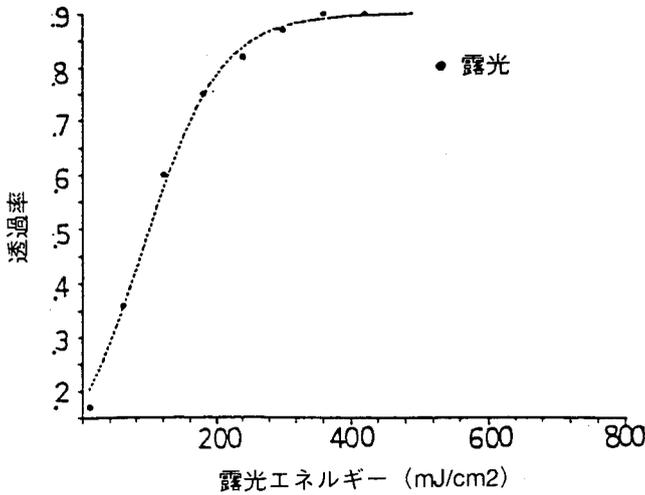


図4.23 CEL膜によるブリーチング特性

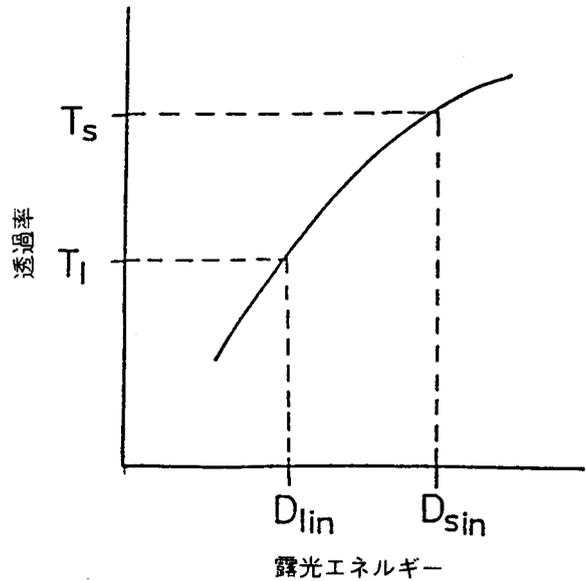


図4.24 CEL膜のエネルギー透過特性

この場合のCEL膜のパラメータは、

$A=4.7 [\mu m^{-1}]$ $B=0.3 [\mu m^{-1}]$, $C=0.017 [cm^2/mJ]$ であった。

CEL膜を透過した光が下層のレジストを露光する露光量即ち露光量 D_{ex} は、透過した光強度の時間積分となる。CEL膜への露光強度を I_0 として、

$$D_{ex} = \int_0^{\tau} I_0 T(t) dt \quad (4.7)$$

と表わせる。CEL膜の特性は、このエネルギーの透過特性によって決まる。

(2) CELの評価方法

CELの効果を解析・評価し、コントラスト・エンハンスト効果を定量化する為に、ここではCEL膜のコントラスト・エンハンスト・ファクター α を導入する。

マスクを通過後、CEL膜に入射する光のコントラスト C_{in} は、Space中央での光エネルギー D_{sin} と、Line中央での光エネルギー D_{lin} を用いて、

$$C_{in} = \frac{(D_{sin} - D_{lin})}{(D_{sin} + D_{lin})} \quad (4.8)$$

で表される。

次に、図4.24に示す様に、CEL膜のエネルギー透過特性で先の D_{sin} と D_{lin} の入射光に対する透過率を T_s 、 T_l とすると、CEL膜の透過後の出力光のエネルギー D_{sout} 、 D_{lout} は、

$$\begin{aligned} D_{sout} &= D_{sin} \cdot T_s \\ D_{lout} &= D_{lin} \cdot T_l \end{aligned} \quad (4.9)$$

と表わせる。ここで、

$$T_l = T_s - \frac{\Delta T}{\Delta D (D_{sin} - D_{lin})} \quad (4.10)$$

と近似すると、 D_{lout} は

$$D_{lout} = D_{lin} T_s \left[1 - \frac{\Delta T}{\Delta D} \frac{D_{sin}}{T_s} \left(1 - \frac{D_{lin}}{D_{sin}} \right) \right] \quad (4.11)$$

と表わせる。

ここで、

$$\alpha = \frac{\Delta T D_{\text{sin}}}{\Delta D T_s} \quad (4.12)$$

をコントラスト・エンハンスト・ファクターと呼ぶことにする。 α は、正規化されたエネルギー透過率の傾きを表し、この値が大きい程コントラスト・エンハンスト効果が大きい。

α を用いると、CEL膜を透過した後の出力光のコントラスト C_{out} は、

$$C_{\text{out}} = C_{\text{in}} \frac{[(1+C_{\text{in}})+\alpha(1-C_{\text{in}})]}{[(1+C_{\text{in}})-\alpha(1-C_{\text{in}})]} \quad (4.13)$$

と表わせる。

図4.25に、 α に対するコントラスト・エンハンスト効果を示す。例えば、入力光のコントラスト $C_{\text{in}}=0.2$ に対し α が2.5以上あると、出力光のコントラスト C_{out} は0.8が確保できる事を示している（これは、 $0.35\mu\text{mL\&S}$ パターンの解像に相当する）。

このように図4.25より、要求されるCEL膜の α 値が予測できる。

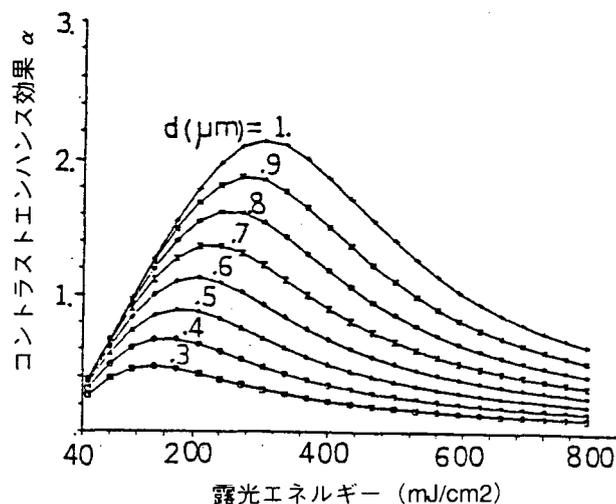
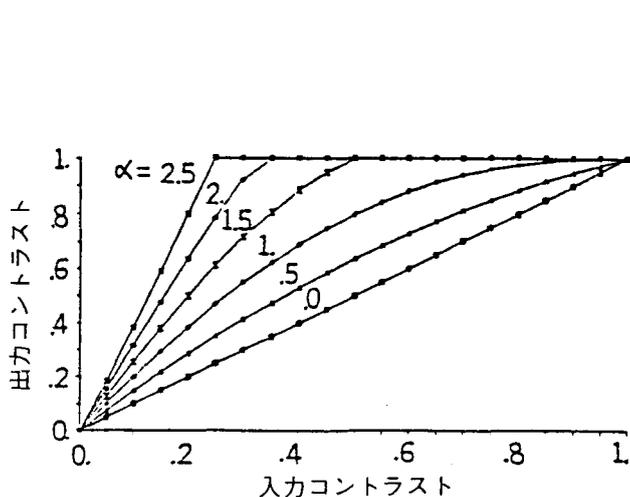


図4.25 コントラスト・エンハンスト・ファクタによるコントラスト特性 図4.26 コントラスト・エンハンスト・ファクタと露光量の関係

(3) CELの露光条件最適化

次に、実際に試作したCEL膜についてCEL膜の入射する露光量の変化に対する α の値を算出した。図4.26に、その結果を示す。図に示される様に、 α の値は、ある入力露光量に対してピーク値を持つことが判る。CEL膜へ入力露光量をこのピーク値に合わせれば、CEL効果が最も大きくなり、CELの露光条件の最適化ができると考えられる。

このモデルに妥当性を評価する為に、実際にCEL膜への入力露光量を変化させていった場合の出力光のコントラストをシミュレーションした。図4.27にその結果を示す。グラフ中の↓印で示す露光量は、 α が最大となる時の値を示す。

図4.27に示される様に、実際にコントラストが最大になる露光量は、 α で定まる値より小さくなっている。これは、式(4.11)でエネルギーの透過率を線形近似している為である。 α が最大となる露光量を、

マスクパタン・エッジでのCEL膜への入射露光量とする事により、この誤差は小さくなる。

しかし、実質的にはコントラストがピークとなる最適値近くの値が予測できており、コントラストの誤差も小さいので、先の α を用いたモデルによって、CEL膜の露光量最適化ができると考えられる。

この様に、 α を用いたモデルによって、CEL膜の露光条件の最適化ができる。

しかし、後述するが実際には下層レジスト感度との整合によって、最適露光量を定める必要がある。

以上の手法で、 $NA=0.35$ 、 $\sigma=0.8$ の光学系において $0.35\mu\text{m}$ のL&SパターンのCELプロセスの最適化を試みた。

入力コントラスト0.2に対して、出力コントラストを0.6以上得ようとした場合、図4.25より要求される α 値は約2.0以上であることがわかる。次に図4.26より α が2.0を確保しうるCEL膜厚は $1.0\mu\text{m}$ 以上になるので、ここでは、 $1.0\mu\text{m}$ とすると、その場合のCEL膜への入力露光量は約 $320\text{mJ}/\text{cm}^2$ となる。マスクによる露光量の減衰を考慮して照射露光量は $950\text{mJ}/\text{cm}^2$ となる。

図4.28に上記の条件でCEL膜のみを透過した場合の出力光を求めたシミュレーション結果を示す。図に示す様に、入力コントラストは0.63となり、ほぼ目標とする効果が得られることがわかる。この場合の出力露光量は、約 $45\text{mJ}/\text{cm}^2$ である。

図4.29に“SAMPLE”を二層構造レジストが扱える様に改造したものをを用いて、上記のプロセスをシミュレーションした結果を示す。 $0.35\mu\text{m}$ が解像しうることが実証された。

この様に、コントラスト、エンハンスト・ファクター α の導入とそれに基づく解析により、CEL効果の定量的な予測と、最適化が可能となる。

この方法に基づいて、 $0.5\mu\text{m}$ L&Sパターンの露光条件の最適化を行い、露光実験を行ったところ、良好なパタンが形成できる事が確かめられた。

4.6.3 CELの可能性

最後に、CELによって得られる解像限界について考察する。

原理的には、光のコントラストが0にならない限りCEL効果は得られるが、実際には、光学系、マスク寸法の精度や、CEL膜材料、CEL膜厚の制御性、露光量の増大等の制約がある。

ここでは、これまでの解析から、 α の上限が2~3でコントラストの増倍効果が約3倍得られるとし、入力光のコントラストの最低限度が約0.2、レジストパタン解像の為に必要な最小コントラストが0.6以上という設定のもとに、 λ 及びNAを変化させた場合の解像性を調べた。

したがって、従来法では、入力光のコントラストが0.6以上の場合を解像限界とし、CELでは、入力光のコントラストが0.2以上の場合、解像し得ると仮定した。

図4.30にその結果を示す。この場合には、CELを用いることにより約20~30%の解像力の改善が期待できることがわかる。

4.6.4 まとめ

以上述べてきた様に、CELを用いてのサブミクロン・リソグラフィの可能性と、要求されるCELシステムについてシミュレーションした。

ここでは、コントラスト・エンハンスト・ファクター α を導入して露光条件の最適化を行い、またCELに具備されるべき条件を明らかにした。

さらに、CELを用いることによって、20~30%の解像度の改善が期待出来る事が判った。

今後これらのシミュレーション結果をもとに、CELの効果を実験的にも検証し、また、材料、プロセスの確立を行っていく。

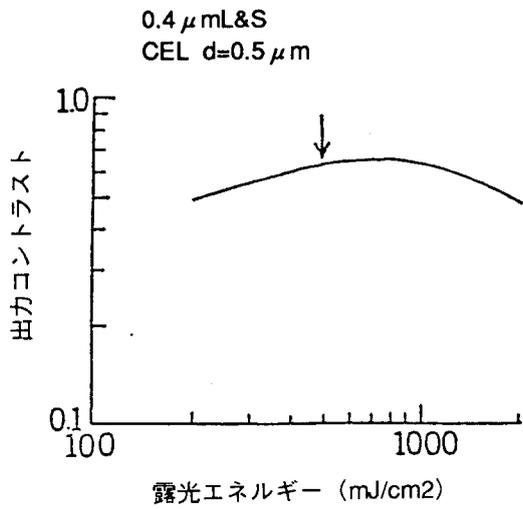


図4.27 露光量によるコントラストの最適化

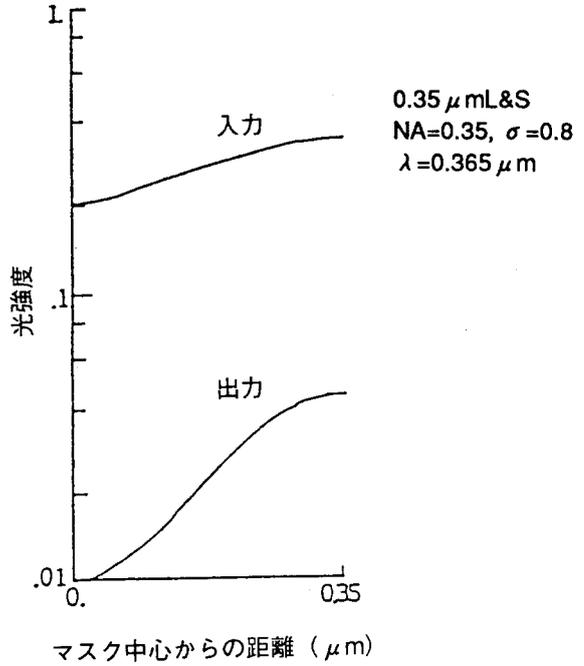


図4.28 CELを最適化した場合の0.35 μm L&Sパターンにおける光強度プロファイル

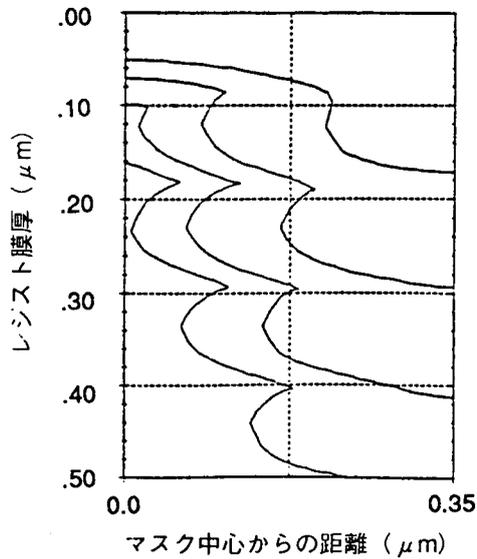


図4.29 CELを最適化した場合の0.35 μm L&Sパターンにおける形状プロファイル

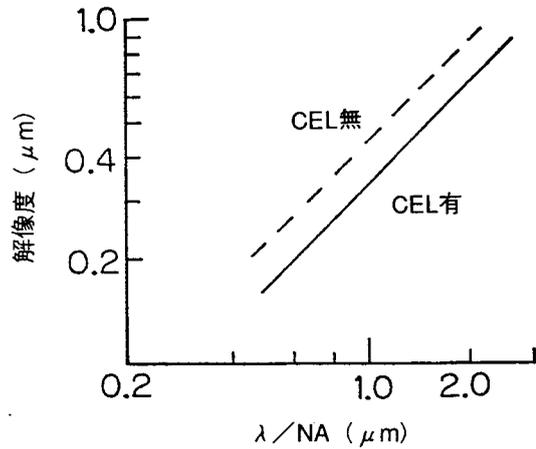


図4.30 CELの可能性と解像限界

4.7 結言

コントラスト・エンハンスト・リソグラフィ (CEL) について、その原理・研究動向を含めて、本研究で開発した水溶性のg線, i線用CEL材料 (WSP-g, WSP-i) を用いた検討について論じた。

本研究では、プロセス的に簡易な水溶性CELプロセスを、材料構成とその物理的特性を世界で初めて明らかにした。

結果としては、g, i線リソグラフィともWSPを用いることにより、パターンの解像性・形状の向上、露光エネルギー・焦点深度変動に対するパターン寸法変動の低減、マスク忠実性の向上などの利点を確認され、それぞれのリソグラフィにとって非常に有益であることがわかった。

特に、g線リソグラフィにとってWSP-gは、高NA化に伴う焦点深度低下に対する、i線リソグラフィにとってWSP-iはサブミクロン・デバイスに対する大きな役割を果たすと思える。

これらの結果については、計算機シミュレーションによって解析され、CELによるサブミクロンからハーフミクロンのパターン形成に対する指針を得た。

水溶性CEL材料を用いたコントラスト・エンハンスト・リソグラフィは今後のリソグラフィ技術の一角を担うと考えられるが、その材料の理論解析や、短波長化のエキシマレーザー・リソグラフィなどパターン形成へのより多くの応用性などを今後研究していくことが肝要である。

第5章 レジスト表面処理によるハーフミクロン・パターン微細加工

5.1 緒言

本章では、レジストプロセスからのアプローチとして、第3章DEM技術、第4章CEL技術に見られる2層レジストを、さらに簡易的にするため、単層レジストのハーフミクロン・パターン微細加工である、アルカリ表面処理法（HARD：High Aspect Ratio Resist by Alkaline Surface Disposal）^{5-1,2)}による高コントラスト・レジスト・ハーフミクロン・パターン形成法について研究を進めてきた技術について論じる。

この新しい技術は、第4章で述べたCEL技術や、また、第6章で述べるエキシマレーザー・リソグラフィとも併用して用いることも可能であり、また、それ自身としてもi線リソグラフィとともにハーフミクロン・リソグラフィとして、プロセス的に簡易であるという利点を生かし、大いに期待できるものである。

本章では、「アルカリ表面処理技術の概略」、「パターン形成実験、解析」、「エキシマレーザー・リソグラフィへの応用」そしてまとめの構成である。

5.2 アルカリ表面処理法（HARD）

従来、パターン形状やパターン形成の際の焦点深度などを向上させるには、第2章でも述べた、2・3層レジスト法が有力である。しかし、生産性の悪さやプロセス的な複雑性が大きいという欠点を有している。

また、第3章の二重露光法や第4章のCEL技術で論じた微細加工に対する効果は非常に大きいものがあった。しかしながら、根本的に経済性を追及することは、半導体製造技術として宿命である。従って、常に単層レジストプロセスに対する要望が高い。

一方、i線レジストの性能向上も第2章でも触れたように近年めざましいものがある。

本研究では、単層i線レジストの性能を簡易的な方法でさらに向上させるアルカリ表面処理法（HARD）を考案し、そのパターン形成についての特徴を検討した。

5.2.1 HARDによるパターン形成

HARD法によるパターン形成方法を図5.1に示す。この図からわかるようにHARD法は露光前にアルカリ水溶液処理を行う工程が増えるのみという簡易的なプロセスを実現している。

実験に用いたレジストはMPS-1400（Shipley社製）1.2 μ m厚、露光はg線（NA0.42）ステッパ、現像はMF-319 60秒であり、アルカリ表面処理は0.24Nのテトラメチル・アンモニウム・ヒドロキシドを60秒間浸漬にて行った。

図5.2にHARD法を用いたレジストの感度特性について示す。HARD法により、レジストの γ 値が15%程度向上し、膜減りが皆無となることがわかった。

図5.3は、0.6 μ mから0.8 μ mのL&Sパターンを示しており、HARD法により、パターンの側壁の鋭さが増大し、膜減りのないコントラストの向上したパターンとなることがわかった。また、このときの露光エネルギーは単層レジストが220mJ/cm²、HARD法によるものが190mJ/cm²であり、感度という点からもこの方法の有利さが理解できる。

この方法は、もちろんg線の他にi線露光に関しても同様の良好な結果が得られる。i線（NA0.42）のステッパによるレジストパターンが図5.4である。HARD法により、0.6 μ mの膜減りのない切り立ったパターンが解像できる。

図5.5は、g線ステッパによる0.6 μ mパターンの焦点深度変動に伴う変動性を単層レジストとHARD法について比較したものである。

この図より、HARD法により大幅な焦点深度の許容性がうかがえ、たとえば $0.6\mu\text{m} \pm 0.1\mu\text{m}$ を解像する焦点深度幅は通常の2倍の $3.0\mu\text{m}$ となった。

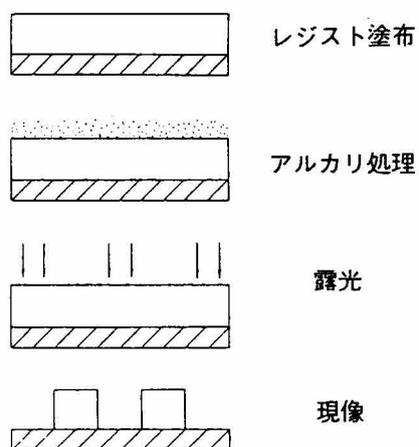


図5.1 HARDプロセスフロー

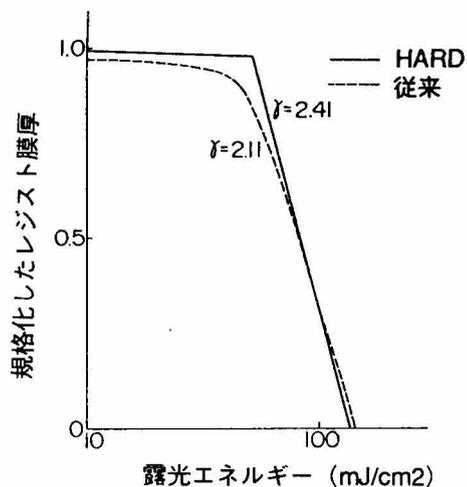


図5.2 HARDプロセスによる感度特性

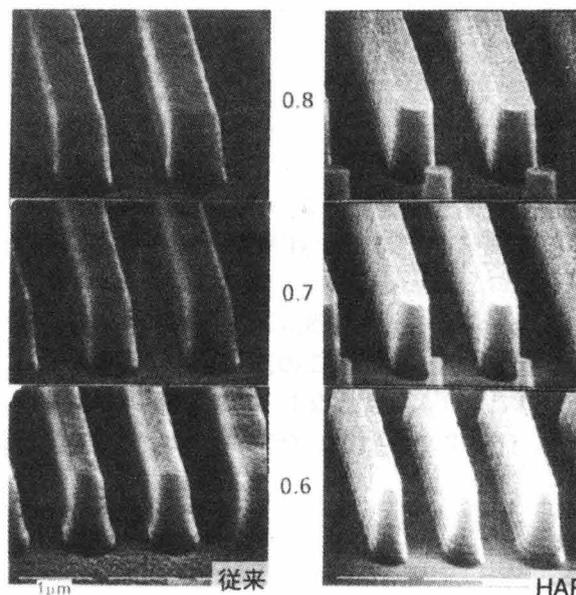


図5.3 HARDプロセスによる 0.6 から $0.8\mu\text{m}$ L&SパターンのSEM写真 (g線NA=0.42)

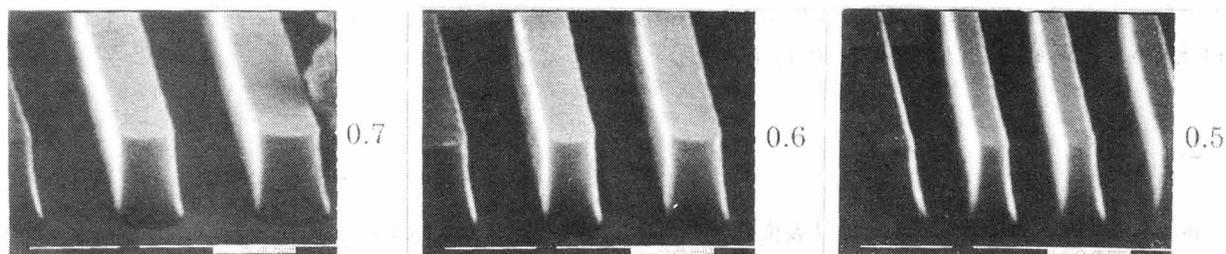


図5.4 HARDプロセスによる 0.5 から $0.7\mu\text{m}$ L&SパターンのSEM写真 (i線NA=0.42)

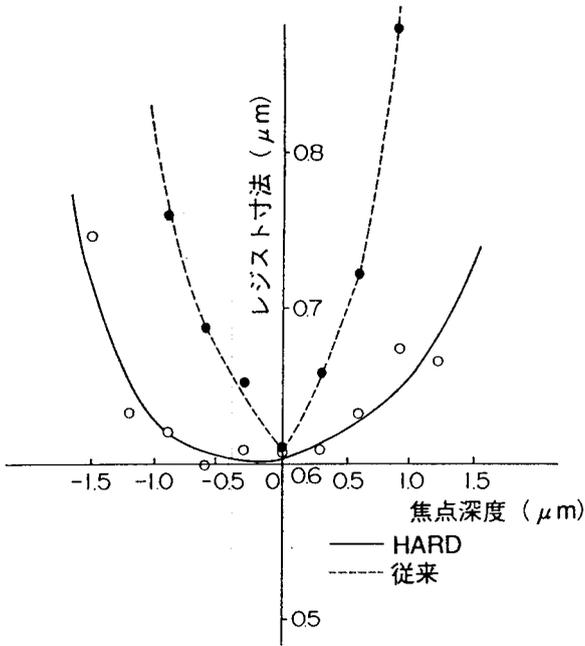


図5.5 HARDプロセスによる焦点深度特性 (g線NA=0.42)

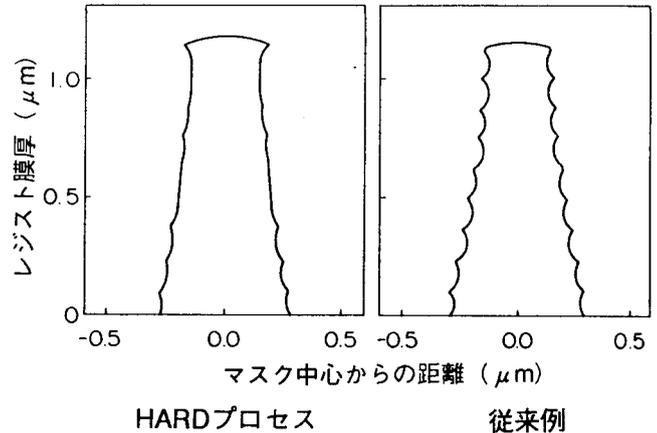


図5.6 HARDプロセスの形状シミュレーション

5.2.2 HARDの解析

SAMPLEを用いたHARD法のシミュレーションを試みた場合が図5.6である。この図は、 $0.6\mu\text{mL\&S}$ パターンをあらわしているが、図5.3で示したパターンSEMを良く再現し、HARD法によるパターン形状の良好さが理解できる。

図5.7はHARD法の作用を解析した結果である。露光エネルギー $100\text{mJ}/\text{cm}^2$ を与えたときの現像時のレジスト残膜とそのときの溶解速度をあらわしている。この図からHARD法により、特に、レジスト表面付近の溶解速度が減少していることがわかる。このようなレジスト表層の溶解速度の減少は、レジストパターンの形状の向上につながる。即ち、マスクから回折した光による露光された未露光部であるべきレジストが溶解しにくくなるためである。

5.2.3 HARDと他プロセスとの併用

HARD法は他のレジストプロセスとも良く適応できる。

図5.8はCEL（水溶性CEL；WSP-g）^{4,26)}とHARDを組み合わせたときの $0.6\mu\text{mL\&S}$ パターンである。WSP-gをHARD処理後塗布して、露光・現像するという工程を考案した。この図より、HARDはCELと併用して、よりコントラストの向上したパターンを形成できることがわかった。

第6章で述べるエキシマレーザー・リソグラフィにもHARD法は非常に良く効果を発揮する。MP2400の γ 特性はHARD法により、膜減りの減少、 γ 値の向上という点で大幅に向上した^{5,3)} (図5.9) (露光；KrFエキシマレーザー NA0.36, 現像；MP2401 20%60秒)。実際に、図5.10よりコントラストの向上した $0.4\mu\text{mL\&S}$ パターンを得た (MP2400, $0.5\mu\text{m}$ 厚)。

5.3 結言

新しく開発したHARD（アルカリ表面処理）法により、レジストパターン形状、パターン制御性が著しく向上することがわかった。また、この方法は、CELやエキシマレーザー・リソグラフィとも良く併用でき、その効果が十分発揮できる。

HARD法は、そのプロセス簡易性の他に、再現性やコストの低さなどから、高性能i線レジストとの併用により、ハーフミクロン超LSIの工業化に非常に有用であると考えられる。

今後は、アルカリ表面処理条件のより深い考察やCEL、エキシマレーザー・リソグラフィとの併用の検討を進める。

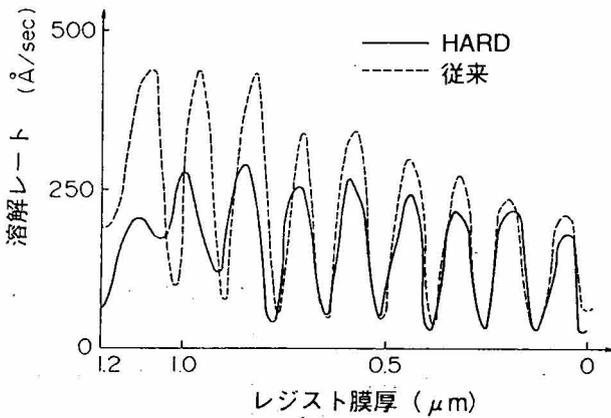


図5.7 HARDプロセスによる溶解速度特性

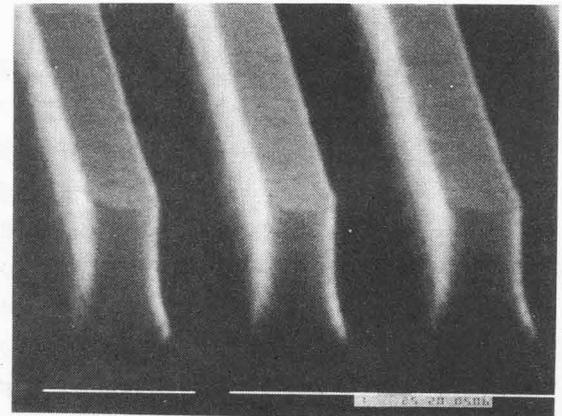


図5.8 HARDとWSP-gとの併用による0.6 μm L&SパターンのSEM写真

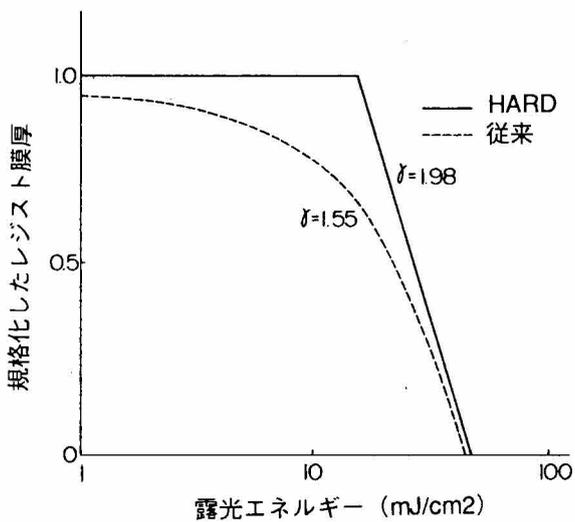


図5.9 HARDプロセスによるエキシマレジストの感度特性 (KrF、NA=0.36)

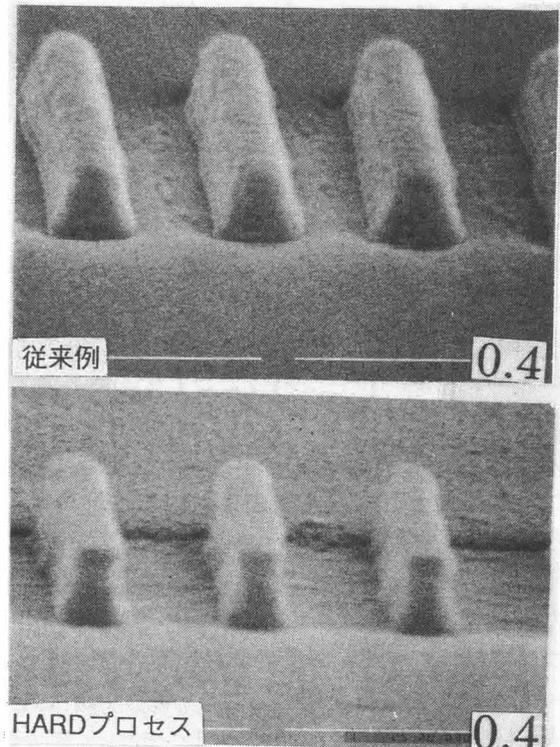


図5.10 HARDプロセスによるエキシマレジストの0.4 μm L&SパターンのSEM写真 (KrF、NA=0.36)

第6章

KrFエキシマレーザー露光による サブハーフミクロン・パターン微細加工

6.1 緒言

微細パターン形成に対する露光装置（ハード）側からのアプローチとしては、短波長、高NA化が望ましいことはすでに第2章で述べた。このような観点からすれば、紫外線（g線, i線）よりも遠紫外線を用いた露光はより高解像度のパターンを得られ、次世代のサブハーフミクロン超LSIには不可欠であるとも考えられる。

以上の観点に基づいて、光リソグラフィの露光装置側からのアプローチとして、遠紫外線であるエキシマレーザーによるパターン形成方法が話題^{6-1~4)}となっている。エキシマレーザーによるパターン形成はパルス露光であり、従来用いられてきた高圧水銀灯によるものとは異なるが、レーザー特有のスペckルや照射むらの問題もなく、レジストパターン形成が可能であることが報告されている。

本論では、このような次世代の超LSI製造の担い手として、また、光リソグラフィの究極でもあると考えられるエキシマレーザー・リソグラフィについての研究成果について論じたい。

本論の構成としては、「緒言」に続いて「エキシマレーザー・リソグラフィの研究動向」により一般的なエキシマレーザー・リソグラフィ技術の概論の後、本研究で行った「KrFエキシマレーザー・露光装置の構築技術」そして、この本研究で構築したKrFエキシマレーザー露光装置を用いたパターン形成技術として「KrFエキシマレーザーによるレジストの評価」「KrFエキシマレーザー・レジストの開発」について述べ、KrFエキシマレーザー・リソグラフィの技術をまとめる。そして、今後の展望として、シミュレーションを交えて「KrFエキシマレーザー・リソグラフィとi線リソグラフィの比較」を論じ、最後に「結言」とする。

6.2.エキシマレーザー・リソグラフィの研究動向

6.2.1 はじめに

エキシマレーザー・リソグラフィは、IBM社のK.Jain^{6-5,6)}、理化学研究所の川村ら⁶⁻⁷⁾によって1982年に提言された技術である。当初は、ArF (193nm) やKrF (248nm) のエキシマレーザー光を反射光学系によりウエハ上のレジストに密着転写を行っていたものである。

第2章でも述べたようにこのような密着式の方法では、レジスト損傷の問題やマスク精度が向上が望めないために微細パターン形成に対して大きな衝撃はなかった。

ところが、図6.1に示すように1986年にAT&Tベル研のV.Pol⁶⁻⁸⁾らがKrFエキシマレーザーを用いた縮小投影露光装置を用いた0.4 μ mのパターン転写を発表して以来、多くの研究者らがこの技術を次世代リソグラフィの本命として取り組むようになった。縮小投影露光については、レンズによって、色補正したレンズを用いる方式^{6-9~11)}と色補正していないレンズを用いる方式^{6-12~18)}が提案されている。色補正したレンズを用いる方式は、エキシマレーザーの発振光の発振半値幅は問題とならないが、レンズの作製が難しい、また、色補正していないレンズを用いる方式はその逆であるという、それぞれ問題点を有している。後者については、レーザーの発振半値幅を狭帯域化するために、インジェクション・ロッキング（注入同期）レーザーや光共振器を用いることが研究されている。

表6.1に各研究機関のエキシマレーザー・露光装置の特徴、表6.2に各研究機関のパターン形成の成果についてまとめた。表6.2からもエキシマレーザーによりハーフミクロン以下のパターン転写が可能であることがわかる。

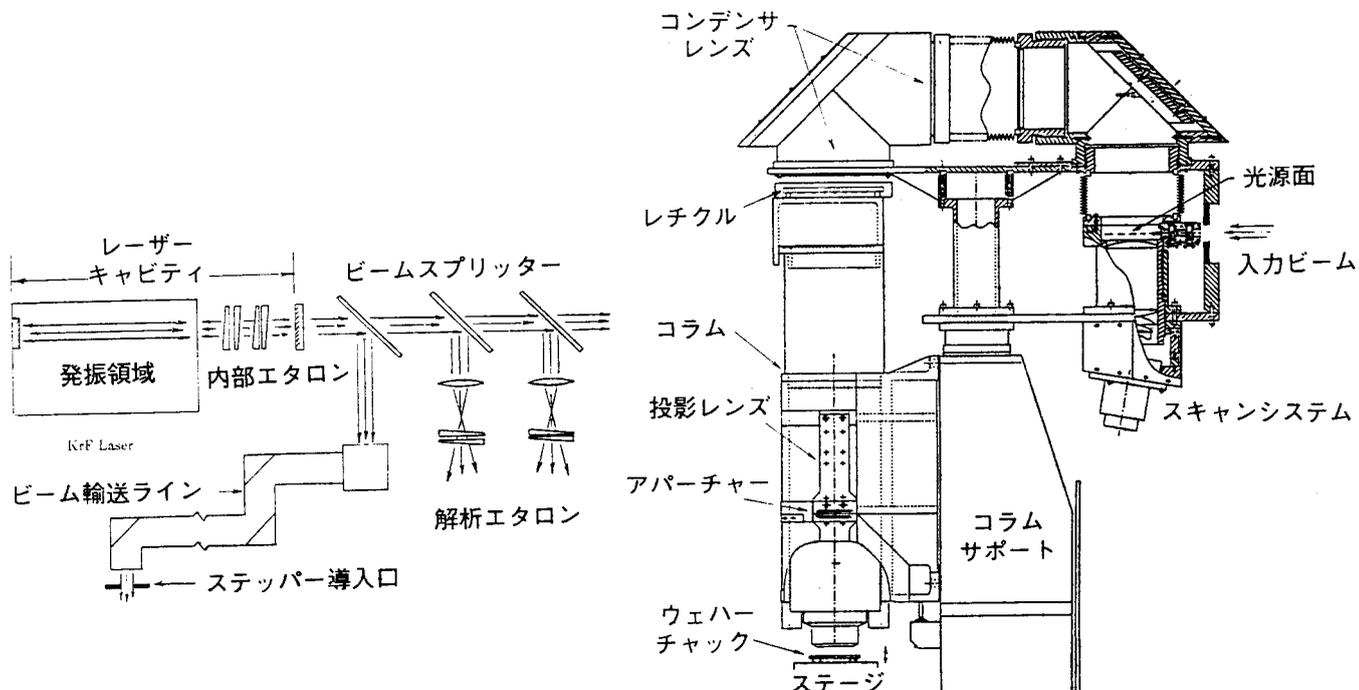


図6.1 Pol⁽⁶⁻⁸⁾の発表したKrFエキシマレーザー・ステッパーの構成

表6.1 各研究機関のエキシマレーザー、露光装置の概要

研究機関	NA 縮小率	露光面積 (mm ²)	レンズ	レーザーの 発振半値幅 (nm)	露光照度 (mJ/cm ² ・パルス)	照明係
松下	0.35 5:1	10	色補正 なし	0.000	0	光共振器
AT&T Bell研	0.38 5:1	10	色補正 なし	0.004	0.4	インジェクション ポンプ キングダム キャンシス テム
ニコン	0.37 10:1	5	色補正	---	---	---
東芝	0.37 10:1	5	色補正	---	20~40	---
キャノン	0.35 5:1	4	色補正 なし	0.002 以下	---	インジェク ションパ ンプ ライアイ レンズ

表6.2 各研究機関のパターン転写成果

研究機関	使用レジスト (製造者名)	膜厚 (nm)	使用形態	解像度 (nm)	露光パルス数
松下	MP2400 (シプレイ)	1.0	単層	0.4	10
AT&T Bell研	MP2400 (シプレイ)	0.40	単層	0.35	200
ニコン	MP2400 (シプレイ)	1.0	単層	0.4	---
	PMMA (東京応化)	1.0	単層	0.35	---
東芝	PMGI (シプレイ)	0.7	3層	0.35	362
	PMMA (東京応化)	0.7	3層	0.425	1930
キャノン	ODUR-1013 (東京応化)	0.3	3層	0.4	---

6.2.2.エキシマレーザー・リソグラフィに用いる光源

6.2.1でも述べたがエキシマレーザー・リソグラフィには、一般的にKrFエキシマレーザーが用いられることが多いことがわかるが、KrFエキシマレーザーと他の代表的なエキシマレーザーであるXeCl (308nm)とArFのレーザーについて、これをステッパーの光源として利用する場合の長所・短所について比較を行い、表6.3にまとめた。

表6.3より、KrFエキシマレーザーが最もリソグラフィ（ステッパー）用の光源として利用しやすいことがわかる。

図6.2は、このようなKrFエキシマレーザーを用いた場合のレンズの材料の選択の可能性を示す。

CaF₂ (ホタル石) とSiO₂ (合成石英) が短波長まで透過性が良いことが分かる。しかし、CaF₂ はレンズ加工が難しくあまり実用的でない。したがって、レンズ材質としては、248nm光の透過性が良く加工性の優れた合成石英が有望である。

表6.3 エキシマレーザー光源波長の長所、短所

エキシマレーザー (λ, nm)	性質
XeCl (308)	解像度改善少ない
KrF (248.4)	レジスト材料多数 シリコン基板に対する損傷無
ArF (193)	レジスト、レンズ材料少ない シリコン基板への損傷未解明

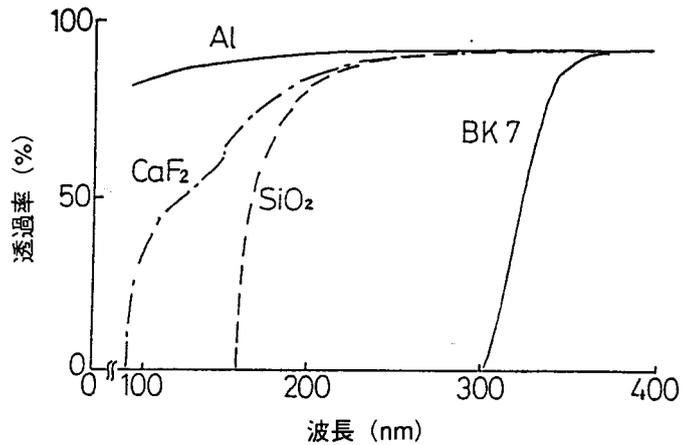


図6.2 各波長におけるレンズ硝材の透過率特性

6.2.3 まとめ

エキシマレーザー・リソグラフィはサブミクロンからハーフミクロンのパターンが容易に得られることから、各研究機関で多くの研究がなされている。特に、合成石英レンズを用いたKrFエキシマレーザー・ステッパーが有利である。

本研究においても、他研究機関の研究動向を踏まえて、次節以降の新技术を開発し、論じていくことにする。

6.3 KrFエキシマレーザー・ステッパーの構築技術

6.3.1 はじめに

本節では、本研究で使用するエキシマレーザー・露光装置の構築技術について、レーザー、レンズのそれぞれの観点から論じ、サブハーフミクロン・リソグラフィに適したステッパーを構築する過程を述べる。

6.3.2 KrFエキシマレーザー・露光装置の構成

図6.3に本研究で試作したエキシマレーザー・露光装置の外観写真 (a) とその構成図 (b) を示す。

図6.3から分かるように、本研究で試作したエキシマレーザー・露光装置は、光源が従来の高圧水銀灯を用いたステッパーと異なる以外はほとんど同様と考えて良い。

エキシマレーザーは、他のレーザと異なり発振が強いため、コヒーレンシーが悪く自然発振時におけるスペクトル半値全幅は約0.3nmである。レーザー発振器は、その内部に光共振器を設置することにより、発振スペクトル半値幅を狭くして、縮小投影レンズの色収差ボケによるレンズのOTF (Optical Transfer Function) 値の低下を防いでいる。また、通常このように狭帯化した単色光は、コヒーレントが良くなり

すぎて、ウエハ面上に照射されたときスペックル（可干渉光）を生じることが懸念され、これが1つの重大な欠点になる可能性がある。しかし、本装置は、エキシマレーザー本来のインコヒーレンシーを保持のまま、すなわち、レーザーのモード数を可能なかぎり少ない状態で使用したため、そのような問題は発生しなかった。さらに、インテグレータ、コンデンサレンズなどはレーザー発振光を効率よく縮小レンズに伝達できるように最適位置に配置した。

レーザー・チャンバー内の内部構造は図6.4に示す。図6.4は本研究で用いるレーザーの特徴を良くあらわしている。後述するように、本研究で用いる単色レンズのためにレーザーの発振半値幅の狭帯域化を内部共振器を用いて行っていることになる。

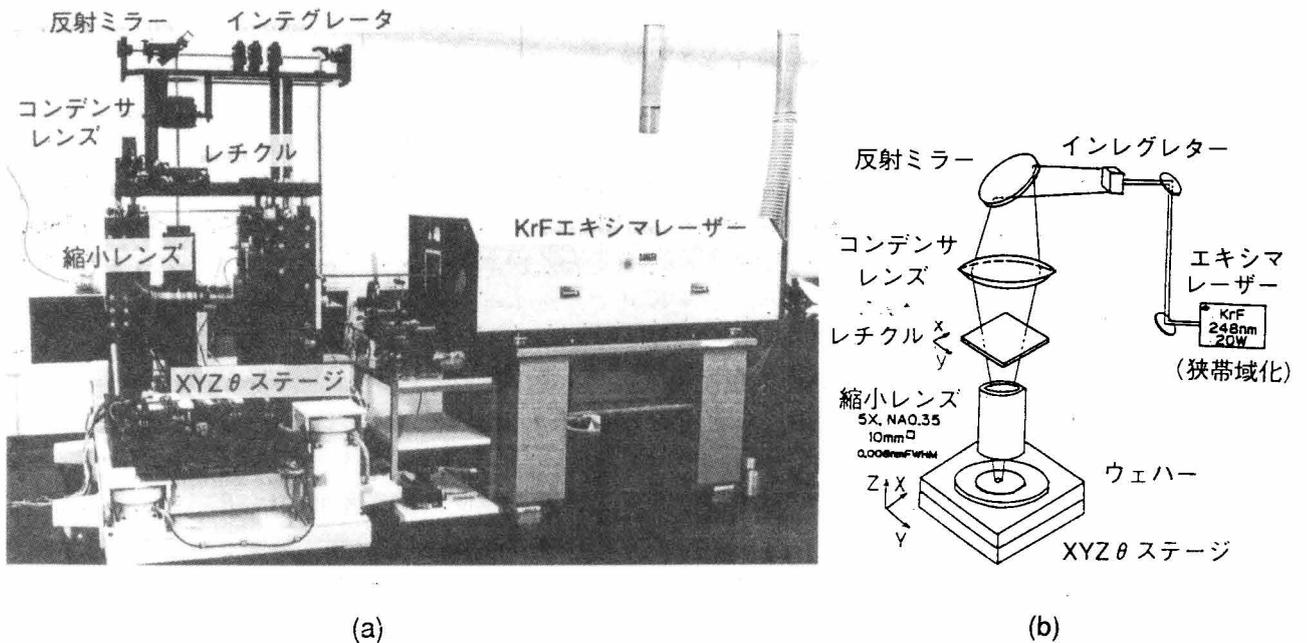


図6.3 開発したKrFエキシマレーザー露光装置 (a) 外観写真、(b) 構成図

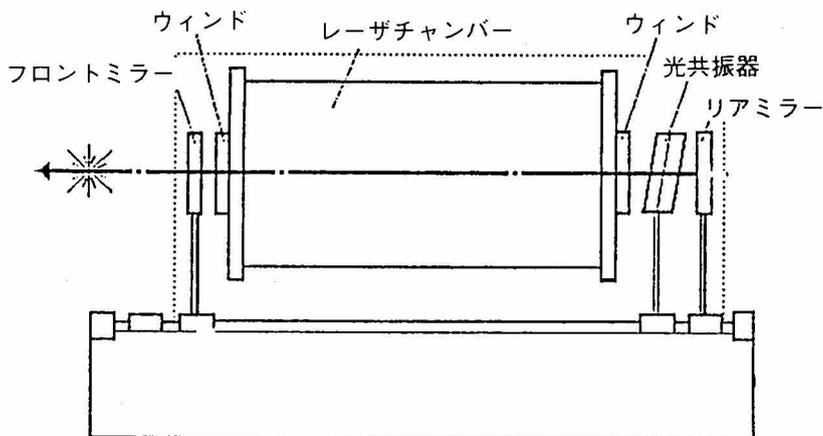


図6.4 レーザー・チャンバの内部構造

6.3.3 KrFエキシマレーザー・露光装置の光学システム

本研究で試作したKrFエキシマレーザー・露光装置の仕様を表6.4に示す。

表6.4.に示す5:1縮小レンズは色補正していない合成石英の単色レンズである。それは、248nmの波長域を色補正するだけの材料が少ないからである。通常色補正していない単色レンズを用いる場合は、レーザーの発振半値全幅 (FWHM; Full Width at Half Maximum) が重要になってくる。図6.5は、FWHMをパラメータにとったOTF(Optical Transfer Function)曲線である。

$\Delta\lambda=0$ (249nm単色光) の場合が良好であるのに対し、 $\Delta\lambda=0.3\text{nm}$ の場合にはOTF曲線が著しく劣化することが分かる。

このような理由から、 $\Delta\lambda=0.008\text{nm FWHM}$ というほとんど単色の場合と変わらない良好なレーザー発振が必要である。

図6.6に、自然レーザー発振：(a)，および狭帯化されたレーザー発振：(b) のスペクトル分光図を示す。横軸はチャンネル数を表しており、1チャンネルは0.0009nmである。縦軸は、スペクトルの相対強度を表している。 $\Delta\lambda=0.008\text{nm}$ という狭帯化したスペクトルが得られていることが分かる。このようなスペクトルの狭帯化を実現するために、レーザー内部に光共振器を設置し、これを最適化した。

実際に、レーザーのスペクトル半値幅がレジストの解像性にどのように影響するかを調べたのが図6.7である。図6.7は、本装置に用いた縮小レンズ (NA=0.35) に対する光のプロファイルをシミュレーションにより求めたものである。横軸は空間周波数、縦軸は光強度を示している。図6.7はそれぞれ空間周波数 (1/mm) が500, 750, 1000, 1250の場合である。図 (a) が本来のレーザー発振光で、 $\Delta\lambda=0.3\text{nm}$ 、図 (b) が光共振器により狭帯化したレーザー発振光で、 $\Delta\lambda=0.008\text{nm}$ の場合を示している。空間周波数:1000 (1/mm) は0.5 $\mu\text{m L\&S}$ パターンに対応している。

このシミュレーションから、発振スペクトル半値幅が狭いほど入射光のプロファイルのコントラストが高いことが分かる。図6.5.のOTF特性と合わせて考えると、実際のレジストパターン解像においても大きな効果が期待できる。

表6.4で特筆すべきもう1つの点は、ウエハ面上での露光量が単位パルス当り8mJ/cm²という非常に大きな値が得られていることである。本レーザーは1パルス15nsecであるから、露光強度としても0.5MW/cm²という高出力である。

このような高出力レーザーは、たとえば繰り返し周波数を100Hz (あるいはpps) と設定すれば、感度100mJ/cm²のレジストの場合は約0.13secで露光を終了させることができ、スループットという面でも本露光装置の有用性が高いことが分かる。

表6.4 開発したKrFエキシマレーザー露光装置の仕様

波長; 248.4nm
縮小比; 1/5
露光サイズ; 10mm \square
$\Delta\lambda$; 0.008nmFWHM
露光パワー; 8mJ/cm ²

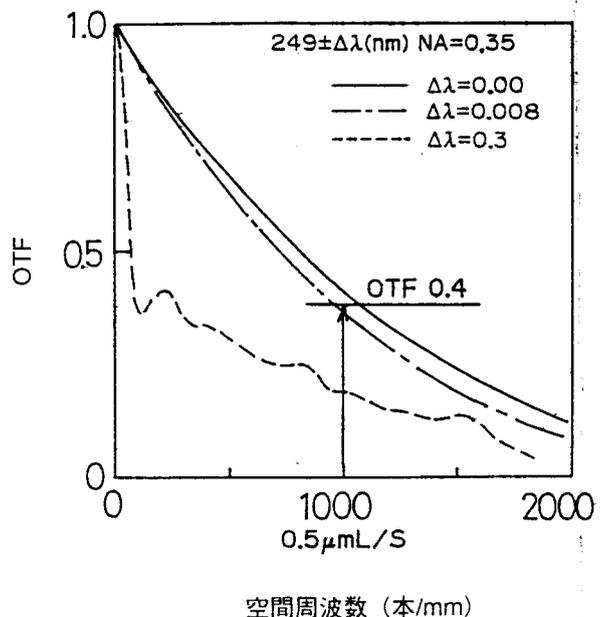


図6.5 単色レンズのスペクトラムFWHMによるOTF特性

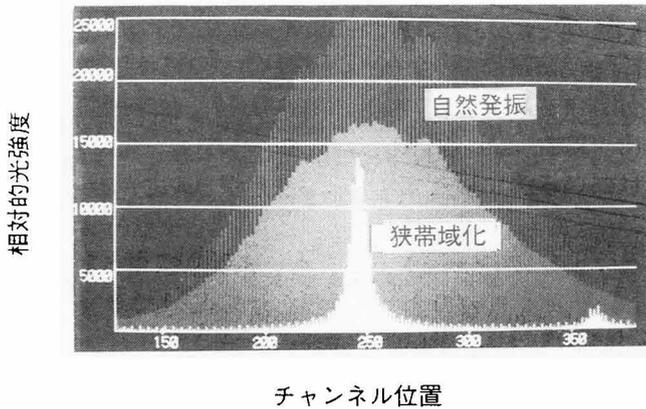


図6.6 KrFエキシマレーザーのスペクトル
(a)自然発振、(b)狭帯域化後

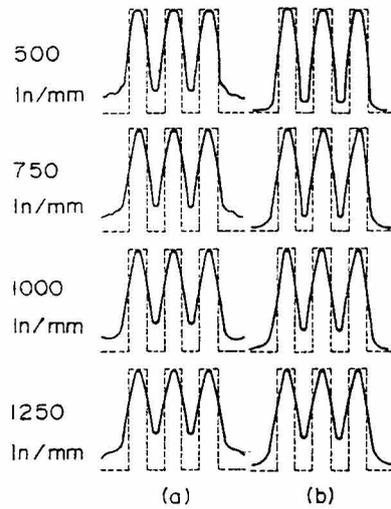


図6.7 KrFエキシマレーザーのスペクトルFWHM
による光強度コントラスト
(a) $\Delta \lambda=0.3\text{nm}$
(b) $\Delta \lambda=0.008\text{nm}$

6.3.4 新KrFエキシマレーザー・ステッパーの特性

(1) はじめに

本節ではLSIレベルが試作可能なレベルにすべく、新たに開発した、15mm角のフィールドサイズを持つ縮小投影レンズと、コンパクトレーザーを備えたハーフミクロン用KrFエキシマレーザー・ステッパーの、新KrFエキシマレーザー・ステッパーシステムと狭帯域化レーザー特性について^{6-19,20}詳細に述べる。

(2) KrFエキシマレーザー・ステッパー・システム

図6.8に新たに開発したKrFエキシマレーザー・ステッパーの光学写真を示す。開発したエキシマレーザー・ステッパーは、光源であるエキシマレーザー、縮小投影レンズを中心とする光学系、ウエハを保持・移動するためのXYZθステージ、そしてアライメント光学系から構成されている。

エキシマレーザー・ステッパーが従来のステッパーと異なる点は、主として光源と投影レンズである。なお、光源の許容帯域幅は投影レンズが色消か単色かによって決定される。

色消方式の場合、レンズ材料が石英と蛍石の2種類しかないため色収差補正が難しい。さらに、蛍石は大きな母材を作り難いことから、15mm角のフィールドサイズの大口徑レンズを製作することは非常に困難である。一方、単色方式の場合は設計製作が比較的容易である。しかし、一般のエキシマレーザーのスペクトル広がり、半値全幅 (FWHM) で0.3nm程度と大きいため、十分なOTF特性が得られない。そのため、スペクトルの狭帯域化が必要となってくる。スペクトルの狭帯域化には、注入同期方式やエタロンなどの干渉フィルタを用いる方式がある。注入同期方式の場合狭帯域化は容易であるが、レーザー特有のスペックルが発生し、露光安定性も悪い。スペックルは、空間的コヒーレンスが高いために生じるものであり、これを防ぐためにビーム自身を振る方法なども考案されている^{6-5,6}が実用的でない。

本研究では、スペクトル広がりとスペックルの問題を、単色レンズとエタロンを用いて狭帯域化したエキシマレーザーを組み合わせる方式で解決した。エキシマレーザーは他のレーザーと異なり、多くの発信モードを持っている。そこで、このモード数の減少を極力抑えた状態でエタロンを用いて狭帯域化を図ることにより、上述の問題を解決できた。

図6.9は、スペクトル半値全幅 (FWHM) によるOTF特性のシミュレーション結果を表している。(a), (b) はそれぞれNAが0.4, 0.36の場合である。図6.9において、FWHM 0 nm場合は、理想的な単色光の特性を表し、FWHM 0.0035nmと0.007nmの場合は、狭帯域化時の特性を表している。さらに、FWHM0.32nmは自然発振光の場合で、エタロン挿入前の特性を表している。FWHMは小さければ小さい

ほど良いが、エタロンの面加工精度の制約から0.0035nmという値を実現することは非常に難しい。実現可能な狭域化が0.007nm程度であることと、レンズ製作の容易さから、本研究ではNA=0.36の単色レンズを用いた。

図6.10は、NA=0.36のレンズのOTFデフォーカス特性をFWHMにより比較したものである。図から、FWHMが大きくなるにしたがって、OTFが低下するため焦点深度が小さくなることが分かる。

ここで、パターンが解像するためには、0.4以上のOTFが必要なため、焦点深度をOTF 0.4以上と定義する。また、0.5 μ mのL&Sパターンは1050（正確には1000）ライン/mmに相当している。したがって、図6.10からNA=0.36のレンズで0.5 μ mL&Sパターンに対してFWHM 0.007nmのとき、約 $\pm 1\mu$ mの焦点深度が得られることが分かる。

次に、開発したエキシマレーザー・ステッパーのレーザー及びレンズのスペックを、それぞれ表6.5および表6.6に示す。

新たに開発したエキシマレーザー・ステッパーの特徴は、狭帯域化のコンパクトエキシマレーザーと単色レンズを用い、15mm角のフィールドサイズを実現したことである。15mm角の露光フィールドで0.5 μ mの解像能力を有したことにより、16M DRAMなどのデバイス製作への応用が可能となった。また、アライメントはグローバルアライメントを採用している。

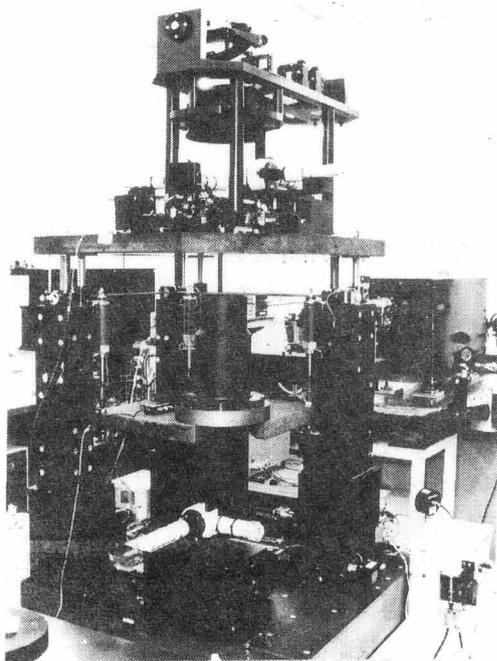


図6.8 15mm角の単色レンズを有するKrFエキシマレーザー・ステッパーの外観写真

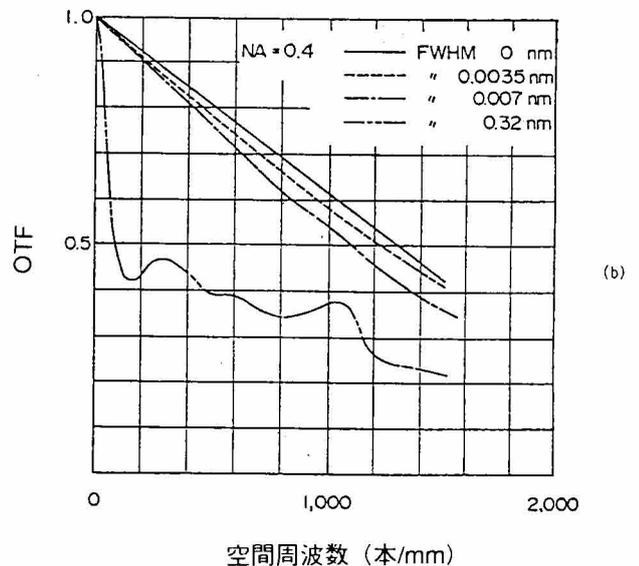
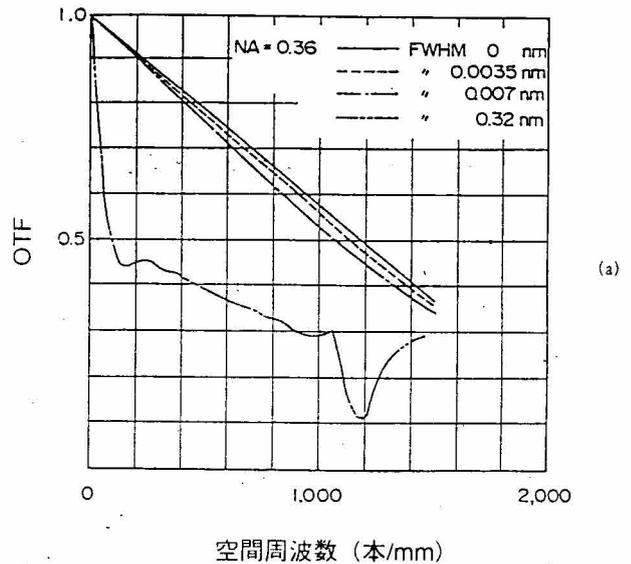


図6.9 NA=0.36、0.4の場合のスペクトルFWHMによるOTF特性 (a)NA0.36、(b)0.4

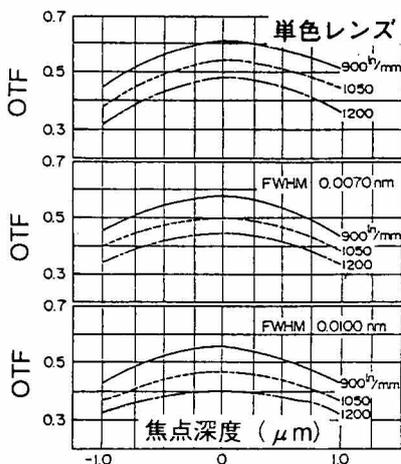


図6.10 NA=0.36のOTFデフォーカス特性

表6.5 15mm角の単色レンズを有する
KrFエキシマレーザー・ステッパーのレーザー仕様

項目	仕様
波長 (KrF)	248.4nm
スペクトラム幅	0.007nm
中心波長安定性	±0.001nm
発振周波数	200pps
パルスエネルギー	40mJ
パルスエネルギー安定性	±5%
レーザー出力	8W
出力安定性	9E9
サイズ	300/500/1000mm
ガス交換	連続

表6.6 15mm角の単色レンズを有する
KrFエキシマレーザー・ステッパーのレンズ特性

項目	仕様
種類	縮小投影方法
縮小比	1/5
露光サイズ	15x15mm□(21.2mm φ)
NA	0.36
波長	248.4nm(KrF)
FWHM	0.007nm
レンズ枚数	合成石英
OID	675.5mm

(3) コンパクトレーザーとエタロンの特性評価

狭帯域コンパクト・エキシマレーザーの特性評価を、スペクトル測定により行った。ここで用いたエタロンは、面精度が15μm以下程度であり、直径50mm、厚み15mmの平行板を2枚合わせたエアギャップ方式のものである。

最初に測定方法について説明する。図6.11は、スペクトル半値全幅 (FWHM) 及び絶対波長の測定システム概略図である。このシステムにより、エキシマレーザーから発生したレーザー光を光ファイバを用いて分光器に取り込み、分解スペクトルをSMA (Spectrum Multichannel Analyzer) で検出し、PC (Personal Computer) で処理した。なお、分光器のグレーディングは1200ライン (mm⁻¹) である。また解像度を上げるために、SMAに取り込む際光をレンズで拡大し、分光スペクトルは6次光を用いた。

実験は、図6.11のA点 (内部エタロン) あるいはB点 (外部エタロン) にエタロンを設置して行った。

SMAのピクセル (チャンネル) の絶対較正はB点に、1mmギャップの較正用モニタエタロンを置きレーザー光のスペクトルを測定して行った。その結果、1Channel=0.0006nm (0.6pm) であった。

図6.12に外部エタロンの場合 (図6.11のB点にエタロンを置いたとき) のスペクトルを示す。このとき、FWHMは25.6chであり、波長に直すと0.0154nmとなる。一方、図6.13に内部エタロンの場合 (図6.11のA点にエタロンを置いたとき) のスペクトルを示す。このとき、FWHMは12.3chであり、波長に直すと0.0074nmとなる。したがって、外部エタロンよりも内部エタロンの方が狭帯域化効果が大きく、約2倍の効果が得られている。また、図6.12と図6.13を比較すると、パワーは狭帯域化効果とは逆に内部エタロンの方が減少することが分かる。

次に、内部エタロンを用い、エタロン面内のスペクトル半値全幅均一性を測定した。図6.14に示すように、エキシマレーザーから得られるビーム断面形状は、7mm×15mmの長方形である。ビーム断面内のA, B, C3点のFWHMを平均すると0.008nmとなり、中心 (B点) が最も良好な特性を示している。いずれにせよ、ビーム内での均一性は良好である。

また、外部エタロンを用い、エタロン面内のスペクトル中心波長均一性を測定した。測定は、ビーム中心のレーザー光をエタロン中心に照射し、エタロンを最適角に調整した後、レーザー光のエタロン照射位置を平行移動することにより行った。

図6.15に、エタロン面内におけるスペクトル中心波長分布を示す。この図より、直径15mmの全面において最大30チャンネル、すなわち、0.018nm中心波長がずれていることが分かる。この原因はエタロンの面精度に起因するものと考えている。エタロン面内で中心波長がずれていると、パターン形成に悪影響を与えることは明らかである。しかしながら、平均0.008nmのFWHMが得られているため、パターン形成に

は十分使用可能と考えた。

最後に、エキシマレーザーの発振周波数の変化によるFWHMの変化、およびスペクトル中心波長の変化を測定した結果を図6.16に示す。このとき、測定は内部エタロンを用い、エタロン中心でおこなった。図において、30Hzの場合を除くとスペクトル中心波長は3チャンネル (0.0018nm) の変動しかない。また、FWHMは約8チャンネル (0.0048nm) の変動しかないことが分かる。なお、このときレーザーパワーは40mJであった。このように、本研究のエキシマレーザーは、その発振周波数の変化に対して、FWHM、中心波長とも安定であり、工業的に容易に使用しうる。

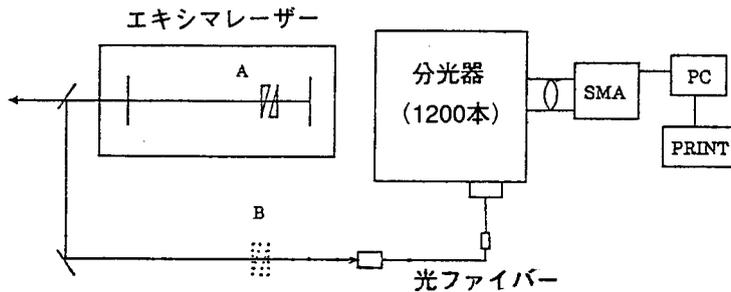


図6.11 スペクトルFWHMおよび絶対波長の測定システム

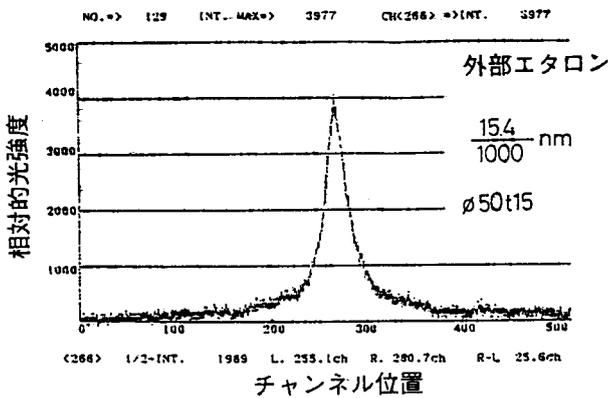


図6.12 外部エタロンのスペクトル

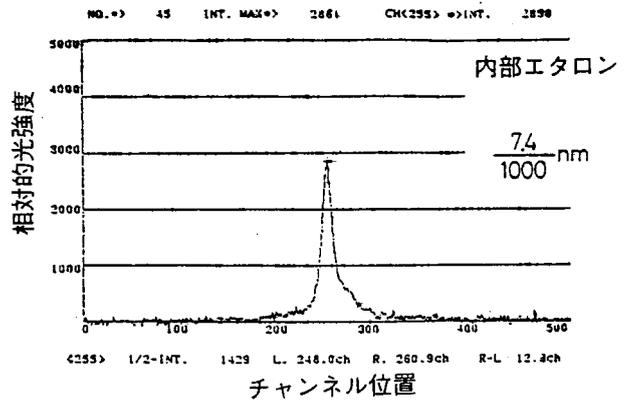


図6.13 内部エタロンのスペクトル

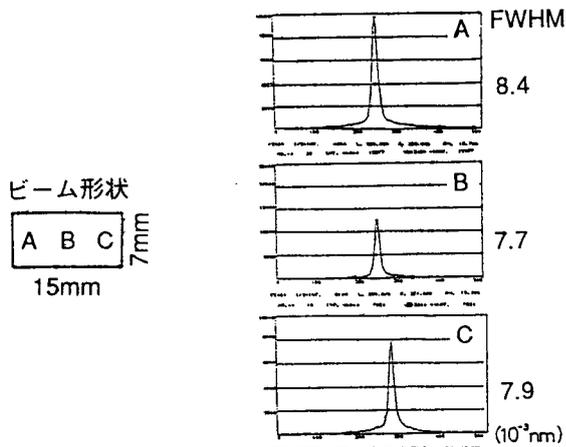


図6.14 ビーム内のスペクトルFWHMの分布

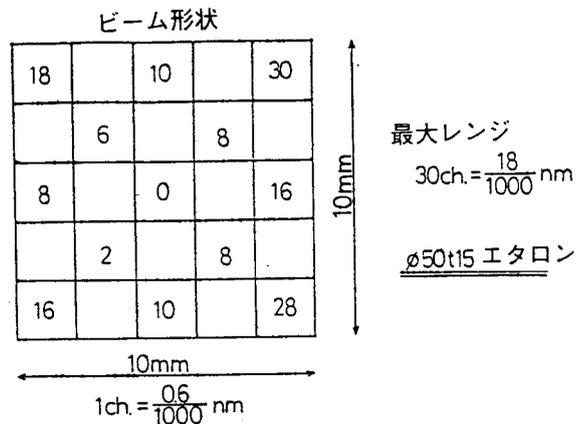


図6.15 ビーム内の絶対波長の分布

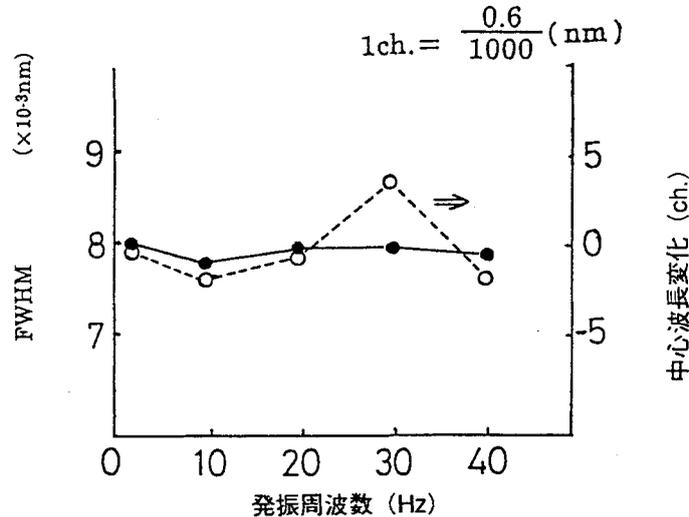


図6.16 繰り返し周波数によるFWHMおよび中心波長の特性

(4) おわりに

ここでは15mm角フィールドで、NA:0.36の単色レンズ、新しいコンセプトのコンパクト・エキシマレーザー、およびグローバル・アライメント装置を備えたhalfミクロン・リソグラフィ用エキシマレーザー・ステッパーのについて述べた。今後は、各部の性能や精度の向上、特にアライメント精度の向上が課題となる。

6.3.6 まとめ

halfミクロンに対応するKrFエキシマレーザー・ステッパーの特性について、その構築技術とともに述べた。本研究のエキシマレーザー・ステッパーはビームの均一性、安定性、線幅の狭帯性など次世代露光装置としての条件を十分備えていることがわかった。

次節以降では、本ステッパーを用いてレジストプロセスの検討を行っていく。

6.4 KrFエキシマレーザーによるレジスト評価

6.4.1 はじめに

エキシマレーザー露光によるパターン形成には、従来の紫外線レジスト以外の遠紫外線レジスト、EBレジストの適用が考えられ、多くの検討が新たに必要である。

本研究ではエキシマレーザー・リソグラフィに適したレジストの評価・選定を行うことと、その反応メカニズムを解明することを目的^{6-21,22)}とした。

6.4.2 レジスト評価条件

(1) 露光装置について

本レジスト評価検討に用いた本研究で試作したKrFエキシマレーザー露光装置の性能を表6.4に示す。このKrFエキシマレーザー・ステッパーの特徴としては、ウエハ面上の照度が大きく、たとえば、100Hzで露光するならば、0.8J/cm²のエネルギーが1秒間に得られることになり、光学系を用いたエキシマレーザー・ステッパーの照度が現状では低い⁶⁻⁸⁾、という問題を解決していることになる。

また、この表からうかがえることは、Rayleigh則より本ステッパーの実験室レベルでの理論解像度は $R = 0.6 \lambda / NA$ (λ は波長、NAはレンズの開口数)なる式にあてはめて、 $R = 0.43 (\mu m)$ となる。この

値は近い将来の64M RAMの設計寸法に適用でき、レジスト材料が最適化すれば、さらに、本研究で試作した性能のエキシマレーザー・ステッパーが64MDRAM製造に用いることができることを示唆している。

(2) レジスト材料について

本研究では、284nmエキシマレーザー露光に用いることが期待できるレジスト材料を遠紫外線 (DUV) レジストおよび電子線 (EB) レジストより選定した。DUVレジストとしては、ポジ型のMP2400 (シブレイ社製)、HPR1182 (富士ハント製)、ODUR-1030 (東京応化製)、ネガ型のRD-2000N (日立化成製) を挙げた。EBレジストとしては、ポジ型のRE-5000P (日立化成製)、OEER-1000 (東京応化製)、ネガ型のCMS-EX (東洋曹達製) を挙げた。

これらのレジスト材料の特徴およびウエハー実験条件については、表6.7にまとめた。表6.7からわかるが、本検討のレジスト材料により、ポジ型についてはアルカリ溶解促進型と主鎖切断型、又、ネガ型については非膨潤のアルカリ溶解促進型と分子重合型など、レジストの反応についてをほぼ網羅している。このことから、本研究によって248nmエキシマ光でのレジストの反応性についてのおよその知見が得られることになると考えた。

なお、レジスト評価の方法としては、材料の紫外分光特性、 γ 特性、エキシマレーザー露光によるパターン形状観察などにより行った。

表6.7 KrFエキシマレーザー露光評価に使用したレジスト実験条件

レジスト	型	主成分	反応機構	ホットプレートでの プリベーク
MP2400	ポジ	ナフトキノン ジアジド+樹脂	アルカリ溶解促進	90°C 2分
HPR1182	ポジ	ナフトキノン ジアジド+樹脂	アルカリ溶解促進	100°C 2分
ODUR-1013	ポジ	ポリメチルイソプロピル ケトン(PMIPK)	主鎖切断	120°C 2分
RD-2000N	ネガ	アジド+樹脂	重合	80°C 2分
RE-5000P	ポジ	ポリ2-メチルベンゼン スルホン+樹脂	アルカリ溶解促進	90°C 1分
OEER-1000	ポジ	ポリメチルメタアクリレ ート(PMMA)	主鎖切断	170°C 2分
CMS-EX	ネガ	クロロメチル化 ポリスチレン	重合	90°C 2分

6.4.3 レジスト評価結果

(1) アルカリ溶解促進型ポジ型DUVレジスト

本研究で検討したアルカリ溶解促進型ポジ型DUVレジストは、MP2400とHPR1182である。これらは、いずれも、ナフトキノン・ジアジドとクレゾール・ノボラック樹脂の系から成るアルカリ溶解促進型のUVレジストの感光域をDUV側へ移動させたタイプのレジストである。一般的に、これらはDUV光によりナフトキノン・ジアジドから N_2 基が脱離し、ケテン転移より生成したカルボキシ基がアルカリ現像液により溶解するという反応経路をとっている。

図6.17, 6.18に、それぞれのレジストの紫外分光曲線図を示す。膜厚はMP2400が $1.0\mu m$ 、HPR1182は $0.5\mu m$ である。これらの分光特性により、いずれのレジストも230nmと280nm付近にベンゼン環に起因する吸収ピークが観測される。

また、250nm付近の吸収ピークが近紫外域(400nm以上)の吸収に比べて非常に大きく、248nm光に対する感度の増大をあらわしている。

表6.8は、これら2種のDUVレジスト、および、ポジ型UVレジストであるMPS1400-27 (シブレイ社製)

についての、248nmと436nmにおける吸収ピークの値の比の対数値[\log (248nmにおける吸収ピーク値 / 436nmにおける吸収ピーク値)]を示した。この数値により各レジストの248nmにおける光反応性が、ある程度明らかにされると考えられる。すなわち、表6.8より、これらDUVレジストはUVレジストに比べて、遠紫外域での反応の起こりやすさ(感度)が増加していることが明らかになった。

図6.19, 6.20にMP2400とHPR1182のエキシマレーザー露光による0.4~0.7 μ mおよび0.5~0.6 μ mのパターンSEM写真をそれぞれ示す。いずれのレジスト膜厚も0.5 μ mである。

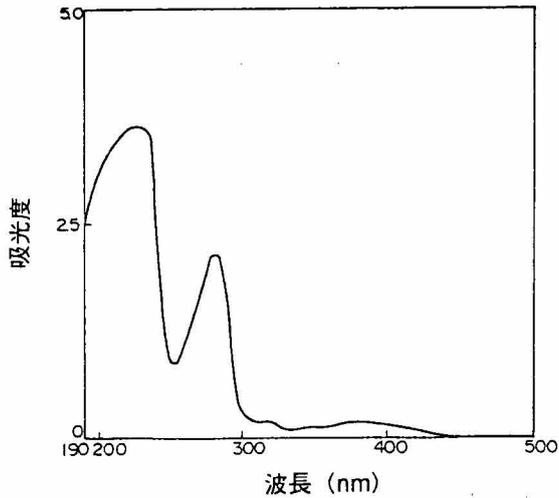


図6.17 MP2400の紫外分光特性

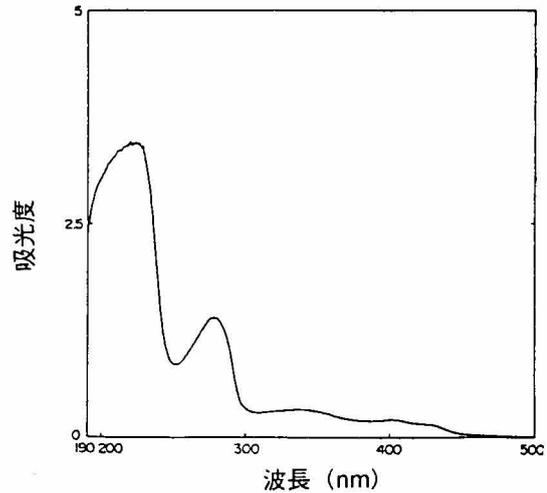


図6.18 HPR1182の紫外分光特性

表6.8 各種レジストの248、436nmの吸収ピーク値の比の対数値

レジスト	MP2400	HPR1182	MPS 1400-27
$\log \frac{\text{Abs. 248 nm}}{\text{Abs. 436 nm}}$	1.10	0.91	0.65

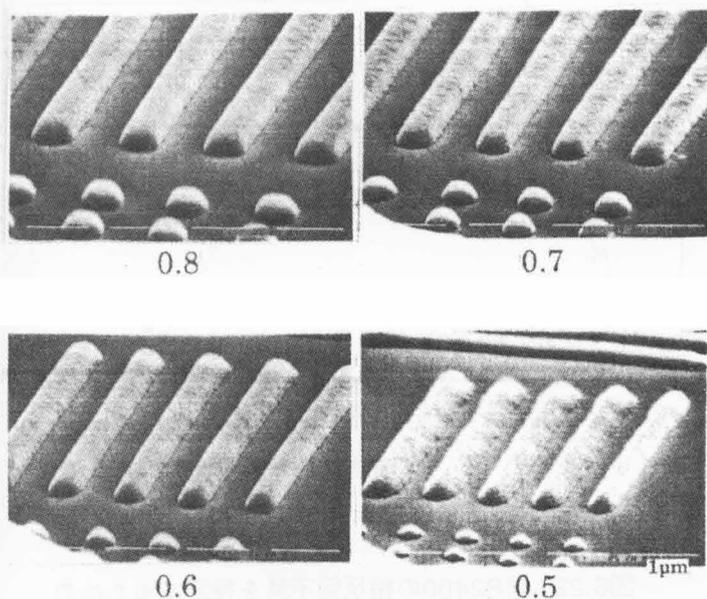


図6.19 MP2400の0.4から0.7 μ m L&S パターンのSEM写真

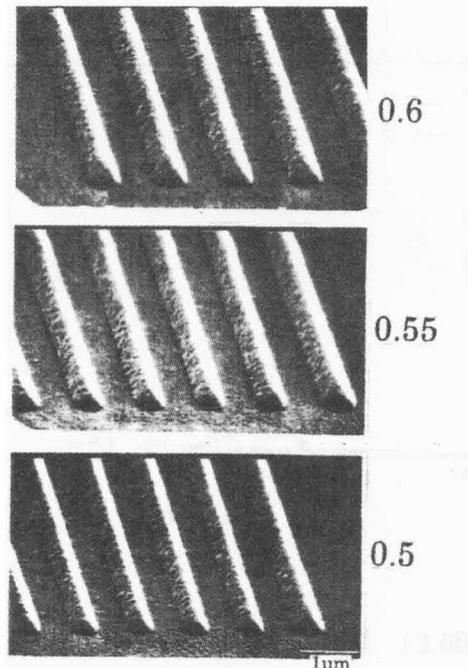


図6.20 HPR1182の0.5から0.6 μ m L&S パターンのSEM写真

現像条件は、MP2400についてはMP2401現像液（Shipley社製）を1：4に水で希釈した液にて60秒、HPR1182についてはHPRD418現像液（富士ハント社製）60秒にて、いずれも浸漬現象により行った。パターン形成に必要としたパルス数は前者が10パルス、後者が15パルスであり、エネルギー換算をすればいずれも100mJ/cm²程度という感度であることがわかった。いずれのレジストについても0.4~0.5μmまで解像することがわかるが、その断面形状については、ほぼ三角形であり、LSI製造の際には満足できるものではない。このような現象については、レジストの表面吸収が強いために、露光が過剰となり、この結果、光が未露光部まで回折し、その結果、膜減りが大きく、かつ形状の悪いパターンとなったと考えられる。

図6.21は、このような我々の推論の実証を表わすべき結果であり、248nm付近に着目したMP2400とMPS1400-27のエキシマレーザー露光前後の透過率の変化をあらわした紫外分光曲線である。いずれの膜厚も1.0μmに統一して、それぞれの比較を可能とした。この図より、248nmにおけるMP2400のエキシマレーザー露光前後の透過率の変化はわずかに2%であり、しかも、露光後の透過率は7%であることがわかる。このことより、MP2400のレジスト膜中に248nmエキシマレーザー光は非常に到達しにくく、レジストの表面吸収が大きいことがわかった。また、MPS1400-27は、DUV領域では、ほとんど反応性がなく、全く露光光がレジスト膜中に入射しないことがわかる。

さて、一般に短波長のエキシマレーザー光を用いたときには、レジストの反応がそのエネルギー密度によって変化するという相反不軌則が、あるレジストに発生すると提唱されている^{6,23)}。相反不軌則はPMMAなどの主鎖切断型のレジストに成立することが知られているが、本研究では、MP2400の如くナフトキノン・ジアジド・ノボラック系のレジストの場合を考察してみた。図6.22は、本研究の実験結果であるMP2400のγ特性であり、相反不軌則の有無を確かめるべく、エキシマレーザーのエネルギー密度を1パルスあたり2.39mJ/cm²と0.47mJ/cm²の2種とした。結果は、両者とも同様のエネルギー、膜厚特性が得られ、γ値は1.30であった。このようにMP2400の如くナフトキノン・ジアジド・ノボラック系レジストの場合には相反不軌則が成立しないことがわかった。この理由としては、感光体であるナフトキノン・ジアジドの系やポリマーのノボラック樹脂系が、熱的に安定であるために、エキシマレーザーの高出力による熱的影響を受けにくいと考えられる。

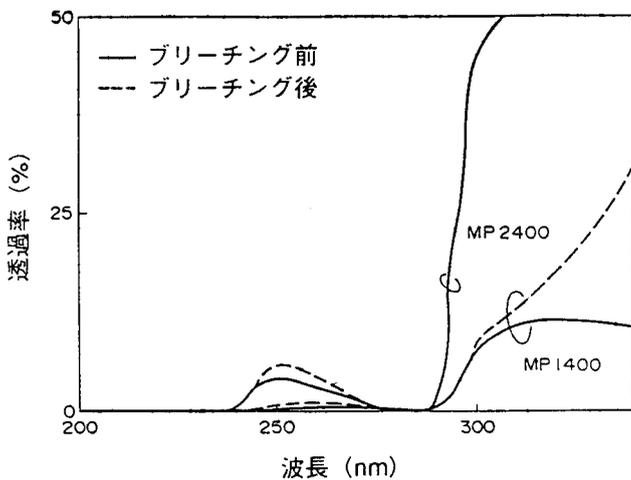


図6.21 MP2400とMP1400の露光前後の紫外分光特性

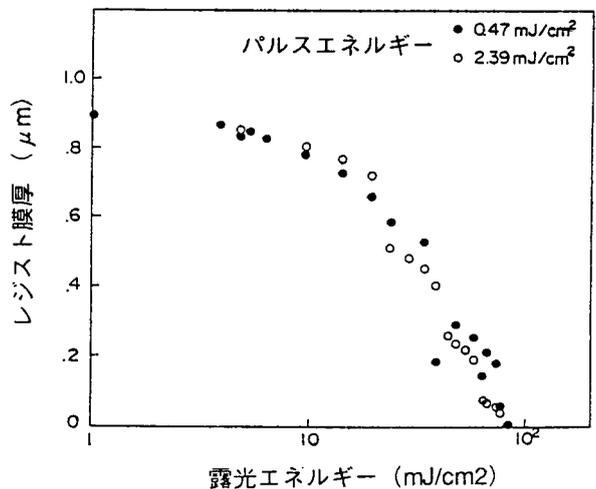


図6.22 MP2400の相反不軌則を検証するための照射特性

(2) 主鎖切断型ポジ型DUVレジスト

主鎖切断型のポジ型DUVレジストの代表例としては、ODUR-1013が挙げられる。ODUR-1013は、PMIPK（ポリメチル・イソプロピル・ケトン）を主成分とするレジストであり、DUV光により主鎖のC-C結合を切断し、分子量の低くなった成分を有機溶媒により溶解させるという反応機構をもっている。

図6.23に、ODUR-1013の γ 特性を示す。現像はODUR-1010現像液60秒浸漬で行い、エキシマレーザーのパルスエネルギーは $2.39\text{mJ}/\text{cm}^2$ とした。この図よりODUR-1013はおよそ $1\text{J}/\text{cm}^2$ の248nm光のエネルギーを必要とすることがわかった。このようなエネルギー特性は同じ主鎖切断型のPMGIレジスト（Shipley社製）でも同様であり、このタイプのレジストは高エネルギーのエキシマレーザー光によっても比較的感度が悪いことがわかる。

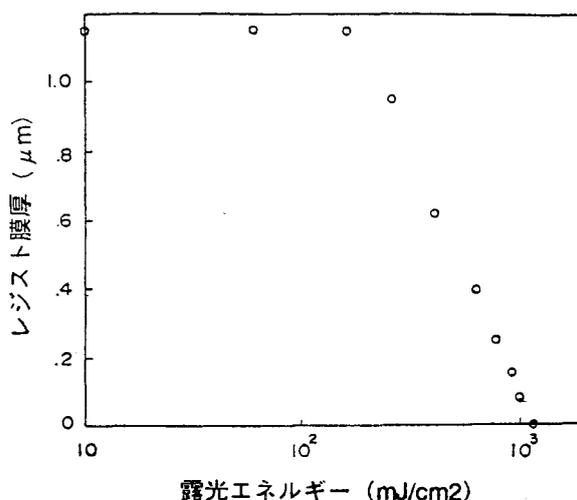


図6.23 ODURの照射特性

(3) ネガ型DUVレジスト

ネガ型のDUVレジストとして非膨潤で高解像性が期待されるのは、RD-2000N^{6,24)}であり、これはアジド系化合物とフェノール系樹脂より成っている。DUV光に感度があるアジド化合物が、DUV光によりフェノール樹脂と架橋を起し、未露光の重合していない部分をアルカリ水溶液で除去現像するという、非膨潤タイプのネガ型レジストである。

図6.24にRD-2000Nのエキシマレーザー露光前後の紫外分光曲線、図6.25に γ 特性を示す。RD-2000Nの膜厚は $1.0\mu\text{m}$ 、現像はRD-2000N現像液にて80秒浸漬で行い、エキシマレーザーのパルスエネルギーは $8\text{mJ}/\text{cm}^2$ である。これらの図より、RD-2000Nは248nm光に対して感度が高いことがわかり、また、その γ 値(2.30)より解像度に関しても良好であることが予想される。

図6.26は、エキシマレーザー露光による $0.5\sim 0.8\mu\text{m}$ のRD-2000NのパターンSEM写真である。パターン形状に必要なパルス数は20であり、MP2400やHPR1182につぐ高感度であった。その解像性についても先に述べた予想通り、形状の良いパターンが $0.5\mu\text{m}$ まではっきりと表われている。これは図6.24の紫外分光曲線から、露光前後の248nmにおける吸収ピークの比が1.5と大きく、レジスト下部までネガ型の重合反応が起こりやすかったためと考えられる。一方、このレジストの場合には、現像によるパターン形状の制御性が問題となるので、現像条件についてのより深い考察が必要である。

(4) アルカリ溶解促進型ポジ型EBレジスト

RE-5000Pは、Bowdenらによって開発されたポリ-2-メチルペンテン-1-スルホンとフェノール樹脂よりなるレジストである。

ポリ-2-メチルペンテン-1-スルホンによるフェノール樹脂の溶解抑制効果を利用したレジストで、通常はEBによってポリ-2-メチルペンテン-1-スルホンのC-S結合が切断され、フェノール樹脂の溶解抑制能が低

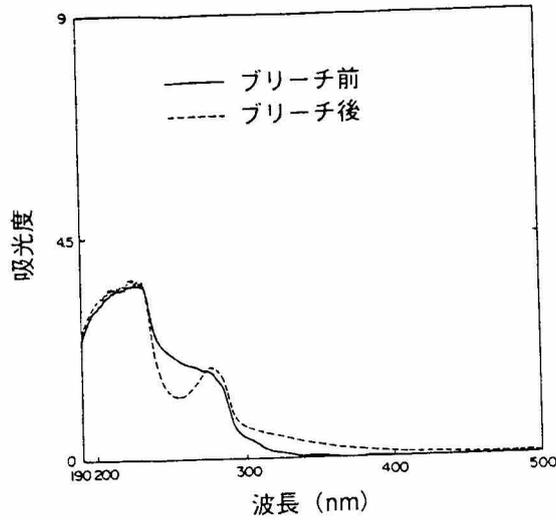


図6.24 RD-2000Nの紫外分光特性

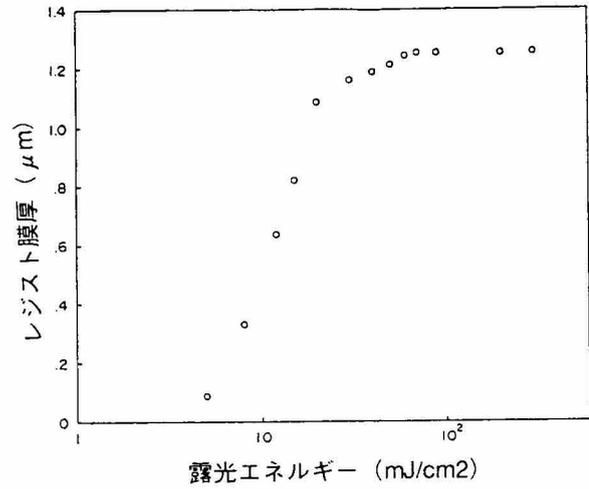


図6.25 RD-2000Nの照射特性

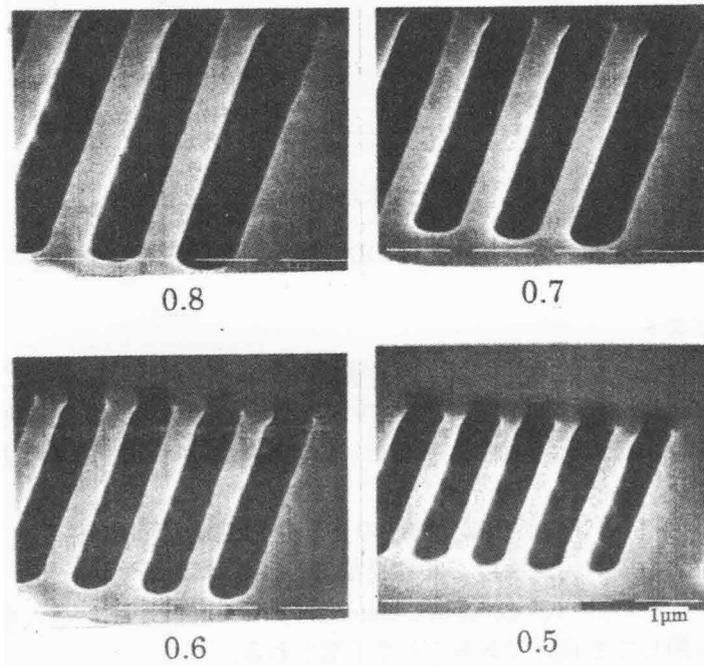


図6.26 RD-2000Nによる0.5から0.8 μm L&SパターンのSEM写真

下することによりアルカリ溶解のポジ型レジストとなる。

このレジストのエキシマ露光前後の紫外分光曲線を図6.27に示す。レジスト膜厚は1.0 μmである。(1)、(3)と同様230nmと280nm付近にフェノール樹脂のベンゼン環の吸収ピークがあらわれる。又、他の領域においてもMP2400やHPR1182と同様な吸収ピークを示しているが、250nm付近の吸収ピークは相対的に低く、感度はこれらのレジストに比べて悪いことが予想される。

図6.28は、RE-5000Pの0.5~0.8 μmのエキシマレーザー露光によるパターンSEM写真を示している。膜厚は0.5 μm、現像はRE-5000P現像液を1:1の水に希釈したもので60秒間の浸漬にて行った。パターン形成に必要としたパルス数は4000で、やはり、DUVレジストに比べると大幅に低感度であった。得られたパターンは0.5 μmまで解像しているものの、膜減りとスペース部のレジスト残渣が多く、このことは、露光後の248nmにおける吸収ピークの増加に起因、即ち、MP2400の場合と同様のレジストの光吸収が起

困していると考えられる。ただし、レジストパターンの形状はMP2400やHPR1182に比べて比較的良好的なので、現像条件をより最適化するなどの方法で前記のレジストの光吸収の問題は解決される可能性があると考えられる。

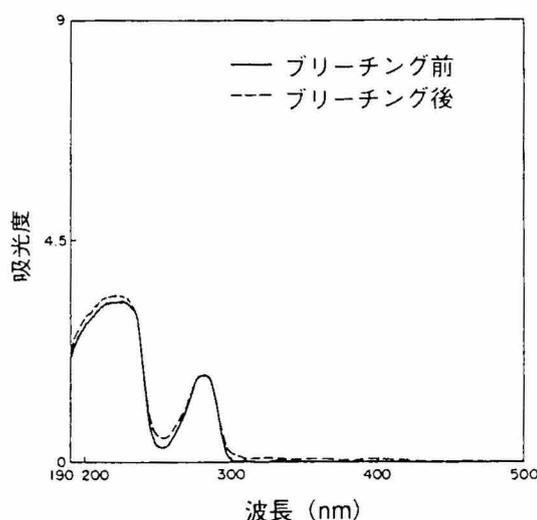


図6.27 RE5000Pの紫外分光特性

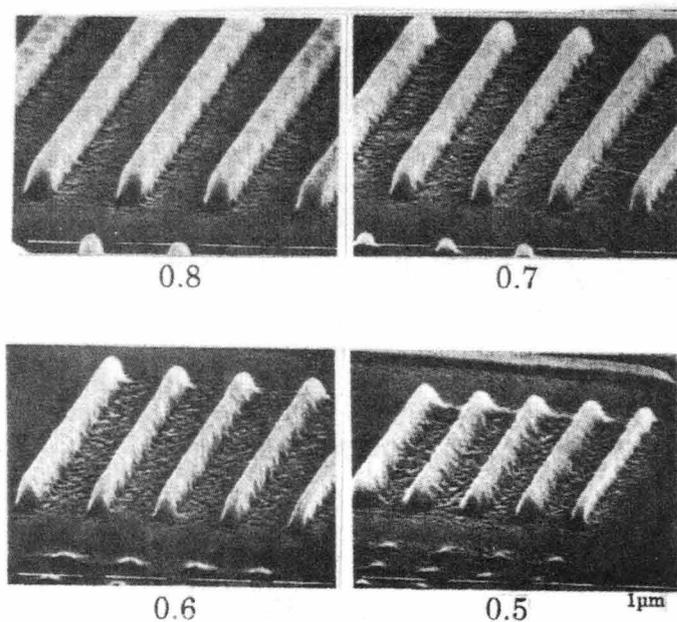


図6.28 RE5000Pによる0.5から0.8 μm L&SパターンのSEM写真

(5) 主鎖切断型ポジ型EBレジスト

主鎖切断型ポジ型EBレジストの代表例はPMMA（ポリメチル・メタアクリレート）であり、これを商品化したものの1つがOEBR-1000である。OEBR1000は分子量約60万のPMMAであり、通常はEBにより主鎖であるC-C結合が切断され、有機溶媒により、分子量の低下した部分が溶解除去される。

本研究ではOEBR-1000の248nmエキシマレーザー光に対する反応性を検討すべくその紫外分光曲線（図6.29）と γ 特性（図6.30）を求めた。OEBR-1000の膜厚は0.5 μm 、現像はOEBR-1000現像液にて180秒浸漬にて行い、 γ 特性測定の際に使用したエキシマレーザーのパルスエネルギーは2.39mJ/cm²である。図6.29より、OEBR-1000は248nm光に対してほとんど感度がなく、また、図6.30よりその感度は10J/cm²以上という膨大なエネルギーであることがわかった。このような低感度のレジストに対しては、我々が試作した高エネルギーのエキシマレーザー・ステッパーによっても、10Hzで1分30秒程度の露光時間を必要とし、実用上の使用が難しいと考えられる。また、仮に、PMMAを使用するときにも、これ自身耐エッチング性のないことから、3層レジストの上層として使用することが提案されている^{6,9)}。

(6) 重合型ネガ型EBレジスト

CMS-EX（クロロメチル・スチレン）はNTTにより開発された^{6,25)}ネガ型EBレジストであり、メチルクロル基がEBによりメチレンラジカルとなり、重合反応を起こすことが知られている。

本研究で用いたCMS-EXは分子量11万の高感度タイプであった。図6.31にCMS-EXの紫外分光曲線を示した。このときのCMS-EXの膜厚は0.5 μm である。248nm付近に感度はあることがわかり、2.39mJ/cm²のパルスエネルギーにて10³パルス程度で、現像時に膜厚が100%となることから、CMS-EXの感度は2J/cm²程度であることがわかった。さらに、本研究では、CMS-EXのエキシマレーザー露光によるパターン形成を試みたが、現像時（現像は酢酸イソアミル：エチルセルソルブ・アセテート=43：57の混合液にて60秒浸漬）に、レジストパターンが基板からはがれるという問題が起こった。この現象は、エキシマレーザー

光が完全にレジスト下部まで到達しにくいためであると考えられ、このような光表面吸収の強いネガ型レジストはKrFエキシマレーザー・リソグラフィには使用が難しいと思われる。

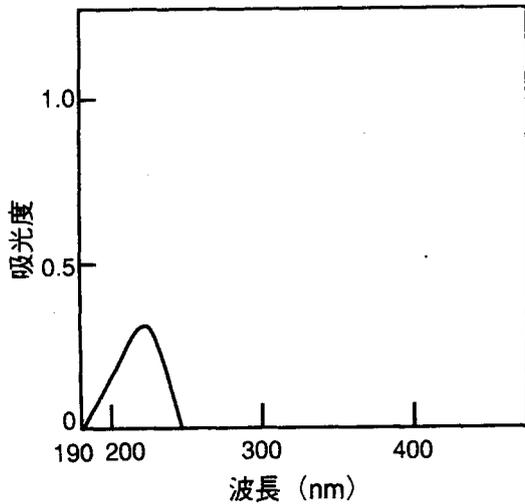


図6.29 OEBR1000の紫外分光特性

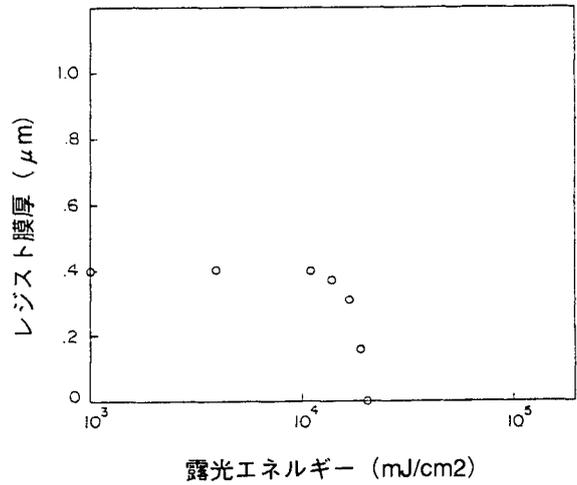


図6.30 OEBR1000の照射特性

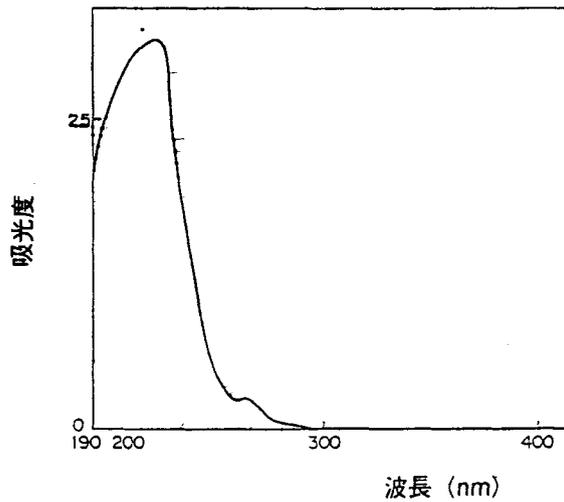


図6.31 CMS-EXの紫外分光特性

6.4.4 まとめ

248nmエキシマレーザー・リソグラフィに適したレジスト材料の特性について検討を行った。評価した結果についてまとめを表6.9に示す。

また、評価したレジストからの主な知見をまとめると以下の通りとなる。

- (1) MP2400, HPR1182というナフトキノン・ジアジド型のレジストは最も感度・解像性とも良いが、レジスト光吸収によるパターン形状の劣化が大きい。
- (2) RD-2000Nはパターン形状・感度とも良い。ただし、現像条件を注意深く制御する必要がある。
- (3) ODUR-1013, OEBR-1000の如き主鎖切断型のポジ型レジストは248nm光に対して103~104mJ/cm²程度の低感度である。

本研究より得られた結果・考察により、248nm KrFエキシマレーザー光に対する種々のレジストの諸特性が明らかとなった。現状のレジストではKrFエキシマレーザー・リソグラフィには必ずしも適合するものがあるとは言えないことも明らかとなり、より高性能のレジスト材料が必要不可欠である。極論すれば、レジスト材料の開発がKrFエキシマレーザー・リソグラフィの将来を決定することになると考えられる。

表6.9 既存レジストの評価結果

レジスト	露光パルス数	現像液	現像時間 (秒)	解像度 (μm)	備考
MP2400	10	MP2401 20%希釈液	60	0.4	パターン形状悪い
HPR1182	15	HPRD-418	60	0.5	パターン形状悪い
ODUR-1013	10^3	ODUR -1010現像液	120	—	感度悪い
RD-2000N	20	RD現像液	80	0.5	現像による 形状変化多い
RE-5000P	$4 \cdot 10^3$	RE現像液：水 = 1 : 1	60	0.5	膜減り、レジスト 残渣多い
OEBR-1000	10^4	OEBR -1000現像液	180	—	感度悪い
CMS-EX	10^3	イソamil酢酸エチル セリルブチレート = 43 : 57	60	—	レジストはがれが 生じる

* $2.39 \text{ mJ/cm}^2 \cdot \text{パルス}$

6.5 KrFエキシマレーザー・レジストの開発

6.5.1 はじめに

KrFエキシマレーザー・リソグラフィ技術は $0.5 \mu\text{m}$ 以下のパターン形成の実力を有している。しかしながら、従来のナフトキノ・ジアジド・ノボラック樹脂を主材とする遠紫外線レジストに於いては、 248nm の波長でレジスト表面付近に強い吸収があるため、高コントラストなパターンが得られなかった。この原因は、レジストに用いられるベースポリマー（樹脂）自身が露光光に対して大きな吸収を持っているか、レジスト中の感光剤の光反応性の効率が悪いことにある。

$0.5 \mu\text{m}$ 以下のパターン形成用レジストに必要とされる特性は、感度、解像度、および耐ドライエッチ性が高く、さらに基板への密着性も高いことが要求される。KrFエキシマレーザー対応レジストの開発には、2種類のアプローチがある。1つはベースポリマーと感光体の注意深い選択による単層高透明性ポジ型レジストの合成およびその透過率の向上である。他の1つは高感度で安定した酸発生剤を利用した化学増幅型レジスト⁶⁻²⁶⁾である。しかしながら、化学増幅型レジストは安定性と密着性といういくつかの問題を有しておりまだまだ未踏の領域である。本論文においては、新しい高透明性溶解阻止型レジストの開発^{6-27~37)}について述べる。

6.5.2 実験条件

合成したレジストはジエチレン・グリコール [diethylene glycol (diglyme)] を溶媒としスチレン・マレイン酸共重合体部分エステル [poly (styrene-co-maleic acid half ester (SMA))] のマトリックス・ポリマーと適量の感光体の混合物から構成される。レジスト溶液を合成後、 $0.2 \mu\text{m}$ のテフロン・メンブレン・フィルタにより濾過した。その後シリコン基板ウェハ上に合成したレジストを塗布し 90°C 90秒間ホットプレート上でベークした。レジスト塗布したウェハは 248nm の開口数0.42のKrFエキシマレーザー・ステッパで露光した。露光後、現像はテトラメチル・アンモニウム・ハイドロオキシド [tetramethyl-ammonium hydroxide (TMAH)] 溶液にて60秒間行なった。

感度とコントラスト値の計測はSTM603P（大日本スクリーン社製）を使用してレジスト膜厚測定シプロットすることより求めた。感度は0%残膜時の露光量、コントラスト値は20、80%間の残膜厚での露光特性の直線より導いた。解像度、パターン形状の評価には走査型電子顕微鏡（SEM）により解析した。

透過率測定は自記分光光度計UV-265（島津製作所製）を使用した。測定レジストは石英板上に塗布し、

標準リファレンスには、未塗布の石英板を使用した。紫外線透過率測定には、露光前後の試料の各波長にて計測した。

6.5.3 結果と考察

g線、i線用の溶解阻止型ポジレジストは、248nmの波長に対し強い光吸収を示すのでほとんど光ブリーチングしない。さらに遠紫外線用として開発されたAZ2400 (Shipley社) においても露光前後の透過率は数%で、三角形のパターン形状しか得られず、エキシマレーザ・リソグラフィの工業化の延滞理由の一つとなっていた。そこで、高透明性の有するポリマーと感光体の開発が各社で行なわれた。

すでに、B.D.Grantら⁶⁻³⁷⁾、C.G.Willsonら^{6-38,39)}やG.Schwartzkopf⁶⁻⁴⁰⁾らは、5-ジアゾ・メルドラム酸誘導体を感光剤として用いた遠紫外線レジストの検討を行なっている。3-ジアゾ-4ジオン系化合物は遠紫外線に感光性を有しかつ光退色性を有する化合物として一般に良く知られている。しかしながら、今までに実用的なレジストとしての報告がない。

スチレン・マレイン酸共重合体部分エステル [poly (styrene-co-maleic acid half ester (SMA))] は248nmの波長に70%と従来になく高透明性があり、レジストのベースポリマとして選択した。図6.32に1.0μm厚のSMAのUVスペクトラムを示した。SMAは275nm以上ではほとんど透明で248nm付近では約70%の透過率が得られている。220nm以下では全く不透明となる。図6.33にSMAの化学構造を示した。化学構造からもわかるように、ベンゼン環を有しているため良好なドライエッチング耐性を示すものと考えられる。

次節に於いては、開発したいくつかのレジストの特長について説明する。

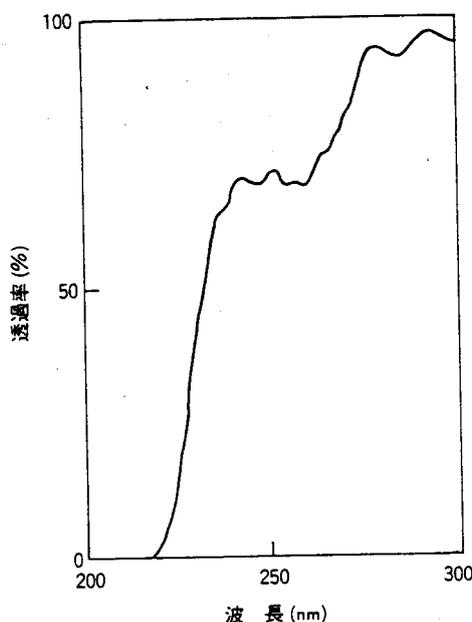


図6.32 SMAの紫外分光特性

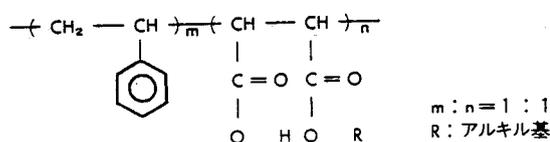


図6.33 SMAの化学構造

(1) STAR-P2レジスト

STAR-P2 (Super Transparent Advanced Positive-Resist, version2) レジストは、ベースポリマであるSMA、感光体、そして溶媒よりなる。STAR-P2の感光体は3-ジアゾ-2, 4-ジオン化物 (1, 7-bis (3-chlorosulfonyl-4-methylphenyl) -4-diazo-3, 5-heptanedione) で図6.34に示した。その化学反応過程は従来の感光性化合物であるナフトキノン・ジアジドと類似したものと考えられている。すなわち、遠紫外線露光によりジアゾ基が脱離し、遠紫外領域の吸収が減少する。それにともない、ケテン転移反応または主鎖のC-C結合の切断反応が発生し、カルボキシル基が生成される。カルボキシル基は、レジスト中の水分または現像液中の-OH基と反応しカルボン酸を生成するためレジスト中の露光部がアルカリ現像液に溶解するというものである。STAR-P2レジストの露光前後のUVスペクトルを図6.35に示した。248nmで露光後45%、露光前で15%と高透明性を得た。図より露光前後での良好な光ブリーチング特性を示している。STAR-P2

レジストの4%NMD-3（東京応化社製現像液；TMAH溶液）による溶解特性を図6.36に示した。未露光部のレジストでは60秒後においても、膜減りがほとんどなく、露光部では25秒以下で全体膜厚が溶解した。図6.37には、高ガンマ値2.1を示すコントラスト特性を示した。STAR-P2は良好な溶解特性の選択性を示すため高コントラスト化がはかれる。つまり、高ドーズ露光量の領域は瞬時に溶解するのに比べ、低ドーズ露光量の領域は現像されないからである。

この良好な高透明性、溶解特性そしてコントラスト値は従来の市販のKrFエキシマレーザポジ型レジストに比べアスペクト比の高いレジスト形状が得られる。STAR-P2のレジスト形状のSEM写真を図6.38に示した。約80度の角度を維持しながら、0.7、0.6、0.5 μm のL&Sパターンが良好に得られた。しかしながら、本レジストは良好なリソグラフィ特性を示すものの、超LSI開発、量産レベルに必要なレジスト角度85度以上の要件を満足しない。

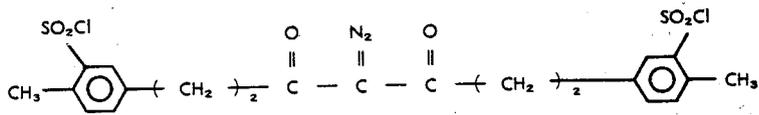


図6.34 STAR-P2の感光体の化学構造

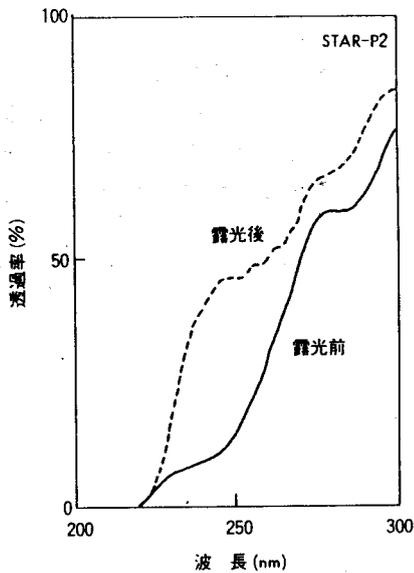


図6.35 STAR-P2の紫外分光特性

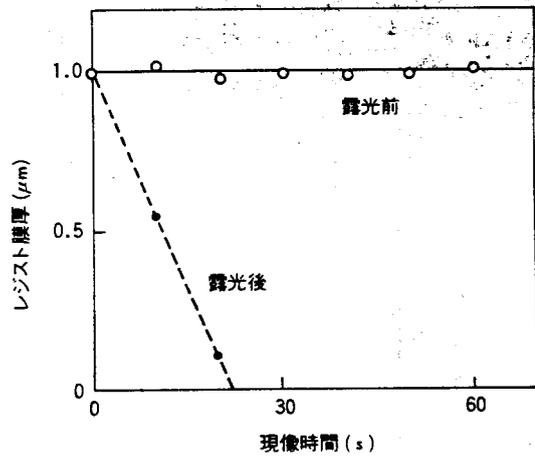


図6.36 STAR-P2の溶解特性

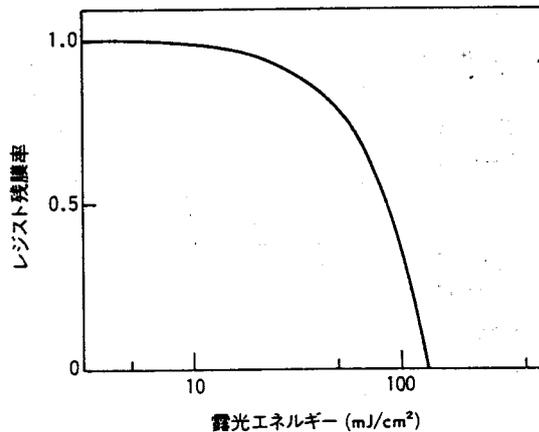
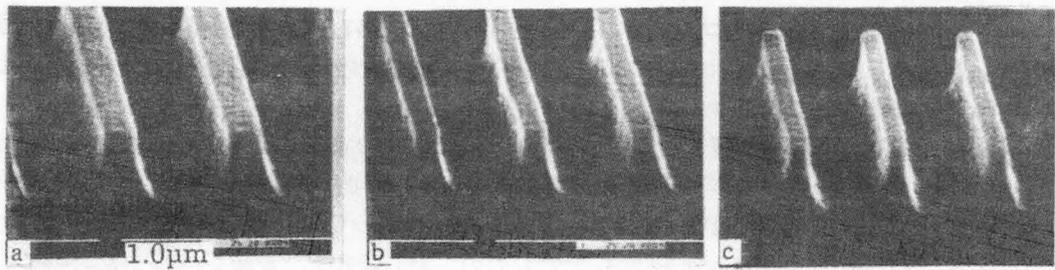


図6.37 STAR-P2の照射特性



0.7 μ m L&S

0.6 μ m L&S

0.5 μ m L&S

図6.38 STAR-P2による0.5から0.7 μ m L&SパターンのSEM写真

(2) STAR-P4

より高い露光後の透過率、ブリーチングレートを有する新しいレジストSTAR-P4 (version4) は、感光体として、他の3-ジアゾ-2, 4-ジオン化物を使用した。露光前後のSTAR-P4のUVスペクトラムを図6.39に示した。露光後の最終透過率は70%で、この値はベースポリマであるSMAの248nmの透過率限界である。溶解特性はSTAR-P2とほとんど同様であるが、図6.40に示したようにコントラスト特性は良好なものではない。従って、図6.41に示したようにパターン形状においても急峻なパターンは得られなかった。このレジストはSTAR-P2の透過率より50%高いにもかかわらず、リソグラフィ性能の最も重要なコントラスト特性が劣る結果となった。従って、高透明性だけでなく良好な現像特性を兼ね備えなければならないことがわかった。

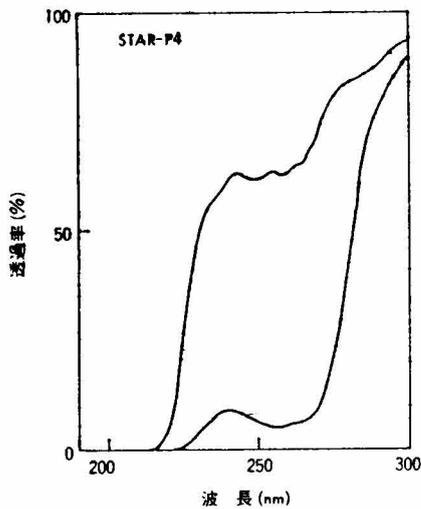


図6.39 STAR-P4の紫外分光特性

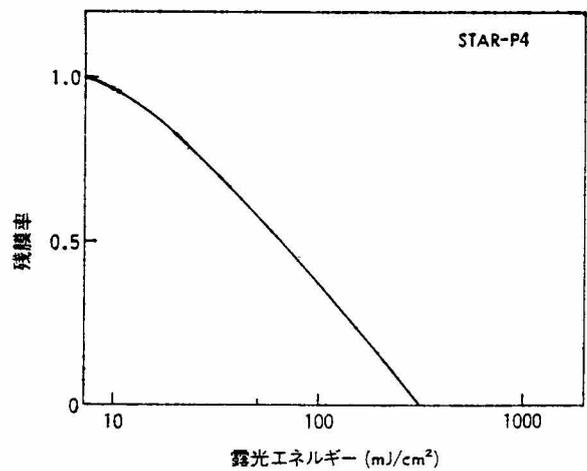
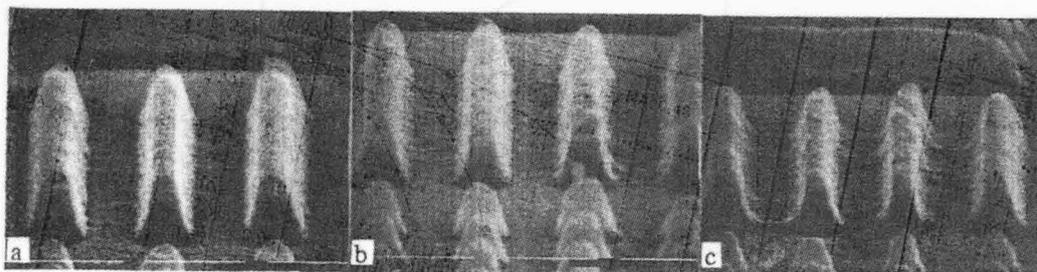


図6.40 STAR-P4の照射特性



0.55 μ m L&S

0.50 μ m L&S

0.45 μ m L&S

図6.41 STAR-P4による0.45から0.55 μ m L&SパターンのSEM写真

(3) MASTERレジスト

高透明性を維持した上で、露光特性を改善するため感光体に改良を加えたMASTER (Micro Advanced Super Transparent Excimer Resist)を開発した。図6.42に示すように、UVスペクトルから再び高透明性を得ている。露光前透過率は約20%、露光後の透過率は約70%であった。溶解特性においてもSTARシリーズと同様の傾向を示した。MASTERレジストの露光特性は図6.43に示すようにSTAR-P4を改善したものになった。

図6.44はMASTERのレジスト・パターンのSEM写真であるが $0.5\mu\text{m}$ 以下まで良好なパターン形状が得られている。パターン角度は80度以上であったがシリコン基板とレジスト界面において裾引きが観察された。

コントラストの高い値が得られたのは、ポリマーが248nmで高い透過率を有し、感光剤がKrFエキシマレーザー露光で高い透過率変化を生じたためと考えられる。なお、感度が低いのは、3-ジアゾ-2, 4-ジオン化合物では、露光時の光化学変化が従来のナフトキノン・ジアジド化合物におけるケテン転移反応より大きなエネルギーを必要とする、主鎖のC-C結合の切断反応であるためと考えられる。さらに感光体を変更することによって、我々は高性能な高透明性レジストMASTER-2 (version2)を開発することができた。レジスト形状の裾引きの改善、解像度 $0.45\mu\text{m}$ でほぼ85度の性能を見いだした。MASTER-2のSEM写真を図6.45に示した。

試作した3-ジアゾ-2, 4-ジオン系感光性化合物は248nm付近に大きな吸収ピークを有し、KrFエキシマレーザー露光で分解する。また、これらの感光体は従来の5-ジアゾ・メルドラム酸と比べ耐熱性が高い。さらに、クロロ・スルフォニル基を付加することにより、アルカリ現像液に対する溶解速度を低下させることができる。従って、248nmで高い透過率を有するアルカリ可溶性スチレン系ポリマーと組み合わせることにより、KrFエキシマレーザー露光に対し良好なコントラストを有するレジストとなった。レジスト感度は従来の市販の遠紫外線レジストより高く、約 $210\text{mJ}/\text{cm}^2$ であった。しかしながら、現在市販のKrFエキシマレーザー・ステッパーを用いて量産するには $25\text{mJ}/\text{cm}^2$ 必要とされるのでまだこの点で改善の余地を残すものといえる。しかしながら、サブハーフミクロン超LSIの開発のためのKrFエキシマレーザー・リソグラフィ対応のレジストとして本MASTERレジストは有力な候補である。

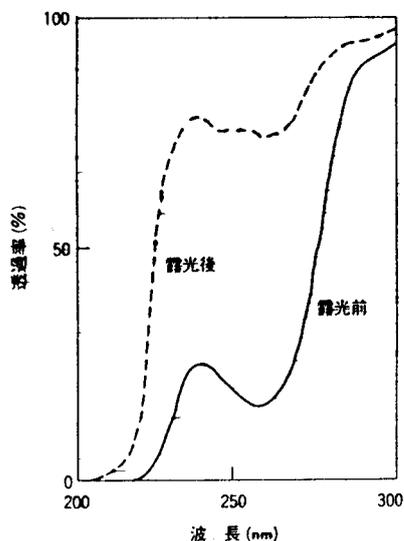


図6.42 MASTERの紫外分光特性

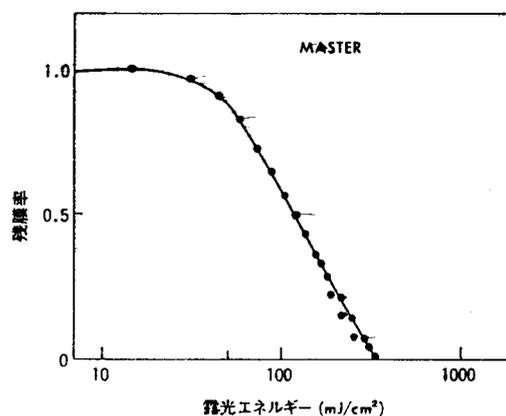
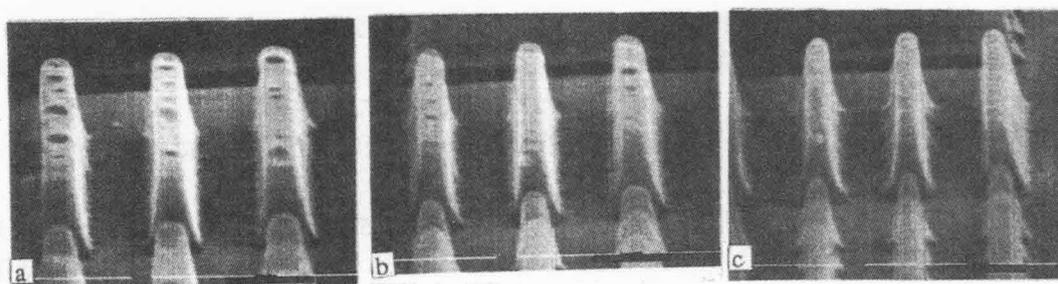


図6.43 MASTERの照射特性

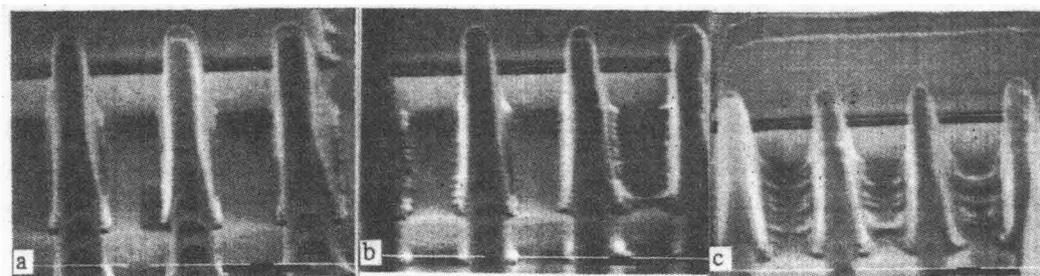


0.55 $\mu\text{mL\&S}$

0.50 $\mu\text{mL\&S}$

0.45 $\mu\text{mL\&S}$

図6.44 MASTERによる0.45から0.55 $\mu\text{mL\&S}$ パターンのSEM写真



0.55 $\mu\text{mL\&S}$

0.50 $\mu\text{mL\&S}$

0.45 $\mu\text{mL\&S}$

図6.45 MASTER-2による0.45から0.55 $\mu\text{mL\&S}$ パターンのSEM写真

6.5.4 材料特性

(1) 耐ドライエッチング性

開発したレジストのドライエッチング特性を検討した。シリコン酸化膜のドライエッチング条件下においてSMAポリマとSTAR-Pレジストシリーズを含んだ各種レジストおよびレジスト材料についてエッチングレートを表6.10にまとめた。SMAポリマは従来レジストのベースポリマのノボラック樹脂の2.5倍以上の耐エッチ性があった。さらにシリコン酸化膜との選択比も約2対1と良好であった。従来のG線レジストの代表であるTSMR-V1（東京応化社製）レジストのエッチングレートは約56nm/minで、STAR-P2もほぼ同等の約57nm/minであった。シリコン酸化膜との選択比においても約5対1以上とSTAR-P2は良好な耐ドライエッチング性をしめし、ドライエッチング・プロセスを多用する超LSIプロセスに有益である。

表6.10 開発したレジストのエッチングレート

材 料	エッチレート (nm/min)
Novolac	70.25
PVP	72.33
SMA	172.46
TSMR-V 1	56.26
STAR-P 2	57.12
SiO ₂	305.24

SiO₂ドライエッチング条件：

CHF₃ 25sccm, O₂ 5 sccm, He cooling 30sccm

Gas pressure 40Pa, 400W RF power 800kHz

(2) 現像液安定性

MASTERおよびSTAR-Pシリーズは両者とも現像液濃度が薄い。そこでこの現像液の安定性について、30日間にわたりTMAHベース現像液(0.1%)の希釈液のTMAH濃度、不純物濃度の変化について分析した。表6.11に於いて、TMAH濃度はほとんど変化しなかったが炭酸塩は0.0074から0.0067重量%と約10%減少した。これは実験を大気中で行なったため酸化されたものと思われる。しかし実際には乾燥窒素雰囲気下であるため炭酸塩の減少は無視されるものと考えられる。現像液の不純物分析は原子吸光法およびプラズマ発光分光分析法により測定した。不純物の増減は認められなかった。MASTERおよびSTAR-Pシリーズの薄い現像液の劣化は超LSI製造に全く問題のないことがわかった。

表6.11 30日前後の現像液の化学分析

(a) 重量比(W/V%)		初期		30日後								
重量比	TMAH	0.089		0.090								
	炭酸塩	0.0074		0.0067								
(b) (ppm)		Na	K	Mg	Ca	Cu	Mn	Ag	Fe	Zn, Pb	Ni, Cr	Al
不純物	初期	0.01	0.01	0.01↓	0.01↓	0.01↓	0.01↓	0.01↓	0.01	0.01↓	0.01↓	0.01
	30日後	0.01	0.01	0.01↓	0.01↓	0.01↓	0.01↓	0.01↓	0.01↓	0.01↓	0.01↓	0.01

Na, K: 原子吸光分光計, その他: ICP

(3) 反射率

各種基板の反射率はデバイス製作およびリソグラフィにおいて非常に重要である。図6.46に各種基板の反射率を示した。最も高い反射率は、g線(436nm)で90%を示したAl/SiとAl/Si/Cuであった。Al/Siの反射率はKrF(248nm)まで一定に高く、ちょうどArF(193nm)帯において約80%に減少し始める。Al/Si/Cuの反射率はi線波長(365nm)付近まで徐々に減少し始めるがKrF波長においても約85%と未だ高反射状態であった。

Si基板の反射率はg線波長で40%、その後、i線波長で60%のピークをむかえ2番目のピークは270nm付近で75%である。248nmでは約70%で反射率は高くなるのがわかる。

WSiの反射率はg線波長で45%で248nmまで約53%と緩やかに増加する。反射率の問題は現在量産の主力であるg線リソグラフィと同様、特別な反射防止、あるいは染料入りレジストの開発など必要性があることがわかった。

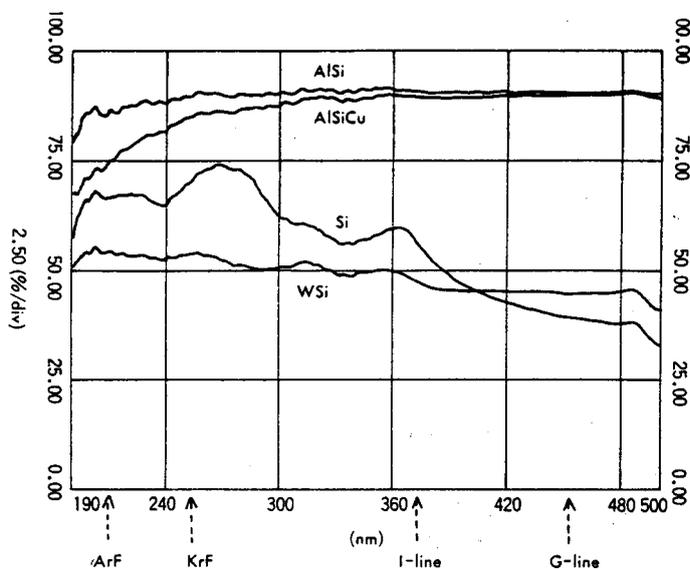


図6.46 KrFエキシマレーザ露光の反射率

6.5.5 まとめ

いくつかの新しい感光体とベースポリマの混合体からなるレジストを合成、評価し、その結果遠紫外線KrFエキシマレーザー・リソグラフィ対応の高透明性レジストSTAR-P、MASTERレジストを開発した。特に、MASTERは70%の高透明性を得、良好なリソグラフィ特性を得た。この透明性と露光特性は85度レジストパターン角度で $0.45\mu\text{m}$ の解像度の結果をもたらした。また、耐ドライエッチング性も従来レジストと同等で実プロセスの導入が容易である。Al/Si、Al/Si/Cu、SiそしてWSi薄膜のそれぞれの基板の反射率について測定した結果、KrFエキシマレーザー・リソグラフィは従来のg線リソグラフィにと同様、反射に対して課題となる。

MASTERはサブハーフミクロン超LSIのためのKrFエキシマレーザー・リソグラフィの開発に有用であると言える。今後、実プロセス、つまり段差の有するウェハ上での評価、感度および解像度についても向上の必要がある。

6.6 エキシマレーザー・リソグラフィとi線リソグラフィの比較

6.6.1 はじめに

前章までに、エキシマレーザーを用いたリソグラフィについて論じ、 $0.5\mu\text{m}$ 以下のパターン形成についてエキシマレーザー・リソグラフィが非常に有効であることがわかった。

本章では、光リソグラフィによる $0.5\mu\text{m}$ 前後のパターンを形成するポテンシャルがあるi線リソグラフィとKrFエキシマレーザー・リソグラフィの比較^(6.41)を行い、それぞれの特徴を明らかにする。方法としては、シミュレーションと実験によるパターン解像性とパターン線幅についての検討を行った。

6.6.2 シミュレーションによる比較

(1) エキシマレーザー・リソグラフィのシミュレーション・モデル

従来、光リソグラフィのシミュレーションモデルはDillらのモデルに基づいており、実験値との良好な対応が確認されている。

ところが高エネルギーのエキシマレーザー・リソグラフィの場合には、通常の光反応以外の2光子吸収や2光子励起などが生じることが報告されている。このような異なる反応系のエキシマレーザー・リソグラフィにおいてはDillらのモデルは不相当であることがわかった。

それゆえに、本研究においては、レジストの露光と現像がレジスト中に吸収されたエネルギー E_{abs} に依存するという新しいモデルを考案した。吸収されたエネルギー E_{abs} とレジストの溶解速度 R は次式により定義される。

$$E_{\text{abs}} = \alpha I dt \quad (6.1)$$

$$R = R_0 (E_{\text{abs}})^{\beta} + R_b \quad (6.2)$$

(6.1)、(6.2)式で、 α はレジストの光吸収係数、 I はレジスト中の光強度、 R_0 、 R_b 、 β は定数である。

図6.47に、KrFエキシマレーザー露光による露光現像特性を示す。この図より、上記の本研究のモデルによるシミュレーションは実験値と良く適合し、この本モデルのエキシマレーザー・リソグラフィにおける正統性が理解できる。

(2) シミュレーションによるパターン線幅の解析

KrFエキシマレーザーとi線によるリソグラフィを比較するために、レジストとして両者に感光性が高いMP2400、現像液はMP2401、20%水溶液を用いた。シミュレーションは2次元のSAMPLEおよび3次元のPEACEなるシミュレータを用い、モデルはエキシマレーザー・リソグラフィに関しては前節の本研究で

考案したエネルギーモデル，i線リソグラフィに関しては通常のDillモデルを採用した。

図6.48に、0.8 μm から0.4 μm のL&Sパターンと露光エネルギーの関係を示した。ここで、おのおのの露光におけるレンズの開口数 (NA) は、KrFエキシマレーザーに対しては0.35，i線に対しては0.42とした。この図より、解像限界はKrFエキシマレーザーでは0.4 μm ，i線では0.5 μm であることがわかる。また、露光エネルギーに対するパターン線幅の制御性もエキシマレーザーを用いた方が良好で、0.5 μm までの制御性がある。一方、i線では0.6 μm の制御が最高値である。

図6.49は、異なるL&Sパターン及びコンタクトホールパターンを解像させるのに必要なエネルギーの比較を行ったものである。1 μm のパターンを解像させるのに必要なエネルギーを基準とすれば、エキシマレーザーを用いたリソグラフィは0.5 μm まで1 μm を解像させるエネルギーとほぼ同等のエネルギーで行うことができる。また、L&Sパターンとコンタクトホールパターンのエネルギー差が少ないことがわかる。i線リソグラフィでは、0.5 μm パターンでは急激な必要エネルギーの増加があり、大小パターンが混在するデバイス製造には困難となる。

焦点深度変動に対するパターン線幅の変動性を検討した結果が図6.50である。

ここでは、Rayleigh式のパターン解像性である λ/NA がKrFエキシマレーザーのNAと同等になるi線のNAを想定 (NA 0.51) した。

図6.50から、焦点深度変動に対するパターン線幅の変動性はエキシマレーザー・リソグラフィの場合に非常に低減されることがわかった。i線リソグラフィでは変動性が大きく、特にNAが大きくなった場合には、1.0 μm 以上の非焦点位置で著しくパターン線幅が変動する。

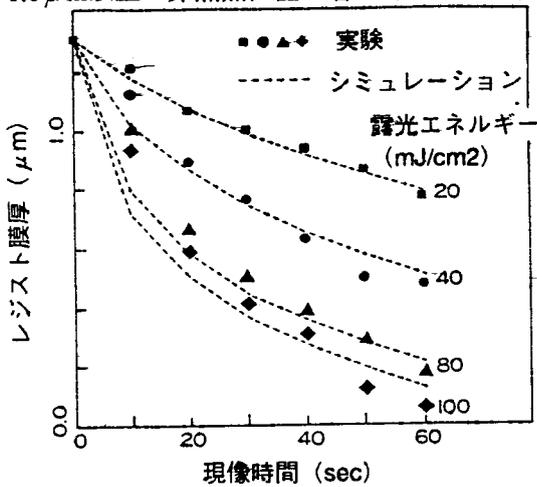


図6.47 KrFエキシマレーザー露光による露光現像特性

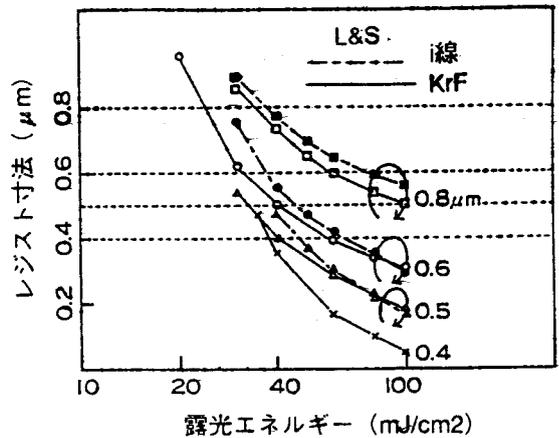


図6.48 0.8から0.4 μm のL&Sパターンと露光エネルギーの関係

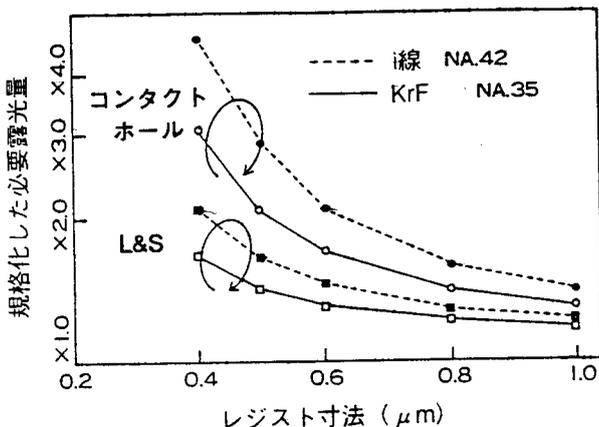


図6.49 任意寸法を解像するための露光エネルギーの比較

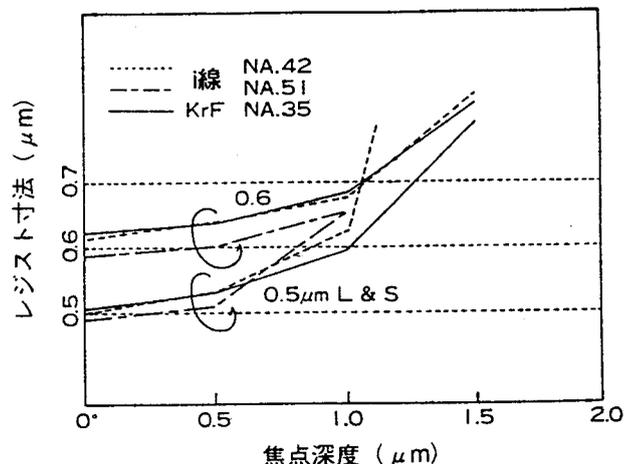


図6.50 KrFエキシマ/i線リソグラフィのシミュレーション焦点深度特性

(3) シミュレーションによるパターン形状の解析

図6.51は、 $0.4\mu\text{m}$ のL&Sパターンの3次元シミュレーションおよび実験によるSEM写真である。本研究のシミュレーションモデルは忠実に実験値を再現していることがわかる。

図6.52は、 $0.6\mu\text{m}$ のコンタクトホールパターンのシミュレーション結果である。KrFエキシマレーザーによる場合にはパターンの近接効果の影響がなく、良好である。一方、i線の場合には、パターン間の近接効果によるパターンサイズの変動と膜減りが見られる。

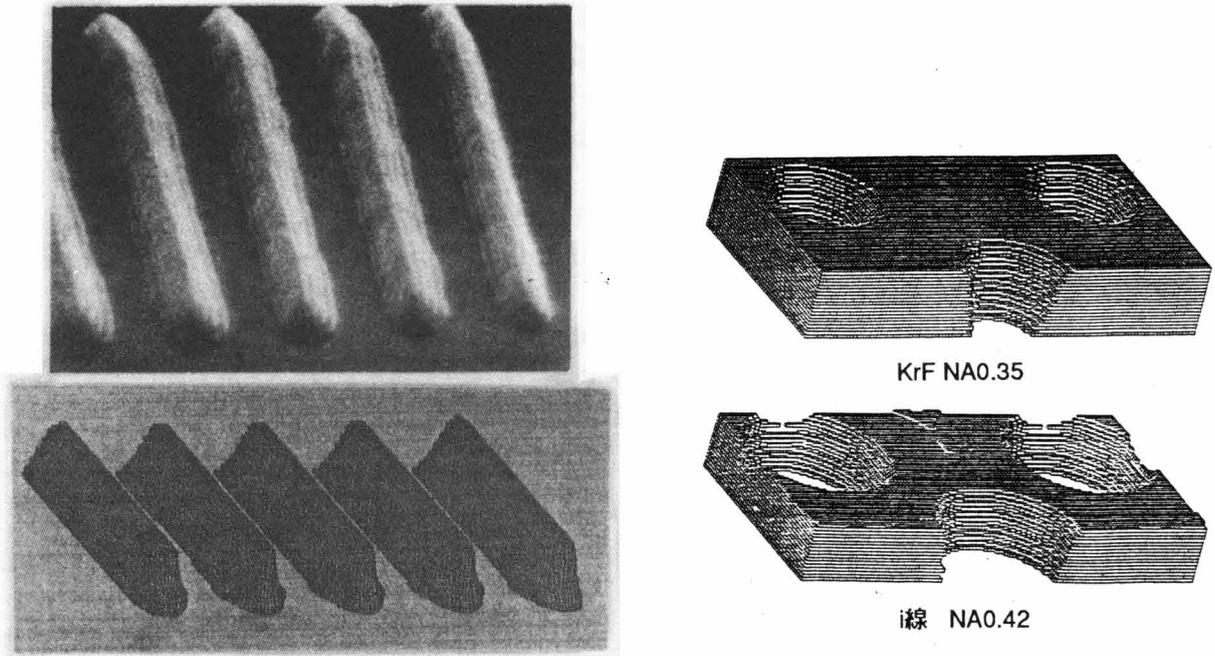


図6.51 KrFエキシマ露光による $0.4\mu\text{m}$ L&Sパターン SEM写真と3次元シミュレーション結果

図6.52 $0.6\mu\text{m}$ コンタクトホールパターンのシミュレーション

6.6.3 実験による比較

図6.53は実験による $0.4\mu\text{m}$ から $0.8\mu\text{m}$ までの孤立パターンとL&Sパターンの露光エネルギー変動に対する線幅変動の結果である。

i線露光の場合には $0.4\mu\text{m}$ パターンが得られず、しかも $0.5\mu\text{m}$ 以上のパターン線幅変動が大きいというシミュレーション結果と同様の結果が得られた。

KrFエキシマレーザー露光は、パターン線幅変動性を低減し、しかも、孤立やL&Sのパターンをいずれも同程度の露光エネルギーで解像させることがわかり、実デバイス製造に有利であることがわかった。

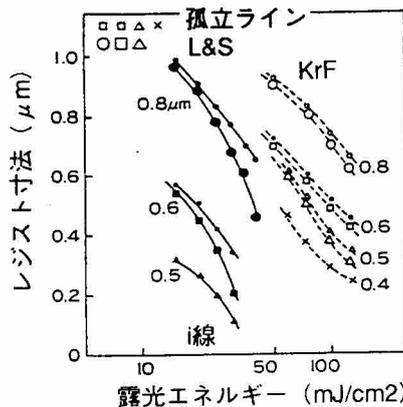


図6.53 0.4 から $0.8\mu\text{m}$ の孤立とL&Sパターンの露光量依存性

6.6.4 まとめ

i線露光とエキシマレーザー露光の比較を行い、i線の場合には $0.6\mu\text{m}$ 、エキシマレーザーの場合には $0.5\mu\text{m}$ のパターン解像性とパターン線幅制御性があることがシミュレーションと実験の両者により確認された。

i線露光の場合には $0.5\mu\text{m}$ の壁があり、NAを増大させることによりこれを解像させることは可能であるが、焦点深度が著しく低下することがわかった。このことからi線リソグラフィにより $0.5\mu\text{m}$ の壁をブレイクスルーするためには、高NA化、レジストの高性能化とともに本研究の前章までに述べたレジストプロセス技術を併用することが必要であると考えられる。

KrFエキシマレーザー・リソグラフィは $0.5\mu\text{m}$ 以下のパターンを近接効果なしに安定して形成できる。現状のレジストの表面光吸収によるパターン形状の劣化を解決し、さらに高いNAのステッパーを用いれば、 $0.25\sim 0.4\mu\text{m}$ のパターンについても形成できる可能性があることもうかがえた。

6.7 結言

KrFエキシマレーザー露光技術に関する研究について論じた。KrFエキシマレーザー・露光技術は、その短波長性という利点を生かして、サブーフミクロン領域の微細パターン形成の次世代リソグラフィに対して非常に有用であることがわかった。

半導体集積回路における $0.5\mu\text{m}$ ルールデバイス、とりわけ16M DRAM製造には、本章で述べたように、現状のエキシマレーザー・リソグラフィを応用することにより、可能であると考えられる。

さらに微細化するデバイス、例えば64M DRAM； $0.25\sim 0.3\mu\text{m}$ ルールにKrFエキシマレーザー・リソグラフィを応用するためには、以下のような問題点を解決する必要性が生じてくる。

- 1) 露光面積の増大 (20mm 以上)
- 2) NAの増大 (0.4 以上)
- 3) 単色縮小レンズを用いる場合のレーザーの発振半値幅の狭帯域化 (0.005nm 以下)
- 4) 露光照度の増大 ($10\text{mJ}/\text{cm}^2 \cdot \text{パルス}$ 以上)
- 5) 重ね合わせ精度の向上 ($0.1\mu\text{m}$ (3σ) 以下)
- 6) 高感度・高 γ レジストの開発
- 7) 高解像度レジストプロセスの開発

これらの課題の解決も、今までのリソグラフィ技術の進展の経過から考えれば、近い将来、現実となることが予測される。

第7章

KrFエキシマレーザー・リソグラフィによる クォータミクロン・パターン微細加工

7.1 緒言

半導体集積回路素子、特に、DRAMの大集積化が進むにつれて、リソグラフィ技術に要求される最小パターン寸法は、 $0.4\mu\text{m}$ 以下となってきた。

第6章で論じたように、KrFエキシマレーザー・リソグラフィはサブハーフミクロン領域の加工が可能であることを実証した。しかしながら、KrFエキシマレーザー・リソグラフィは、安定で高出力のエキシマレーザーが狭帯域化素子の寿命により完成が遅れていること、高感度・高解像度のレジストが未だ実現されていないなどの問題点により、i線リソグラフィに併用する位相シフト・マスク⁷⁻¹⁾、EB一括転写⁷⁻²⁾などの新技術が台頭してきた。これらの技術も、データ処理の煩雑さ、装置価格などの技術的、経済的問題が山積している。

筆者は、次世代リソグラフィとして、最も期待できるKrFエキシマレーザー・リソグラフィの実用化を行なうために、新しいKrFエキシマレーザー⁷⁻³⁾とレジスト^{7-4,5)}の開発に成功した。特に、最大の問題であったレジストについては、ポジ型化学増幅レジストの実現により、高感度・高解像度・高安定性を達成して、エキシマレーザー・リソグラフィ実用化の課題を解決することができた。

本論では、この新しく開発したKrFエキシマレーザーとポジ型化学増幅レジストの特性と、これを64、256M DRAMのパターン形成に用いて応用した結果^{7-6~10)}について論ずる。

本論の構成としては、「緒言」に続いて「リソグラフィ対応エキシマレーザー装置の課題」「KrFエキシマレーザー・リソグラフィ対応光源」「KrFエキシマレーザー・ステップの開発」「エキシマレーザー・レジストの開発」について述べ、KrFエキシマレーザー・リソグラフィの装置技術をまとめる。そして、「化学増幅型ポジレジストの開発」「KrFエキシマレーザー・リソグラフィのクォータミクロン・デバイスへの挑戦」「KrFエキシマレーザー・リソグラフィ・プロセスの開発」について論じて、KrFエキシマレーザー・リソグラフィ技術の材料・プロセスをまとめる。今後の展開として、超解像技術を併用した「サブクォータミクロン・パターン形成の可能性」を論じ、最後に「結言」とする。

7.2 リソグラフィ対応エキシマレーザー装置の課題

7.2.1 エキシマレーザーの動作原理

エキシマレーザー装置の断面構成を図7.1に示す。コンデンサC1を直流の数十kVの高電圧で充電し、サイラトロンS1をトリガにより瞬間的に閉じるとC1に溜まったチャージはアーク放電により予備励起ピンを通過してコンデンサC2を充電する。予備励起ピンは1mm程度のギャップを有する電極で、この間のアーク放電による紫外線がカソードとアノードの間のレーザーガスを予備的に電離する（予備励起）。C2が十分に充電されるとカソードとアノードの間に高電圧がかかり、予備励起により電離した電子をもとにレーザーガス中に電子雪崩放電（グロー放電）が30nsほどの短時間で強力に放電する（主放電）。

この強力な放電のエネルギーによりエキシマが高密度に発生する。KrFエキシマレーザーでは、レーザーガスはエキシマを作るKrやF₂ガスの他にグロー放電をさせるためのバッファガスであるHeまたはNeの混合ガスを使用する。これらのレーザーガスはファンにより高速度（10～20m/s）で放電容器中を回し常に新しいガスを主放電電極間（カソード・アノード間）に供給す

ると共に熱交換器によりガスを冷却する。

図7.1の紙面の垂直方向の上下に配置した2枚のミラーで構成する光の共振器の中で、エキシマによるレーザー光が20nsほどの短時間強力にパルス発振し、これらの発振が毎秒数百回繰り返して運転される。

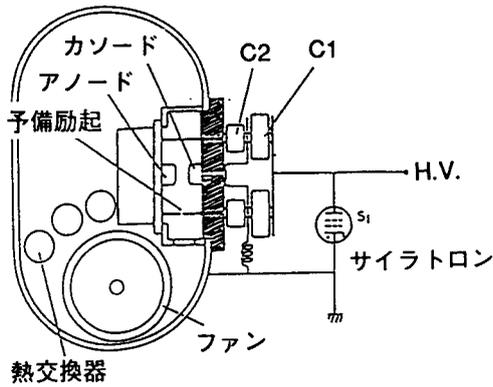


図7.1 エキシマレーザー装置の断面構成

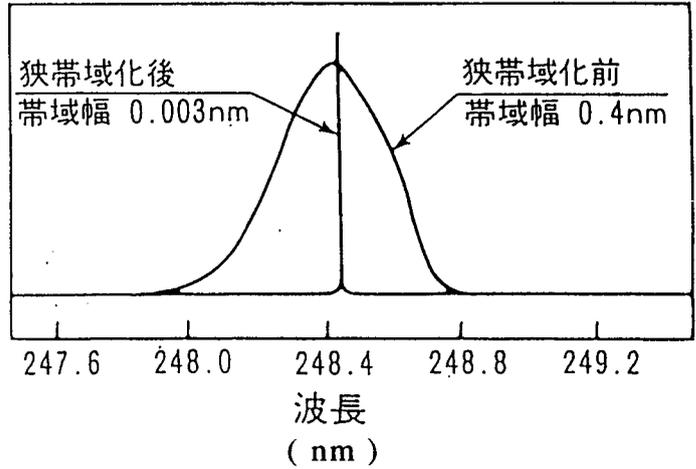


図7.2 KrFエキシマレーザーの実測スペクトル

7.2.2 エキシマレーザー光源の課題

(1) 強放電にともなう課題

エキシマレーザーは短時間に強力な放電を行なうことに起因する問題点が多い。例えばサイラトロンが短時間に大電流を流す苛酷な条件で使用されるため、寿命が短くなる。レーザーガスは激しい放電により発生したフッ化物ガスなどの不純物ガスにより汚染されたり、 F_2 ガスが消費されたりしてレーザーガスが比較的早く劣化する。強力な放電により電極が磨耗して微細な粉塵となり、放電容器からレーザー光を取り出す窓に付着して透過率を下げるなど多数問題点が発生する。

しかし、このような問題点は最近では急速に改善されつつある。例えばサイラトロン回路に磁気飽和現象を用いて過渡的な電流を押さえた磁気アシスト回路を使用することにより、サイラトロン寿命も 10^9 パルス程度に達し、窓の汚染はフィルタで粉塵を除いたクリーンなガスを窓に吹き付けることにより大幅に交換時間を長くできる。ガス寿命もガス純化装置などにより交換せずに 10^7 パルス以上の使用が可能となってきた。

(2) 狭帯域化に関する課題

露光用のエキシマレーザーは通常のエキシマレーザーと異なり狭帯域化が必要となる。

エキシマレーザー光はスペクトルの幅が一般に広い。図7.2はKrFエキシマレーザーのスペクトルを実測したもので、0.4nmと広い幅を示す（図7.2の狭帯域化前）。これはエキシマレーザー光のコヒーレンシが悪く干渉性が弱いことを示し、ステップ装置で露光したレジストの干渉（スペックル）による露光ムラ（縞状斑紋）が発生しない長所がある。

しかし、KrFエキシマレーザーの波長（248nm）ではステップ装置の投影レンズとして使用できる大型で良質なレンズ材料（硝材）が溶融石英だけとなり、2種類以上の硝材を使用して色収差を除去することができない。このためエキシマレーザー光のスペクトル幅（半値全幅）を3pm（0.003nm）程度まで狭帯域化して、投影レンズの色収差の影響を避ける方式が主流となっている（図7.2の狭帯域化後参照）。すなわち狭帯域化したエキシマレーザーを露光用には使用する。

具体的な狭帯域化の方法は回折格子、エタロンなどの波長により光学特性の変化する波長分

散素子を狭帯域化素子としてレーザー共振器中に挿入して、特定の波長だけを選択して発振させる方法が用いられる。一例として図7.3 (a) にリトロ配置の回折格子を使用し、ビームの拡大に逆望遠鏡を介して、プリズムでビームを拡大するものである。図7.3 (b) にエタロンを使用した狭帯域化レーザーの構成を示す。半透過鏡と全反射鏡で作る光共振器中に放電管と2つのエタロン（コースとファイン）が配置されている。

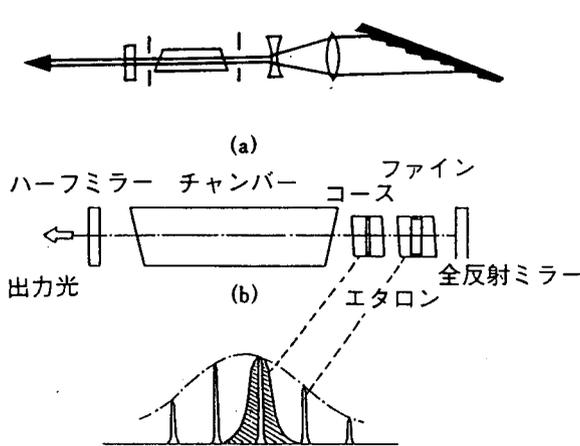


図7.3 狭帯域化レーザーの構成
(a) 回折格子、(b) エタロン

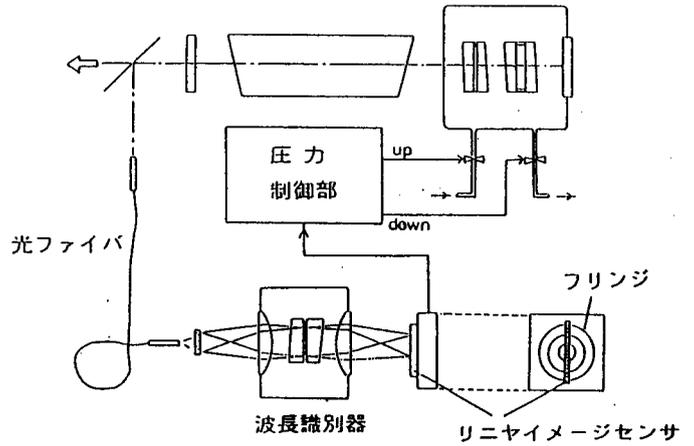


図7.4 中心波長安定化法の構成

(3) 中心波長の安定化に関する課題

露光用のエキシマレーザーは狭帯域化に伴って中心波長も安定化する必要がある。中心波長の変動は投影レンズの焦点距離の変化となりピントズレを生ずるため、 $\pm 1\text{pm}$ 以下に変動を抑えることが要求される。

図7.4は本研究で開発した中心波長安定化方法を示す構成図⁷⁻¹¹⁾である。2つのエタロンは N_2 ガスを充たした圧力容器の中に入れられ、圧力を変化させることにより中心波長が調整できる。出力光の一部は光ファイバを通して波長識別器中の基準エタロンに導かれ、エタロンが作る干渉フリンジをリニヤ・イメージセンサで検出し、波長変動を干渉フリンジの変化で検出する。検出信号は圧力制御部で圧力容器のガス圧を変えることにより、フィードバックして中心波長を安定化している。

この方式は波長の調整に機械的な動きが無く、長期間安定して動作する特長がある。

(4) 露光用レーザーの研究課題のまとめ

露光用エキシマレーザーを実用化して製造ラインで使用するための重要開発課題をまとめると、次の1)～6)と考えられる。

- 1) 高出力 (高平均出力、高繰り返し)
- 2) 狭帯域 (半値全幅、発散角)
- 3) 高安定 (中心波長安定、出力安定)
- 4) 長寿命 (素子寿命、ガス寿命)
- 5) 低コスト (価格、小型化、運転コスト)
- 6) 保守性 (無塵室対応、交換容易性)

高出力はシリコンウェハの処理速度を上げるために重要で、現在の主力機種の水銀ランプ (g線) を光源としたステップ装置と同等の処理速度を得るためには5W以上の出力が要求される。

狭帯域化しないエキシマレーザーではすでに100W程度のものも市販品でも得られているが、狭帯域化すると出力が大幅に低下して2~3W程度になる。そこでさらに出力を上げるために通常は繰り返しを早くして対応している。また高繰り返しは個々のパルスのバラツキを平均化し

露光量の均一化にも有効で、実用上では200pps以上が要求されるが、現在すでに露光用レーザーでも400ppsが開発されている⁷⁻¹²⁾。

また、露光量を一定にするために平均出力も電源の充電電圧を出力に応じて制御することにより、安定化している。

最終的に製造の実用ラインで使用されるためには、コスト、保守性も重要で、特に無塵室での使用を考慮して塵を出さずに保守できることが望ましい。露光用エキシマレーザー開発は近年相当に進み、現在性能的には実用化一歩手前の段階に達していると思われる。スペクトル半値全幅3pm以下、中心波長安定性 ± 1 pm以下、平均出力2~3Wの装置が入手可能である^{7-13,14)}。

7.3 KrFエキシマレーザー・リソグラフィ対応光源

エキシマレーザーを用いたリソグラフィ技術は、g線、i線よりさらに短波長で高出力光源を使用するため、クォータミクロンを実現する技術として注目されている。

露光用のエキシマレーザーとしては、高出力で狭帯域なレーザーが望まれることは既に説明したが、ここでは本研究で開発した最大出力10.5Wの高出力狭帯域化エキシマレーザーの、高出力化と長寿命化について詳細に述べる。

7.3.1 狭帯域化方式

高出力、狭帯域、高安定、長寿命などの開発課題は相互に絡みあって単独にはなかなか改善できない。露光用レーザーとして特に問題となるのは狭帯域化の方法で、高出力と長寿命が相互に関連する。狭帯域化方式は現在回折格子を使用する方式とエタロンを使用する2つの方式が主流で、狭帯域化方式のアプローチを2分している。

回折格子を使用する方式はエタロン方式に比較して高出力を得やすい長所がある。これはエタロンに比較して回折格子が高強度のレーザー光に強い（耐光力が大きい）ため、狭帯域化素子の寿命も長い特長がある。

しかし反面、以下に述べる理由で高品質なレーザービームを得ることが難しい。回折格子は光の入射角の変化で選択する波長が大きく変わるので、レーザービームの幅を広げると入射角に広がりが生じ、スペクトル幅も広がる。従って、狭帯域化するためにはビーム幅をスリットにより狭く制限する必要がある。

ビーム幅が狭いためレーザー管の有効断面積が減少し、狭帯域化した時の出力が狭帯域化前の出力に比較して大幅に低下し、狭帯域化効率が悪い。またビーム幅が狭いためレーザー光の干渉性が高まり、スペckルが発生しやすく露光ムラの上でも不利である。さらに回折格子は機械的に変動を受けやすく中心波長が不安定になりやすい。

これに対して、エタロン方式はビーム幅が広く、狭いスペクトルが容易に得られ、高安定、高狭帯域化効率である。しかし、寿命が短い。石英基板の上に形成した誘電体多層膜で90%以上の高反射ミラーを2枚作り、これらのミラーを数十~数百 μ mの間隔で平行に向かい合わせた素子がエタロンである。この2枚のミラーの間に光が共鳴しながら閉じ込められ、共鳴した光だけが選択されて狭帯域化する。従って、共鳴により十数倍に強度の増した光が誘電体多層膜の光負荷となり、高出力運転では多層膜に損傷が発生して寿命が短くなる。

このように回折格子方式とエタロン方式は一長一短があるが、エタロンの寿命を延ばすことができれば、高品質、高出力、長寿命、高効率なレーザーが可能である。この観点から、本研究では新たに偏光結合型共振器（PCR：Polarization Coupled Resonator）⁷⁻³⁾を応用してエタロンの光負荷を約1桁減らし、10.5Wの高出力と従来の10倍以上のエタロン寿命を達成するPCRレーザーを開発した。

7.3.2 PCRレーザーの構成と動作

図7.5 (b) は新しいPCRレーザーの構成概略図で、図7.5 (a) の従来構成と比較すると偏波面回転プリズムとS/P分離鏡が新たに付加されている。光にはP偏光とS偏光の2種類の成分があり、従来のエキシマレーザーは両成分が混合して発振している。しかし、本構成では発振をP偏光で行い、その後S偏光で増幅して取り出している。

すなわち、P偏向した弱い光はファインとコースの2個のエタロンにより、半値全幅3pm以下の狭帯域化した状態で発振する。偏波面回転プリズムはP偏光した光の大部分(約90%)をS偏光に変換し、変換したS偏光は放電管で増幅され、S/P分離鏡より強力な出力光として取り出される。残りの約10%のP偏光成分はS/P分離鏡を透過して発振を継続する。この結果、エタロンの光負荷は出力光強度に比較して大幅に小さくなった。

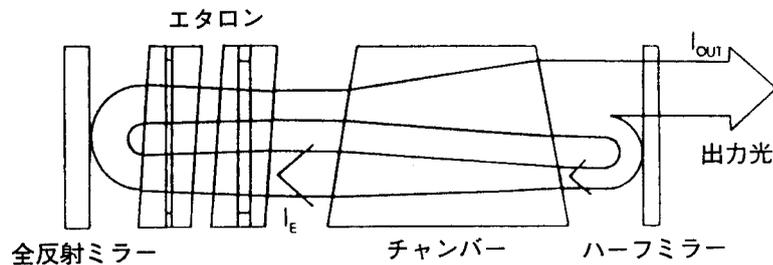
従来の構成(図7.5 (a))ではエタロン負荷が出力光強度と同等以上もあったことから、従来装置に比較して約1桁もエタロン負荷が低くなった。この結果、従来の数倍の出力で運転してもエタロン負荷は従来よりむしろ少なく、高出力と長寿命を同時に達成している。

偏波面回転プリズムは特別に開発した素子なので少し詳しく説明する。図7.6は具体的な構成図で、プリズムは回転台の上に乗せられている。プリズムの上面は全反射膜面で、斜めの面は誘電体多層膜による90°位相回転反射膜面で光学的に1/4波長板(偏波面を回転する素子)と同等な働きをする。入射する光 I_2 は純粋なP偏光であるが、プリズムは回転台により角度 θ 回転しているため、プリズムを出る光 I_3 は角度 2θ 回転してP成分とS成分の混合した状態となる。

混合の比率 R_{pp} はプリズムの回転角で任意の望む値に設定できる。実際的には約90%をS成分、約10%をP成分に設定する。このような素子により容易にP偏光を大部分S偏光に変換できその割合 R_{pp} も最適値に合わせられる。このようにして、エタロンへの負荷を軽減し、長寿命レーザーを実現した。これにより、大レーザー出力も同時に実現され、スループットもg線と同等の性能が得られるようになった。

また、現状のエキシマレーザーでは、出力制御が難しく、パルス毎に±5%程度の出力バラツキがある。1チップ当たり100パルス程度の露光量が確保されるように出力を調整すれば、露光バラツキは、0.5から1%程度に減少させることができる。

(a) 従来レーザー



(b) 新PCRレーザー

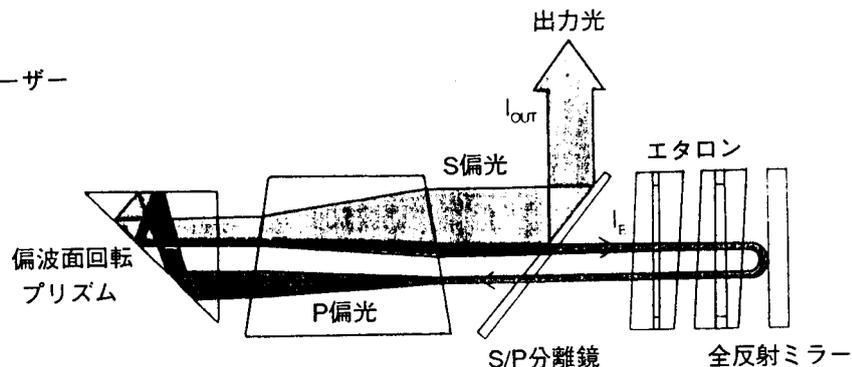
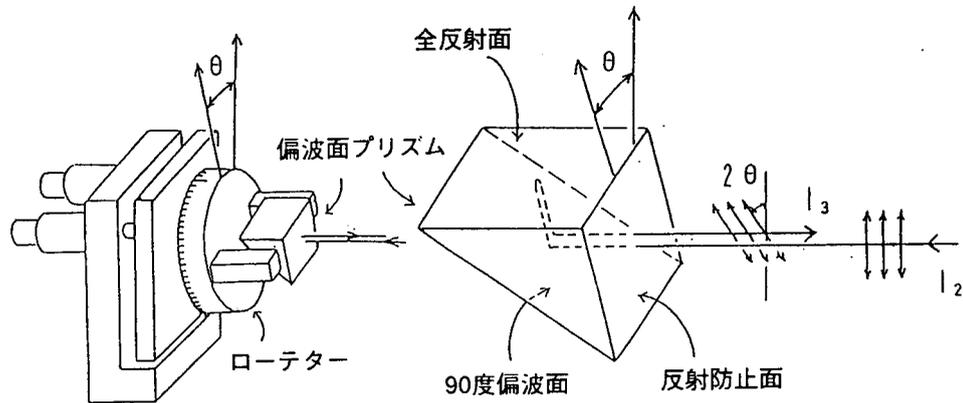


図7.5 PCRレーザーの構成 (a) 従来、(b) PCR



$$R_{PP} \equiv I_P / (I_P + I_S) = \cos^2 (2\theta)$$

図7.6 偏波面回転プリズムの構成図

7.3.3 PCR狭帯域化KrFエキシマレーザーの特性

(1) 出力特性

図7.7はPCRレーザーの繰り返し数に対する出力特性を示す。繰り返し数の増加に対して出力は直線的に増加して、200ppsでは10.5Wに達している。

従来の構成のレーザーでは繰り返しを上げると、エタロンの負荷が増大するためエタロンに熱歪みを生じ、中心波長がシフトする、コース・エタロンとファイン・エタロンはシフト量が異なり、図7.5 (a) に示すコースとファインの通過波長にズレが出て透過量が減り、出力が低下する。このため高繰り返しで出力が直線的に伸びず、飽和していた。

また、本方式では狭帯域化効率が高く約50%を得ている。狭帯域化効率は狭帯域化したときと狭帯域化前の出力の比で、回折格子方式では非常に悪い、エタロン方式は比較的よく従来のエタロン方式で約30%程度であった。本方式はさらに高く50%を得ているが、これは発振の後、増幅する機能が一体となっているためである。効率が高いことは比較的小さな放電容量で大きな出力が得られ小型化に有利であり、サイラトロンなどの電気部品の寿命も延びる長所がある。

(2) 中心波長安定性

図7.8は中心波長の安定性の実測値を示す。中心波長は前に述べたように±1pm以下に安定化する必要がある、このためエタロンを入れた箱の気圧をコントロールしてフィードバック制御を行う。これにより長期間のドリフトは十分に除くことができる。しかし、急に繰り返し数を変えると、前章でも述べたようにエタロンの熱歪みで中心波長が急速にシフトする、このためフィードバック制御の応答が難しくなる。

図7.8では4pps～100pps～200ppsと急速に繰り返しを変化させても中心波長は何ら変化していない。この実験では波長のフィードバック制御はしていないのでこのレーザーが本質的に安定であることを示している。この結果、繰り返し数の急変にも中心波長の安定した狭帯域化レーザーが可能となった。これもエタロンの負荷が減少して、熱歪みの影響が少ないためである。

(3) 連続長時間平均出力特性

図7.9に連続8時間運転の平均出力特性を示す。この測定では出力の制御はしていないにも関わらず、8時間の間ほとんど平均出力が変化していない。これはガスの劣化を補うために少量づ

つ連続的に新しいレーザーガスを流し込みながら、古いガスを同量ずつ抜き取る方式（連続部分交換方式）を採用したことによる。この方式では、ガスを一時期に補給したり交換したりする、通常使用されている方式に見られる、補給時の出力の変動やパルスのバラツキの増加が無く安定した特性が得られる。

(4) 新開発した狭帯域化エキシマレーザー装置

前述した新方式の偏光結合型共振器（PCR）を使用して、大出力・長寿命の狭帯域化KrFエキシマレーザー装置を開発した。表7.1に装置の性能仕様を示す。

表7.1で示す平均出力、繰り返し数、半値全幅などについてはすでに説明した、中心波長は本質的に安定しているが長時間ドリフトを抑えるためフィードバック制御もしている。パルス安定性は1パルス毎のパルスエネルギーのバラツキでレーザー・ゲインに余裕が有るため値が小さい。

ビームサイズはエタロン方式の長所で幅が広い。ビーム発散角が大きいことは狭帯域化しても干渉性が低くスペckルが発生しないことを示している。ガスは連続部分交換のため、補給しているかぎり何十時間でも連続運転可能で、通常の意味でのガス寿命は無い。エタロン寿命の長いことは本方式の大きな特長で従来の10倍以上である。装置の外形もコンパクト化して、クリーンルームの高いスペースコストを考慮している。

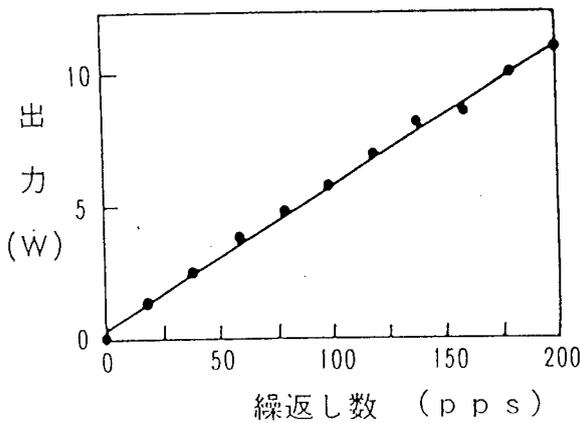


図7.7 PCRレーザの繰り返しに対する出力特性

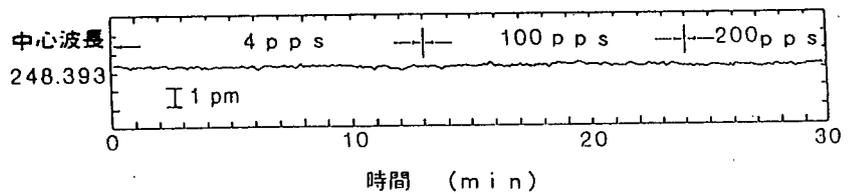


図7.8 中心波長の安定性

表7.1 PCRレーザの性能

平均出力	5 W (最大 10 W)
繰り返し数	200 pps
スポット半値全幅	3 μm 以下
中心波長安定性	± 0.5 pm 以内
パルス安定性	± 5% 以内
ビームサイズ	7 mm × 20 mm 以上
ビーム発散角	0.75 mrad × 1.8 mrad 以上
ガス寿命	補給量 1.5 l/min
エタロン寿命	10 ⁸ パルス 以上
ウインド交換	10 ⁸ パルス
コンパクト化	0.6(長) × 1.6(幅) × 1.3(高) m

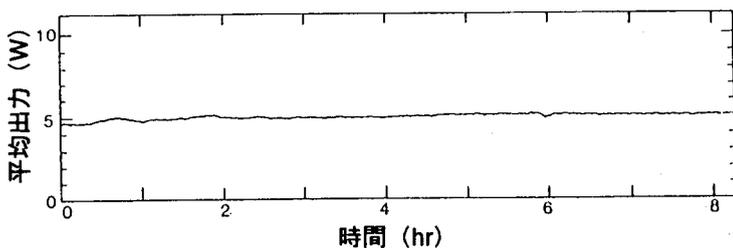


図7.9 連続運転時の平均出力特性

7.4 KrFエキシマレーザー・ステッパの開発

7.4.1 はじめに

集積回路の集積度が確実に進展したのは、高圧水銀ランプを光源とする光リソグラフィ技術の解像性が、高性能レジストの開発およびステッパの高NA化・短波長化により着実に向上したからである。しかしながら、64M DRAMを代表とする0.35 μ mルール以降のデバイスを開発するにあたり、現在の主流であるi線（波長0.365 μ m）リソグラフィ技術が解像限界に直面し、0.35 μ mルールを実現するリソグラフィ技術の選択を迫られる状況となった。0.35 μ m以下のルールを達成する手段として、i線+位相シフト法、i線+超解像技術⁷⁻¹⁵⁾がある。位相シフト法および超解像技術は解像性向上効果にパターン・レイアウト制限があるため、レチクルに何らかの細工を施す必要があり実用化に大きな課題を残している。一方、より短波長の光源を用いるKrF（波長0.248 μ m）エキシマレーザー・リソグラフィ技術はこのような欠点がなく、高性能な化学増幅型レジストの登場に伴い今後のリソグラフィ技術の本流になると考えられる。

本章では、KrFエキシマレーザー・リソグラフィを実用域に近づけるため、高精度ステッパを開発したので、それを中心に本研究の成果について論じる。

7.4.2 KrFエキシマレーザー・ステッパの仕様

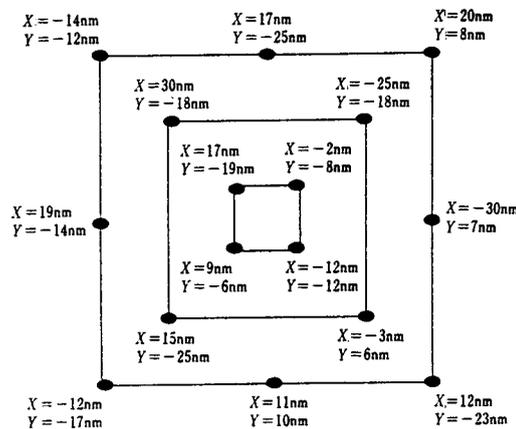
KrFエキシマレーザー・ステッパの一つの大きな課題は前章の狭帯域エキシマレーザーの出力と寿命と、高精度なアライメントである。これらの課題を克服するために、本研究では、PCRレーザーおよびTTR（Through The Reticle）アライメントを搭載したKrFエキシマレーザー・ステッパを開発した⁷⁻¹⁶⁾。

ステッパの性能を決める要素は解像度とアライメントに大別される。KrFエキシマレーザー・ステッパではこれに光源であるKrFエキシマレーザーが追加される。

またKrFエキシマレーザー・ステッパはg/i線ステッパとのMix & Matchが前提となるため、異号機間互換性向上のために、低ディストーション・レンズ・高アライメント精度の実現が重要になる。

本研究で開発したKrFエキシマレーザー・ステッパの主要項目の仕様を表7.2に示す。

投影レンズ材料としては合成石英が主となるが、g/i線用レンズの技術蓄積がそのままKrFエキシマレーザー用レンズにも踏襲されるため、年々レンズ研磨、組立、検査技術とも着実な進展をとげている。本研究で開発したKrFエキシマレーザー・ステッパに搭載した投影レンズのNAは0.42と0.48の2種類、露光領域は20mm角（直径28mm）、ディストーションは ± 30 nmである。ディストーション・データを図7.10に示す。投影レンズ露光領域は20mm角であり、64M DRAMのチップの2個どりが可能である⁷⁻¹⁷⁾。



(8, 12, 19mm \square の理想的格子に対する値)

図7.10 NA0.48、20mm角KrFレンズのディストーション・データ

表7.2 20mm角の単色レンズとアライメント機能を有するKrFエキシマレーザー・ステッパの仕様

エキシマ レーザー	平均出力	6W
	発振周波数	500Hz
	スペクトル幅	$\leq 2\text{pm}$
	波長安定性	$\leq \pm 0.5\text{pm}$
	パルス間出力安定性	$\leq \pm 10\%$
投影レン ズ	解像度	$\leq 0.225\mu\text{m}$
	NA	0.48
	露光領域	20mm□
	ディストーション	$\leq \pm 0.03\mu\text{m}$
照明系	σ	0.7
	照明均一性	$\leq \pm 1.5\%$
アライメ ント系	ステッピング精度	$\leq 0.03\mu\text{m}$ (3σ)
	重ね合わせ精度	$\leq 0.08\mu\text{m}$ (平均の絶対値+ 3σ)
	センサ	ホログラフィ, 画像認識

7.4.3 高精度アライメント光学系

図7.11に全体システムの光学系を示す。

従来、位置検出方法としては、受光したアライメントマークの散乱光を光電変換し、その信号波形よりマークのエッジ検出する方法がとられていた。エッジ検出を行うため、アライメントマーク上の表面荒れにより位置検出信号のS/N比が低下し、精度が劣化する問題があった。また、従来の非TTR (Through The Reticle) アライメントの場合はベースラインの不安定性が指摘されている。

そこで本研究では、アライメントマーク上の表面荒れの影響を受けにくく、ベースラインの安定性を向上した独自のTTRホログラフィ・アライメント方式^{7-18,19)}を開発した。アライメント光学系を図7.12に示す。アライメント原理はアライメント光としてHe-Neゼーマンレーザー光 (波長633nm) を用いるヘテロダインホログラフィ法を用いており、ウエハ上の位置合わせマークからの回折光のビート信号とレチクルからのリファレンスビート信号の位相差を検出することによりウエハ上の位置合わせマークの位置を検出する。アライメント光がHe-Neであるために生ずる色収差はレチクルと投影レンズ間に色収差補正レンズを設置することで解決した。本アライメント方式の検出分解能は11nm、安定性は11nm以下である。

TTRホログラフィ・アライメント方式とステッピング精度30nm (3σ) の高性能ステージの開発により0.08 μm の重ね合わせ精度が実現できた (図7.13)。

7.4.4 まとめ

図7.14に実用的なKrFエキシマレーザー・ステッパとPCRエキシマレーザーの外観写真を示した。本研究の成果により、クォータミクロン領域の超LSIのデバイス開発が可能となった。今後高性能なレジストが実現すれば、KrFエキシマレーザー・リソグラフィの工業化は近いと思われる。

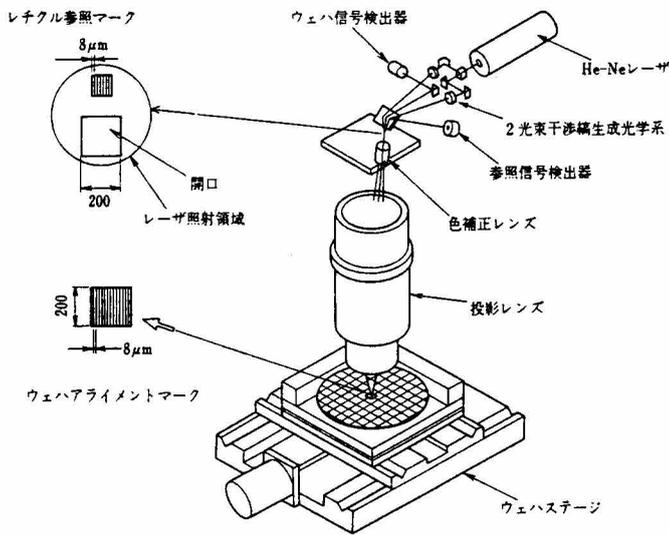


図7.11 全体システム光学系

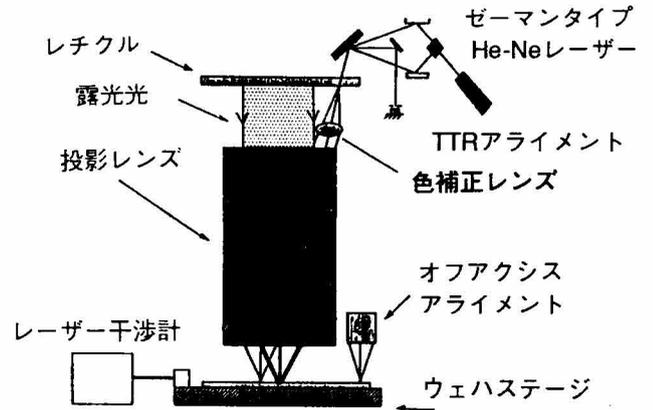


図7.12 TTRホログラフィックアライメント光学系の構成図

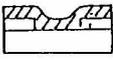
マーク形状	x (μm)		y (μm)	
	3 sigma	mean+3 sigma	3 sigma	mean+3 sigma
レジスト	0.058	0.062	0.063	0.070
	0.047	0.077	0.083	0.098
	0.072	0.095	0.092	0.094
	0.091	0.105	0.108	0.110

図7.13 プロセスウェハでの重ね合わせ結果

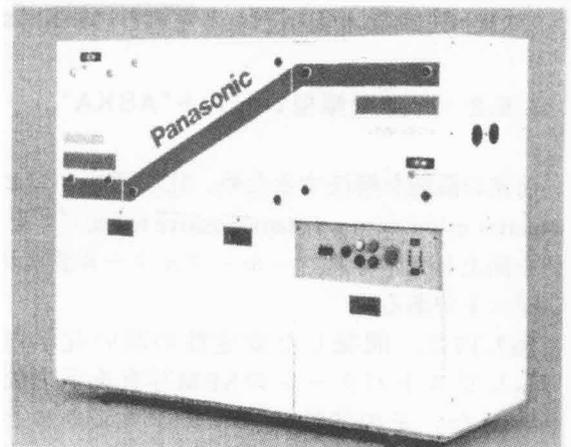
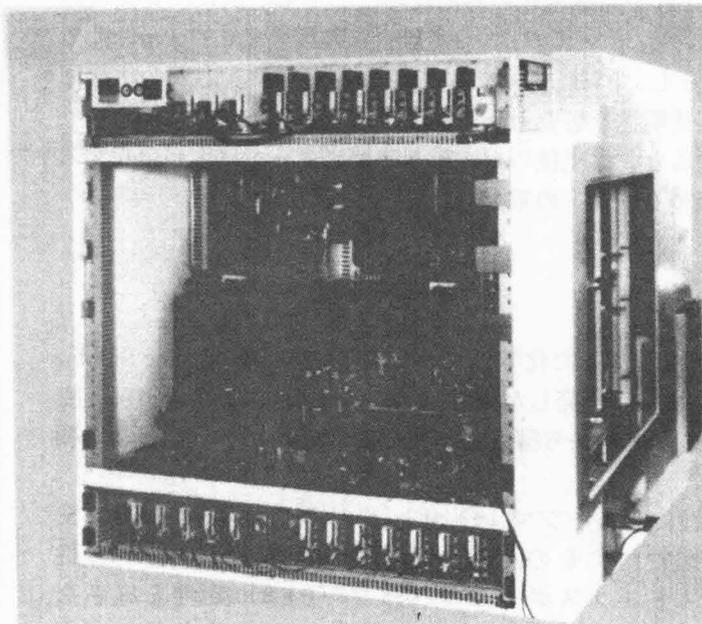


図7.14 開発したステッパとレーザーの外観写真

7.5 化学増幅型ポジレジストの開発

7.5.1 化学増幅型のコンセプトと課題

LSIの微細化はリソグラフィ技術の進展に支えられてきたと言っても過言でない。しかし、現在の量産技術の主流であるi線リソグラフィでは $0.4\mu\text{m}$ 以下の超LSI製造は波長限界に近いため、解像度と焦点深度の点から困難であり、新リソグラフィ技術が求められている。

リソグラフィにはパターン転写のため良好なレジスト材料が必要不可欠である。従来のg線（波長 $0.436\mu\text{m}$ ）やi線に適用しているナフトキノン・ジアジゾ・ノボラック樹脂からなるポジレジストは、KrFエキシマレーザー波長付近に大きな吸収を有し良好なパターンを形成することができない。図7.15には研究初期段階のKrFエキシマレーザーによって露光したナフトキノン・ジアジゾ・ノボラック樹脂ベースのレジストの $0.5\mu\text{m}$ L&SパターンのSEM写真を示した。露光前後のレジストの $0.248\mu\text{m}$ 波長に対する透過率は僅か数%で、強い表面吸収のため三角形形状の品質の悪いものであった。

これを解決するためにKrFエキシマレーザー対応レジストの開発には、2種類のアプローチが提案された。1つは従来の方法を継承してベースポリマーと感光体の注意深い最適化による単層高透明性ポジレジストの合成およびその透過率の向上である。他の1つは酸発生剤を利用した新しい概念の化学的連鎖反応を利用した化学増幅型レジストである。研究の当初では、第6章で述べた単層高透明性ポジレジスト⁷⁻²⁰を開発した。しかしながら、材料選択の幅が狭い理由と解像性と感度の限界がある事を見極め、波長限界の解像度をブレイクスルーするため、化学増幅の採用に到った。

化学増幅型レジストは、米国のShipley社の熱硬化型電子線対応レジストSAL601⁷⁻²¹およびドイツのHechst社の高感度型X線レジストRAY-PF⁷⁻²²のサンプル供給が始まり注目されるようになった。もともと米国IBM社のItoとWillson⁷⁻²³が”Chemical Amplification”の命名と共に酸触媒反応を利用したレジスト系を提唱したことに始まる。一方、その原形となったのは米国GE社のCrivello⁷⁻²⁴のオニウム塩に関する研究であったと言える。

KrFエキシマレーザー・リソグラフィ対応レジストに化学増幅のコンセプトを利用する場合、二つの利点がある。一つは高感度化であり、もう一つは光吸収の問題を緩和しパターン形状を改善できることにある。高感度化においては、通常のナフトキノンを感光剤として用いるレジストが1以上の量子収率を得ることが不可能であるが、酸を触媒として用いる化学増幅型レジストでは、図7.16に示すように露光により酸発生剤が分解し発生した酸が多数回の反応、例えばポリマの分解などを引き起こすことが可能なため、結果として1以上の量子収率を得ることができる。これが高感度化の容易な理由である。次に、光吸収の問題においては、一般に樹脂および感光剤が有するベンゼン環の $\pi-\pi^*$ 結合に起因する $0.27\mu\text{m}$ 付近での吸収がKrFエキシマレーザー波長にも巨大にもたらし、パターン形状に悪影響を及ぼす。しかし化学増幅型では酸の連鎖反応を利用するため従来ほどの高透明性を必要としない。

しかし一般的に、酸発生のみでポリマーが分解すると、露光後の据え置き時間によって感度に変化することになり、不安定なレジストと言うのが化学増幅型レジストの重大な課題^{7-25,26}であった。

7.5.2 化学増幅型レジスト"ASKA"

前述の課題を解決するため、化学増幅コンセプトを導入した化学増幅レジストASKA（Alkaline Soluble Kinetics using Acid generator positive resist）⁷⁻²⁷を開発した。開発したASKAは未露光部と露光部の溶解速度比を向上したポリビニール・フェノール誘導体、酸発生剤から構成されている二成分系ポジ型化学増幅レジストである。

図7.17に、開発した安定性の高い化学増幅型KrFエキシマレーザー用レジストASKAの $0.35\mu\text{m}$ レジストパターンのSEM写真を示した。図7.18にそのASKAレジストのコントラスト特性を示した。その特性からもわかるように、ポストエクスポージャバーク（PEB）処理を施さないと全く溶解、つまり現像液に対し分解溶解しない。このASKAは、露光により酸を発生する

ステップとPEBで発生した酸によりポリマーを分解するステップの化学反応を分離し、感度の不安定要因であった露光後の据え置き時間依存性の少ないレジストを実現した。その結果、 $1\mu\text{m}$ 厚パターンニング感度が約 $30\text{mJ}/\text{cm}^2$ で従来の高透明型の10分の1の高感度を得ている。しかも、リニアリティ解像度は $0.35\mu\text{m}$ で高反射基板のAl上においても良好な高解像度を得た。図7.19には、ASKAレジストおよびPCRレーザーの組み合わせによる $0.35\mu\text{m}$ の素子分離パターンの形成例を示した。本ASKAレジストは、十分実用性のあるもとと確信する。実デバイス上で $0.35\mu\text{m}$ パターンが解像しており、64M DRAMに対応するサブハーフミクロンパターン形成が実証されている。

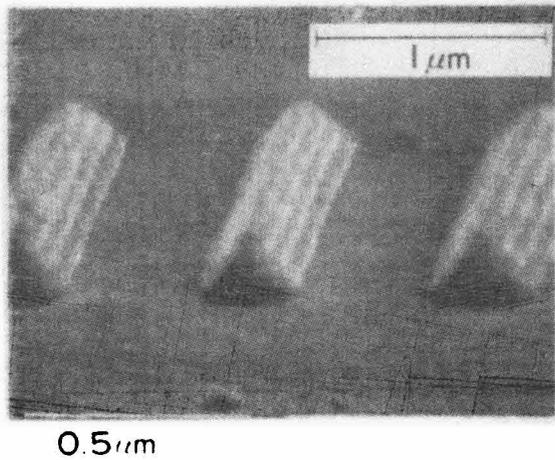


図7.15 従来のナフトキノンジアジゾノボラック樹脂レジストの $0.5\mu\text{m}$ L&SパターンSEM写真 (露光はKrFエキシマレーザーステップ; NA=0.35)

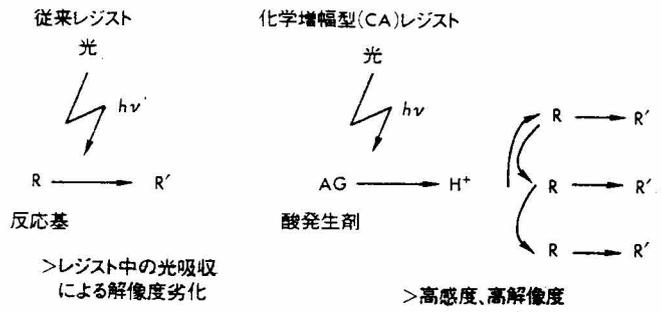


図7.16 化学増幅型レジストのコンセプト

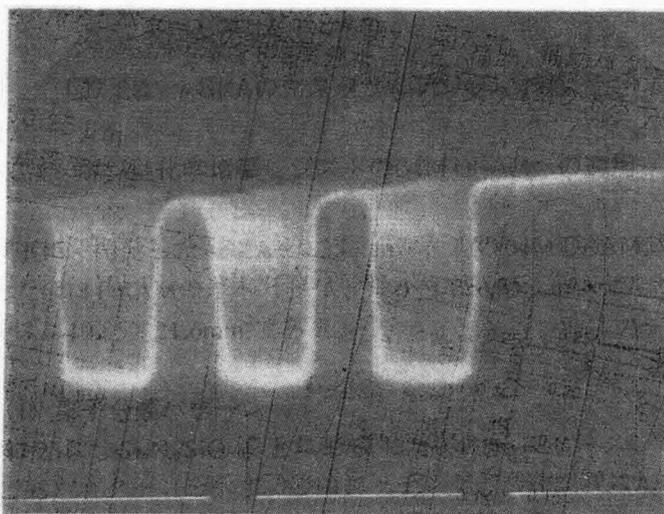


図7.17 ASKAによる $0.35\mu\text{m}$ L&SパターンのSEM写真

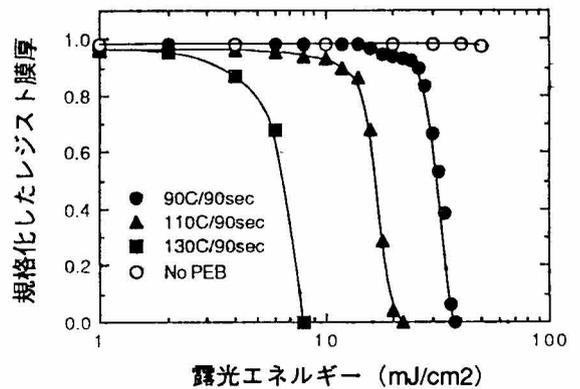


図7.18 ASKAの照射特性

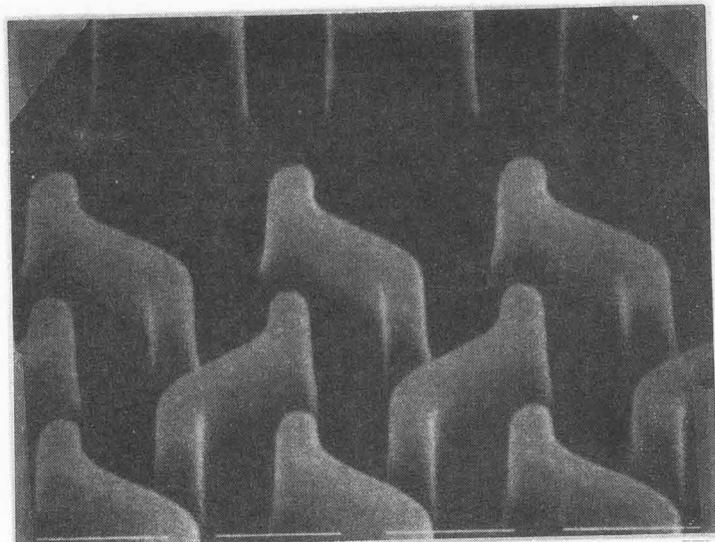


図7.19 ASKAレジストとPCRレーザーの組み合わせによる0.35 μm ルール64M DRAM素子分離パターン

7.5.3 ポジ型化学増幅レジストの特性

(1) 実験

Si基板上に、本研究で開発したポジ型化学増幅レジストASKAを1.0 μm 塗布した。このASKAは、透過率を44%から65%まで向上させてパターン形状の改善をターゲットにしたものである。露光は、前述したPCR (Polarization Coupled Resonator) 方式のKrFエキシマレーザーを搭載したKrFエキシマレーザーステップ (N.A0.42) により行なった。95°C90秒の露光後加熱 (PEB) の後、NMD-3 (東京応化) 現像液60秒により現像を行ない、パターンを形成した。

(2) レジストパターン形状

図7.20に、ASKAの0.4 μm から0.3 μm のL&Sパターンを示す。0.3 μm L&Sパターンまで膜べりなく、透明度の向上により垂直形状で形成されていることがわかる。また、露光量も化学増幅作用を適用したため約40mJ/cm²と高感度であった。このような1 μm 以上の膜厚を有する高アスペクト比のパターン形状は、64M DRAMのレベルに用いられるデバイスに発生する高段差に対しても非常に有効であると考えられる。

(3) レジストパターンの寸法制御性

微細パターン寸法を、焦点深度や露光量の変動に対していかに安定性良く形成できるかが、実際の素子製造の歩留り向上につながる。特に、64M DRAM相当のデバイスの量産時代においては許容値も当然スケールダウンされる。ASKAの場合について調べた結果が、図7.21、図7.22であり、それぞれ焦点深度、露光量の変動に対するパターン寸法変動を表している。これらの図より、ASKAは、0.4 μm パターンに対して、2.1 μm の焦点深度余裕、5mJ/cm²の露光時間余裕があることがわかる (0.4 μm \pm 10%以内のパターン寸法変動としたとき)。これらの値は、従来のg線、i線リソグラフィに比べても非常に大きく、エキシマレーザー露光の短波長化と言う長所を發揮させたASKAの高い性能を示している。

(4) レジストパターンのマスク忠実性

同一の露光量でいかに微細なパターンまで解像することができるかは、さまざまなサイズのパターンが混在するDRAMの様なデバイスを製造するうえで非常に重要な事である。図7.23は、ASKAのマスク忠実性 (パターン寸法とマスク寸法の関係) を表しており、0.4 μm までの良好な結果が理解できる。さらに微細なパターンの解像については、ASKAが0.3 μm の解像性を有していることから、マスクサイズの変更により忠実性よく形成できると考えられる。

(5) レジストパターンの多重干渉効果とバルク効果

レジストパターンを形成する際には、入射光と基板からの反射光の干渉による多重干渉効果が重要となる。

図7.24は、ASKAのレジスト膜厚変動に対するパターン線幅の変動を表している。KrFエキシマレーザー露光においては、短波長化と反射率の影響で多重干渉効果が大きい。一方、バルク効果自体はほとんど観測されないという良好な結果も示している。このことより、ASKA2を使用する場合には、膜厚の十分な管理を必要とすることがわかる。しかし、バルク効果の少なさにより、線幅の変動は大幅に削減されることもわかり、基板の反射率のモニタリングが重要となる。

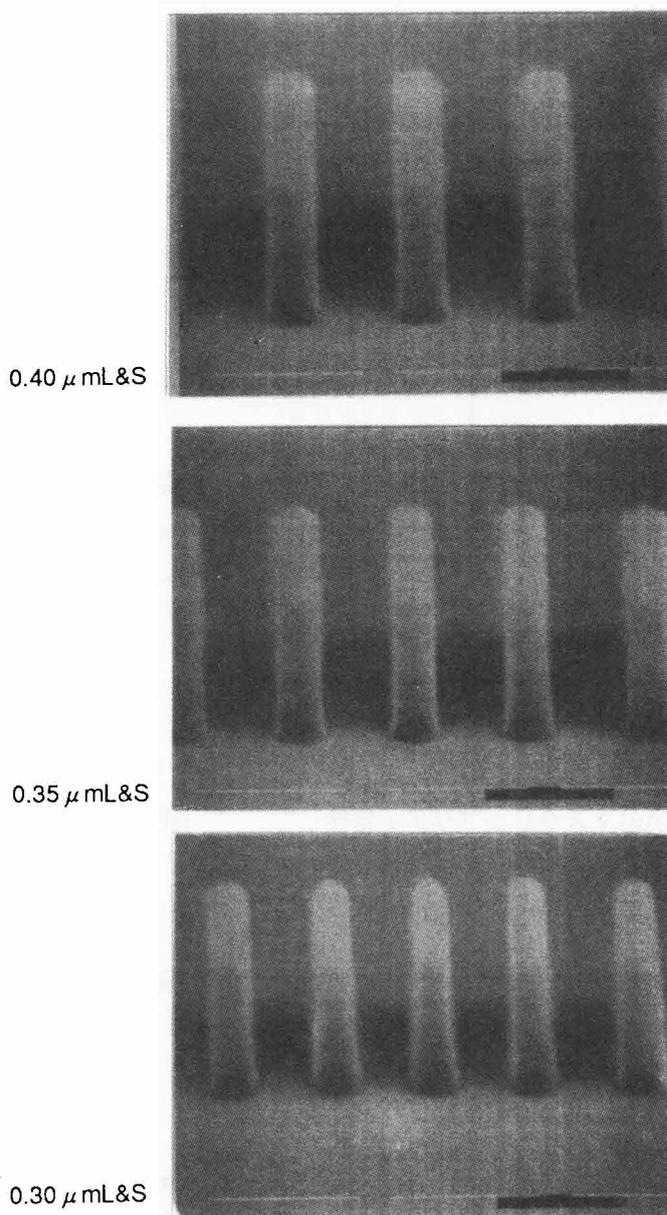


図7.20 ASKAによる0.4から0.3 μmまでのL&SパターンのSEM写真

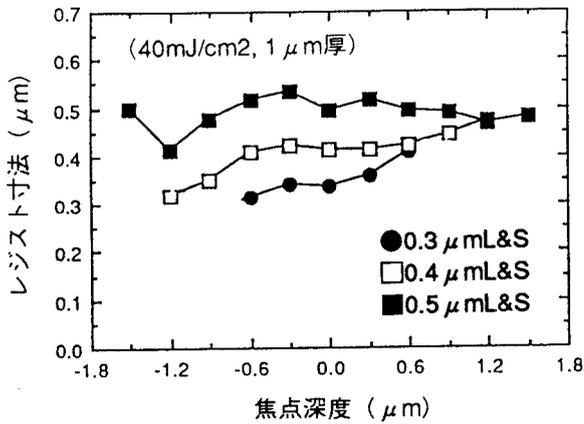


図7.21 ASKAの焦点深度特性

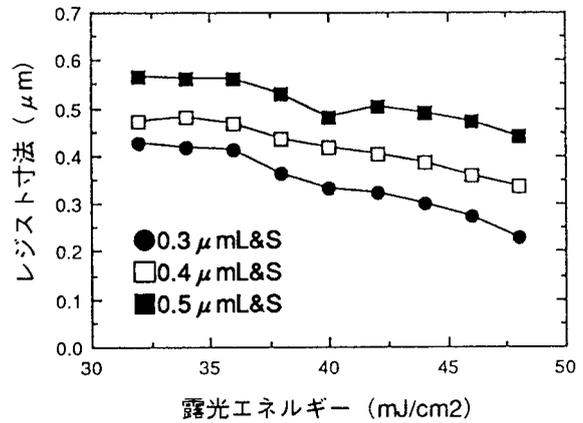


図7.22 ASKAの露光特性

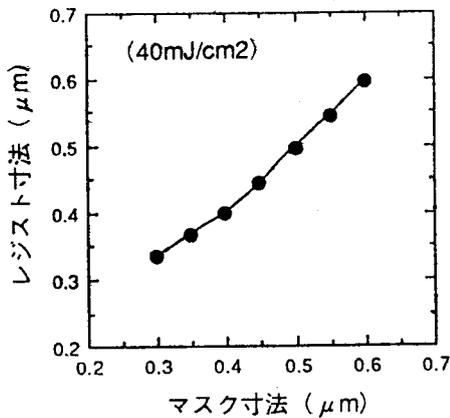


図7.23 ASKAのマスキニアリティ特性

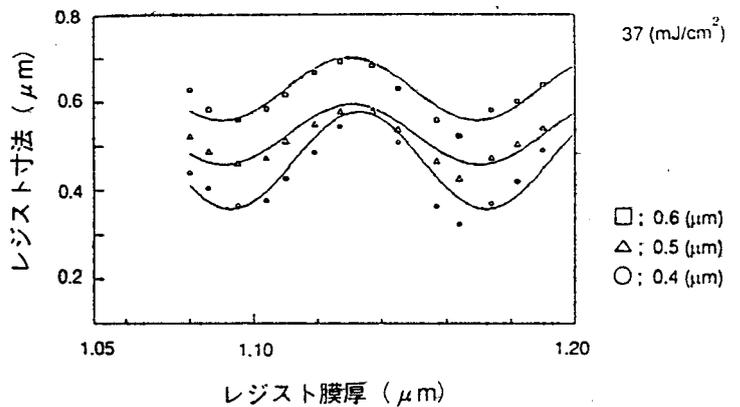


図7.24 ASKAの多重干渉効果

7.5.4 ポジ型化学増幅レジストの64M DRAMへの適用

以下に、開発したASKAを0.35 μmルールでの64M DRAM試作に適用した結果について論ずる。なお、試作した64M DRAMの基本仕様は、最小寸法0.35 μm、セルサイズ1.0×2.0 μm²、スタック容量型、チップサイズは10.85×21.6mm²である。

(1) 素子分離パターン

図7.25に、Si₃N₄/SiO₂膜上に形成した0.4 μmスペース、0.5 μmラインのASKAによる素子分離（通常LOCOS）パターンを示す。後のエッチング、酸化工程にASKAパターンの垂直形状によって、パズピークが極力抑えこまれた最適なLOCOS形状が得られた。

(2) ワード、ビット線パターン

図7.26に、HTO/poly-Si上に形成した0.4 μmワード線パターンを示す。分離パターンによる下地段差の

存在にもかかわらず、ノッチングのない良好なパターンを形成できた。同様に、シリサイド上のビット線パターンも良好に形成できた。

(3) コンタクトホール・パターン

図7.27に、 SiO_2 上に形成した $0.4\mu\text{m}$ コンタクトホール・パターンを示す。従来の光リソグラフィでは、非常に困難であったこのパターンを垂直な形状で実現しており、ライン・アンド・スペースの限界解像度にはほぼ近い解像力がある。

(4) 配線パターン

図7.28に、 TiN/AlSiCu 上に形成した $0.4\mu\text{m}$ の配線パターンを示す。このSEM写真は、メモリーセルと周辺部の間の段差部を示しており、この段差は約 $0.7\mu\text{m}$ である。本工程は、64M DRAM試作プロセスの中でも最も難しい工程の1つであるが、化学増幅を利用したASKAは、これを解決して、ほぼ垂直な $0.4\mu\text{m}$ パターンを達成した。図7.29にはドライエッチング後の配線パターンSEM写真を示した。最後となるが、従来のノボラック樹脂をベースとしたレジストと同等の耐エッチング性を有していた。また、除去性においても全く問題はなかった。

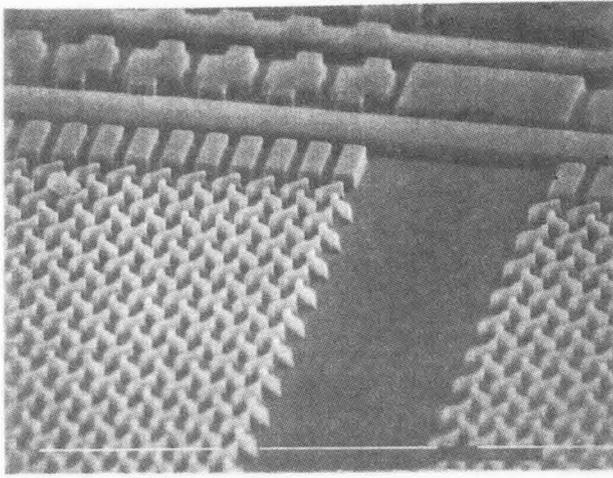


図7.25 ASKAによる素子分離パターンSEM写真

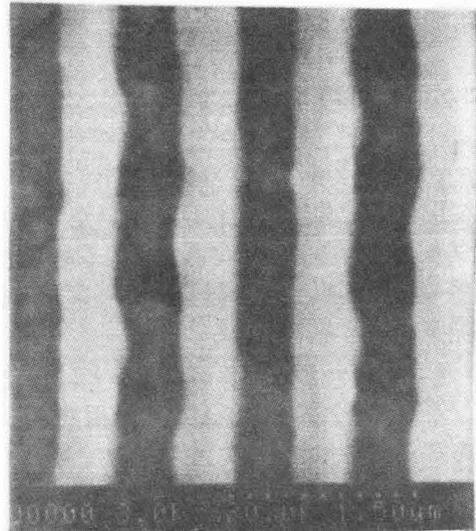


図7.26 ASKAによるワード線パターンSEM写真



図7.27 ASKAによるコンタクトホールパターンSEM写真

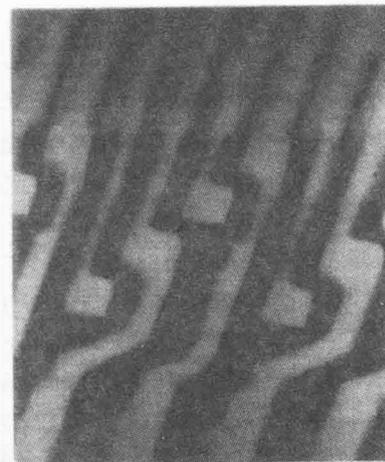


図7.28 ASKAによる配線パターンSEM写真

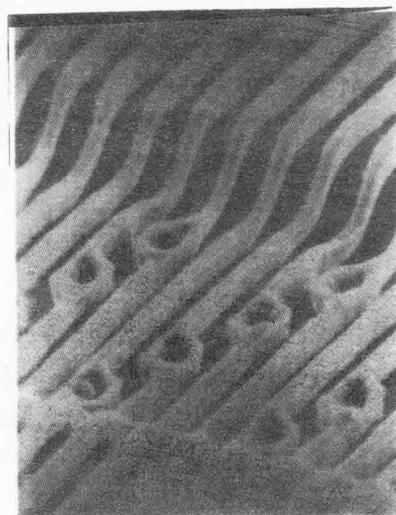


図7.29 配線パターンのエッチング後SEM写真

7.5.5 まとめ

0.35 μm ルールの64M DRAMの試作にエキシマレーザー・リソグラフィを適用できることを実証した。本研究で開発した化学増幅作用を用いたポジ型レジスト（ASKA）は、従来のKrFエキシマレーザー・リソグラフィの最大の問題点であったレジストの解像性不良を解決できた。この新しいレジストは、安定性良く段差のある基板にも微細パターンを形成できることから、64M DRAMの量産に対しても、大きな効果を発揮すると考えられる。

KrFエキシマレーザー・リソグラフィは、化学増幅型レジストのさらなる改良により、0.25 μm 以下のパターンルールの256M DRAMにも適用できると考えられ、この技術の一層の発展を行なっていくことが重要である。

7.6 KrFエキシマレーザー・リソグラフィのクォータミクロン・デバイスへの挑戦

7.6.1 はじめに

KrF（波長0.248 μm ）エキシマレーザー・リソグラフィは、当初0.5 μm デザインルールの16M DRAMの量産適用のために1986年にAT&T⁶⁻¹⁵⁾および本研究¹⁻²⁷⁾によって世界で初めて実用的な提案がされて以来、エキシマレーザーの狭帯域化、単色縮小投影光学系を含む高精度アライメント技術の開発がなされ、現在では実用的なレジストの開発が精力的に行なわれるようになり、いよいよ実用化前夜の段階までに到ってきた。

現在のKrFエキシマレーザー・リソグラフィのターゲットとするデザインルールとしては、i線（波長0.365 μm ）リソグラフィの改善もあり、0.35 μm 以下の超LSI、例えば第2世代の64M DRAMや256M DRAMが候補である。このKrFエキシマレーザー・リソグラフィ技術は本来、i線よりも30%以上波長が短いから、従来にない高解像性により0.25 μm 以下のパターン形成の実力を有しているが、その実力を実証するレジストの開発が最大かつ最後の技術ブレークスルとして残っていた。

本章では、化学増幅というコンセプトを導入したASKAを材料的に改善することにより、実用的なポジレジストを開発した。そのレジストの材料特性、リソグラフィ性能および超LSIへの適用例を示し高解像度化および高感度化を含む高性能化とともに、技術的障壁の最も大きかった高安定な化学増幅型ポジレジストについて記述する。

7.6.2 化学増幅型の課題

一方、化学増幅型の大きな課題としては図7.30のごとく触媒として酸をレジストバルク中に振る舞わせるので、雰囲気中や基板への失活あるいは中和反応によりレジスト形状に変化（一般的に、T-TOPあるいは裾引き現象と言う）が発生⁷⁻²⁵)したり、酸の連鎖反応によりレジスト線幅や形状に時間的経時変化（引き置き特性と言う）が起こるなどの安定性⁷⁻²⁶)の問題である。

ここで、0.25 μm 超LSIリソグラフィの要求するレジスト性能をまとめると、パターンニング感度は30mJ/cm²、解像度は0.25 μm 以下でその精度は10%の $\pm 0.025 \mu\text{m}$ 以内、引き置き安定性は3時間以上が実用化の基準と言える。

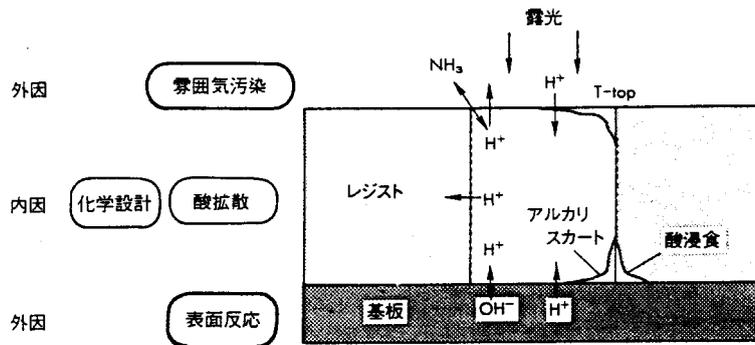


図7.30 化学増幅型ポジレジストの酸の振る舞いと課題

7.6.3 化学増幅型レジストASKAの高性能化

(1) 基本組成

本節では、前章に述べた化学増幅のコンセプトを導入し、かつ安定性を高めた化学増幅型レジストASKA (Alkaline-Soluble-Kinematics Acidgenerating positive resist for KrF excimer laser lithography) を高性能化するための、材料合成について研究した。ASKAの基本組成はポリビニル・フェノールのフェノール水酸基を保護基によりブロックしたアルカリ非可溶性誘導体メインポリマーと酸発生剤により構成された2成分系の化学増幅型レジストである。簡単に図7.31に化学組成⁷⁻²⁸)を示した。KrFエキシマレーザー露光により露光部で酸発生剤が分解して酸が発生し、その酸によりポリビニル・フェノールのフェノール水酸基をブロックしている保護基を加熱分解して水酸基を発生させることにより、露光部がアルカリ現像液に可溶となりポジ型のパターンを形成するポジレジストである。一方、3成分系の化学増幅型、つまり、アルカリ可溶性ポリマ、酸発生剤そして溶解阻害剤からなるポジレジストが提案されている⁷⁻²⁹)。この系は溶解阻害剤が酸により分解し、溶解阻止効果を失い、アルカリ現像液に体する溶解速度を増進するものであるが、3成分のためその組成比の最適が難しいことや透明性が犠牲となる欠点があり、ASKAは2成分系の化学増幅型を採用した。

(2) 実験条件

合成したASKAはPGMEAを溶媒としポリビニルフェノール誘導体と適当量の酸発生剤および表面阻害剤の混合物から構成される。レジスト溶液を合成後、0.1 μm のテフロン・メンブレン・フィルタにより濾過した。その後シリコン基板ウェハ上に合成したレジストを1.06 μm 厚に塗布し90°C90秒間ホットプレート上でプリバークした。レジスト塗布したウェハは0.248 μm の開口数0.48を有するKrFエキシマレーザー

ー・ステップ⁷⁻³⁰⁾で露光した。露光後、PEBは105℃90秒間ホットプレート・ベークし、現像はTMAH溶液にて60秒間行なった。

感度とコントラスト値の計測はSTM603P（大日本スクリーン社製）を使用してレジスト膜厚測定シプロットすることより求めた。解像度、パターン形状の評価には走査型電子顕微鏡により解析した。

透過率測定は自記分光光度計UV-265（島津製作所製）を使用した。測定レジストは石英板上に塗布し、標準リファレンスには、未塗布の石英板を使用した。紫外線透過率測定には、露光前後の試料の各波長にて計測した。

レジスト寸法測長にはサイクロトロンSEM⁷⁻³¹⁾（ホロン社製）を使用し低加速電圧化で測長した。

(3) 材料特性

(3-1) 高感度化

化学増幅型の高感度化は、そのコンセプトや酸発生剤含有量もさることながら少なからずレジストの透明性が起因する。また、一方で透明性を高め過ぎると基板反射によりパターン形状劣化を招く。図7.32はASKAの紫外線分光特性を示す。0.248 μm における透過率は65%とポリビニルフェノール樹脂に近い高透明性を得ている。通常レジスト開発においてはSi基板に対してレジストの光学特性が最適化されており、理想的な解像度はSi基板上で得られる。レジスト厚みが1ミクロンのとき65%前後が最適であった。これは化学増幅型レジストはブリーチング性がないため従来のi線レジストに比較して特に、透過率が高すぎると定在波が大きくなり解像性が劣化し、一方、透過率が小さいとレジストのバルクの吸収によりレジスト底部での吸収されたエネルギーが小さくなる。図7.33に下地反射の影響を考慮した光形状シミュレータ“PEACE”⁷⁻³²⁾により求めた各種吸収率を仮想したレジスト膜中での露光光強度分布を示している。化学増幅型レジストはブリーチング性を有しないためこの下地反射を考慮した簡易なシミュレーションにより各種下地反射率に対してのレジストの透過率の最適化を行うことができ、先に示したように実験結果65%とほぼ等しい結果が得られた。この程度の透明性は、先に報告した高透明性タイプのポジレジストの結果とほぼ同じで現在実在し、かつ、適用しうる有機化合物のなかでは限界と考える。図7.34には、KrFエキシマレーザー露光量によるASKAレジストの現像後残膜特性である。完全に残膜のなくなるしきい値エネルギーは20mJ/cm²でi線レジストの100mJ/cm²に比べ非常に高感度化が実現されている。この高感度性はステップ光学系によるエキシマレーザー照射パワーの劣化に有利に働きステップ本体の高スループット化に大きく寄与する。また、コントラスト値は5.7と大きい γ 値が得られ高解像度が期待できる。

(3-2) 高解像度化

ASKAは未露光部と露光部の溶解速度差を積極的に向上させて高解像度化を実現している。図7.35に開発当初の化学増幅型レジストとASKAの露光部でのレジスト深さ方向に対する溶解速度の特性を示した。レジスト底部付近での溶解速度を増すために表面溶解阻害剤の混合と共に、ポリマと酸発生剤そのものの反応効率を各々高めている。

(3-3) 安定化

図7.36にポリマを同一とし、それぞれ酸発生効率の異なる三種類の酸発生剤による化学増幅型ポジレジストの0.3 μm L&SパターンSEM写真を示した。酸発生効率の高い酸においては、露光部の酸密度が多くそれだけ拡散距離も長くなるためレジスト表層から失活しやすくなる。結果として、表層に強い難溶化層が形成されT-TOP現象が発生すると考えられる。一方、発生効率が弱いと化学増幅型の連鎖反応が薄れるため、透明性が支配することとなりレジスト底部まで溶解が進行しないので結果的に裾引き現象が発生しパターン形状が劣化したものとする。一方、露光部のレジスト中の残存溶倍量も安定性に大きく起因する。図7.37にこの現象を実証するために、ASKAレジストの溶媒をジエチレン一方、透過率がグリコール [diethylene glycol (diglyme)]、PGMEA (propylene glycol monomethyl ether acetate) そしてジエチレン一方、透過率がグリコール溶媒で真空ベークした場合の0.3 μm L&SパターンSEM写真を示した。蒸気圧の高いPGMEA溶媒、つまりレジスト中に残存しにくい方がレジスト形状も良好であり、真空ベークでの上部の梁形状から察知すれば残存溶倍量が酸の振る舞いに大きく寄与していることがわかる。

化学増幅型レジストの材料的観点による初期的安定化には、ポリマ、酸発生剤そして溶媒、添加剤の全ての最適化が重要であることがわかった。

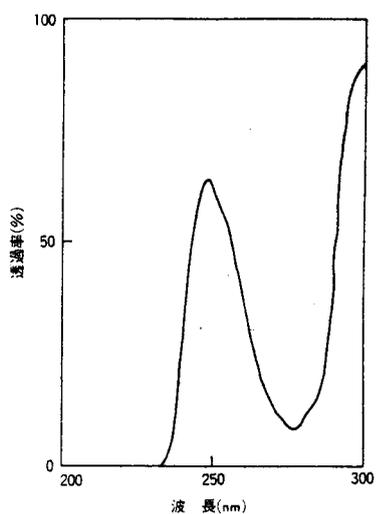
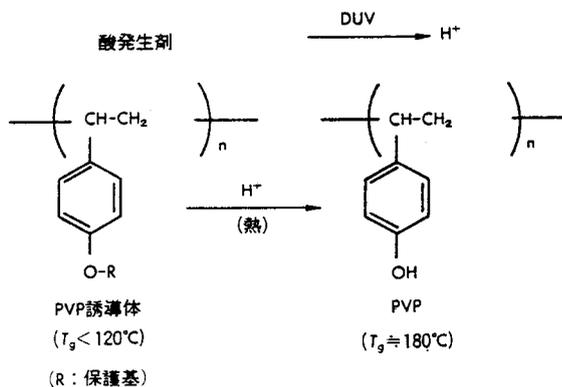


図7.31 化学増幅型レジスト"ASKA"の化学構造

図7.32 ASKAの紫外線分光特性

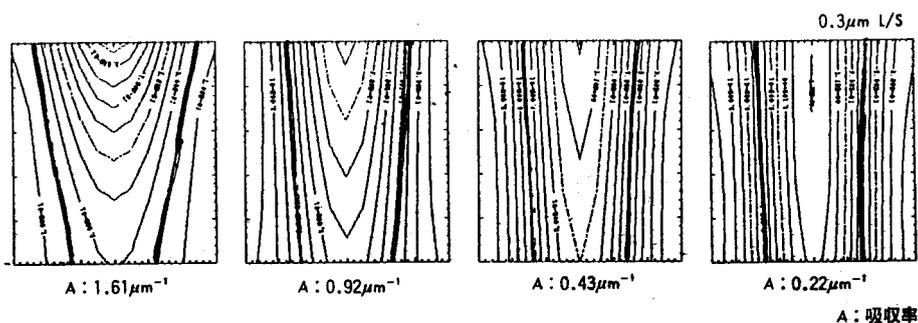


図7.33 各種吸収率を仮想したレジスト膜中での露光光強度分布のシミュレーション結果

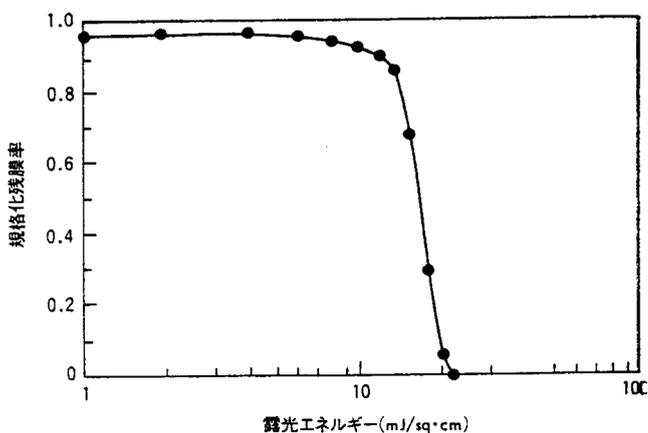


図7.34 ASKAの現像後残膜特性

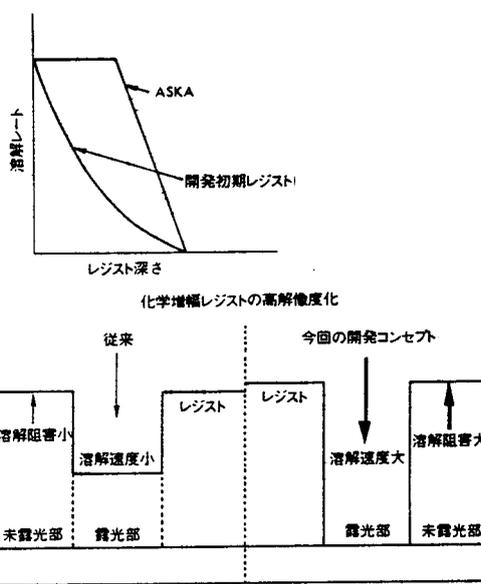


図7.35 開発当初の化学増幅型レジストとASKAのレジスト深さ方向に対する溶解レートの特性和溶解速度差を利用した化学増幅型レジストの開発コンセプト

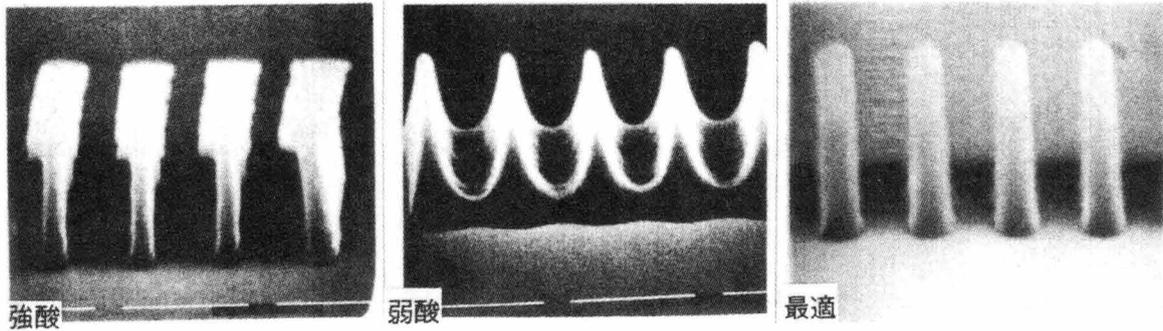


図7.36 酸発生効率の異なる三種類の酸発生剤による化学増幅型ポジレジストの0.3 μm L&SパターンSEM写真

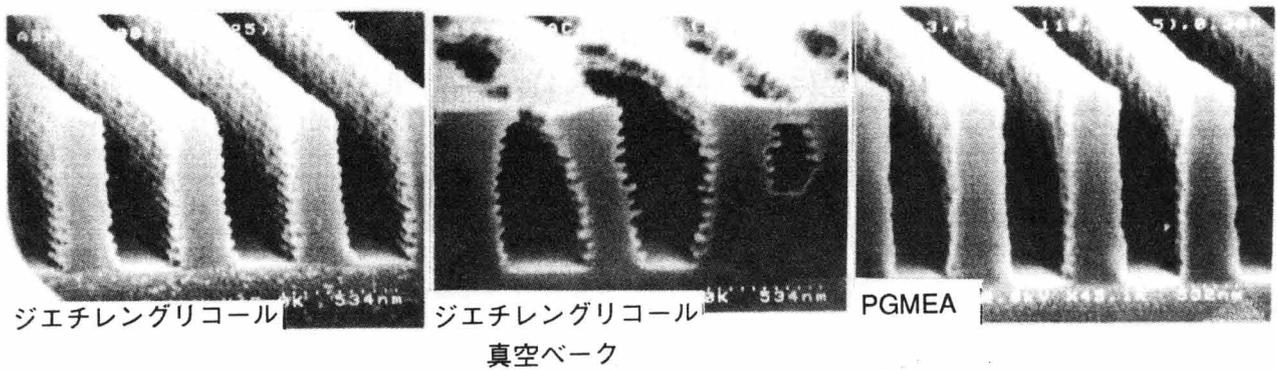


図7.37 ジエチレン・グリコール、PGMEA溶媒、真空バークによるASKAレジストの0.3 μm L&SパターンのSEM写真

7.6.4 高性能ASKAのリソグラフィ特性

(1) レジスト性能

ASKAのマスクリニアリティ特性を図7.38に示した。パターンニング感度 $30\text{mJ}/\text{cm}^2$ の高感度で $0.25\mu\text{m}$ までマスク寸法通りに形成されている。ただし、ブリーチング特性を有しないため、ラフパターン領域での近接効果による寸法ロスがまだ課題として挙げられる。図7.39には開発したASKAのパターンニング性能を示す 0.3 、 0.25 、 0.225 、 $0.2\mu\text{m}$ L&SパターンのSEM写真を示した。 $0.225\mu\text{m}$ と言う波長を越えた超解像力が示されており、材料設計段階における化学構造の最適化を良く反映している。また、図7.40には $0.25\mu\text{m}$ のコンタクトホールをSEM写真を示したが、露光部と未露光部の溶解速度差が十分に確保されているため従来コンタクトホールでの光強度の劣化による解像性の低下が、25%から10%に抑制された良好な結果である。図7.41、42にはそれぞれ $0.25\mu\text{m}$ 、 $0.3\mu\text{m}$ L&Sの焦点深度特性によるパターンSEM写真をそれぞれ示した。 $0.3\mu\text{m}$ L&Sでは $1.4\mu\text{m}$ 、 $0.25\mu\text{m}$ では $1.2\mu\text{m}$ の焦点深度が確保され、実際の段差の有する超LSI基板においても有効であると考えられる。

図7.43にはASKAの $0.25\mu\text{m}$ L&Sパターンの多重干渉効果を示す。バルクによる寸法変化(全体傾き)は小さいものの四倍屈折率分の波長変化によるレジスト膜厚変動における寸法変動(定在波効果)は $\pm 0.05\mu\text{m}$ とまだ大きく改善の余地があると言える。この課題に対しては、レジスト上部に塗布し、その膜

の最適屈折率により反射光を相殺するオーバコート膜⁷⁻³³⁾やレジスト下部に塗布し、反射光を吸収するARC (Anti-Reflective-Coating) 膜⁷⁻¹⁷⁾が有効である。単層化を実現するには、リニアリティ特性改善においても述べたが、ブリーチング効果の導入が望まれる。

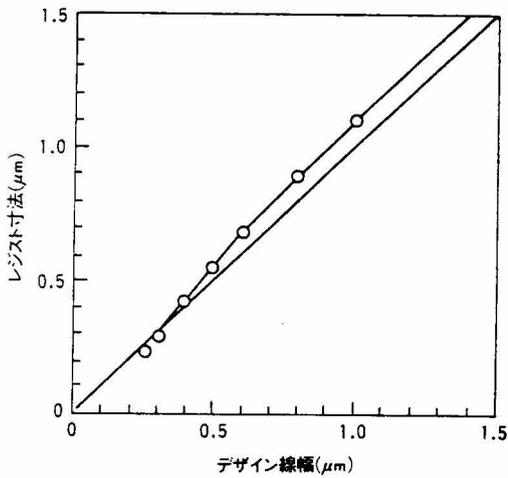


図7.38 ASKAのマスキリニアリティ特性

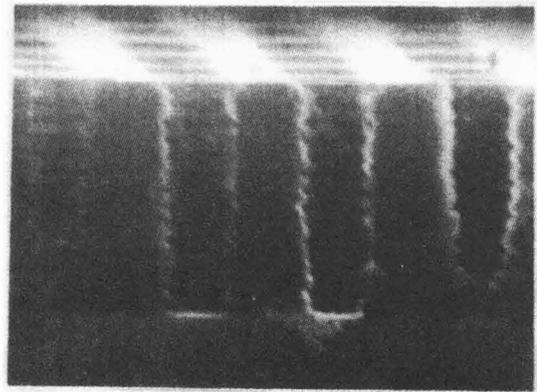


図7.40 ASKAによる0.25 μmのコンタクトホール・パターンのSEM写真

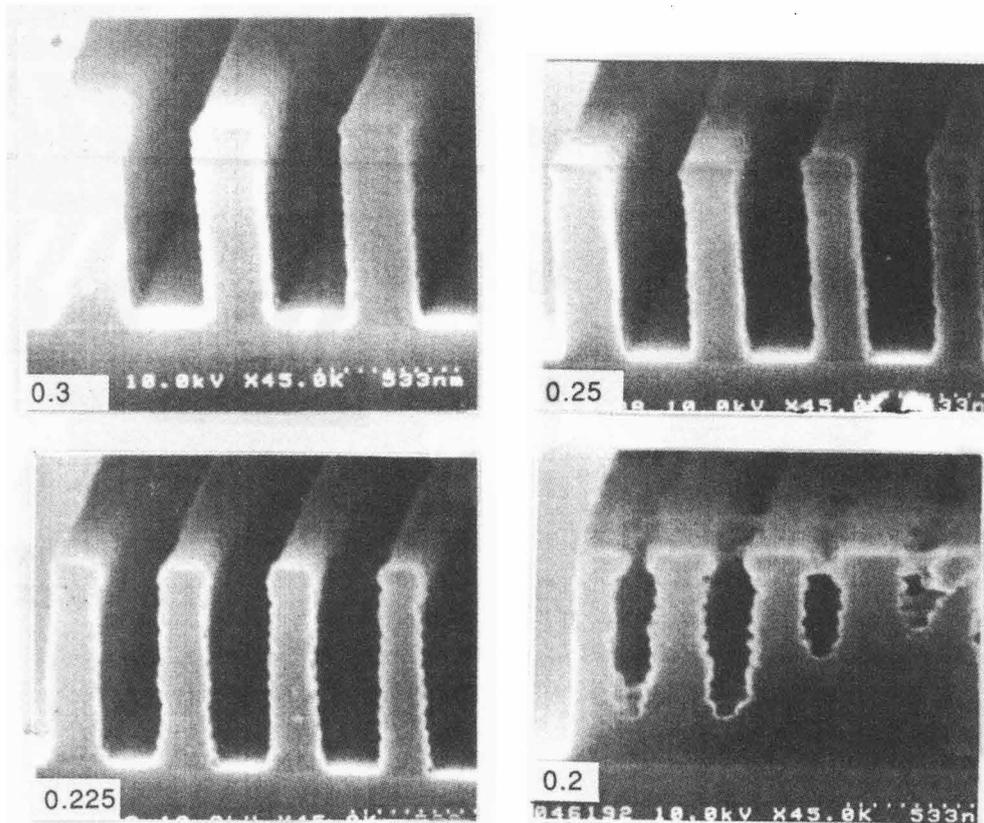


図7.39 ASKAによる0.2から0.3 μmまでのL&SパターンのSEM写真

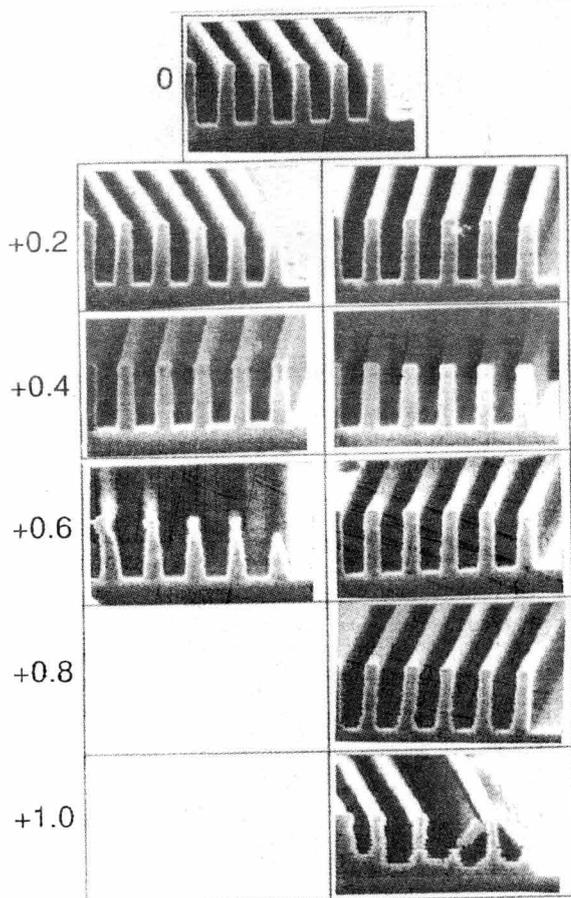


図7.41 0.25 μm L&Sパターンの
焦点深度特性SEM写真

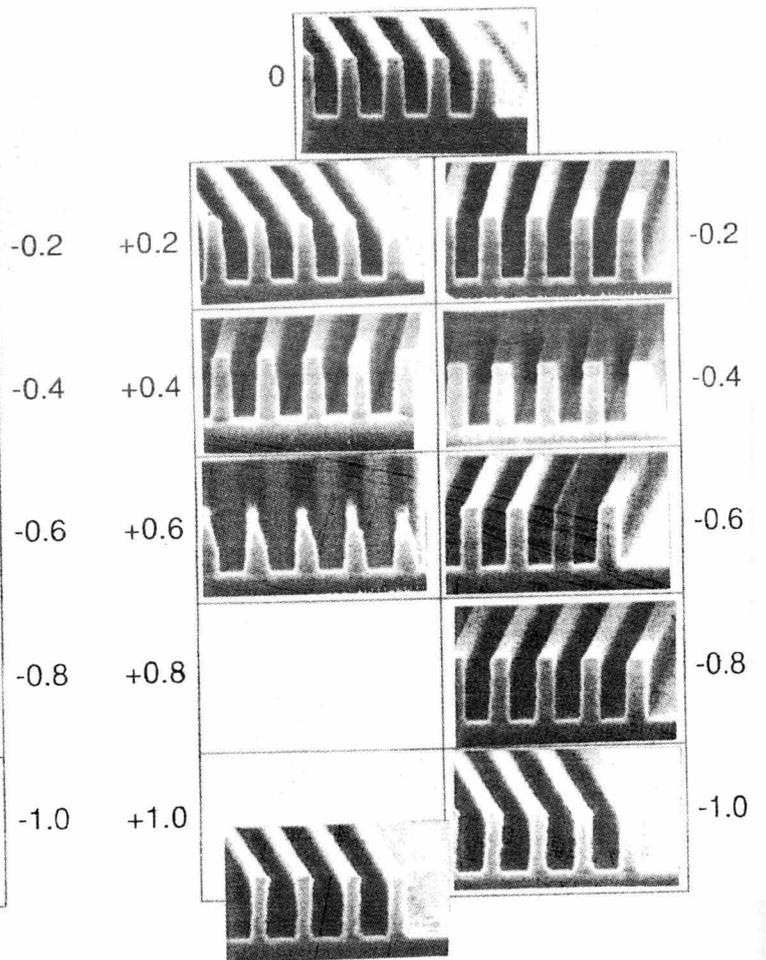


図7.42 0.3 μm L&Sパターンの
焦点深度特性SEM写真

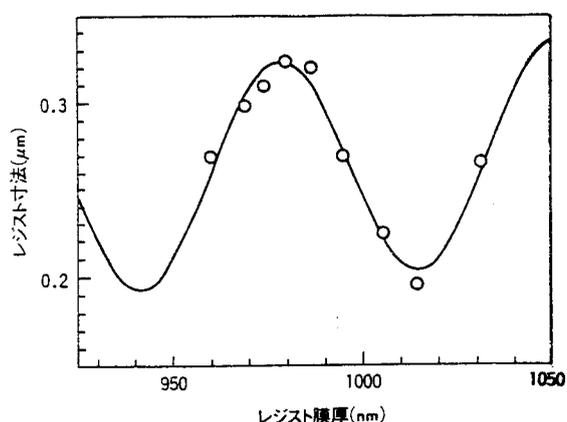


図7.43 ASKAの0.25 μm L&Sパターンの多重干渉効果特性

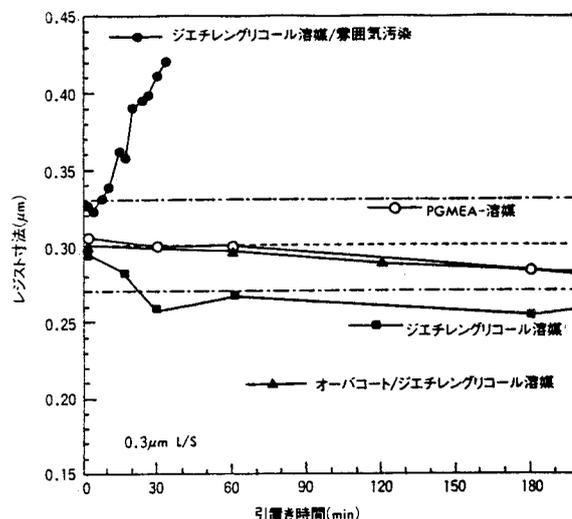


図7.44 ASKAの引き置き時間による0.25 μmレジスト線幅変動特性

(2) プロセス性能

次に、実プロセス使用を想定した性能評価について述べる。実際に化学増幅型レジストを量産に使用する場合の最大の難関は、引き置き特性つまり露光後ポスト・エキスポージャ・バークまでの引き置き時間によるレジスト線幅変動をいかに抑制可能かの安定性である。ASKAは化学組成上、一般の保存性と言う観点からは従来のi線レジストとかわらず冷暗所保存により6ヶ月間は安定している。しかしながら、図7.44に引き置き時間によるレジスト線幅変動特性を示すように、クリーンルームがアルカリ性物質、特にアミン雰囲気汚染(数10ppbオーダー)された場合には極度なT-TOP現象が表面に発生しパターンが30分程度で短絡する。図7.45は100%アルカリ性のHMDS(hexamethyldisilazane)および酸性の硝酸雰囲気下での放置実験パターンSEM写真である。HMDS下ではレジストの酸との中和反応による酸の失活によりT-TOP現象が、硝酸雰囲気下ではレジストバルク中への酸の拡散により酸過多となりレジスト形状の細りが観察された。一般の量産工場への化学増幅型レジストの導入には、アルカリ性、酸性物質の隔離あるいはクリーンルーム雰囲気清浄化技術が必須である。図7.44の残留溶媒の多いジエチレン・グリコールにおいては、酸の暗反応による未露光部への酸の拡散が発生し寸法変動10%以内の引き置きは60分しか保持できていない。一方、同じジエチレン・グリコール溶媒に水溶性オーバコート膜を併用した場合や、蒸気圧の高い、つまり残像溶媒の少ないPGMEAでは、180分以上の引き置き安定性が得られレジスト側での安定化は一応の目処を得た。次に、化学増幅型レジストと基板との反応について検討した。レジスト表面と雰囲気との反応と同様に基板側に残留するイオンによっても現像後のパターン形状に影響を及ぼす。図7.46にはSi基板上、酸性有機反射防止膜(ARC)上、無機反射防止膜(TiN)上、中性の有機材料を塗布したTiN基板上のそれぞれにASKAをパターンニングしたSEM写真である。ARC上のパターン形状は基板界面からの酸拡散による侵食現象が、TiN上では残留アルカリイオンによる酸失活による裾引き現象がそれぞれ発生している。有機ARC膜においては材料設計の段階からpH値を考慮することによりこの問題が解決できるが、無機ARC膜を使用する場合には、中和処理による残留イオンの管理が重要であることがわかった。

(3) 超LSIへの適用結果

最後に0.25 μmデザインルール超LSIへの開発したASKAの適用例⁷⁻³⁴⁾を示す。図7.47には試験的256M DRAM(最少寸法0.25 μm)の素子分離パターンとゲートパターンを示した。現状、一部のレイヤにおいて寸法変動や反射を抑制するためにオーバコート膜やARC膜の補助があるものの、0.25 μmの超微細加工が可能となった。

7.6.5 まとめ

化学増幅のコンセプトをKrFエキシマレーザー・リソグラフィに適応すべく、高感度化、高解像度化そして高安定性化の観点からレジスト材料設計を進め、 $0.25\mu\text{m}$ デザインルールを超LSIのリソグラフィプロセスに使用可能なKrFエキシマレーザー・リソグラフィ対応化学増幅型ポジレジストASKAを開発した。ASKAの性能は、 $0.225\mu\text{m}$ の解像度、 $30\text{mJ}/\text{cm}^2$ の感度と世界でも前例のないものを示した。また、化学増幅型の課題であった安定性に関して、レジスト溶媒、雰囲気そして基板との反応を検討することで180分以上の引き置き安定性を得た。

ASKAは $0.25\mu\text{m}$ 超LSIのためのKrFエキシマレーザー・リソグラフィの開発に有用である。今後、プロセスの簡素化と低コスト化を計るためには、近接効果や定在波効果の影響を受けないブリーチング効果の導入が急がれる。

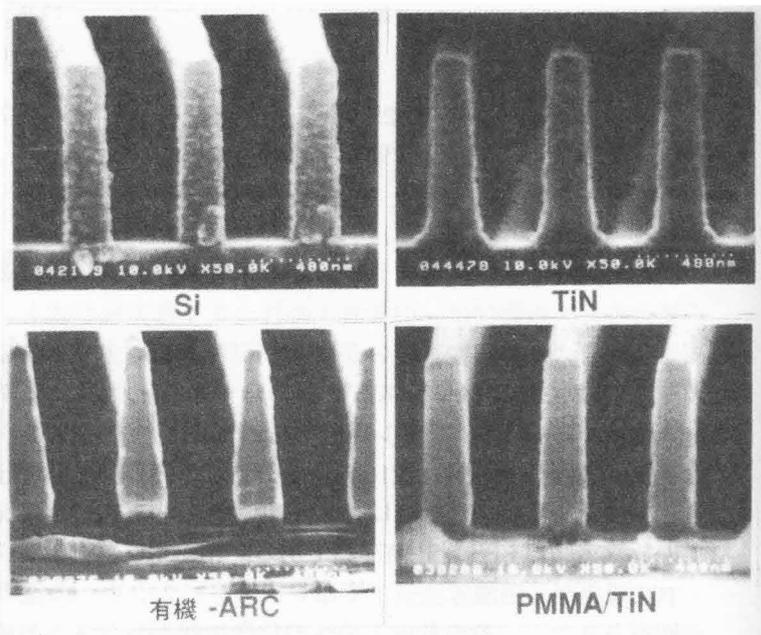
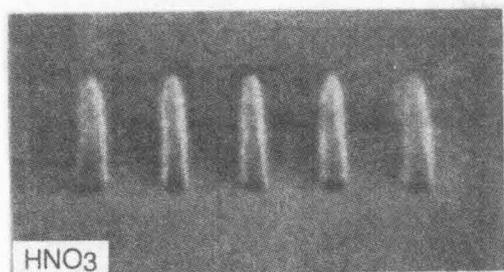
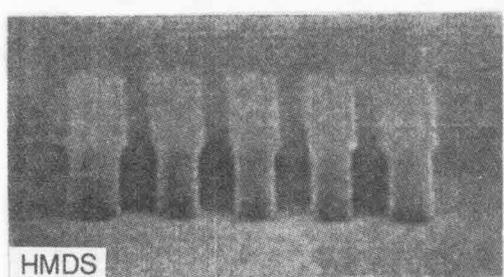


図7.45 アルカリ性および酸性雰囲気下におけるASKAのパターンSEM写真

図7.46 各種基板上的ASKAパターンニングSEM写真

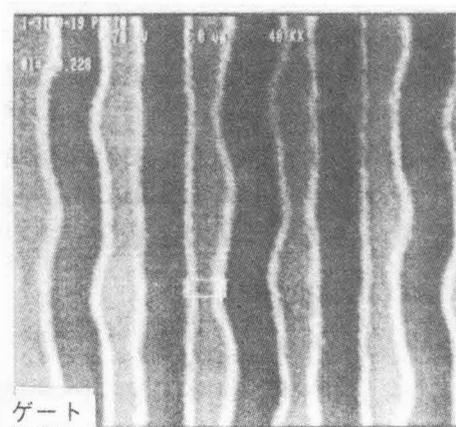
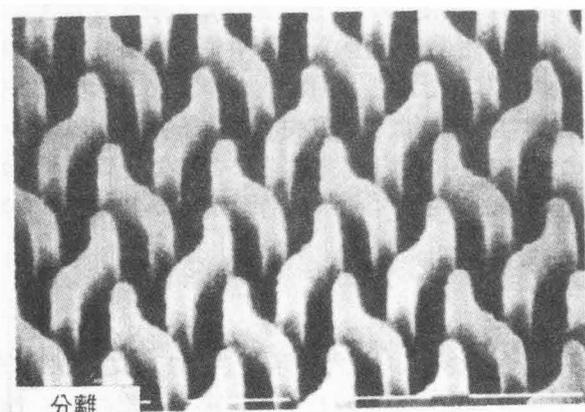


図7.47 試験的256M DRAMの素子分離、ゲートパターンSEM写真

7.7 KrFエキシマレーザー・リソグラフィ・プロセスの開発

7.7.1 はじめに

本章では、クォータミクロン・デバイス製造におけるKrF（波長；248nm）エキシマレーザー・リソグラフィの実用化に課題として残った多重干渉効果やハレーションを防止するアプローチと化学増幅型レジストの耐熱性向上について論ずる。

前章のように、波長と同等の解像性を有するポジ型レジストの開発に成功したが、実際のデバイス試作においては、多重干渉効果やハレーションによる寸法変動が最後の最も重要な課題となった。そこで以下に、オーバーコート・プロセスとARC（反射防止膜）について多重干渉効果とハレーション低減のレジストプロセスの結果^{7,4)}を述べる。また、レジストの耐熱性向上にはフラッシュバック法^{7,9)}を考案し、検討を行った。

7.7.2 レジストプロセス

(1) オーバーコートプロセス

ポリビニル・アルコール誘導体からなるオーバーコートを露光波長の4n分の1になるようにASKA上に42nmスピコートした。オーバーコート膜の屈折率（n）は1.48であり、レジスト表面からの反射光を低減する反射防止膜として働く。図7.48にASKAレジスト膜厚を0.95 μm から1.05 μm 変化させたときのレジストの寸法変動を示した。オーバーコート膜を用いないとレジストの寸法変動は $\pm 0.08\mu\text{m}$ であるが、オーバーコート膜を用いることにより $\pm 0.03\mu\text{m}$ に抑制することが出来た。そこでオーバーコート・プロセスの有効性を調べるために実際の64M DRAMへの適用性について検討をおこなった。図7.49は0.35 μm ルールの64M DRAMのストレージ基板コンタクトホール⁵⁾のSEM写真を示す。オーバーコート膜を用いないとチップ角でコンタクトホールサイズの寸法変動がみられるが、オーバーコート膜を用いることにより寸法変動は $\pm 0.03\mu\text{m}$ に制御することが出来た。

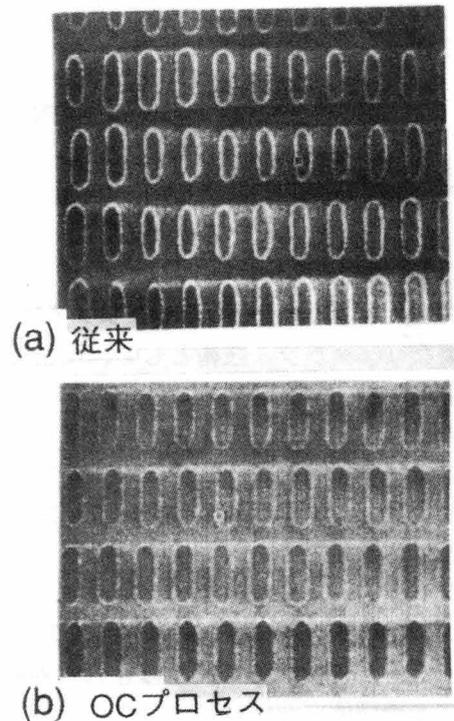
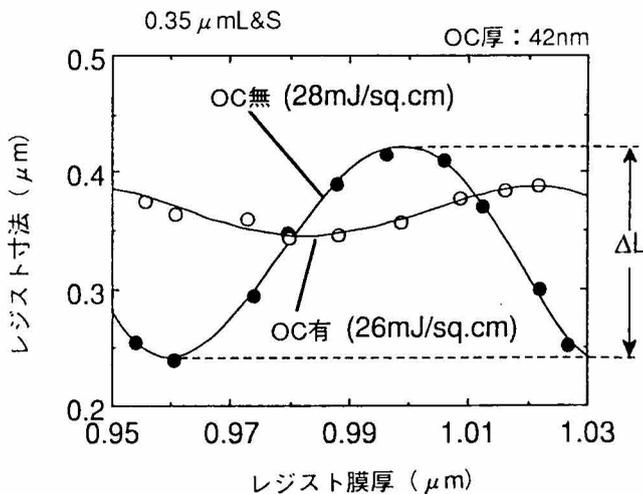


図7.48 オーバコート・プロセスによる多重干渉効果

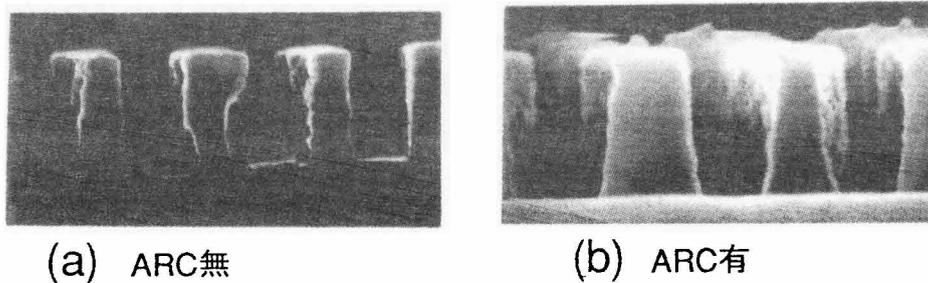
図7.49 オーバコート・プロセスによる64M DRAMのストレージ電極への適用SEM写真

7.7.2.2 ARCプロセス

オーバーコート・プロセスは多重干渉効果を低減することはできるが、LOCOS（選択酸化）のような傾斜した面からの反射光によるレジストパターンの局所的な欠け（ハレーション）に対しての効果がない。図7.50はARC有無のレジストパターンの断面SEM写真を示す。ARCプロセスは多重干渉効果およびハレーション対策に同時に効果を発揮するが、ARCを除去する際のレジストパターンの寸法シフトが課題となる。本研究では、この寸法シフトを最小限におさえるため、ARC材料およびARCエッチング条件の最適化を行った。ARC材料として250nm付近に吸収を有するダイをメタクリ酸樹脂に混入したものを用いた。メタクリ酸樹脂はエッチング耐性がなく、基板エッチングと同一エッチング条件で一度に除去できる可能性がある。エッチング方法としてはこのように基板と同一エッチングで1度に除去する方法とARCと基板を別々のエッチング条件で行う2段エッチングについて検討した。

結果として、寸法ばらつきは $\pm 0.03 \mu\text{m}$ 、寸法シフトは2段エッチングにより $0.03 \mu\text{m}$ に抑制することができた。

実際の64M DRAM以降のクォータミクロン・デバイス製造にはレイヤーによって、オーバーコート・プロセスやARCプロセスを併用していく必要があると思われる。



0.35 μm ゲートレジスト形状 (LOCOS上)

図7.50 ARCプロセスによるレジスト断面SEM写真

7.7.3 耐熱性向上プロセス

(1) はじめに

KrFエキシマレーザー・リソグラフィは、64M DRAM以降のクォータミクロン領域の微細パターン形成に必要なリソグラフィ技術として、現在最も注目されている技術のひとつである。この技術に使用するレジストとして、248nmの光に透過性の高い樹脂を用いた化学増幅、すなわち、酸触媒反応を利用してレジストの極性を変化させるシステムを取り入れたレジストが開発されている。その一形態として、ポリビニル・フェノール (PVP) のフェノール性水酸基を保護基によりブロックされたメインポリマーと、遠紫外線照射により酸を発生する酸発生剤 (PAG: Photo Acid Generator) より成る二成分系ポジ型レジストが開発されている。

ところが、上記のようなポリマーは、通常ガラス転移点 (T_g) が低く、後工程に必要なポストバークとして、パターン形成後 $110\sim 130^\circ\text{C}$ で熱処理を行うと、パターン形状が劣化する場合が多い。また、この様なパターンの劣化を防ぐために遠紫外線 (DUV) バークによる硬化⁷⁻³⁵⁾を行うと、レジストの遠紫外線に対する透明度が非常に高いため、従来のレジストでは表面でのみ起こった硬化反応が、レジスト内部にまで及ぶこと、さらにポリマー側鎖の分解が起こるといふ二つの要因により、レジストの体積は大きく減少する。従って、従来のホットプレートに代表されるポストバーク方法では十分な耐熱性を持つレジストパターンを形状良く、寸法変動なしに得ることはできなかった。この寸法変動、形状変動は、64M

DRAM以降のデバイスにおいて大きな問題である。そこで本研究では、従来のポストバークに代わり、この様な系の化学増幅型レジストの性質を利用した、形状変化を起こさず、パターン寸法変動も抑制した、新たなキュア方法を開発した。

開発したキュア方法は、現像後のレジストパターンに基板をポリマーのガラス転移点以下の低温に保ちながら数秒間の遠紫外線照射を行いレジスト自身のガラス転移点を高めるものである。以後このキュア方法を“フラッシュキュア”と称する。この方法は従来のような高温での熱処理を必要としなくなる。また、遠紫外線照射を行った際、硬化反応を起こさないため、寸法変動は最小限に抑制することができる。このキュア方法で処理したレジストパターンについて、耐熱性、耐ドライエッチング性の検討を行ったところ、良好な結果が得られたので以下に論ずる。

(2) フラッシュキュアのメカニズム

二成分系化学増幅ポジ型レジストのメインポリマーは、多くの場合PVP骨格で構成されている。PVP（ポリビニル・フェノール）は、170℃という高いガラス転移点（Tg）をもつポリマーである。ところが、今回使用した化学増幅ポジ型レジストのメインポリマーは、そのアルカリ溶解性を阻害するため、フェノール性水酸基を保護基によりブロックされており、その結果、Tgは、110℃程度に低下している。従って、レジストの耐熱性は、110℃前後である。レジストの耐熱性は、そのメインポリマーのTgによりほぼ決定される。つまり、メインポリマーのTgを上昇させることにより、レジストの耐熱性を向上させることができる。ここで、メインポリマー側鎖の保護基を分解し、PVP骨格のみとすれば、レジストの耐熱性は、170℃近くまで上昇すると考えられる。

フラッシュキュアは、通常のレジストの遠紫外線による反応と同じく、遠紫外線の短時間照射（フラッシュ）により、レジスト中に含まれる酸発生剤からの酸の発生を促し、ポリマー側鎖の保護基を分解することによりメインポリマーをポリビニル・フェノールとし、Tgの向上を図るものである（図7.51）。従って、照射する遠紫外線の必要な光量及び照射時の温度は、酸を発生させるのに十分な光量であり、ポリマー側鎖の分解に必要なエネルギーを与え得る温度であればよい。すなわち光量は通常のパターン形成時の露光エネルギー程度、また照射時の温度は、分解前のポリマーのTgより低く、かつ、通常の露光後バークを行う温度あるいは、それ以下で良い。

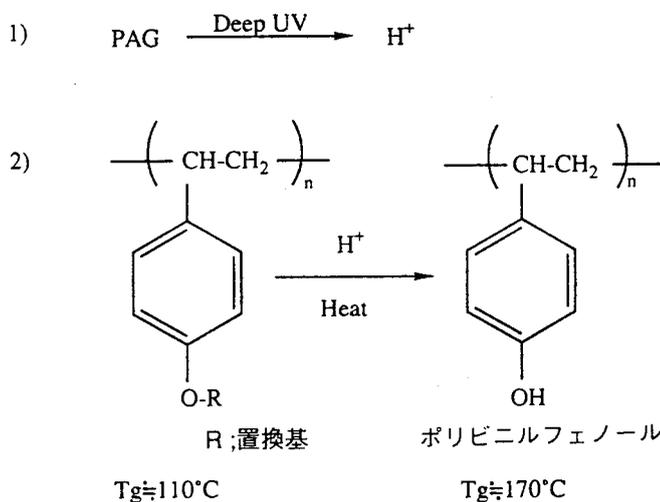


表7.3 レジストパターンの耐熱性

遠紫外線照射	温度 (°C)	バーク後形状
3秒	160	変化なし
3秒	180	劣化
無	120	劣化

図7.51 フラッシュキュアのメカニズム

(2) 実験内容及び結果

(2-1) 耐熱性

二成分系ポジ型化学増幅レジストをシリコン基板上に塗布し、プリベーク (90°C 60秒) を行って、1.0 μm のレジスト膜を得た。その後、KrFエキシマレーザー・ステッパー (NA 0.42) により露光し、PEB (95°C 60秒) を行った後、TMAH水溶液により現像することでパターン形成を行った。形成したレジストパターンに、水銀ランプを用いて、遠紫外線を3秒間照射した。水銀ランプの主な発光スペクトルは200~450nmの範囲であった。その後、160°C、および180°Cで120秒間のベークングを行い、現像後のパターン形状と比較した。また、フラッシュキュアを行わないレジストパターンも同様に120°Cでベークングを行い、形状を検討した。これらの結果を表7.3に示す。また、フラッシュキュア後、160°Cでベークングを行ったもの、及び現像後、120°Cでベークングを行ったものの断面形状をそれぞれ図7.52、53に示す。フラッシュキュアを行わない場合、120°Cのベークングでもパターンは丸みを帯びており、耐熱性が不足していることがわかる。一方、3秒間のフラッシュキュアを行なった場合、160°Cの熱処理を行ってもレジストパターンは現像後の形状をそのまま残しており、形状の劣化はみられない。

ここで、フーリエ変換赤外分光分析装置を用いフラッシュキュア前後の赤外分光スペクトル (IRスペクトル) を測定することにより、反応の解析を試みた。フラッシュキュアを行っていないレジストは、側鎖の C-O-C伸縮振動等、側鎖の保護基に由来する吸収が900~1100 cm^{-1} に数本みられる (図7.54 (a))。3秒間の照射を行うことにより、これら保護基に由来する吸収は全て消失し (図7.54 (b)) その後、さらに照射し続けても変化しなかった。従って、3秒間の照射により、レジスト側鎖の分解反応が完結したと考えられる。

これらの結果から、ポリビニル・フェノール誘導体をメインポリマーとする二成分系ポジ型化学増幅レジストは、遠紫外線照射 (フラッシュキュア) により、容易に酸触媒による分解反応を起こす。さらにPVPになるにともない、耐熱性が向上し、160°Cの熱処理にも耐え得るようになる。但し、ポリマーの骨格であるPVPの T_g が約170°Cであるので、それ以上の高温に対する耐熱性を与えることはできない。

(2-2) 遠紫外線照射によるレジストの体積縮小

本節で用いたエキシマレーザー用化学増幅系ポジ型レジストは、遠紫外線に対し、優れた透明性 (65%) を有する。そのため、従来のノボラック系レジストでは表面のみで起こった遠紫外線ベーク時の硬化が、レジスト内部でも起こるため、レジストの体積縮小が発生する。同時に、ポリマー側鎖の分解による縮小も生じ、二重の要因によりパターン寸法の縮小等の問題が発生する。フラッシュキュアではレジストの硬化を起こさないため、硬化による縮小は発生しないが、側鎖の分解による縮小が観測された。図7.55 (a) は、160°Cの遠紫外線ベークを行った場合の0.5 μm L&Sのキュア前後のパターン寸法を、図7.56 (b) は、フラッシュキュアを行った場合の、キュア前後のパターン寸法を示したものである。160°Cで遠紫外線照射を行った場合、キュア後寸法は、現像後寸法から15~20%縮小する場合があるが、フラッシュキュアを行った場合、0.5 μm L&Sパターンに対して、0.03 μm 前後の寸法変動量に収まった。つまり、フラッシュキュアを行うことにより、キュア時のレジストの寸法変動を、1/2以下に抑制することができた。

(3) まとめ

これまでに示してきたように、フラッシュキュアは、硬化反応を伴わずポリマー側鎖の分解反応のみにより耐熱性を向上させるため、短時間の遠紫外線照射のみで反応が進行し、従来のポストベークのような高温が不要で、非常に簡便なプロセスでレジストの耐熱性を向上させることができる。また、化学増幅レジストの性質を利用しているため、PVPを骨格とする二成分系ポジ型化学増幅レジストであれば、酸発生剤の種類、ポリマー側鎖の構造によらず適用でき、耐熱性を170°C程度まで向上させることができる。さらに、硬化、熱処理を行わないため、レジストの体積縮小を抑制することができる。

このように、フラッシュキュアを用いれば、従来のポストベークの欠点を大幅に緩和し、また、スループットも10倍以上向上させることができる。特に、ポリマー側鎖の分解によるレジストの縮小は未だ観測されたが、寸法シフト量は現像後寸法に対して5~10%、0.5 μm L&Sパターンに対して0.03 μm 程度となり、従来の1/2以下に抑制することができた。また、同時に、レジストパターン形状の劣化がエッチングに及ぼす影響も緩和することができた。このキュア方法を用いた場合、レジストの耐熱性はメインポリ

マーの側鎖の分解により得られるポリマーのガラス転移点、(通常、PVPのガラス転移点、約170℃)以上にはならないが、現状では、エッチングマスクとして用いる場合、170℃の耐熱性は満足できる値であり、今回の実験によっても耐熱性不足その他の理由による悪影響はみられなかった。この新キュア方法は、PVPを骨格とする化学増幅系レジストを用いた場合のポストバークに広く使用でき、寸法精度、スループットの向上に大きな効果を発揮することが期待できる。



図7.52 フラッシュキュア・プロセスによるレジストパターンのSEM写真

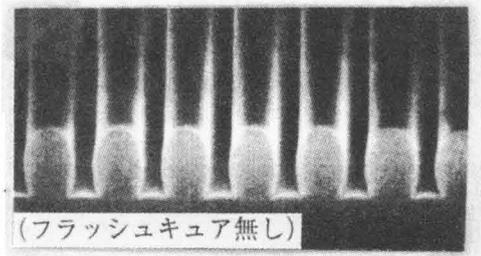


図7.53 従来法によるレジストパターンのSEM写真

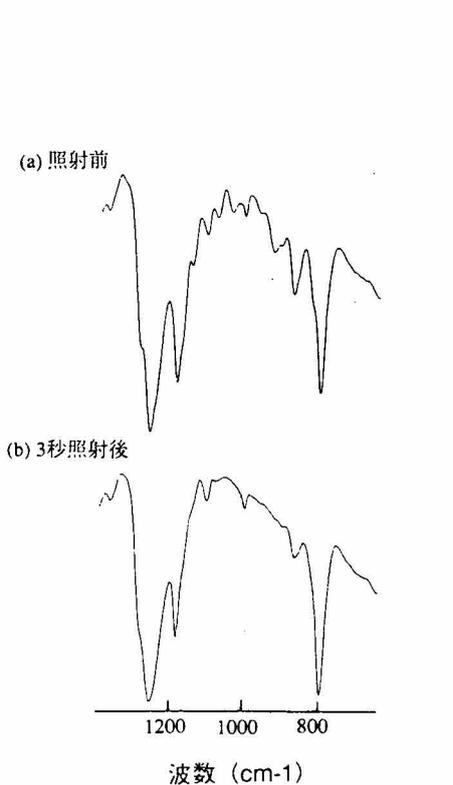


図7.54 フラッシュキュア・プロセスにおける赤外吸光分光スペクトル(a)照射前,(b)3秒照射

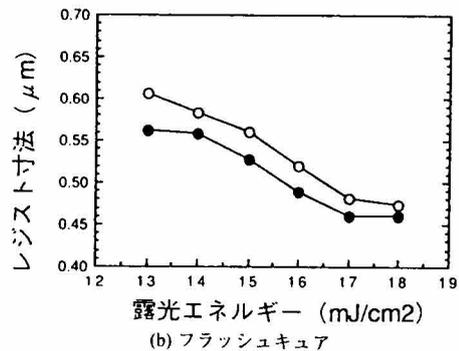
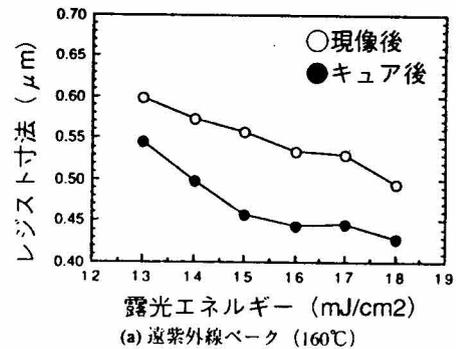


図7.55 フラッシュキュア・プロセスにおける寸法変動特性(a)DUVバーク,b)フラッシュキュア

7.8 サブクォーターマイクロパターン形成の可能性

7.8.1 KrFエキシマレーザー・リソグラフィと超解像

i線リソグラフィにおいて超解像技術が光リソグラフィの解像性を向上させる有効な手段であることが報告されている⁷⁻¹⁵⁾。そこで本研究ではKrFエキシマレーザー・リソグラフィに超解像を組み合わせることでサブクォーターマイクロパターン形成の可能性について検討した。

図7.56は $0.2\mu\text{m}$ スペースのストレージノード・パターンと $0.25\mu\text{m}$ コンタクトホール⁷⁾のSEM写真を示す。高解像度を持つASKAを用いることによりKrFエキシマレーザー・リソグラフィに超解像を組み合わせることでサブクォーターマイクロパターン形成の可能性があることがわかる。

この超解像技術をこれまで研究してきたKrFエキシマレーザー・リソグラフィに適用し、その長所と短所を明確にし、任意パターンにも効果のある補助パターン技術を考案⁷⁻⁸⁾し、そのサブクォーターマイクロパターンの微細加工の可能性について論ずる。

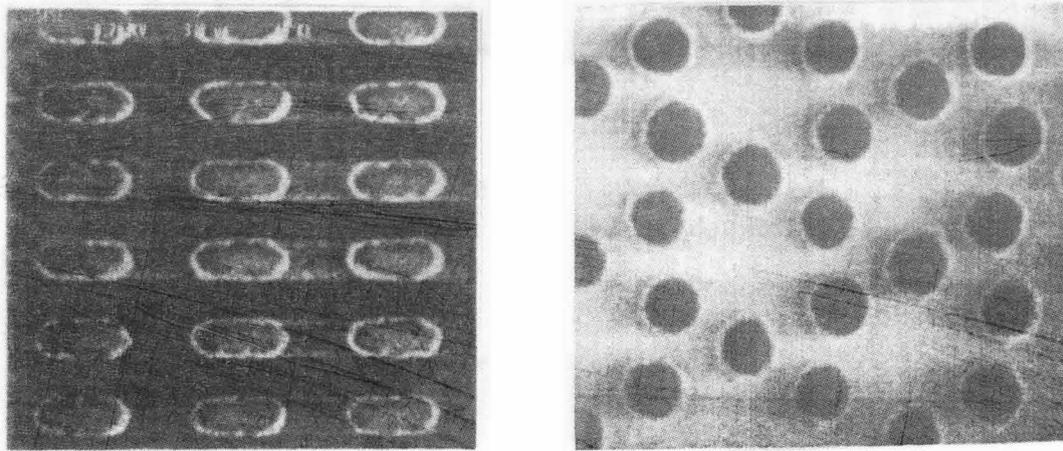


図7.56 超解像による $0.2\mu\text{m}$ のストレージ電極パターンと $0.25\mu\text{m}$ コンタクトホールのSEM写真

(1) 超解像技術の課題

超解像は、斜入射・変形あるいは輪帯照明法とも呼ばれているが、主にi線ステッパーの限界を延ばすため、ここ数年開発が盛んに行われてきた⁷⁻³⁶⁻³⁸⁾。原理上、i線ステッパーで可能な超解像技術はそのままエキシマレーザー・ステッパーに応用できる。超解像の原理は、ステッパーの照明系内のハエ目レンズのレチクル側に、種々のアパーチャを設置し、投影レンズの瞳面上にリング状の照明光源像や四つ穴開口の照明光源像を作ること、レチクルで回折した光の0次光と \pm どちらか一方の1次光でレチクルパターンを投影することになり、結果として解像度、焦点深度が向上する(図7.57)。

超解像技術を用いることにより周期パターンに対しては焦点深度の向上がみられるが、孤立パターンに対しては効果がないという課題がある。本研究では、 $0.25\mu\text{m}$ ルール任意パターンに対する焦点深度向上を目的として、高NAのKrFステッパーに超解像を適用し、前述の課題を解決するためにシミュレーションを用いて孤立パターンに対する補助パターン配置を検討し、実験で実証したので報告する。

(2) シミュレーション方法

シミュレーションは、KrFエキシマレーザーステッパ(NA0.48)を想定し、3次元リソグラフィ・シミュレータPEACEを用いて行った。通常照明と輪帯照明(超解像)の場合について、光強度分布のフォーカス特性をシミュレーションした。

シミュレーション条件を以下に示す。

露光波長：248nm

NA：0.48

照明系：通常照明法 ($\sigma = 0.6$)

輪帯照明法 ($\sigma = 0.6, \alpha = 0.7$)

ただし、輪帯照明におけるパラメータ σ 、 α は図7.58のように定義する。

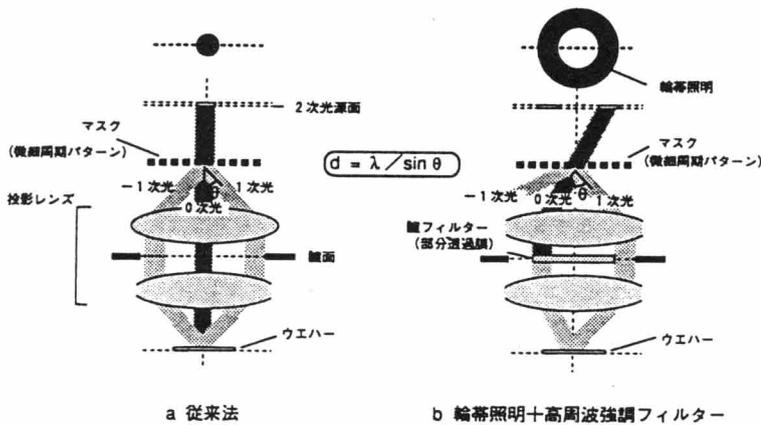


図7.57 超解像の原理

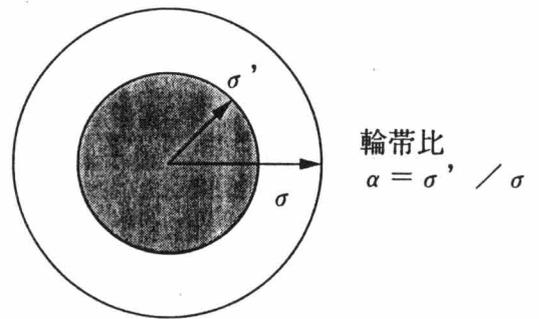


図7.58 超解像パラメータの定義

(3) 焦点深度向上効果のパターン依存性

図7.59に輪帯比 α が0.8、0.7、0.6、0.4、0（通常露光法）のときのL&Sの各寸法に対するコントラストを示す。図より輪帯比 α を大きくすればコントラストが良くなるが、照度の低下と照度むらの問題がでてくるので、以下の検討においては輪帯比 $\alpha = 0.7$ としてシミュレーションした。図7.59 (b) より $0.75 \mu\text{m}$ のデフォーカス時における $0.4 \mu\text{m}$ 以下のL&Sのコントラストの低下が通常照明 ($\alpha = 0$) に比べて輪帯照明 ($\alpha = 0.7$) の方が小さい。解像するコントラストのしきい値を0.5とすると、通常照明 ($\alpha = 0$) の場合はデフォーカス $0.75 \mu\text{m}$ のとき $0.25 \mu\text{m}$ L&Sのコントラストは0.35程度しかなく、焦点深度は小さいと予測できる。輪帯照明 ($\alpha = 0.7$) を用いるとデフォーカス $0.75 \mu\text{m}$ のとき $0.25 \mu\text{m}$ L&Sのコントラストが0.56程度あり、焦点深度が $\pm 0.75 \mu\text{m}$ 以上あることがわかる。超解像を用いると周期的パターンでL&Sパターンに対しては焦点深度の向上効果があることがこのシミュレーションからわかる。図7.60に通常照明と輪帯照明 ($\alpha = 0.7$) の場合の $0.25 \mu\text{m}$ 孤立スペースの断面の光強度分布を示す。通常照明と輪帯照明の場合、どちらもデフォーカス時（フォーカス $0.75 \mu\text{m}$ ）における光強度のピーク値の低下の度合いは変わらない。つまり、 $0.25 \mu\text{m}$ 孤立スペースに対しては輪帯照明を用いることによる焦点深度の向上効果はないことがわかる。同様に $0.25 \mu\text{m}$ 孤立コンタクトホールパターンに対しても焦点深度の向上効果はない（図7.61）。 $0.25 \mu\text{m}$ コンタクトホール・パターンを $0.5 \mu\text{m}$ ピッチの1次元周期に配置した場合の光強度分布を図7.62に示す。デフォーカス時（フォーカス $1.0 \mu\text{m}$ ）におけるコントラストが通常照明よりも輪帯照明の方がよく、輪帯照明を用いることによる焦点深度の向上効果があることがわかる。

以上より、超解像（輪帯照明）を用いることにより、 $0.25 \mu\text{m}$ の周期パターンに対しては焦点深度が向上するが、 $0.25 \mu\text{m}$ の孤立パターンに対しては焦点深度の向上の効果がないということがわかる。

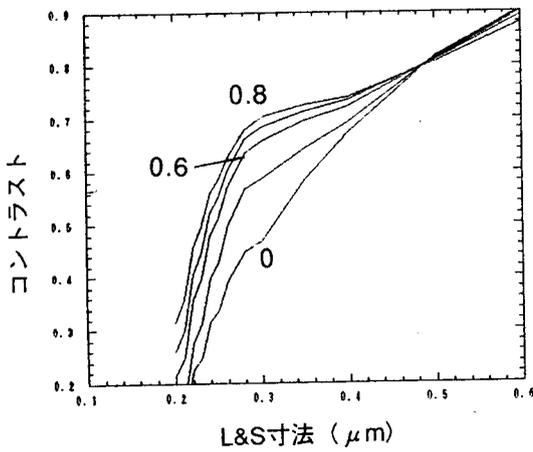


図7.59 各輪帯比におけるコントラスト特性

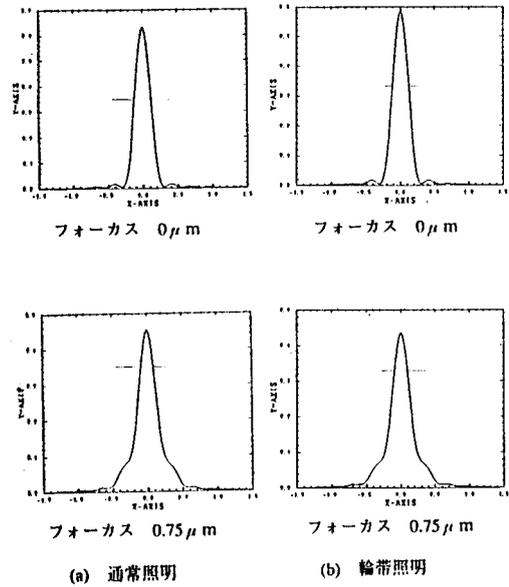


図7.60 0.25 μm 孤立スペースパターンの光強度分布

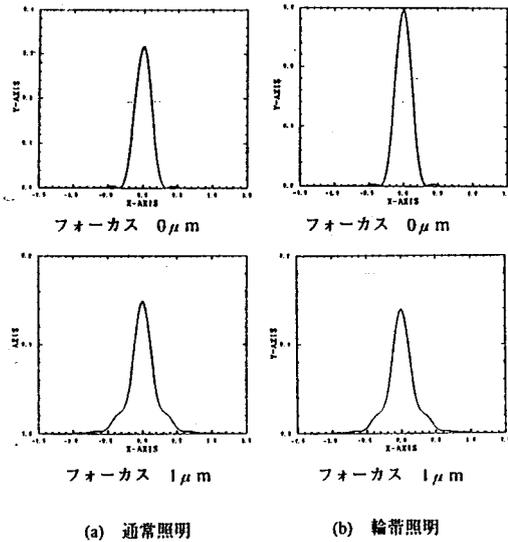


図7.61 0.25 μm 孤立コンタクトホールパターンの光強度分布

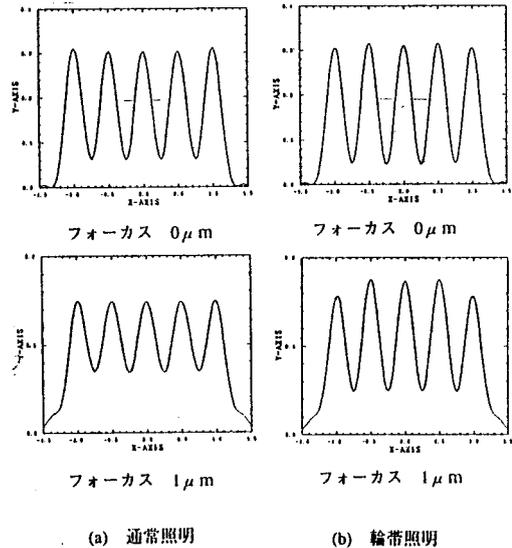


図7.62 0.5 μm 周期にレイアウトされた0.25 μm コンタクトホールパターンの光強度分布

(4) 任意パターンに対する焦点深度向上技術

前述したように、超解像技術において孤立パターンの焦点深度の向上の効果が無いという課題を検証したが、孤立パターンに対して解像しない寸法の補助パターンを配置することにより、上記の課題点を解決し、0.25 μm ルールの任意パターンに対して焦点深度が向上する技術を開発した。

(4-1) 孤立スペースに対する補助パターン配置

図7.63に補助パターン配置図を示す。0.25 μm 孤立スペースに対して両側に p だけ離れた位置に幅 w の補助パターンを設ける。輪帯照明の条件は、 $\sigma = 0.6$ 、 $\alpha = 0.7$ である。パラメータ $p = 0.4 \sim 0.7 \mu\text{m}$ 、 $w = 0.05 \sim 0.25 \mu\text{m}$ と変化させて、フォーカスを変化させた時の光強度分布のシミュレーションを図7.64に示す。それぞれのパラメータ p 、 w に対して、フォーカス $0 \mu\text{m}$ のときの光強度分布において $0.25 \mu\text{m}$ となる光強度のしきい値を求め、デフォーカス時のしきい値での寸法をプロットしたものを図7.65、66に示す。焦点深度を $0.25 \mu\text{m} \pm 10\%$ と定義した場合、パラメータ p 、 w を変化したときの焦点深度を図7.67、68に示す。図7.67より、補助パターンの位置は $p = 0.5 \mu\text{m}$ において焦点深度が最大となり最適であることがわかる。図7.68より、補助パターンの大きさは $0.1 \mu\text{m}$ 以上必要であることがわかる。しかしながら、補助パターンは解像してはならないという条件を考慮に入れると $w = 0.1 \mu\text{m}$ 程度が最適であると考えられる。最適な補

助パターン配置 ($p=0.5\mu\text{m}$, $w=0.1\mu\text{m}$) により、焦点深度が1.5倍程度向上することがシミュレーションよりわかる。

以上より考察すると、 $0.25\mu\text{m}$ 孤立スペースのウエハ上での光強度分布のメインピークと補助パターンのウエハ上での光強度分布のサイドローブの干渉により、補助パターンの位置が $p=0.5\mu\text{m}$ のときに最も $0.25\mu\text{m}$ 孤立スペースのピークが強調されるため、焦点深度が向上すると考えられる。言い換えると輪帯照明を用いた場合、 $0.5\mu\text{m}$ の間隔で隣接するマスクの開口部を形成すると、光の干渉によりコントラストが増加し、焦点深度が増加すると考えられる。したがって、 $0.5\mu\text{m}$ 間隔のマスク開口部を疑似的に設けることにより、孤立コンタクトと孤立ラインについても同様に焦点深度の向上効果が得られると考えられる。

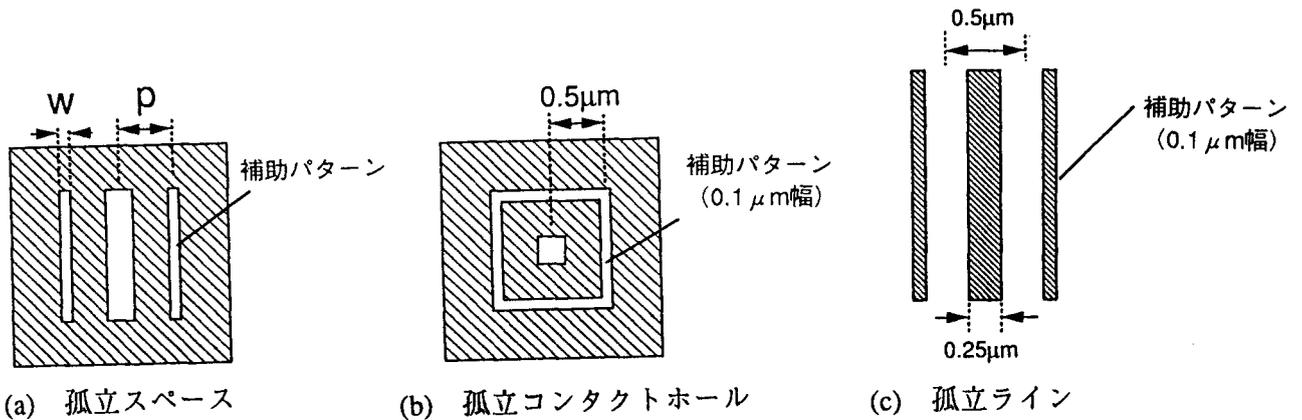


図7.63 補助パターンの配置図

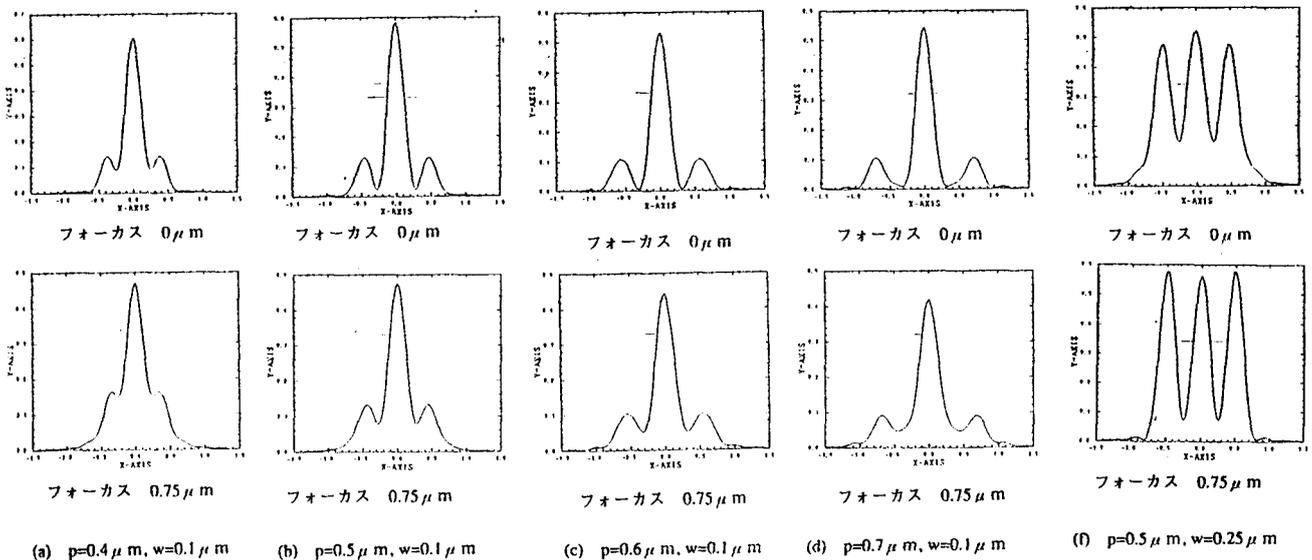


図7.64 補助パターン配置時における $0.25\mu\text{m}$ 孤立スペースパターンの光強度分布

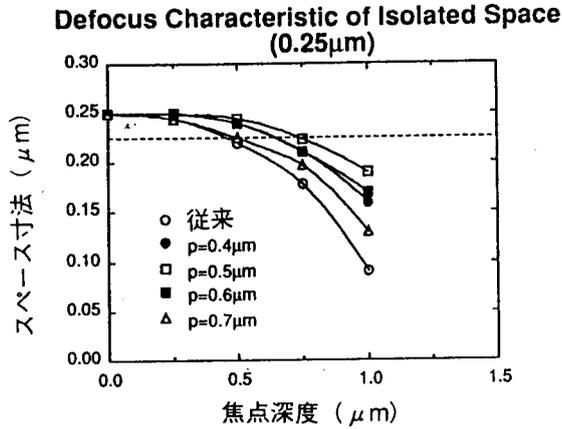


図7.65 配置パラメータpによる寸法特性

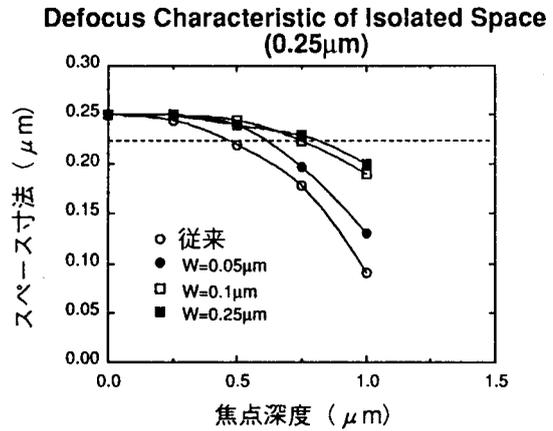


図7.66 配置パラメータwによる寸法特性

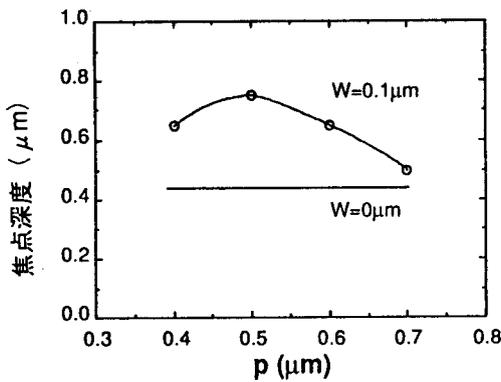


図7.67 配置パラメータpによる焦点深度特性

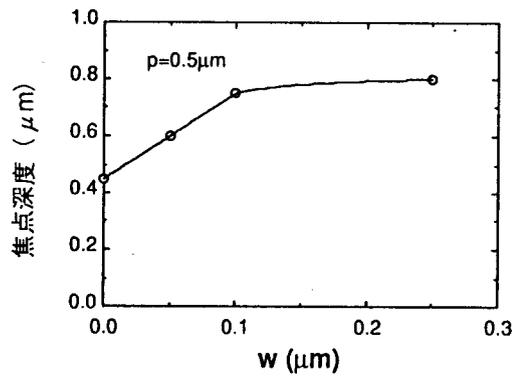


図7.68 配置パラメータwによる焦点深度特性

(4-2) 孤立コンタクトホールに対する補助パターン配置

図7.63 (b) に示すように $0.25\mu\text{m}$ 孤立コンタクトの周囲を囲む補助パターンを配置した。補助パターンの間隔は $0.5\mu\text{m}$ で、寸法は $0.1\mu\text{m}$ である。図7.69に、輪帯照明における補助パターン配置後の $0.25\mu\text{m}$ 孤立コンタクトホールの光強度分布を示す。図7.70に補助パターン配置後の $0.25\mu\text{m}$ 孤立コンタクトホールのフォーカス特性を示す。図より $0.5\mu\text{m}$ 間隔の円環状の補助パターンを配置することにより焦点深度が1.5倍以上向上していることがわかる。これは孤立スペースの場合と同様、 $0.25\mu\text{m}$ 孤立コンタクトのウエハ上での光強度分布のメインピークと補助パターンのウエハ上での光強度分布のサイドローブの干渉によるものである。

(4-3) 孤立ラインに対する補助パターン配置

図7.63 (c) に $0.25\mu\text{m}$ 孤立ラインに対する補助パターンの配置図を示す。(4-1) で述べたように、輪帯照明を用いた場合 $0.5\mu\text{m}$ 間隔で隣接しているマスクの開口部を形成することにより像のコントラストが増加するので、 $0.25\mu\text{m}$ 孤立ラインの両側に $0.5\mu\text{m}$ 間隔の開口部(スペース)を設けることにより、孤立ラインの焦点深度の向上を図った。つまり、 $0.25\mu\text{m}$ 孤立ラインの両側に $0.425\mu\text{m}$ の間隔に $0.1\mu\text{m}$ の解像しないラインを配置することにより、 $0.25\mu\text{m}$ 孤立ラインを挿んで $0.5\mu\text{m}$ 間隔のスペースを形成する。図7.71に、輪帯照明における補助パターン配置後の $0.25\mu\text{m}$ 孤立ラインの光強度分布を示す。図7.72に補助パターン配置後の $0.25\mu\text{m}$ 孤立ラインのフォーカス特性を示す。図より孤立ラインの両側に $0.5\mu\text{m}$ 間隔のスペースを形成する補助パターンを配置することにより焦点深度が2倍程度向上していることがわかる。

図7.73には実験による $0.25\mu\text{m}$ 孤立ラインの焦点深度を変化させた場合のSEM写真を示した。実験においても、補助パターン技術の効果が裏付けられた。

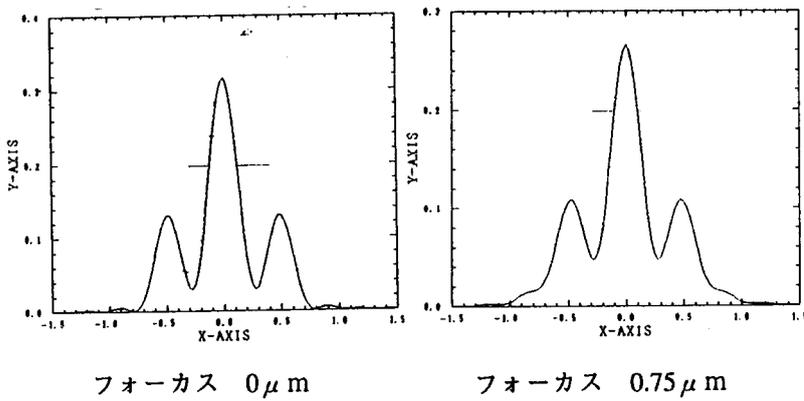


図7.69 補助パターン配置時における $0.25\mu\text{m}$ 孤立コンタクトホール・パターンの光強度分布

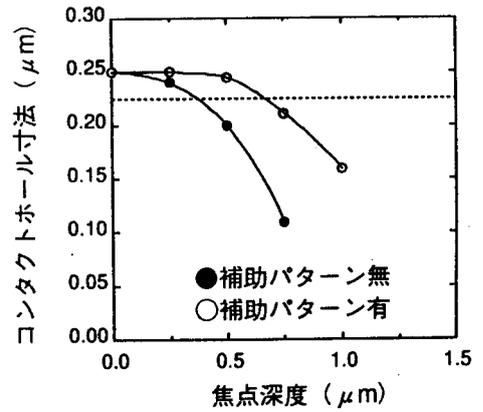


図7.70 補助パターン配置時における $0.25\mu\text{m}$ 孤立コンタクトホール・パターンの焦点深度特性

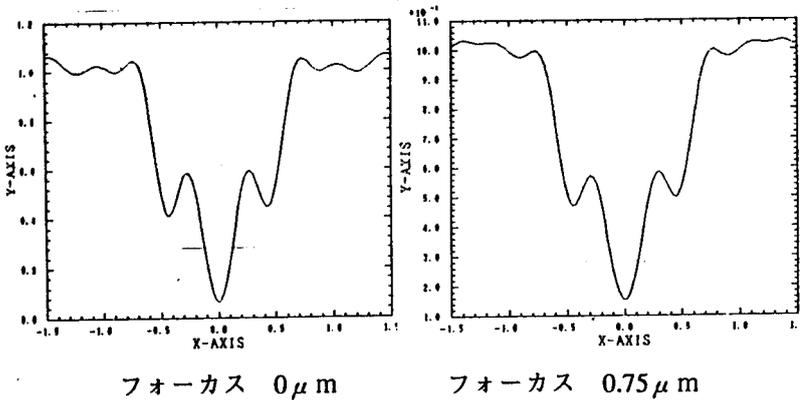


図7.71 補助パターン配置時における $0.25\mu\text{m}$ 孤立ラインパターンの光強度分布

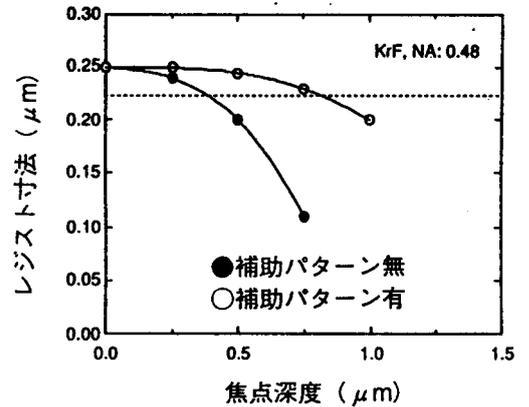


図7.72 補助パターン配置時における $0.25\mu\text{m}$ 孤立ラインパターンの焦点深度特性

7.8.2 まとめ

KrFエキシマレーザー・リソグラフィに、超解像技術とその欠点を補足する補助パターン技術を適用することにより、クォータミクロン・レベルのプロセス余裕度の向上と、サブクォータミクロンの微細加工の可能性を見いだした。本研究により、以下のことが判明した。

1) KrFエキシマレーザー・ステッパー (NA0.48)に輪帯照明 ($\sigma=0.6$, 輪帯比0.7) を用いることによって、 $0.25\mu\text{m}$ 以下の周期パターンに対して焦点深度が向上することがわかった。

2) 超解像技術は $0.25\mu\text{m}$ 周期パターンに対しては焦点深度の向上効果があるが、 $0.25\mu\text{m}$ 孤立パターンに対しては効果がないということが明らかになった。

3) 超解像技術に、孤立パターンへの補助パターン配置を適用することにより、上記の課題点を解決し、 $0.25\mu\text{m}$ 孤立パターンの焦点深度を向上できることをシミュレーションと実験により明らかにした。

4) 本技術を用いることによって、 $0.25\mu\text{m}$ ルールの任意のパターンに対して焦点深度が向上するため、 $0.25\mu\text{m}$ 以下のルールの任意のデバイスのパターン形成に有効である。

今後の課題として、

1) 孤立パターンへの補助パターン配置を実際に超LSIパターン適用して、実験実証する。

2) 孤立パターンへの補助パターンの自動配置のアルゴリズムを検討する。

とまとめられる。

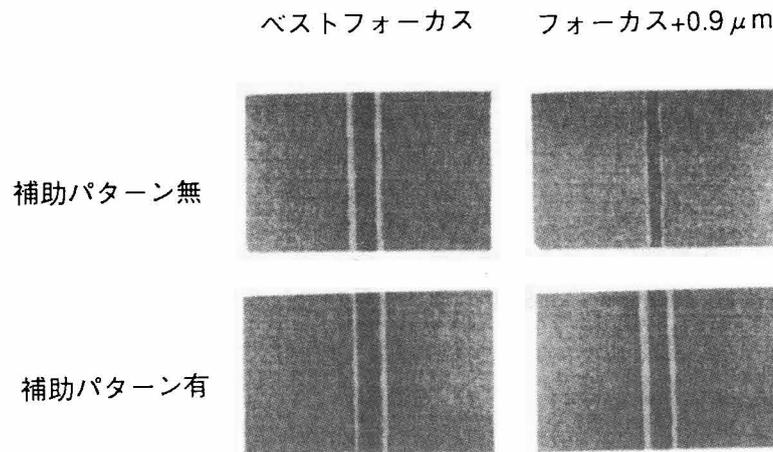


図7.73 実験による補助パターン配置時における $0.25\mu\text{m}$ 孤立ラインパターンの焦点深度のSEM写真

7.9 第7章の結言

KrFエキシマレーザー・リソグラフィを $0.35\sim 0.25\mu\text{m}$ ルールの超LSIに適用すべく、実用性の高いレーザー、ステッパおよびレジストに関する研究の進展について論じた。PCRレーザーおよびTTRアライメントを有するKrFエキシマレーザー・ステッパは、 10^9 パルス以上のエタロン寿命および $0.1\mu\text{m}$ 以下の重ね合わせ精度を実現した。クォータミクロン・デバイス開発に十分な $0.25\mu\text{m}$ の解像性を有するボジ型化学増幅型レジストの開発に成功した。多重干渉効果およびハレーションによる寸法変動やレジストの局所的な欠損は重要な課題であるが、オーバーコート・プロセスやARCプロセスにより解決出来た。

高解像度を持つASKAを用いてKrFエキシマレーザー・リソグラフィに超解像を組み合わせることでサブクォータミクロンパターン形成の可能性があることがわかった。より短波長のArFエキシマレーザー光を用いることによりサブクォータミクロン以下のパターン形成の可能性があると思われる。

最終的に量産レベルへのKrFエキシマレーザー・リソグラフィの導入の最後の課題としては、レジスト、ステッパ等全面に渡る経済性、つまりランニングコストの考慮のローコスト化が挙げられる。

今後とも、超LSIの大量生産からくる量産技術として、KrFエキシマレーザー・リソグラフィには、より安定した装置、材料、プロセス技術の確立の為に、最先端の加工技術、材料技術の研究成果を発展させることが必要である。

今後の課題としては、以下にまとめられる。

1) 解像度

今後、解像度向上はレジストの進化および超解像技術の進歩に期待される。その結果、KrFエキシマレーザー・リソグラフィは、ルールが $0.25\mu\text{m}$ 以下のデバイスにまで適用可能になるであろうと確信する。

レジストに関しては先に述べたように基板反射の影響を受けない新しい概念のレジスト開発を推進していく必要がある。

また、解像度を向上する、超解像は繰り返しパターンには効果があるが、孤立パターンやランダム・パターンには効果がない。孤立パターン近傍に補助パターンを配置して対応する方法を提案したが、超解像をあらゆるパターン・レイアウトに対して実用化するには、補助パターンの自動発生や設計CADとの結合等の課題が残っている。そのため超解像照明の使用・不使用をレイヤ毎に切り替える必要がある。

2) アライメント

ステージ系、検出系の高精度化および計測環境の安定化がここ数年間の課題であり、ハード的には完成の域に近づきつつある。ハードウェア的限界が見えてきた以上、検出したデータを最大限有効利用するソフトウェア（アルゴリズム）の開発が当面重要になる。特にMix & Matchを考えた場合、チップ内倍率（ディストーション）制御が必要となり、その方法としては、レンズ内圧力を調整する方法と露光波長を調整する方法がある。

これからのステップは、基板状態によりアライメント方式を使い分けるために二種類以上のアライメント・センサーを有すること、倍率制御・非線形成分補正がイン・サイチューで可能であることが要求される。

3) 露光領域

今後、チップサイズの増大に伴って、露光領域の拡大が必要になると考えられるが、現在のステップ方式（レンズ投影/ステップ移動）で露光領域を拡大した場合、低ディストーション・レンズの製造が非常に困難になる。一方、露光領域をスリット状にし、レチクルとウエハを同時にスキャンさせて露光するスキャン方式は露光領域の拡大が容易である。

現在考えられているレンズ投影/ステップ移動、レンズ投影/スキャン移動、ミラー投影/スキャン移動の3方式の比較を表7.4に示す。各方式ともに一長一短あるが、当分の間は信頼性・安定性・スループットの面で現在のところ圧倒的に有利なレンズ投影/ステップ移動方式が主流であると考えられる。将来的には広フィールド化・短波長化に有利なミラー投影/スキャン移動方式が有望であると思われる。

表7.4 レンズ・スキャンとミラー・スキャンの比較

方式 (光学/機械)	Lens/Step	Lens/Scan	Mirror/Scan
露光形状	正方形	長方形	長方形
露光領域の拡大	不利	短辺のみ制限される	短辺のみ制限される
NA可変	有利	有利	不利
ディストーションの低減	不利	有利	有利
色収差	大	大	小
光源帯域幅	狭	狭	広
短波長化	不利	不利	有利
移動体	ウエハ	ウエハ, レチクル	ウエハ, レチクル
局所的レベリング補正	不利	有利	有利
スループットの露光量依存性	小	大	大
Mix & Match	不利	有利	有利
システム安定化	有利	不利	不利

4) レジスト・プロセス

化学増幅型レジストの解像性を劣化させる原因としてレジスト周辺のアミン系塩基物質の影響による露光部の酸の失活が報告されている。レジスト周辺の環境はオーバーコートの使用や基板の表面処理をすることで改善可能である。

またレジスト・パターンの微細化に伴いアスペクト比が高くなり、現像後にレジスト・パターン倒れが発生し、単層レジストの解像限界を制限してしまうことが報告されている。現像後のレジスト・パターン倒れはリンス液の表面張力を小さくすることである程度まで抑制できるが、アスペクト比が5を超える場合にはドライ現像が必要になると思われる。

5) コスト

簡単に試算したところ、現時点でのKrFエキシマレーザー・リソグラフィ工程のコストはi線リソグラフィ工程の約2倍であることが分かった。レジストコスト、KrFエキシマレーザーのランニングコストの低減を実現することで将来的には1.5倍程度に押さえることが可能であり、KrFエキシマレーザー・リソグラフィが工業化される日も近いと考える。

第8章 ArFエキシマレーザー露光による サブクォータミクロン・パターン微細加工

8.1 緒言

半導体産業はコンピュータのダウンサイジングを加速し、もはや民生と産業の区分けがなくなってきた。また、生活様式の多様化も相まってAV分野と情報通信分野が合流した、非常に大きな市場規模を創成するマルチメディア産業の到来が数年後に予測される。その牽引者はマイクロプロセッサをコアとしたシステム・オンシリコンと呼称するさらに大規模なULSIである。その実現には、半導体産業が邁進してきた微細加工のさらなる追求が必要である。具体的加工寸法は $0.25\mu\text{m}$ 以下というサブクォータミクロン以下のレベルが要求されてこよう。

大規模集積化を実現している原動力の1つは縮小投影露光（ステッパー）を核とする光リソグラフィ技術による微細加工技術の進展である。光リソグラフィ技術の解像性向上の主要因は、ステッパーの高NA化、短波長化およびレジスト解像性向上があげられる。現在ではg線（波長436nm）ステッパーでハーフミクロン、i線（波長365nm）で0.4ミクロン、KrF（波長248nm）エキシマ光でクォータミクロンの微細加工技術が開発されている。ArF（波長193nm）エキシマレーザー・リソグラフィはサブクォータミクロン・パターンを形成できる能力がある光リソグラフィ技術とされ、ArFエキシマ露光に対する期待は大きい⁸⁻¹⁾。

本章では、ArFエキシマレーザー・リソグラフィの可能性を見極めるため、球面レンズおよび市販レジストの評価を行ない^{8-2~6)}、最後にArFエキシマレーザー・リソグラフィ技術を実現化するため、高透明な非球面レンズおよび化学増幅型ポジ型レジストを提案し、プロセス評価を行なった^{8-7~10)}。

本章の構成は「緒言」に続き、「ArFエキシマレーザー露光の可能性」「ArFエキシマレーザー非球面レンズ露光技術」「ArFエキシマレーザー化学増幅型レジスト」にわけて論じ、最後に「結言」とする。

8.2 ArFエキシマレーザー露光の可能性

8.2.1 はじめに

本章では、ArFエキシマレーザー・リソグラフィの可能性を検討するために、1/5の球面レンズを基本とした屈折縮小レンズを登載した投影システムを開発し試作した^{8-2,3)}ので論ずる。

そして、各種のレジストのパターン形成を試作したArFエキシマレーザー屈折投影光学システムにより評価することにより、その技術的可能性を探る。

8.2.3 ArFエキシマレーザー・ステッパーのシステム・コンセプト

1985年にMITのEhrichら⁸⁻¹⁰⁾により、初めて投影型のArFエキシマレーザーを用いたリソグラフィが報告された（図8.1）。彼らの光学系は反射投影型のもので、高解像度を得ているが、元来反射投影光学系では、実用的な広フィールドを実現するのは光学設計が難しいとされている⁸⁻¹¹⁾。

そこで、広フィールドの実現性とArFエキシマレーザー・リソグラフィの可能性を検討するため、新しくKrFと同様な単色レンズを用いた屈折投影光学系の研究を開発した。仕様を表8.1に示した。

ArFエキシマレーザーでは、KrFに比べて非常に深刻な技術的問題がある。例えば、レンズ材料、レンズ設計、ArFレーザー光の狭帯域化、ArFレーザー光の大気中での吸収の問題とレジスト材料の問題が挙げられる。

試作したArFエキシマレーザー投影システムにおいては、単色投影レンズのOTF特性を維持するため可

能な限りレーザーのスペクトル線幅を狭帯域化する方式を選択した。

図8.2に、ArFエキシマレーザー投影実験装置の写真を示す。この装置は、狭帯域化されたArFエキシマレーザー光源、コンデンサレンズ、インテグレータ、球面単色屈折投影縮小レンズとX-Y-Z-θステージからなっている。

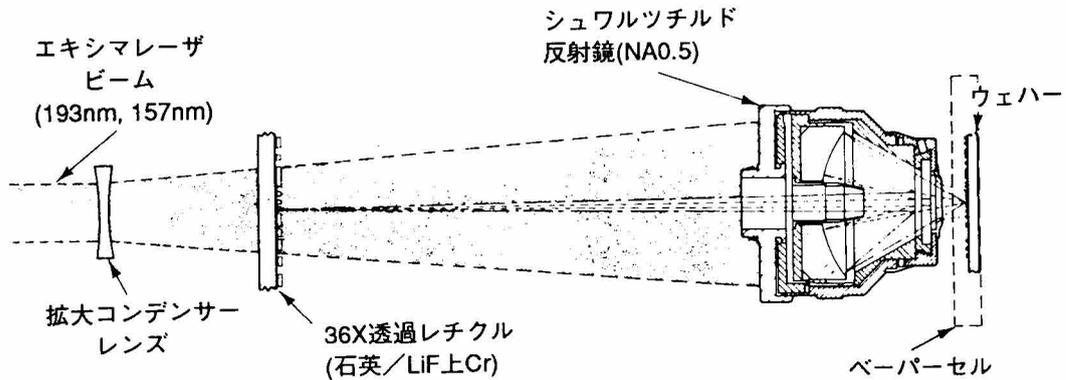
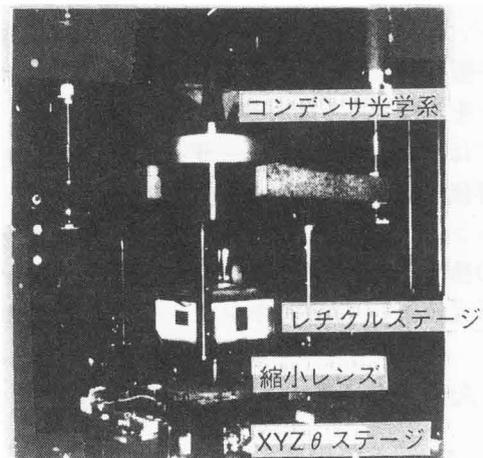


図8.1 Ehrichの提案したArF反射投影光学系⁸⁻¹⁰⁾

表8.1 ArF屈折投影光学系の仕様

NA	0.4
縮小比	1/5
露光サイズ	1mm \square
露光パワー	10mJ/cm ²
スペクトラル幅 FWHM	<10pm



チャンバー内を窒素ガスにより
充填することにより、光路は
ほぼ完全にカバーされている。

図8.2 ArFエキシマレーザー投影実験装置の写真

8.2.3 光学システム

ビーム光路はArFの大気中の酸素による吸収を避けるため、窒素パーズを施した。

設置された単色投影レンズは、5枚の合成石英からなる球面レンズからなる。レンズスペックは、NA0.4、縮小率5で露光面積は1mm角である。小面積であるのは、本研究が可能性研究であるためで、大面積も改良されたレンズで、非球面レンズ等の採用により可能であると考えている。

図8.3は、ArFエキシマレーザーの10pmおよび50pmでの空間周波数とOTF値とのシミュレーション結果を示した。図8.3より0.25 μ m L&Sパターンである空間周波数2000本/mmを解像するOTF値0.4以上は、スペクトル線幅を10pm FWHM以下に狭帯域化する必要がある事がわかる。

投影レンズに使用した合成石英のArFエキシマレーザー波長での屈折率は、レンズ設計上非常に重要で、我々は石英プリズムの最小偏角と頂角を測定することで行った。測定波長は、低圧水銀ランプ、ホロカソードランプそしてArFエキシマレーザー光を使用した。結果として、23 $^{\circ}$ Cの室温で1.55902の値を得た。この測定値は、レンズ設計とOTFシミュレーションに使用した。

8.2.4 狭帯域化ArFエキシマレーザー

単色投影レンズに適応させるため、本研究ではArFエキシマレーザーの狭帯域化に対して2種類の方式を検討した。1つはエタロンそしてもう1つはグレーティング方式である。結果としては、グレーティング方式よりもエタロン方式の方が狭帯域化が優れた。得られたパワーも、エタロン方式の方が上回った。

図8.4にArFエキシマレーザーの自然発振および37 μm のエアギャップの内部エタロンのそれぞれのスペクトラムを示した。得られた狭帯域スペクトラムはシャープで10pm FWHM以下であった。

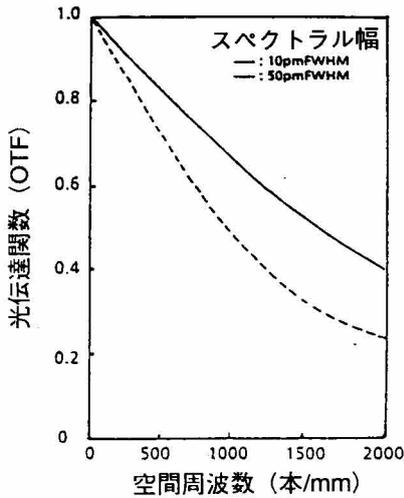


図8.3 球面レンズのArFエキシマレーザーの狭帯域幅とOTF特性

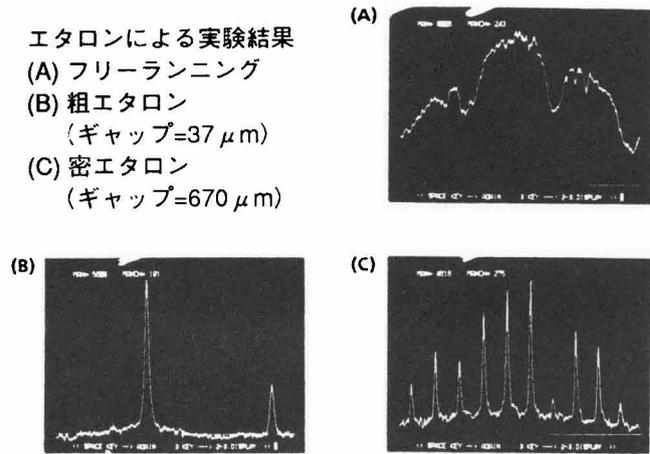


図8.4 ArFエキシマレーザーの実測スペクトラム

8.2.5 パターン形成

実験には、市販のDUVレジストである、PMGI、MP2400（ともにShipley社製）そして本研究でKrFエキシマレーザー用に開発したSTAR-P、さらにEBレジストとし、PMMA（東京応化社製）、FBM（東レー社製）、ER-7（Shipley社製）を評価した。

ほとんどのレジストにおいて、フォト・アブレーションが発生した。図8.5にPMMAとSTAR-Pの紫外線分光特性を示した。図よりベンゼン環を有するSTAR-Pのようなレジストは200nm付近の強い吸収を持つことがわかる。一方、PMMAにおいては良好な透明度があり、150パルス程度でパターン形成が可能となった。

図8.6にArFエキシマレーザー屈折投影実験装置によるパターン転写例を示した。0.3 μm 以下のパターンがスペックルもなく、試作したArFエキシマレーザー投影装置により得られた。パターンの一部にブリッジが発生しているが、レーザーパワーの不均一性による相反則不軌によるものと考えられる。

現状では、最適なレジストがないものの、0.25 μm のパターンが得られており、ArFエキシマレーザー・リソグラフィの可能性が実証されていると考えられる。

今後、ArFエキシマレーザー・リソグラフィでの活発なる研究がなされると思われる。

新しく開発した単色屈折レンズを搭載したArFエキシマレーザー投影システムにより、0.25 μm のパターンの形成に成功した。

本研究では、ArFエキシマレーザー・リソグラフィの可能性をKrFエキシマレーザー・リソグラフィシステムの狭帯域手法と同様なアプローチで達成できることを証明した。

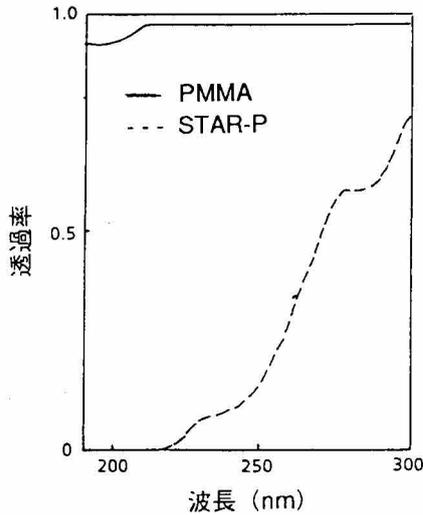


図8.5 既存レジストの紫外分光特性

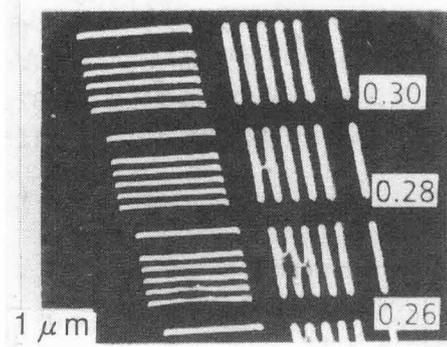


図8.6 ArFエキシマレーザー対応球面レンズによる0.25 μm L&SパターンのSEM写真

8.3 ArFエキシマレーザー非球面レンズ露光技術

8.3.1 はじめに

屈折投影光学系のステッパー技術構築において、一般的に要求される高解像度化、大チップ化の課題以外に、193nmの波長での、雰囲気、レンズ、レジストによる光吸収が最も重要な課題となる。現在ステッパーの投影レンズにはガウス変型タイプの球面レンズが用いられているが、その光学素子の硝材である合成石英の光吸収が200nm以下の波長にて大きくなり、レンズ硝材全体で光の透過率が著しく減少する。

そこで本研究ではレンズ総肉厚を低減し、レンズを透過率を向上するために非球面レンズを用いた投影レンズを考案した⁸⁻⁴⁾。非球面レンズ加工は各種の方法が研究されているが、ArFエキシマレーザー非球面投影レンズを実現するために要求される非球面加工形状精度 $\lambda/50$ 以下の超精密オブテックス加工技術が確立されていないのが現状である。そこで本章では偏心マイクロ・ポリッシング方法を用いたオンマシン計測研磨装置と、本装置による非球面加工形状精度 $\lambda/50$ 以下の超精密オブテックス加工の実現の可能性について論ずる⁸⁻⁹⁾。さらに、KrFエキシマレーザー・リソグラフィで採用した化学増幅原理をArFエキシマレーザー波長に透明な材料を明らかにし、基本的なポジ型レジストを合成し評価を行った⁸⁻⁸⁾。

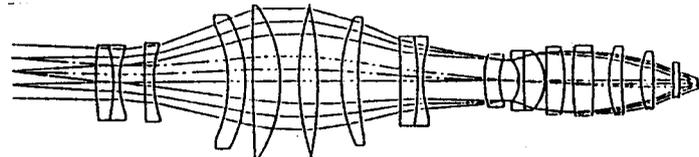
8.3.2 ArFエキシマレーザー用非球面投影レンズ

従来からのステッパーの投影光学系はガウス型をベースにした屈折光学系で構成されている。そこでガウス型をベースにした屈折光学系でArFエキシマレーザー投影光学系が構成可能かについて検討を行った。図8.7にNA(レンズ開口数):0.45、15mm角の露光領域を持つ投影光学系についての設計図を示す。このレンズは、17枚構成でトータルのレンズ肉厚が30cmある組レンズとなり、レンズ透過率が約36%に減少してしまい、レンズの熱吸収による歪において実用的でないと思われる。

そこで、投影光学系の透過率向上を目的としてカタジ・オプトリック光学系を基本系とするArFエキシマ非球面投影レンズを設計した。ArFエキシマ投影レンズの仕様を表8.2に示す。非球面面数は非球面レンズの生産性、コストを考慮して3面以下とした。レンズの全長を表すOID(マスクウエハ間距離)および露光領域は現在の縮小露光装置の大きさ、投影レンズ倍率制御性、非球面創成研磨加工機の最大加工径(200mm ϕ)を考慮してそれぞれ1m前後、12.5mm角とした。また総レンズ肉厚を減らし、レンズの透過率を60%以上に向上させるため、レンズ構成枚数は7枚以下とした。図8.8に非球面5面を含む7枚構成のNA:0.45、15mm角の単色レンズの設計図を示す。図8.9のインコヒーレント正弦波のMTFに示すように全露

光領域にわたりほぼ無収差、レンズ総肉厚が16cm、光透過率が約60%の非球面単色投影レンズが設計できた。

この光学系の実現性を確かめるために、現状の技術として可能なレーザー光源の波長半値幅0.1pm、非球面形状精度 $\lambda/10$ ($\lambda=632.8\text{nm}$)にて2000本/mmでMTF値を40%以上に維持するよう、露光領域を1mm角、NA=0.45、非球面面数を1面とした6枚構成の小型単色レンズを設計、試作し露光実験を行った。図8.10に0.23から0.25 μm L&SパターンのSEM写真を示す。用いたレジストは0.5 μm 厚のPMMAであり、感度は約1.5J/cm²であった。NA=0.45の非球面レンズを用いて、0.24 μm まで良好なパターンが得られるのが実証された。



15mm \square 露光サイズ、0.45NA 17枚構成
 ダブルガルジ型1/5縮小レンズ
 総レンズ肉厚30cm

図8.7 従来型の球面レンズから構成された投影レンズの設計図

表8.2 ArFエキシマレーザー非球面投影レンズの仕様

露光波長	193nm
NA	0.45
縮小倍率	1/5
露光領域	12.5mm \square
レンズ材質	合成石英
レンズ枚数	7枚
OID	1m前後
非球面	3枚以下
加工面精度	20nm以下

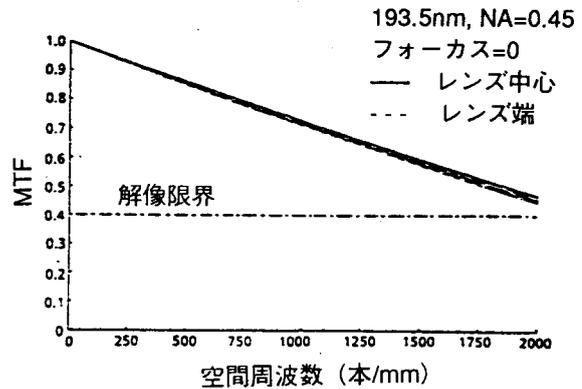
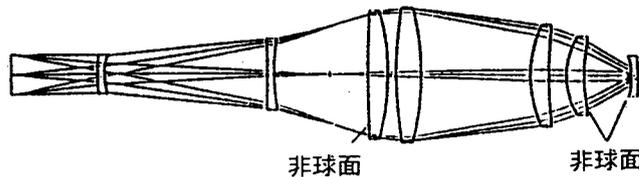


図8.9 MTFの空間周波数依存性



15mm \square 露光サイズ、0.45NA 7枚構成
 総レンズ肉厚16cm
 レンズ透過率60%以上

図8.8 非球面を用いた設計した投影レンズの設計図

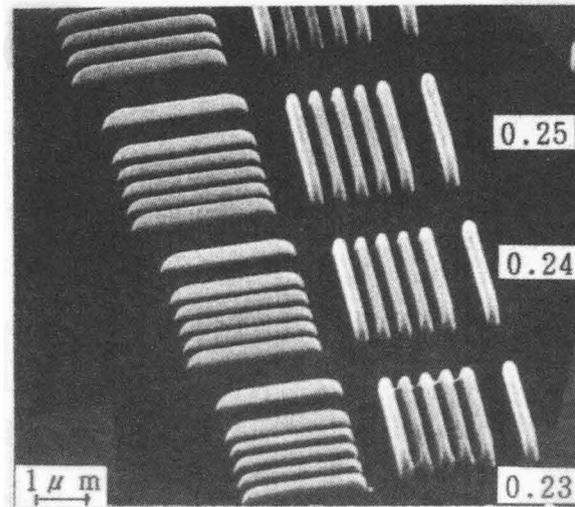


図8.10 試作した非球面投影レンズを用いて得られたレジストパターンのSEM写真

8.3.3 非球面投影レンズ加工

非球面光学素子の表面形状精度はfigure (f)、accuracy (a)、smoothness (s) なる3つのパラメータと表面荒さによって表される。(f)は各点の測定値から最小2乗法で求めた誤差近似非球面との差、(a)は各点と誤差近似非球面との差、(s)は誤差非球面形状の傾きを示す。今回設計したArFエキシマレーザー投影レンズでは最大非球面量は0.67mm、(a)は $\lambda/50$ 以下、曲率半径および中心肉厚交差は $\pm 5 \mu\text{m}$ 以内の高精度な非球面レンズ加工が要求される。

(1) 非球面レンズ加工プロセス

非球面レンズ加工プロセスを図8.11に示す。加工プロセスは、プレス硝材の表裏を球面研削し、片面球面を所定の曲率半径に研削研磨したのち、芯取り加工を行う。このとき、片面は研削加工面であるため、メカニカルな芯出し方法であるベル・クランプ動作については偏心精度確保のための配慮が必要である。次に、非球面研削を行い、最終仕上げとして非球面研磨を行う。非球面研削には、6軸補正による超砥粒ダイヤモンド砥石を2枚装着した高精度NC非球面加工装置を用いた⁸⁻¹²⁾。非球面研磨は創成研削加工で仕上げられた非球面形状精度を確保し、光学仕上げ面を得るために、図8.12に示すように偏心弾性体ポリシヤによるオンマシン計測研磨装置を用いた。図8.13にはワークが静止時の偏心弾性体ポリシヤによる研磨特性を示す。

(2) 非球面形状計測

創成研磨において、形状計測精度は加工に必要な制御情報を与えるという点で非常に重要である。本オンマシン計測加工装置では、3次元の非球面形状計測方法として被験面に周波数安定化レーザー光を直接集光し、スポット走査による光ヘテロダイン法⁸⁻¹³⁾をもちいている。本非球面レンズの形状計測には被検レンズの反射率低下による測定精度劣化の影響をなくすために、探触子として原子間力プローブが用いられている。

図8.14に本計測ユニットの構成図を示す。周波数F1とF2で発振するレーザー光はそれぞれ参照ミラーと非測定面で反射され光検出器上で重ね合わされる。得られるビート信号を積分して被測定面のZ座標を求める。Z軸は、被測定面へレーザー光を集光するために半導体レーザーを利用してフォーカス・サーボをかけている。被球面が傾いた場合に傾きサーボモータでサーボレンズを光軸に垂直にシフトさせることで、被測定面に被験光を垂直に入射させ、常に参照光と干渉できるようにしている。測定範囲は $80 \times 200 \times 40 \text{mm}^3$ であり、 $0.01 \sim 0.02 \mu\text{m}$ の測定精度が得られる。

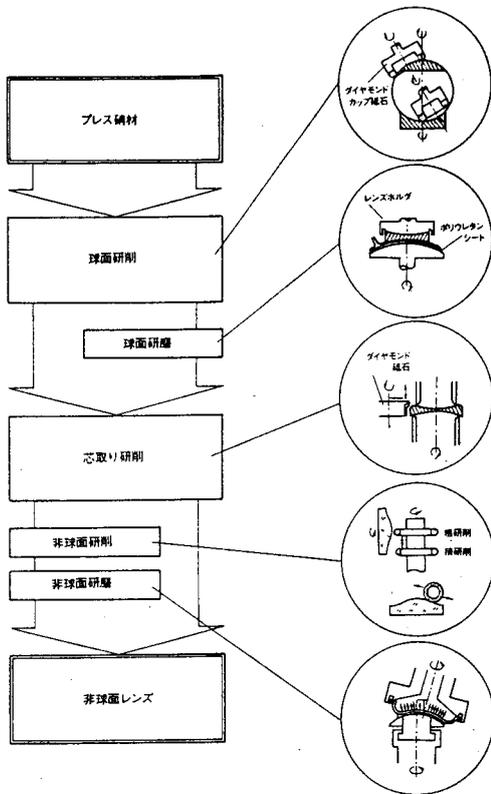


図8.11 非球面加工プロセス (片面)

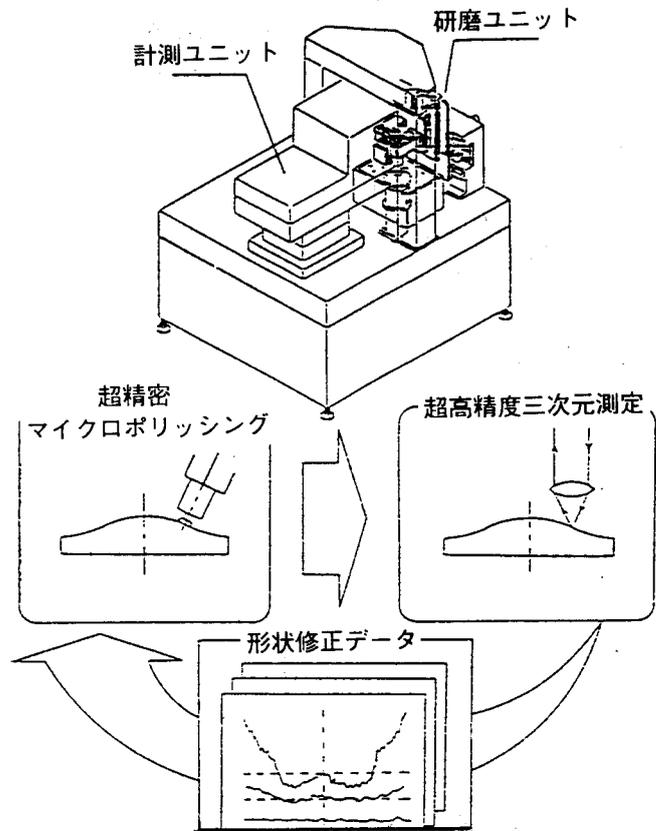


図8.12 オンマシン計測非球面研磨装置

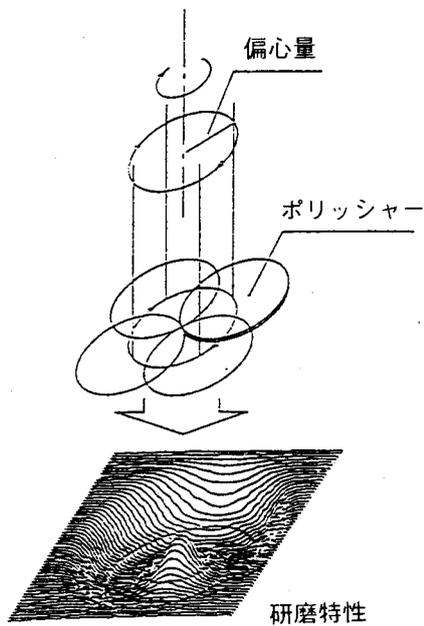


図8.13 偏心マイクロポリッシャの運動およびポリッシング・パターン

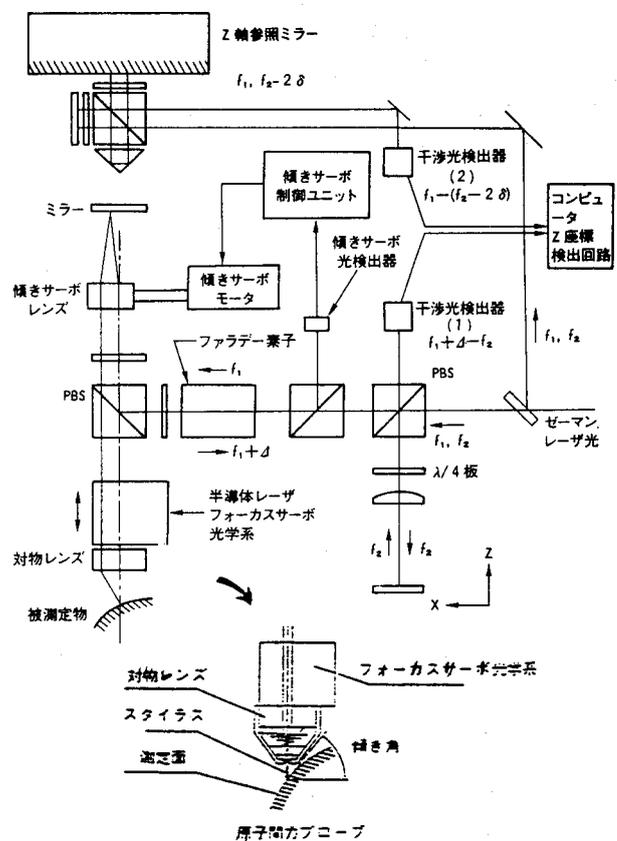


図8.14 オンマシン計測ユニットZ座標測定光学系 (光ヘテロダイン法)

(3) 非球面形状研磨

非球面研磨加工においても、種々の研磨方式が行われている⁸⁻¹⁴。創成皿研磨方式は、特殊皿とポリシヤを用いており、特別な機械を必要とせず容易に加工できるが、不連続な段差が生じやすく、高精度な加工には不向きである⁸⁻¹⁵。小さな研磨工具を用いた形状軌跡をNC制御するスモールツール方式は、ポイント研磨となるため、加工時間が長い欠点がある⁸⁻¹⁶。本研究では、大面積の高速高精度な研磨加工を実現するために、弾性体ポリシヤによる均等研磨方式について検討を行った。

研磨装置の仕様を表8.3に、また加工部の構成を図8.15に示す。弾性体と同じく弾性体ポリシヤを貼り付け、圧縮空気より膨張させたレンズ面に均等に圧力をかける。また、レンズ面上の各点において研磨相対速度が一定になるようレンズとポリシヤとの位置関係をX・θ方向に移動させて配置する。レンズクランプは着脱を容易にするため吸着方式を採用し、レンズの端だれを防止するために、レンズ外周にダミー工具を用いている。

ワークに対して、小さな研磨工具を用いた局所的な形状を創成研磨するには、プレストンの経験則から圧力・速度・滞留時間の3要素の制御が考えられる。修正研磨量は、まず、ワーク形状をオンマシン計測部で測定し、目標除去形状を求める。この目標除去形状と予め測定した単位除去形状から、図8.16内のプレストンの式に示すように一定の拘束条件下での滞留時間分布を求める。

試料を回転した場合のポリッシングパターンは、次式によってもとめられる⁸⁻¹⁷。

$$\frac{\partial}{\partial t}l(r) = \frac{1}{\pi^2} \int_0^\alpha \int_0^\alpha (s^2 w_1^2 + r^2 w_2^2 - 2rsw_1 w_2 \cos \theta)^{1/2} d\theta d\phi$$

$$s = (r^2 + D^2 - 2rD \cos \phi)^{1/2} \tag{8.1}$$

ただし、αの値は、s < |u-d/2| かつ u ≤ d/2 のとき、α = π、s < |u-d/2| かつ u > d/2 のとき、α = 0、|u-d/2| ≤ s ≤ |u+d/2| のとき、α = cos⁻¹ [{s²+u²- (d/2)² } / 2su]、s > |u+d/2| のとき、α = 0である。また、同様にβの値は、r < |u+d/2-D| かつ D ≤ U+d/2 のとき、β = π、r < |u+d/2-D|、かつ D > u+d/2 のとき、β = 0、|u+d/2-D| ≤ r ≤ |u+d/2+D| のとき、β = cos⁻¹ [{r²+D²- (u+d/2)² } / 2rD]、r > |u+d/2+D| のときβ = 0である。

図8.17に理論式および実験から得られたポリッシング・パターンおよび研磨加工条件を示す。ほぼ理論通りの研磨が得られていることが分かる。

図8.18、19に形状修正研磨されて獲られたArF非球面レンズの形状測定データを示す。研削および鏡面加工後、オンマシン非球面創成研磨装置で段階的に形状修正がなされ最終的に図8.20に示すようにλ/10程度の非球面形状精度および非球面レンズ表面荒さ5nm以下が得られた。表面荒さ測定にはWYKO社製TOPO-3Dを用いた。非球面形状精度0.02μm以下を実現するため、より一層の研磨パターンの最適化とポリシヤ耐久性、測定再現性の向上が必要である。

表8.3 研磨装置の仕様

項目	内容
レンズ軸 駆動	DC スピードコントロールモータ
回転数	~600rpm
回転精度	10μm 以下
X 方向ストローク	±30mm
θ 方向ストローク	- 5°~50°
ポリシヤ軸 駆動	DC スピードコントロールモータ
回転数	~600rpm
回転精度	10μm 以下
研磨圧 押付け圧力	0.1~1.5kgf/cm ²
ポリシヤ内圧	0.1~1 kgf/cm ²
研磨量の均一性	0.05μm/0.5μm (10%)
研磨速度	1 μm/min

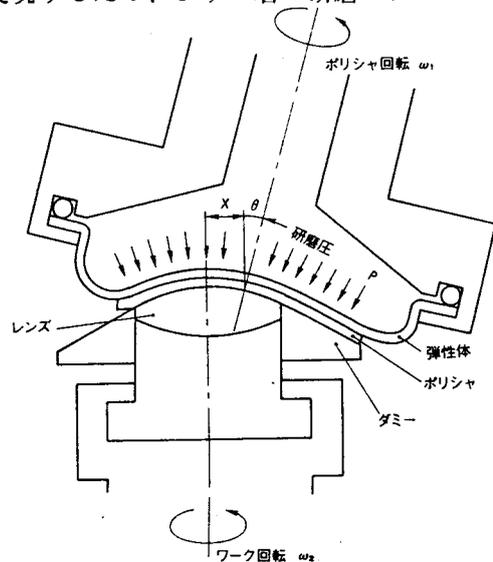


図8.15 均等研磨方式の構成

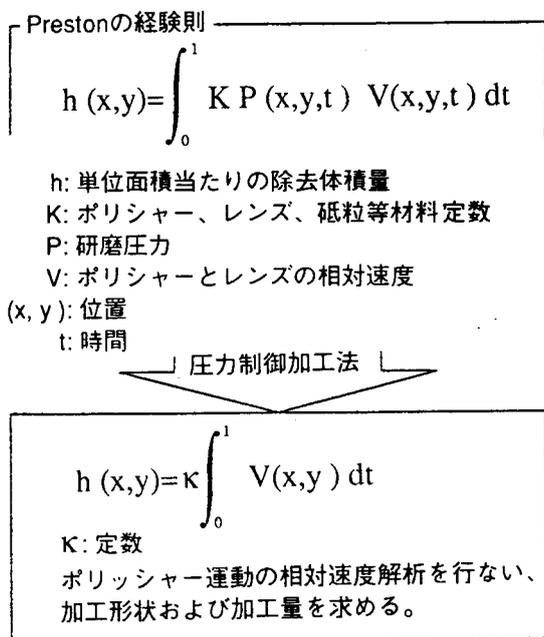
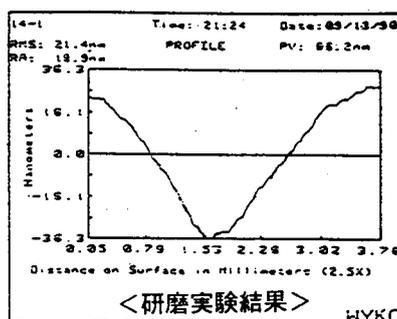
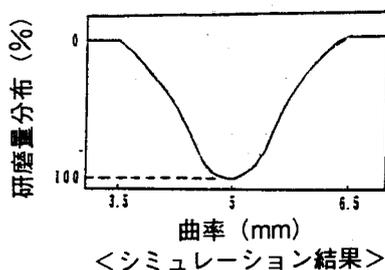


図8.16 修正研磨加工のコンセプト



条件
 ポリシャー径 ; φ2mm
 偏心量 ; 0.5mm
 ポリシャー回転数; 120rpm
 レンズ回転数 ; 50rpm

図8.17 ポリッシング・パターン比較

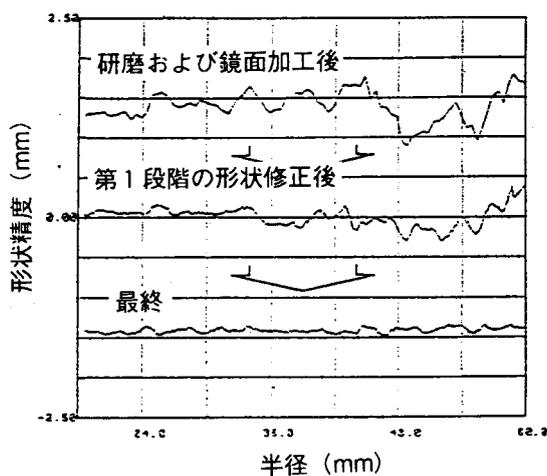


図8.18 非球面レンズ修正研磨加工形状変化

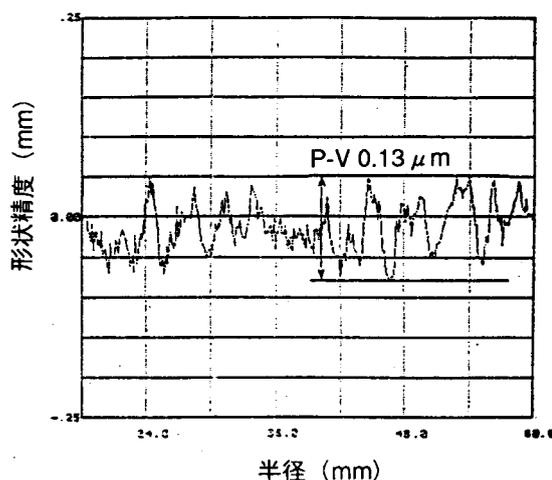


図8.19 非球面レンズ形状精度

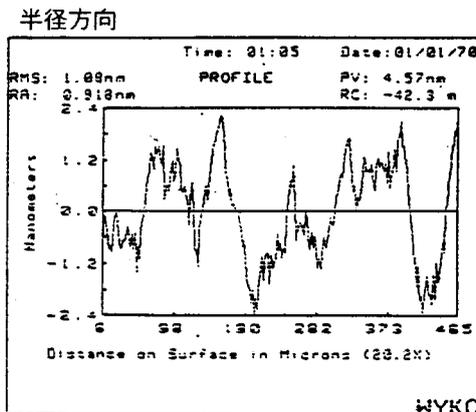
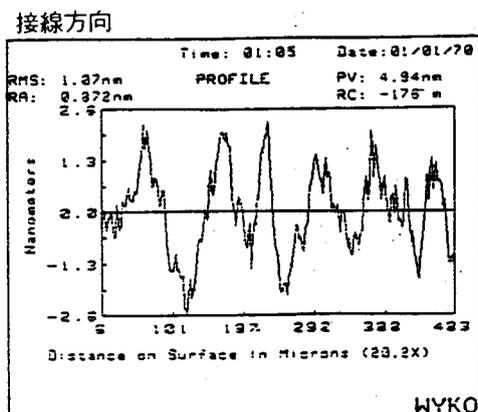


図8.20 非球面レンズ表面粗さ

8.4 ArFエキシマレーザー化学増幅型レジスト

KrFエキシマレーザー・リソグラフィ対応のレジストにおける課題はレジスト感度であったことを、前章では述べている。このレジスト感度を改善し実用化の最も大きいのが化学増幅型レジストである。化学増幅（Chemical Amplification）はIBMのIto, Willsonら⁸⁻¹⁸⁾によって、命名され酸触媒反応を利用したものである。この化学増幅型レジストは酸触媒反応を利用するため、吸収光子1個にたいし起こる光化学反応の生成物の分子数、つまり量子収率がカスケード的に反応を引き起こすために結果として1以上となり、高感度化がはかれる。この化学増幅のコンセプトは、さらにポリマーの吸収の激しくなるArF（193nm）帯域には、大きく有効である。

化学増幅型レジストは、従来レジストよりも化学反応過程が多い。まず、光によって酸を発生し、現像前にレジストをポストバークし、発生した酸と熱によってポリマーを分解するためある程度透明性の悪さをカバーすることとなり、結果として良好なパターン・プロファイルとともに微細パターンも得られ易い。従って、化学増幅型レジストは、酸発生剤、酸に反応して溶解性が変化するポリマとからなる。

図8.21には開発したArFエキシマレーザー対応の化学増幅型ポジレジストの化学構造を示した⁸⁻⁸⁾。極力、短波長であるArF光の分子中内での吸収を避けるため、芳香族基を除いたポリノルボニル・メタクリレート樹脂と酸発生剤としての脂肪族スルフォニル化合物からなる化学増幅型である。図8.22にはそのパターン転写例のSEM写真を示した。波長限界付近の0.2 μ mのパターンが形成されArFエキシマレーザー・リソグラフィのポテンシャルが実証される。

一方、ArFエキシマレーザー・リソグラフィにおける短波長化の弊害として焦点深度の低下が考えられる。また、従来のウェット現像処理時におけるリンス液の蒸発の際の表面張力によるパターン倒れが、微細化に伴う高アスペクト比化により問題となる⁸⁻¹⁹⁾。そこで、表面解像プロセスが有望とされる。図8.23に次々世代の表層プロセスのコンセプトを示した。表面解像プロセスは焦点深度の向上と共に、近接効果、多重干渉効果および反射を抑制することができる。最終の現像工程での技術的ブレークスルが望まれる。

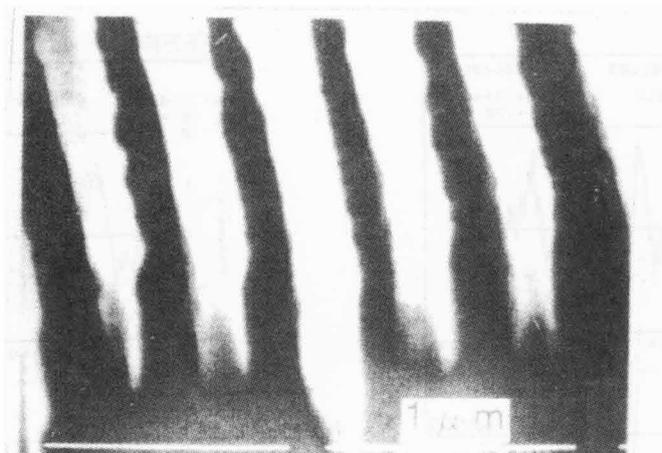
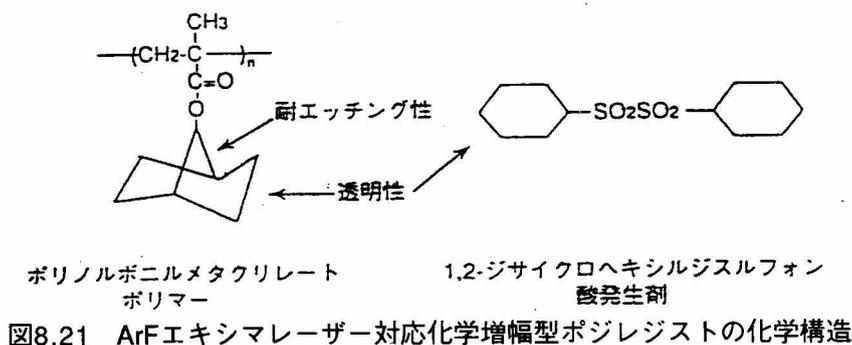


図8.22 開発したArFエキシマレーザー対応化学増幅型ポジレジスト0.2 μ mL&SパターンのSEM写真

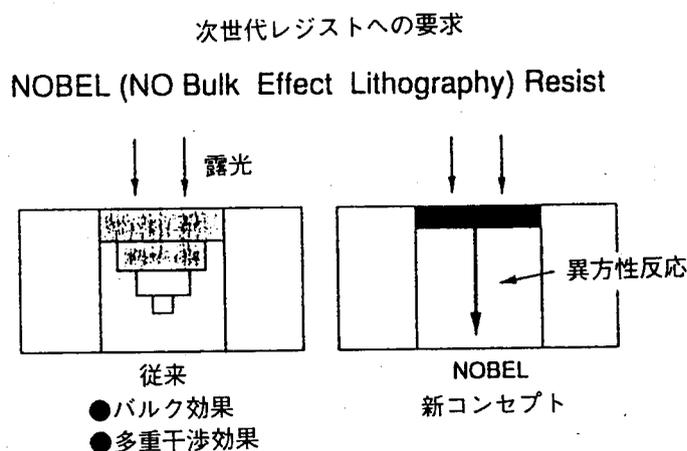


図8.23 表面解像プロセスのコンセプト

8.5 結言

ArFエキシマレーザー・リソグラフィの可能性を、露光用の球面レンズと狭帯域化ArFエキシマレーザーで、既存のレジストに露光実験を行ったところ、 $0.25\mu\text{m}$ 以下の可能性を見極めた。

さらに、ArFエキシマレーザー縮小投影レンズとして、レンズの透過率を向上するために非球面レンズを有する投影レンズ光学系を提案した。本非球面投影レンズを実現するには、 $\lambda/50$ 以下の高精度非球面レンズ加工が要求されており、本研究では偏心マイクロ・ポリッシング方法を用いたオンマシン計測研磨装置を試作した。本オンマシン計測研磨装置により非球面形状精度 $\lambda/10$ 以下、表面荒さ 5nm 以下が達成できたが、非球面形状精度 $\lambda/50$ 以下を実現するために、研磨パターンの最適化とポリシャー耐久性、測定再現性の向上が必要である。

さらに、ArF光に透明性の高い芳香族基を除いたポリノルボニル・メタクリレート樹脂と酸発生剤としての脂肪族スルフォニル化合物からなる化学増幅型ポジレジストを合成しサブクォータミクロン・パターン形成の結果を得た。

最後に、ArFエキシマレーザーでは、KrFに比べて未だ実用化において越えなければならない技術的問題が多い。例えば、ArFエキシマレーザー光の長寿命化、ArFエキシマレーザー光の大気中での吸収の問題とレジスト材料の高性能化の問題等が挙げられ、未だ研究初期段階である。今後、ArFエキシマレーザー・リソグラフィ分野での活発なる研究により、大規模なシステム・オンチップ・ロジックや1G DRAM以上に対応するサブクォータミクロン微細加工の実用化が期待される。

第9章 次々世代リソグラフィによる超微細加工

9.1 緒言

本章では、21世紀を睨んだリソグラフィ技術の微細加工はどうあるべきか論じる。第1章序論でも述べたが、将来の超LSIの半導体製造技術は現状の延長線では、その経済性は勿論のこと、科学的見地から分子、原子レベルのゆらぎと装置機械の稼働安定性を無視できなくなるのは明白であり、通用し難くなる。微細加工技術分野、とりわけリソグラフィ技術も、さらに細部に渡り科学的究明をし、現象をプロセス、装置の両面からモデリングしていかなければならない。一方、半導体集積度は微細加工の進展とともに設計も複雑多岐となり、システムが巨大化してこよう。従って、製造技術も設計サイドにかなりの範囲にデザイン・インしてゆかないと、本当の意味のシステム・オンシリコンの完成はありえない。本来、リソグラフィ技術は設計デザインを忠実に再現することに注力してきたが、前述のゆらぎ、つまり、バラツキ増大と複雑化に対応していく事が次々世代微細加工の最も注力すべき道となるであろう^{9.1)}。

そこで、この将来を考慮し、本章ではリソグラフィの最も定量化されていないウェット現像をドライ化したシリレーションの研究^{9.2,3)}と、設計データを忠実に再現するためリソグラフィ・シミュレーションをベースに、リソグラフィ微細加工結果を予測し設計データを修正する研究^{9.4,5)}について論ずる。

本章の研究は、まだ実用領域までに至っていないが、今後の微細化限界の追及とともに今後の新しい研究指針となるものである。

本章の構成は、「緒言」に続き、「シリレーション・プロセス」「リソグラフィ・シミュレーションによるパターン補正」を述べ、最後に「展望」を記す。

9.2 シリレーション・プロセス

9.2.1 はじめに

シリレーション（シリル化）プロセス^{9.6)}は、表面解像反応を利用したリソグラフィ技術であり、解像性、焦点深度の改善に有効な技術である。しかも、現像は酸素プラズマでドライ化するため、物理的制御が可能である。そこで、本研究ではKrFエキシマレーザー・リソグラフィにシリル化プロセスを適用して、0.2 μm 以下のリソグラフィの研究を検討した。シリル化前ベークとシリル化時ベークのプロセス条件の研究を行って、解像性とマスク・リニアリティについて検討したので論ずる。

半導体集積回路の集積度の増加に伴い、0.2 μm 以下の微細パターン形成技術が必要となってきた。このような微細パターン形成が可能な技術として、位相シフト法^{9.7)}、超解像技術^{9.8)}、シリル化プロセスなどが考えられる。

本研究では、開発したシリル化プロセスを、位相シフト法あるいは超解像技術と組み合わせることによって、解像性と焦点深度がより改善される結果を述べる。本章では、シリル化プロセスのプロセス余裕度（露光量余裕度、フォーカス余裕度）と解像性について議論し、シリル化プロセスとレベンソン形位相シフト法との組合せによりサブクォータミクロンの微細パターンを十分なフォーカス余裕度で形成できることを明らかにする。

9.2.2 実験方法

表9.1に実験条件を示す。Si基板にレジストを膜厚1.25 μm 塗布し、KrFエキシマレーザー・ステツパ

(NA=0.42) を用いて露光した。露光後、シリル化前ベークを行った後、加熱しながらシリル化を行い、O₂ RIEによりドライ現像を行った(図9.1)。本実験では、シリル化前ベークとシリル化時ベークの感度、パターン形状に及ぼす効果を調べ、最適化した。シリレーション・プロセスは、露光部あるいは未露光部に選択的にレジスト表面の露光反応による分子構造の変化に対し、シラノール化合物雰囲気(気相^{9,9)}、あるいは液相状態^{9,10,11)}で反応させることにより、Si層を表面に数百nmの厚さで選択的に形成するものである。本研究の実験では、最もi線リソグラフィで研究報告の多い気相シリレーション法をKrFエキシマレーザー・リソグラフィに検討し、シリル化剤にはヘキサメチル・ジシラザン(HMDS)を使用した。

表9.1 シリレーション・プロセスの実験条件

レジスト	PLASMASK 301U
レジスト膜厚	1 μm
露光	KrFエキシマ (NA0.42)
プリシリレーションベーク	160°C 180sec
シリレーション	ベーパーHMDS 160°C 180sec
ドライ現像	酸素RIE (O ₂ 40sccm, 1.5Pa, 900W)

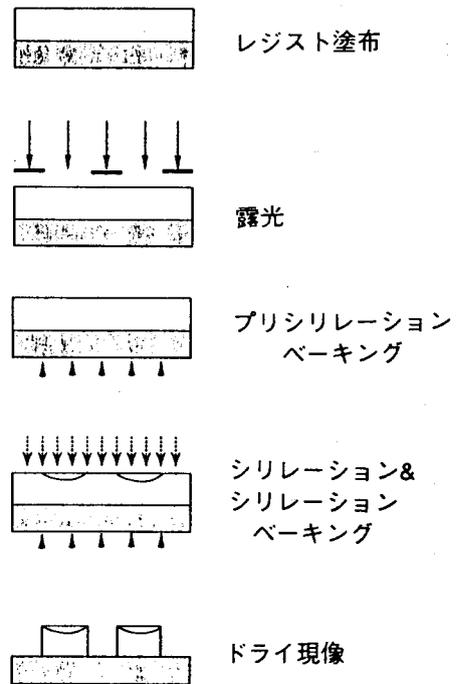


図9.1 シリレーション・プロセスフロー

9.2.3 シリル化実験結果

(1) シリル化前ベークの感度、パターン形状に及ぼす効果

図9.2に、シリル化前ベーク温度によるパターン形状の影響を示す。ここでは、パターン形状の影響をパターン角度で表した。図より、シリル化前ベーク温度が160°C以上で、垂直なパターン形状が得られることがわかる。図9.3に、シリル化前ベーク温度による感度の影響を示す。図より、シリル化前ベーク温度を高くすると、感度が悪くなることがわかる。以上より、シリル化前ベークは、レジスト未露光部の架橋を促し、パターンのコントラスト(パターン角度)の向上に貢献するが、過度の高温は、露光部の架橋も引き起こし感度低下につながる。

(2) シリル化時ベークの感度、パターン形状に及ぼす効果

図9.4に、シリル化時ベーク温度によるパターン形状の影響を示す。ここでは、パターン形状の影響をパターン角度で表した。図より、シリル化時ベーク温度が低ければ低いほど、垂直なパターン形状が得られることがわかる。図9.5に、シリル化時ベーク温度による感度の影響を示す。図より、シリル化前ベーク温度を高くすると、感度が良くなることがわかる。150°Cから160°Cにかけて感度が急に良くなり、160°C以上で徐々に良くなる。図9.6に、シリル化時ベークの時間による感度の影響を示す。図より、ベーク時間の増加に伴い、指数関数的に感度が良くなることがわかる。以上より、シリル化時ベークは、シリル化の露光部への拡散を促進し感度が向上するが、過度の高温は、未露光部へのSiの拡散が生じてパターンのコントラスト(パターン角度)低下につながる。

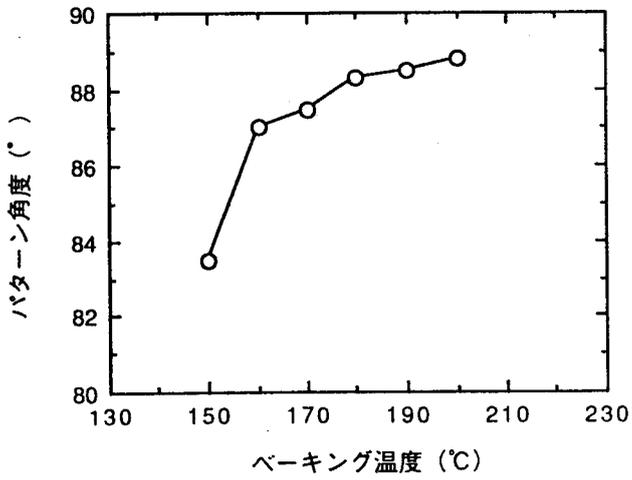


図9.2 シリル化前ベーク温度によるパターン形状の影響

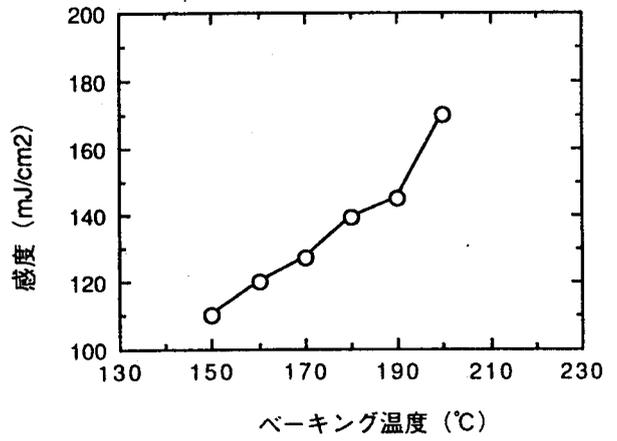


図9.3 シリル化前ベーク温度による感度の影響

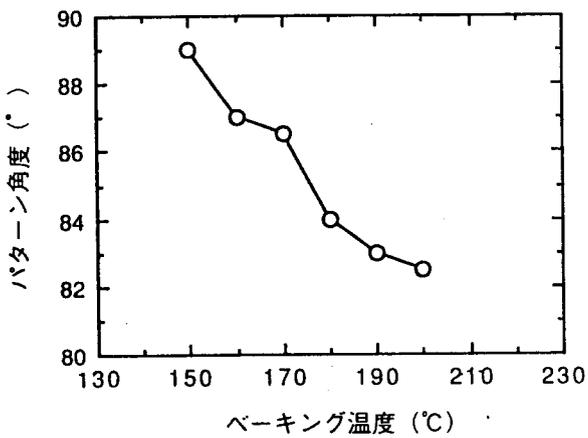


図9.4 シリル化時ベーク温度によるパターン形状の影響

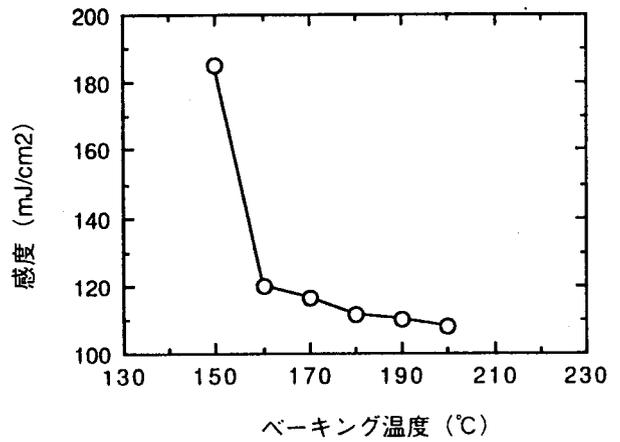


図9.5 シリル化前ベーク温度による感度の影響

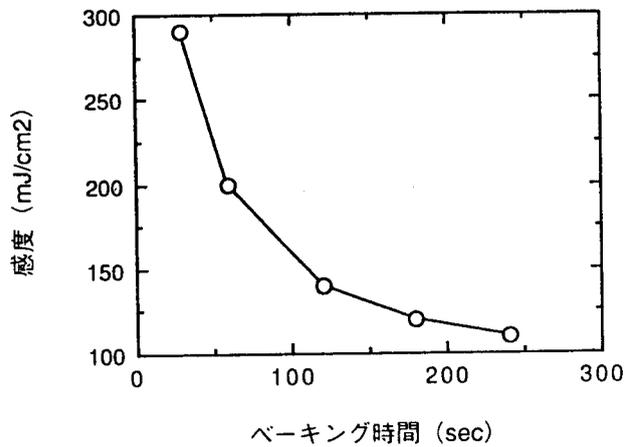


図9.6 シリル化時ベーク時間による感度の影響

(3) 露光量余裕度

図9.7に、 $0.3\mu\text{m}$ と $0.25\mu\text{m}$ のL&Sについて、露光量を関数としてライン寸法の測定値を示す。図より、 $0.30\mu\text{m}$ と $0.25\mu\text{m}$ のL&Sの露光量余裕度は、それぞれ $\pm 10\%$ と $\pm 7\%$ である。露光量余裕度は十分であり安定にパターン形成ができる。なお、露光量余裕度はマスク寸法に対して寸法が $\pm 10\%$ 変化するときの露光量変動のパーセンテージで定義する。

(4) フォーカス余裕度

図9.8に、シリル化プロセスとASKAを用いた単層レジスト・プロセスにおいて、フォーカス・オフセットを関数として $0.30\mu\text{m}$ L&Sの寸法の測定値を示す。図より、シリル化プロセスとASKA単層レジストプロセスにおける $0.30\mu\text{m}$ L&Sのフォーカス余裕度はそれぞれ $1.5\mu\text{m}$ と $0.9\mu\text{m}$ であることがわかった。表面解像プロセスが本質的に単層レジスト・プロセスに比べて低い光強度コントラストで解像可能なため、シリル化プロセスの方が単層レジスト・プロセスに比べてフォーカス余裕度が大きいということがわかった。

(5) 解像性とマスク・リニアリティ

図9.9に、 $0.30\mu\text{m}$ から $0.225\mu\text{m}$ までのL&SのSEM写真を示す。図より、高アスペクト比の垂直なパターンが得られていることがわかる。ASKA単層レジスト・プロセスの限界解像度 $0.25\mu\text{m}$ (NA=0.42の場合)に比べて、シリル化プロセスの解像性は $0.225\mu\text{m}$ 以下に向上していることがわかる。シリル化プロセスにおけるマスク・リニアリティを図9.10に示す。図より、 $0.225\mu\text{m}$ までのパターンがマスク・リニアリティ良く解像できることがわかる。表9.2は、以上述べたシリル化プロセスのプロセス余裕度と解像性についてASKA単層レジスト・プロセスと比較してまとめたものである。以上より、シリル化による表面解像プロセスは解像性と特にフォーカス余裕度の向上に大きく貢献することがわかった。

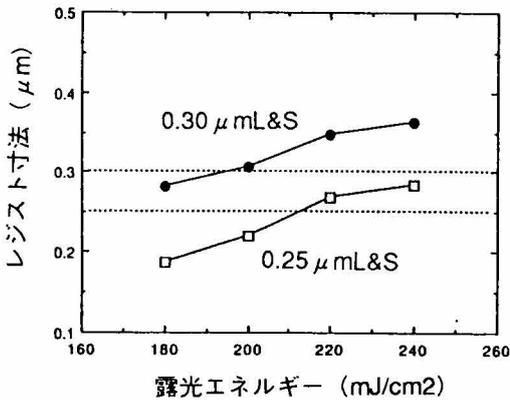


図9.7 0.3 、 $0.25\mu\text{m}$ L&Sパターンの露光特性

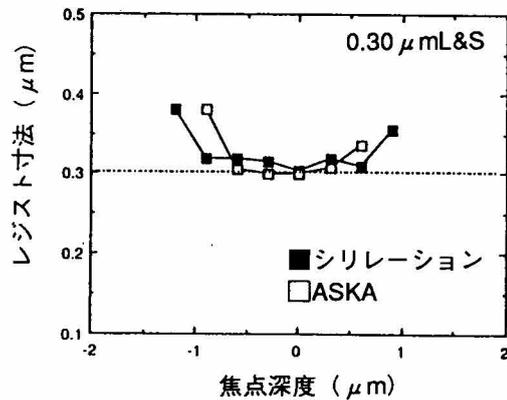
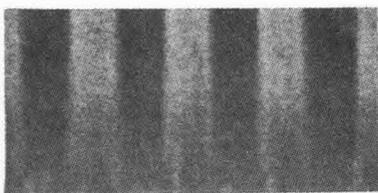
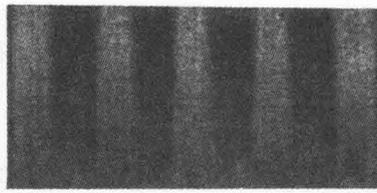


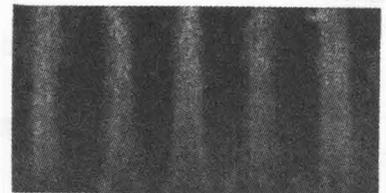
図9.8 シリレーション・プロセスにおける焦点深度特性



$0.3\mu\text{m}$ L/S



$0.25\mu\text{m}$ L/S



$0.225\mu\text{m}$ L/S

図9.9 0.225 から $0.3\mu\text{m}$ L&SパターンのSEM写真

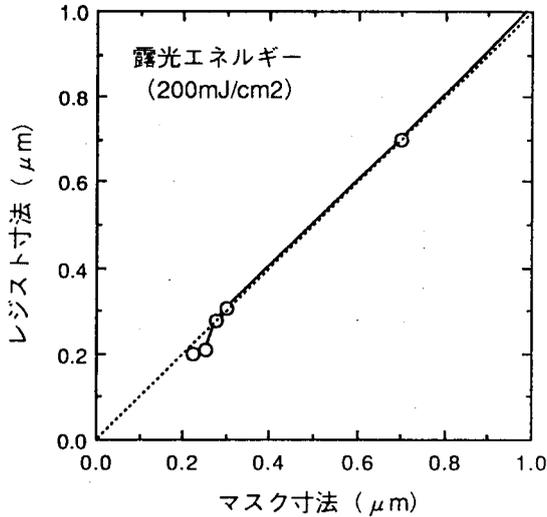


図9.10 シリレーション・プロセスの
リニアリティ特性

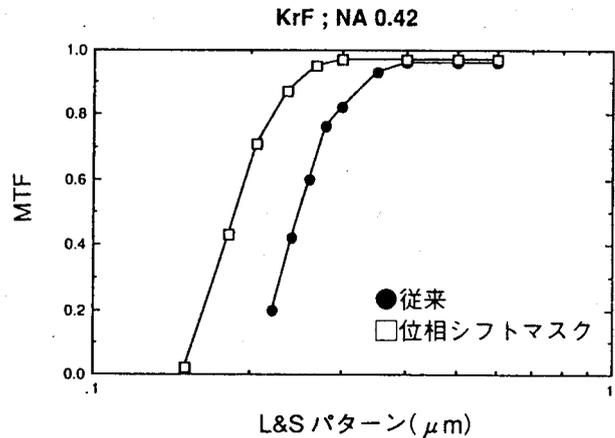


図9.11 位相シフトマスクのMTF特性

9.2.4 シリル化プロセスと位相シフト法の組合せ

9.2.3で述べたように、表面解像プロセスは単層レジスト・プロセスに比べて低い光強度コントラストで解像可能なため、シリル化プロセスはフォーカス余裕度の向上に大きく貢献する。一方、図9.11のMTFのシミュレーション結果からもわかるように、レベンソン型位相シフトマスク技術は解像性の向上に大きく貢献する。従って、シリル化プロセスとレベンソン型位相シフト法とを組み合わせることによって、解像性とフォーカス余裕度がより向上することが期待できる。

シリル化プロセスとレベンソン型位相シフト法との組み合わせにおいて、フォーカス・オフセットの関数として、 $0.3\mu\text{m}$ L&S、 $0.25\mu\text{m}$ L&S、 $0.2\mu\text{m}$ L&Sの断面SEM写真をそれぞれ図9.12,13,14に示す。これらの断面写真より、シリル化プロセスとレベンソン型位相シフト法との組み合わせにおいて $0.2\mu\text{m}$ までのパターンが良好な形状で得られていることがわかる。図9.15に $0.2\mu\text{m}$ L&Sに対して、位相シフト法と組み合わせた場合と組み合せない場合のシリル化プロセスおよび位相シフト法と組み合わせた単層レジスト・プロセスのフォーカス余裕度の比較を示す。 $0.25\mu\text{m}$ L&Sのフォーカス余裕度 (NA=0.42) は、位相シフト法と組み合わせた場合のシリル化プロセスが $1.8\mu\text{m}$ 、シリル化プロセスだけの場合が $0.9\mu\text{m}$ 、位相シフト法と組み合わせた単層レジスト・プロセスが $1.2\mu\text{m}$ である。また、 $0.2\mu\text{m}$ L&Sに対するフォーカス余裕度は、位相シフト法と組み合わせた単層レジスト・プロセスが $0.6\mu\text{m}$ であるのに対して、位相シフト法と組み合わせた場合のシリル化プロセスが $1.2\mu\text{m}$ であり、フォーカス余裕度が2倍向上していることがわかる。以上述べた種々の方法によるフォーカス余裕度についてパターン寸法を関数にしてまとめたものを図9.16に示す。以上より、シリル化による表面解像プロセスはレベンソン型位相シフト法との組み合わせにより、解像性とフォーカス余裕度がより向上するということが実証できた。

9.2.5 まとめ

以上のシリレーション・プロセスの研究をまとめると、以下になる。

- (1) シリル化前ベーク、シリル化時ベークの温度の高低により、それぞれ、レジスト・パターンの感度、パターン角度の相反する事象が発生する。
- (2) KrFエキシマレーザー・リソグラフィに、シリル化を用いた表面解像プロセスを適用することにより、単層レジストプロセスの限界解像度 $0.25\mu\text{m}$ に比べて解像性が $0.225\mu\text{m}$ まで向上し、特にフォーカス余裕度の向上に大きく貢献した。
- (3) シリル化プロセスと位相シフト法とを組み合わせることによって、 $0.20\mu\text{m}$ 以下のパターンを十分

大きいフォーカス余裕度で形成することができた。

(4) シリル化を用いた表面解像プロセスは、1G DRAMあるいはそれ以上のULSIデバイスへの適用が可能である。

今後の課題として、未露光部におけるシリル化残さの低減、実プロセス適合性の検討、コンタクトホール、定在波効果、反射の影響の検討、そして、ArFエキシマレーザー・リソグラフィへのシリル化プロセスの適用などが挙げられる。

また、寸法制御性をますために、ドライ現像時のモニタリングが今後のキーポイントとなるであろう。

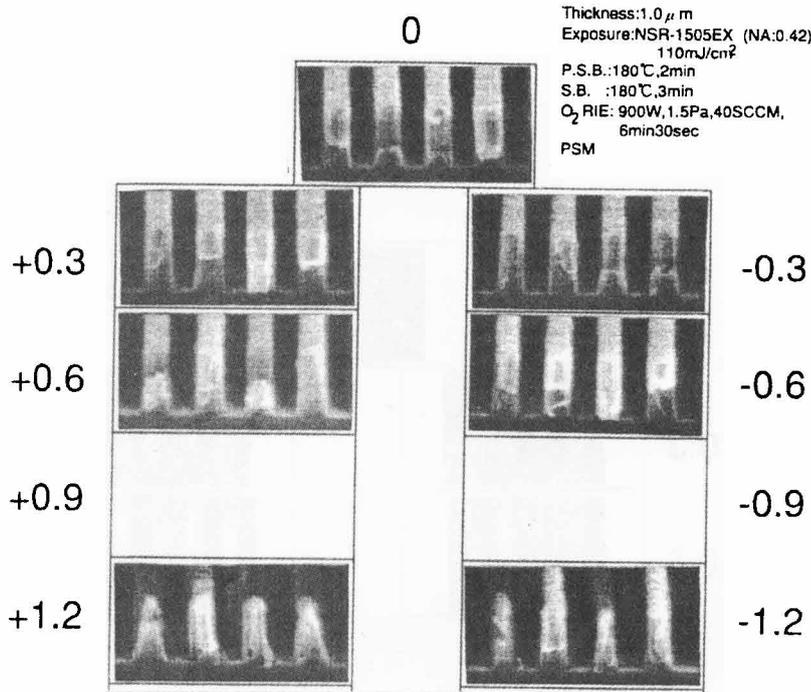


図9.12 シリレーションプロセスと位相シフトとの併用による0.3 μm L&SパターンのSEM写真

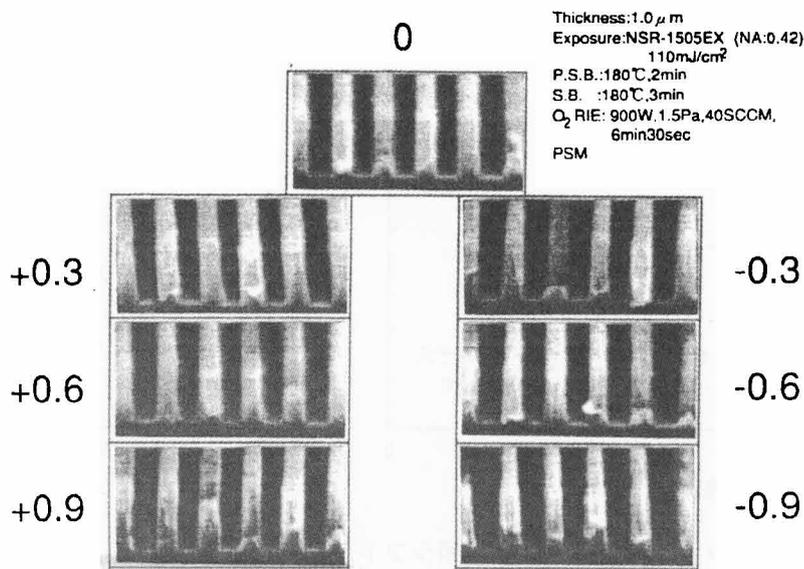


図9.13 シリレーションプロセスと位相シフトとの併用による0.25 μm L&SパターンのSEM写真

表9.2 シリレーション・プロセスのプロセス性能

	シリレーション プロセス	単層レジスト プロセス(ASKA)
解像度	0.225 μm	0.25 μm
焦点深度余裕度 (0.3 μm L&S)	0.5 μm	0.9 μm
露光余裕度 (0.3 μm L&S)	200 \pm 20 mJ/cm ²	33 \pm 5 mJ/cm ²

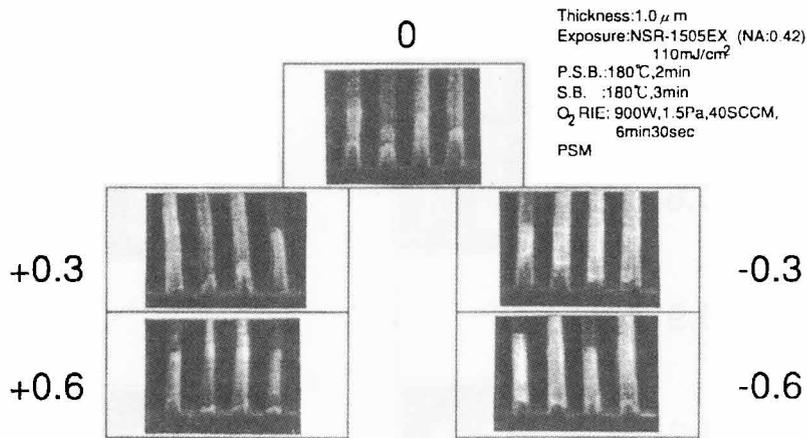


図9.14 シリレーション・プロセスと位相シフトとの併用による0.2 μm L&SパターンのSEM写真

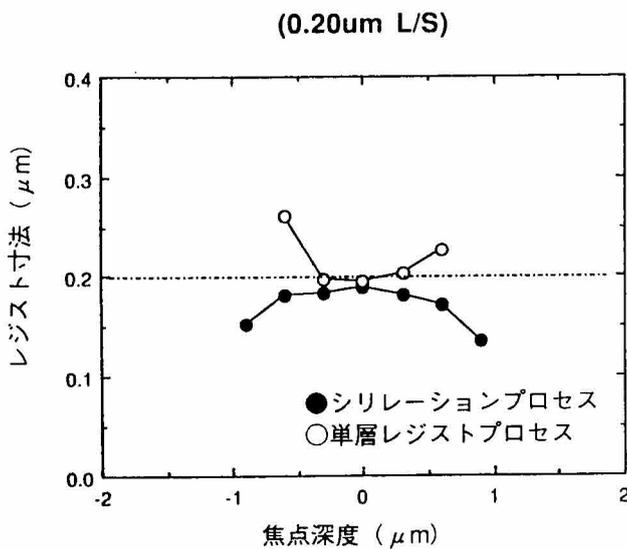


図9.15 シリレーション・プロセスと位相シフトとの併用と単層レジストによる0.2 μm L&Sパターンの焦点深度特性

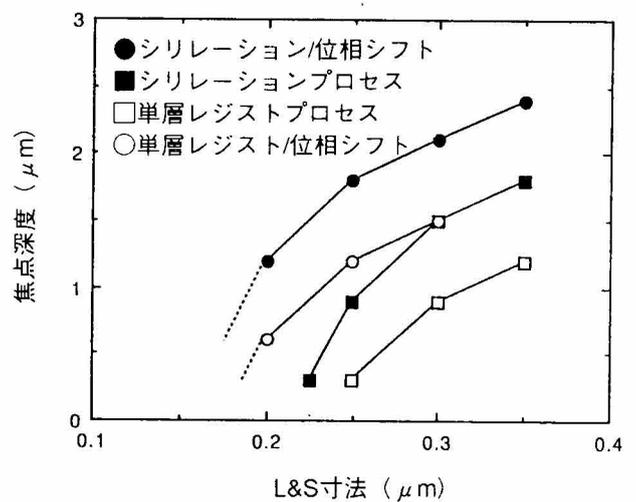


図9.16 焦点深度余裕度

9.3 リソグラフィ・シミュレーションによるパターン補正

9.3.1 はじめに

将来、寸法精度がますます厳しくなるリソグラフィにとって設計通りにレジストパターンを形成することは、光近接効果、多重干渉効果や下地のばらつきなどにより困難となってくる。そこで、本研究では、リソグラフィ・シミュレーションをベースに、その光強度計算値やレジスト寸法、形状の出力を予測し、設計パターン寸法を逆に自動補正することにより、最大限のプロセス余裕度とLSI性能を引き出す技術について研究を行なった。自動補正には第8章で論じた補助パターンを包含して論ずる。

現在の超LSIロジックの研究において、 $0.35\mu\text{m}$ CMOSプロセスが中心となってきている。その中で最も加工スペックの厳しい層はゲートパターン形成である。ゲート寸法バラツキのスペックは $\pm 10\%$ が動作限界とされ、現状の光リソグラフィ・プロセスでは大きな課題となっている。スペックを満足するためには、2つの問題がある。1つは孤立ゲートパターンのフォーカス・マージン不足、もう一つは光近接効果による孤立パターンとL&Sパターンとの寸法差である。その中で、孤立ゲートでフォーカス・マージンを確保するためには、補助パターンが必要不可欠である。本章では、 $0.35\mu\text{m}$ ゲートをビークルに、光近接効果による孤立パターンとL&Sパターンの寸法差の低減に焦点をあて、マスク補正により寸法ばらつきを低減する手法を述べる。

9.3.2 光近接効果

図9.17に実験で求めた $0.35\mu\text{m}$ パターン線幅のスペース間隔依存性を示す。基板はポリシリコン、レジストはIX061 (JSR社製) 膜厚 $1.06\mu\text{m}$ であり、測長箇所は5本のL&Sパターンの中心ラインの線幅を、測長装置ESPA-10 (ホロン社製) で側長した。マスク設計線幅は同一にかかわらず、レジスト・パターンでは最大 $0.07\mu\text{m}$ ばらついていることが判る。このように周辺パターンのレイアウト依存によって線幅が異なる現象が光近接効果である。図9.18に $0.35\mu\text{m}$ 孤立パターンとL&Sパターンの相対光強度 (マスクがないときの光強度を1とする) を示す。光強度シミュレーションはPEACEを用い、条件は、波長 i 線 (365nm)、 $\text{NA}=0.50$ 、 $\sigma=0.6$ で行った。

レジスト・パターンはある光強度のしきい値以下で形成されると仮定すると、シミュレーションによる光強度分布からその線幅を求めることは可能である。図9.18 (a) に示すように $0.35\mu\text{m}$ L&Sパターンの光強度分布において、線幅が1:1に形成される光強度を基準とすると、しきい値は0.325となる。逆にその値から $0.35\mu\text{m}$ 孤立ラインの線幅を割り出すと約 $0.4\mu\text{m}$ となる。このように空間的な光強度によっても簡易的に光近接効果を把握できる。

図9.19は同様の方法で求めたスペース間隔に対する $0.35\mu\text{m}$ 線幅の挙動である。測定箇所は図9.17と同様に5本のL&Sの中心パターンの線幅を、フォーカス位置変化させて計算した。図9.17と図9.20を比較すると実験値と $\text{DOF}=0.8\mu\text{m}$ でのシミュレーション結果とが良く合っている。この結果から、以後、 $0.35\mu\text{m}$ のパターン線幅のシミュレーションを相対光強度0.325、 $\text{DOF}=0.8\mu\text{m}$ の条件で計算することにした。

9.3.3 補助パターンの効果

図9.20に補助パターンの概略と配置に必要な各パラメータを示した。ここで記述する補助パターンは、ゲートパターンに平行に配置され、レジスト・パターンとして解像しないものである。

W 、 $S1$ 、 $S2$ の各パラメータは光強度によって最適化できる。図9.21に光強度によって求めた W と $S1$ に対するパターン線幅を示す。 W が大きくなるにつれ、パターン線幅が細くなる。また $S1$ が $0.5\sim 0.6\mu\text{m}$ 程度のところにパターン線幅の極小値を持つ。●はパターン評価TEGによって得られた $W=0.15\mu\text{m}$ の実測値である。光強度から求めた値と良く一致している。孤立パターンの線幅が補助パターンの幅、配置によって細くなる効果を利用すれば、光近接効果による線幅バラツキを低減できる。

図6.22に隣接する2本の補助パターンのWとS2を変化させた場合の光強度分布の最小値をプロットした。補助パターンは解像してはならないため、光強度の最小値がしきい値0.325よりも高いことが必要条件である。Wは大きい方が効果が高く、S2は小さい方が配置の制限が少ないため、図9.22、23からW、S1、S2を決定することができる。

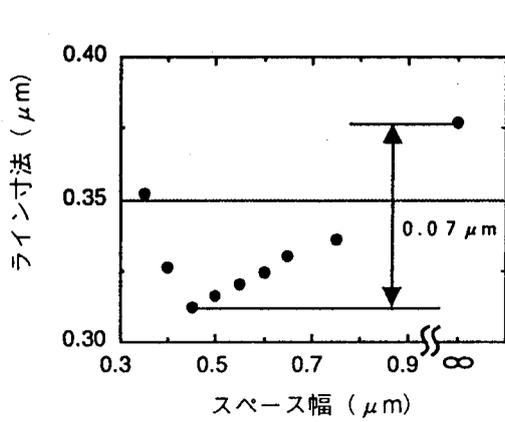


図9.17 0.35 μmパターンのスペース幅依存性 (実験)

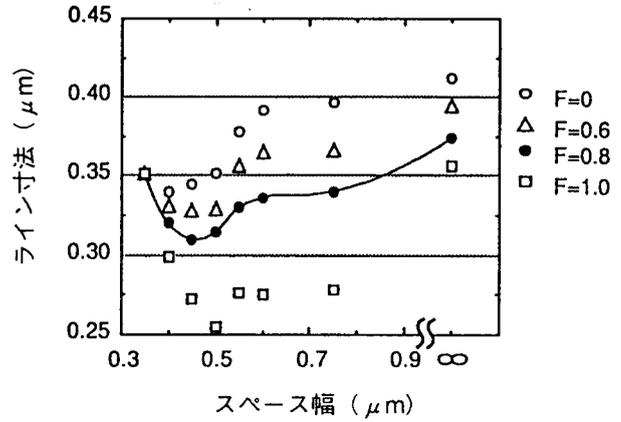


図9.19 0.35 μmパターンのスペース幅依存性 (シミュレーション)

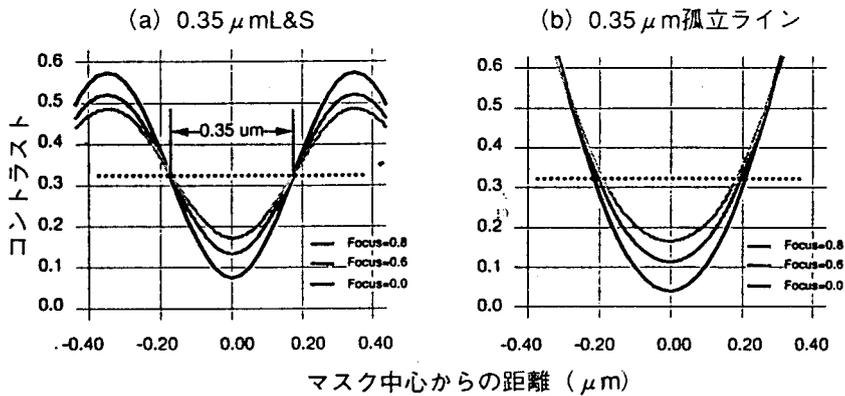


図9.18 0.35 μm孤立ラインとL&Sの光強度

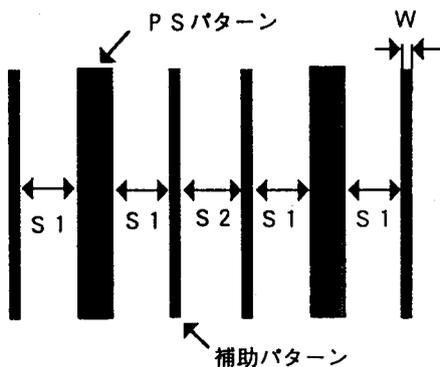


図9.20 補助パターン配置パラメータ

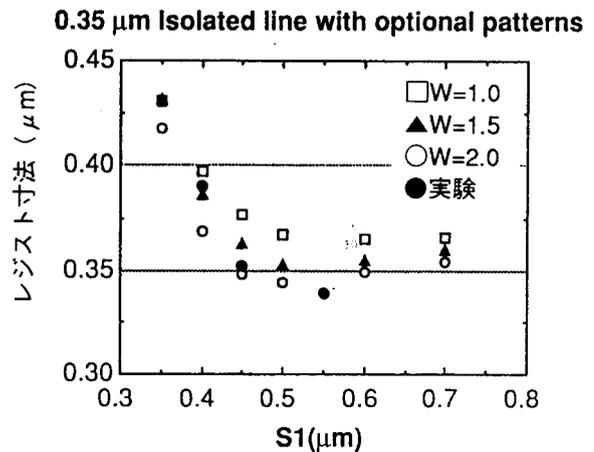


図9.21 光強度計算によって求めた寸法特性

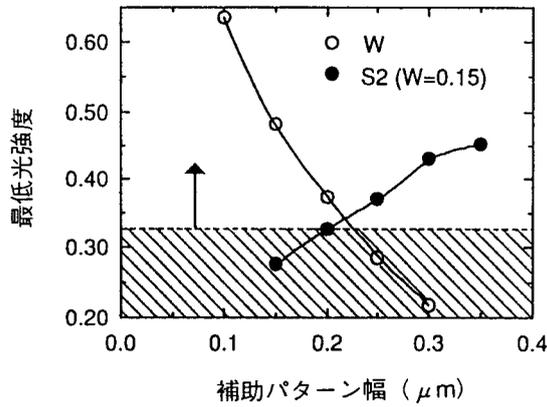


図9.22 補助パターンによるパターン寸法変動特性

9.3.4 補助パターンと超解像の組み合わせ

補助パターンに超解像技術を併用すると、フォーカス・マージンが向上するというシミュレーションと実験結果を第8章で述べている。超解像条件は $\sigma=0.4\sim0.6$ の輪帯を用いた。図9.23、24にその結果を示す。 $W=0.15\mu\text{m}$ の条件では、補助パターンを1組付加したものでは超解像による効果は現われなかったが、2組付加したものでは大きな効果が見られた。また、 $W=0.20\mu\text{m}$ では通常照明に比べ、フォーカス・マージンの向上が確認された。孤立パターンで超解像を用いる場合は、2組の補助パターンが有効であることが判った。

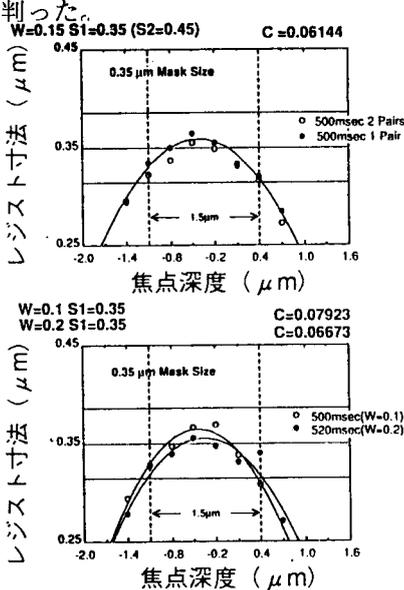


図9.23 補助パターンによる焦点深度特性

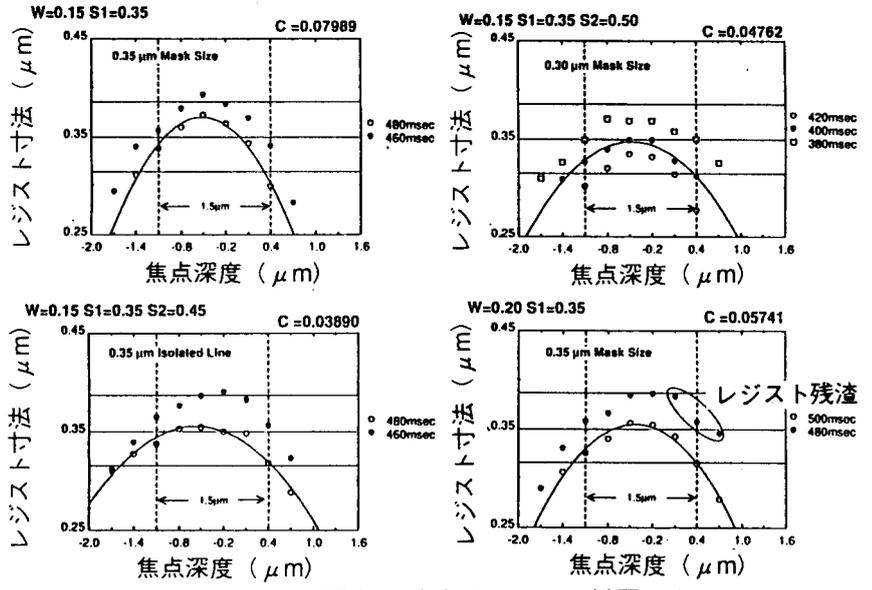


図9.24 超解像に補助パターンを併用した場合の焦点深度特性

9.3.5 補助パターン自動発生

W 、 $S1$ 、 $S2$ の各パラメータが決まれば補助パターンを自動発生することができる。図9.25に補助パターンの基本発生方法を示す。まずPゲートパターンを $S1+W$ だけ拡大サイズした図形データをレイヤA1に作成する。同様に $S1$ だけ拡大サイズした図形データをレイヤA2に作成する。レイヤA1からレイヤA2を引くと、ゲートパターンの周辺に $S1$ だけ離れた W の幅を持つ補助パターン・データA3ができる。これら

の計算はすべてブーリアン論理演算処理で行ない、セルベースもしくはブロック・ベースでデータを一括処理できる。

補助パターンは隣接するゲートパターンの間隔によって配置できる場合とできない場合があるので、隣接するゲートパターンの間隔をXとすれば以下のように分けることができる。

領域	補助パターン数
領域1 $X \leq W + 2S1$	0
領域2 $W + 2S1 < X \leq 2W + 2S1 + S2$	1
領域3 $2W + 2S1 + S2 < X$	2

実際の処理手順を図9.26に示す。

まず、(a) ゲートパターンを一定量拡大リサイズ、次に (b) 同量縮小リサイズを行ない領域1をなくす。次に (c) 補助パターンの基本発生処理を行なうと領域2と3にだけ補助パターンが作成される。次に (d) 隣接する2本の補助パターンを領域1と同様にリサイズを行ない1つにする。次に (e) 1本に合わせた補助パターンを少しずつシュリンクし、Wの幅までシュリンクした後、他の補助パターンと合わせる。

最後に、(f) 補助パターンとオリジナルのゲート・パターンを組み合わせる。

これらはすべてプログラムによって自動で行なうことができ、ブーリアン処理プログラムを基本にしている。それによって実際に $0.35\mu\text{m}$ ロジックのスタンダード・セルに応用した例を図9.27に示す。今回はデータ数を考慮し、ゲートの中でも特に精度を要求される活性領域上だけに補助パターンを配置した。これは素子分離レイヤとのアンド処理で簡単に行なえる。図9.28に実際の転写例を示す。

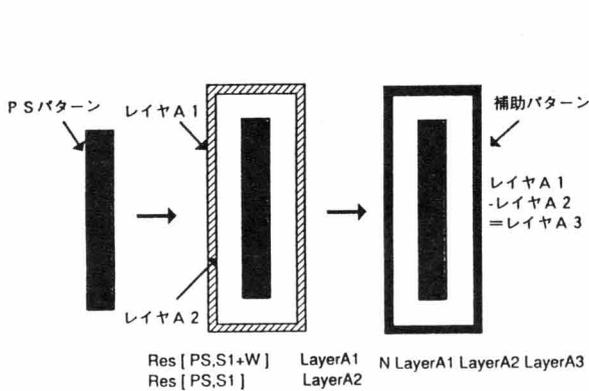


図9.25 補助パターンの自動発生法

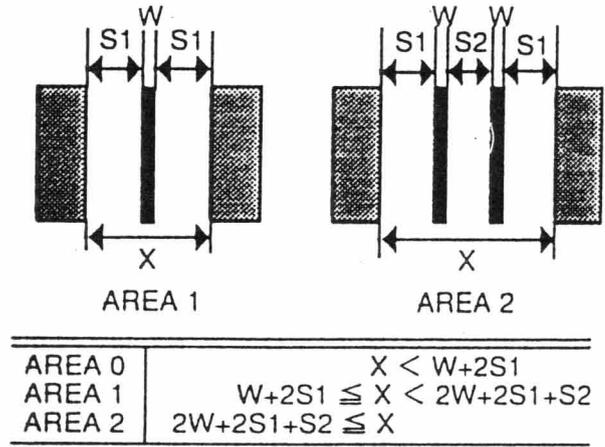


図9.26 自動発生の処理手順

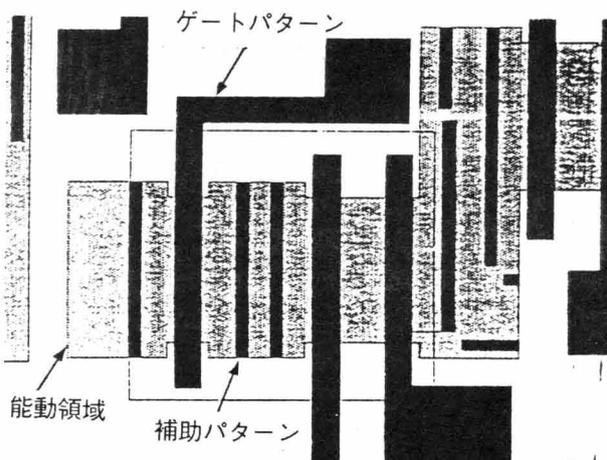
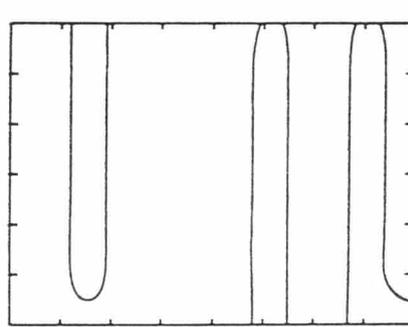
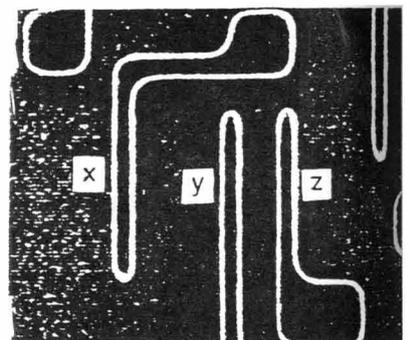


図9.27 $0.35\mu\text{m}$ ロジックLSIのゲートCADデータレイアウト



(a)シミュレーション結果



(b)SEM写真

図9.28 $0.35\mu\text{m}$ ロジックLSIのゲートパターンへ応用した場合のSEM写真

9.3.6 自動設計データ補正の課題

図9.30に、リソグラフィ・シミュレーション（光強度計算）から自動設計データ補正に至る一連のアーキテクチャーを示した。しかしながら、現状では以下に示す課題がある。

- (1) 光強度計算に制限される設計データエリア
- (2) 補正設計データの検証
- (3) 仕上がり加工寸法の精度

などが挙げられる。そのため、リソグラフィ・シミュレーションの計算速度の精度の向上と共に、計算速度を大きく向上させる必要がある。

また、補助パターンマスクの課題として、補助パターンの作成精度、マスクのパターン欠陥検査が考えられる。

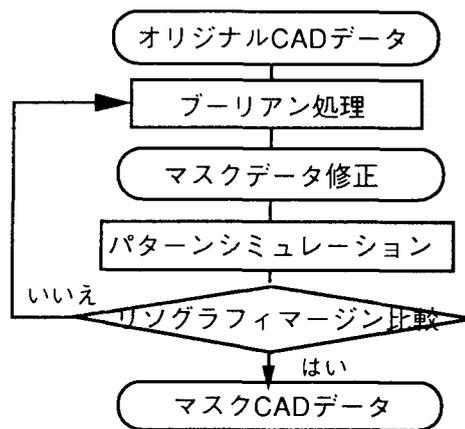


図9.30 自動設計データ補正システムのアーキテクチャー

9.3.6 まとめ

予め、リソグラフィ・シミュレーションにより寸法変動を予測して、自動設計データを補正することによりロジックのゲートパターンにて実証を行なった。

これらはCAD上でオリジナル設計データから論理処理によって補助パターンを作成することにより補正されるものである。これらの処理によって近接効果による線幅バラツキは半分以下に低減できることがわかった。

9.4 今後の展望

以上、次々世代のリソグラフィのための超微細加工の基礎研究について論じた。ドライ現象を用いるシリレーション・プロセスや、加工後の寸法をシミュレーションにより予測して超LSI設計データを補正する技術は、将来の超LSIプロセスの歩留まりやTAT向上そしてコストダウンの手掛かりとなるものと確信する。しかし、残念ながら未だ完成の域にはさらなる研究が必要であり、リソグラフィ・プロセスを科学的に制御すべく、基礎的な物性、化学の解明が必須となってきよう。また、物理変動を統計的にとらめえるための、インサイチュー・モニターとフィード・フォワードでウェハ毎に補正を加えていく手法や、設計DAシステムおよびプロセス・デバイス・シミュレーションとの融合を取り入れていくことにより、21世紀の半導体プロセスの微細加工の将来は、大きく開拓されるものと考えられる。

第10章 総 括

今世紀最大の発明といわれるトランジスタが世に出て半世紀が経過した現在、半導体素子は、IC, LSI, VLSI, さらにULSIへと進化し続けている。この間に素子の価格、容積は数十～数千万分の一以下になり、現在のエレクトロニクスを支えている。USLIの集積度の向上には、素子構造のコンパクト化と微細加工技術の発展が何よりも要求される。そして微細加工技術の代表であるリソグラフィ技術へは、より厳しいデザインルールが要求され、これを達成すべく、露光装置、レジスト材料、プロセス技術等の研究開発が行なわれている。そしてこの開発が、工学、物理学、化学といった広範囲に渡る科学技術の発展をも促すとともに、日常生活においても、従来産業用の高性能コンピュータに匹敵するハイテク製品が家庭に入り込み、生活様式をも変えようとしている。

最近の半導体業界では、最先端レベルの技術を、量産性を保ちながら、次世代技術へと発展させると言う低コスト化が重要となっている。しかしながら図10.1に示すごとく、リソグラフィ技術の研究開発レベルではデバイスのデザインルールに追い付かれ、ここに来て大きな技術的経済的ブレークスルーが要求されるに至っている。

しかしながら、リソグラフィの進展の主役になってきたものは、本研究の主眼である、その量産性、経済性に優れた光リソグラフィ技術による微細加工である。常に限界が議論されてきた光リソグラフィは、本研究で明らかにしたように、すでに量産レベルでハーフミクロンの加工技術を達成しつつあり、最近では、さらにエキシマレーザーによるクォータミクロン以下の領域までの可能性を明確にし、大きなブレークスルーがなされた。図10.2に、本研究の総括として、現状から将来へのリソグラフィ・トレンドをまとめた¹⁰⁻¹⁾。

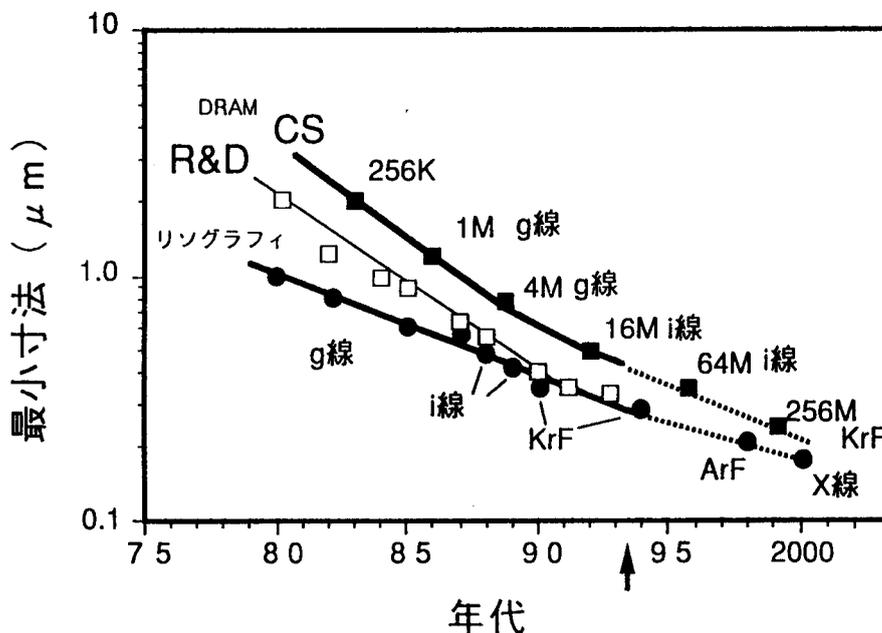


図10.1 微細加工とデバイス・トレンド

以下に、本研究のまとめを記す。

本研究では、光リソグラフィ技術における微細加工の進展を、レジスト・プロセス、材料側からと露光装置側からの両面から検討を行なった結果を論じた。

レジスト・プロセス側からのアプローチであるDEM法では、g線ステッパーを併用して、実段差上での

1 μ m以下の微細加工について、また、プロセス簡易的な有用性を確認した。

コントラスト・エンハンスド・リソグラフィ（CEL）はこの技術の主要材料である水溶性CEL材料（WSP）の開発・最適化を行い、g線とi線のリソグラフィに関してWSPを用いてその解像性、パターン形状、露光エネルギー、焦点深度変動に対するパターン線幅の変動性、マスク忠実性などについての検討を行い、WSPの使用によるサブミクロン・パターン形成の有用性を確認した。

他のレジスト・プロセス側からのアプローチである、HARD法を開発し、i線リソグラフィに応用してハーフミクロン領域の微細加工に対する知見が得られた。

露光装置を主とする短波長露光のアプローチは、KrFエキシマレーザー露光について研究を行った。内容としては、ステッパーの構築技術、レジスト評価、エキシマレーザーおよびレジストの開発である。これらの技術を用いることにより、サブハーフミクロン領域の微細パターン形成が可能であることを証明した。また、エキシマレーザー・リソグラフィによる実デバイス製造の容易性をi線リソグラフィに比較して優位であることを論じた。

さらにKrFエキシマレーザー・リソグラフィをクォータミクロン領域へ進展すべく、長寿命高出力エキシマレーザー、化学増幅型レジストおよびスルー・ザレチクル方式のステッパーを開発してクォータミクロン・レベルのデバイスに応用し、実用性を実証した。

光リソグラフィの限界を迫すべく、さらに短波長のArFエキシマレーザー・リソグラフィの非球面縮小レンズおよび化学増幅型レジストを設計試作し、サブクォータミクロン領域の可能性を見いだした。

最後に、次世代の知的生産システムの基盤となる、半導体製造科学に立脚したリソグラフィ技術の研究の先駆けを行ない、さらなる微細化限界の迫及とともに今後の新しい研究指針を考察した。

今後の展望として、半導体産業は微細化限界と物理動作限界の極限領域に向けて、ますます活発化し、世の中の情報革命を支えるシステムULSIを実現すべく発展するものと確信する。このような半導体産業の主役である微細加工技術には、本研究の技術が有効でかつ、不可欠のものとなると考えられる。

本研究の成果が、今後のギガビット・メモリーやシステム・オンシリコンに活用され、半導体産業、製造業については世界の繁栄につながることを、切に希望する。

リソグラフィ技術のさらなる発展のためにも、本研究の一層の進展を行う考えである。

最後に、謝辞、参考文献、研究業績一覧を記し、終わりとする。

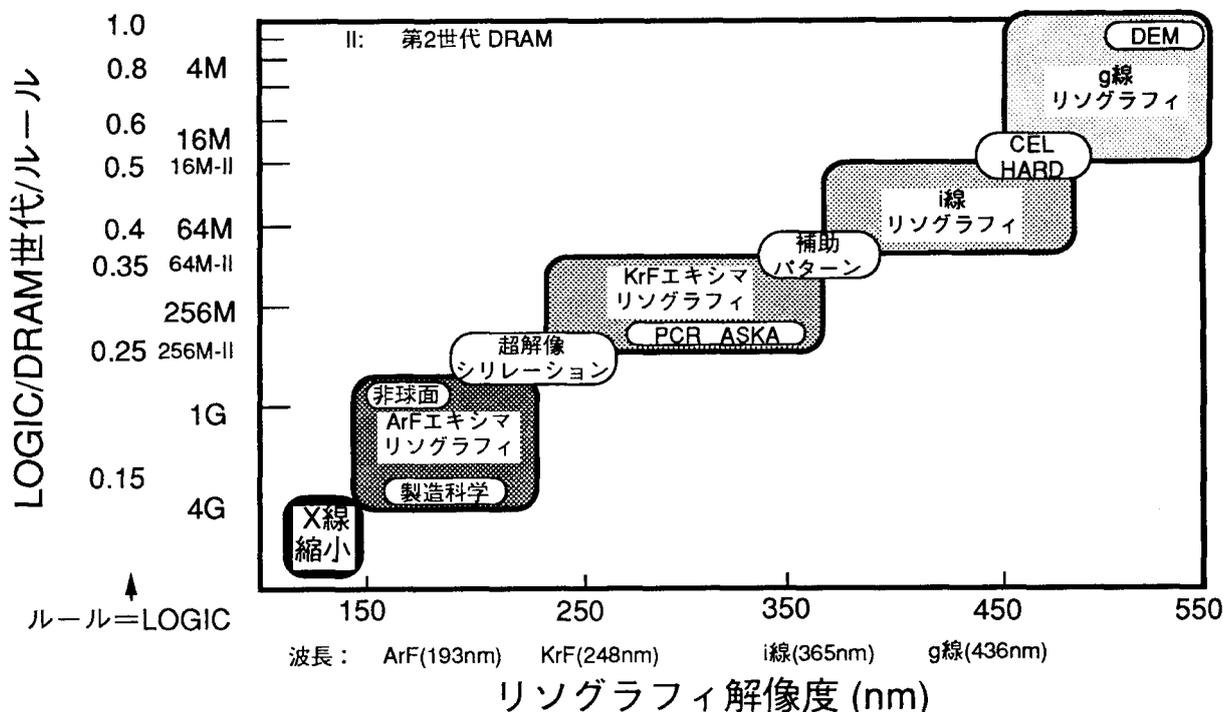


図10.2 本研究の総括図

謝 辞

本研究を完遂するにあたり、終始御懇切な御指導と御激励を賜りました神戸大学大学院自然科学研究科物質機能講座 山本恵一教授に心から感謝の意を表します。

本論文をまとめるにあたり、御懇篤な御指導を頂きました神戸大学大学院自然科学研究科物質機能講座 西野種夫教授、難波孝夫教授および同自然知能講座 中前勝彦教授に深謝致します。

本研究は、松下電器産業（株）半導体研究センターで行なったものであり、著者に本研究に携わる機会を与えて下さり、御指導、御鞭達を賜りました松下電器産業（株）工学博士水野博之技術特別顧問、同技術品質本部長工学博士 堀内司朗常務取締役、同半導体研究センター工学博士 竹本豊樹所長、同電化技術研究所石原健所長に心より感謝いたします。特に、石原健所長には、本研究に着手する機会を与えて下さったばかりでなく、論文にまとめるに当たり全般に渡り御助言を賜りました。重ねて御礼申し上げます。

また、松下電器入社以来、半導体技術の御指導と御助言並びに有益な御討論を頂き、論文にまとめることを勧めていただいた同半導体研究センター学術博士畑田賢造主幹技師に深謝致します。

松下電器入社以来、直接御指導を頂き、本研究を完遂するにあたりましても熱心な御討論と御厚情を賜りました松下技術情報サービス北広勇部長（株）、松下電子工業（株）京都研究所所長江崎豪弥取締役、同マイコン（事）米田忠央部長、松下電器産業（株）研究本部照井康明参事、同半導体研究センター工学博士井上道弘主幹技師、工学博士野村登主幹研究員、秋山重信主幹技師、工学博士小倉基次主任技師、工学博士大曾根隆志主任技師（現富山県立大学教授）、同中央研究所工学理学博士小川一文主任研究員、同液晶開発部黒田啓主任技師、同本社経営企画室学術博士柴田淳副参事に深謝致します。

本論文をまとめるにあたり、御指導及び公私に渡り熱心な御討論を頂きました松下電器産業（株）半導体研究センター工学博士小田中紳二主任技師、工学博士橋本伸主任研究員、神田彰弘副参事、中尾一朗主任技師、工学博士大仲清司主任技師、工学博士佐々井洋一主任技師、工学博士小川真一主任技師、久保田正文主任技師、学術博士山崎弦一主任技師、同中央研究所工学博士美濃規央主任研究員、同研究本部福本徹副参事、松下電子工業（株）京都研究所工学博士布施玄秀主任技師、奥田能充室長、同マイコン（事）下田秀明技師、木更津高専冬木茂教授に深謝致します。

本研究は、半導体研究センターにおける次世代リソグラフィ・プロセス技術開発プロジェクトの一環として行なわれたものであります。当開発プロジェクトに関連する諸氏の共同研究者としての御援助なくしては、この研究はありえなかったものです。本研究の共同研究者として御協力頂きました松下電器産業（株）半導体研究センター工学博士遠藤政孝主任技師、平井義彦主任技師、山下一博技師、中川秀夫技師、小泉太一技師、松尾隆弘技師、橋本和彦技師、松岡晃次氏、勝山亜希子女史、小林智氏、内藤康志主任技師、藪俊樹主任技師、岡田昌三主任技師、松下電子工業（株）京都研究所谷美幸技師、松下電器産業（株）生産技術研究所長野寛之主任技師、松下技研（株）佐藤健主任技師、小野拓弘主任技師、古谷伸昭主任技師、インテルコーポレーション Ph. D. H.Fujimotoに深く感謝します。特に、遠藤政孝主任技師と山下一博技師には全般に渡り、多大なる御協力を頂くとともに、その卓越した材料化学技術と計測物理技術に敬意を表します。また、平井義彦主任技師には、シミュレーションにおいて多大なる御協力を頂きました。

最後に、種々の研究実験に御協力下さった林原生物化学研究所、アドモンサイエンス（株）、和光純業工業（株）、東ソー（株）、（株）ニコン、リソテックジャパン（株）、松下電器産業（株）半導体研究センター、生産技術研究所、中央研究所、松下テクノリサーチ、松下電子工業（株）並びに松下技研（株）の方々に深く感謝いたします。

参 考 文 献

第1章関連

- 1-1) VLSI Technology, S. M. Sze Editor, McGraw-Hill, (1983), and ULSI プロセスの基礎技術, 古川静二郎編, 丸善, (1991).
- 1-2) M. Inoue, H. Kotani, T. Yamada, H. Yamauchi, A. Fujiwara, J. Matsushima, H. Akamatsu, M. Fukumoto, M. Kubota, I. Nakao, N. Aoi, G. Fuse, S. Ogawa, S. Odanaka, A. Ueno, and H. Yamamoto, in IEEE ISSCC88 Digest of Technical Papers, p.246, (1988).
- 1-3) T. Yamada, Y. Nkata, J. Hasegawa, N. Amano, A. Shibayama, M. Sasago, N. Matsuo, T. Yabu, S. Matsumoto, S. Okada, and M. Inoue, IEEE J. Solid-State Circuits, Vol.26, p.1506, (1991).
- 1-4) H. Kotani, H. Akamatsu, Y. Naito, T. Fujii, T. Iwata, T. Tsuji, H. Asaka, Y. Itoh, N. Shimizu, J. Hirase, Y. Shibata, K. Yamashita, T. Hori, and T. Fujita, in IEEE ISSCC94 Digest of Technical Papers, p.142, (1994).
- 1-5) P. Gargini and G. H. Parker, Proc. SEMICON/Kansai-Kyoto 92 Technology Seminar, p.15, (1992).
- 1-6) 日経マイクロデバイス, 1994年1月号, p.57
- 1-7) G. E. Dennard, F. H. Gaensslen, L. Kuhn, H. N. Yu, IEEE J. Solid-State Circuits, Vol.SC-9, p.259, (1974.)
- 1-8) B. Hoeneisen and C. A. Mead, Solid-State Electronics, 15, p.819, (1972).
- 1-9) S. Horiguchi and H. Yoshino, J. Appl. Phys., 58, p. 1597, (1985).
- 1-10) J. D. Meindle, in IEEE 1988 VLSI Symp. Tech. Dig. Tech. Papers, p1, (1988).
- 1-11) P. Chatterjee, in IEEE Proc. Int. Electron Devices Meet., p.11, (1991).
- 1-12) W. T. Wong, J. Y-C. Pau and J. D. Plummer, in 1992 IEEE/SEMI Int. Semiconductor Manufacturing Science Sympo., p.117, (1992).
- 1-13) S. M. Irving, Solid State Technol., 14(6), p. 47, (1971).
- 1-14) J. W. Coburn and H. F. Winters, Ann. Rev. Mater. Sci, Vol. 13, p. 91, (1983).
- 1-15) J. M. Cook, O. Turmel, T. Wicker, J. Winniczek, Proc. AVS Topical Conf. on High density Plasma and applicat., (1993).
- 1-16) M. A. Lieberman and R. A. Gottscho, in Physics of Thin films, Academic, (1993).
- 1-17) K. Suzuki, S. Okudaira, I. Kanomata, Jpn. J. Appl., Phys., 16, p.1979, (1977).
- 1-18) M. Hefner, J. Photogr. Sci, 12, p.181, (1964).
- 1-19) M.H.Ekund and G.Landrum, Semiconductor Int., p.43, (1982).
- 1-20) 超微細加工とレジスト材料, CMC編, 第1章, 1985.
- 1-21) R.D.Coyne and O.W.Otto, Proc. SPIE, 773, p.183, (1987).
- 1-22) H.C.Pfeiffer, Solid State Technol., 27, p.223, (1984).
- 1-23) 笹子勝, 電気化学および工業物理化学, Vol.55, No.5, p.350, (1987).
- 1-24) 笹子勝, 遠藤政孝, 平井義彦, 小川一文, 石原健, 応用物理, 第56巻, 第1号, p.56, (1987).
- 1-25) M.Sasago, M.Endo, K.Ogawa, Y.Hirai, N.Nomura, T.Ohzone, and T.Ishihara, in IEEE 1985 VLSI Symp. Tech. Dig. Tech. Papers, p76, (1985).
- 1-26) M.Endo, M. Sasago, K. Matsuoka, and N.Nomura, J. Vac. Sci & Tech. B, Vol.7, No.5, p.549. Sep. /Oct., (1989).
- 1-27) M.Sasago, M.Endo, Y.Hirai, K.Ogawa and T.Ishihara, in IEEE Proc. Int. Electron Devices Meet., p.316, (1986).
- 1-28) 遠藤政孝, 笹子勝, 中川秀夫, 平井義彦, 小川一文, 石原健, 応用物理, 第56巻, 第9号, p.1168, (1987).
- 1-29) 笹子勝, 谷美幸, 遠藤政孝, 野村登, National Technical Report, Vol 36, 4, p. 444, Aug. (1990).
- 1-30) M. Sasago, T. Matsuo, K. Yamashita, M. Endo, K. Matsuoka, T. Koizumi, A. Katsuyama, and N. Nomura, IEICE Trans. on Electronics, Vol.E77-C, No.3, p.416, March, (1993).

1-31) M. Sasago, Y. Tani, K. Yamashita, M. Endo, and N. Nomura, Extended Abstracts of 1991 Int. Conf. on Solid State Devices and Materials, p.472, (1991).

1-32) M. Sasago, K. Yamashita, M. Endo, T. Koizumi, T. Matsuo, K. Matsuoka, A. Katsuyama, S. Kobayashi, and N. Nomura, J. Photopolymer Sic. & Technology, Vol.6, No.4, p.433, (1993).

1-33) T. Matsuo, M. Endo, K. Yamashita, M. Sasago, and N. Nomura, J. Photopolymer Sic. & Technology, Vol.5, No.1, p.141, (1992).

1-34) K. Matsuoka, K. Yamashita, M. Sasago, and N. Nomura, Jpn. J. Appl. Phys. Vol.32, 1-12B, p6071, Dec. (1993).

第2章関連

2-1) H. Yamauchi, T. Suzuki, A. Sawada, T. Iwata, T. Tsuji, M. Agata, T. Taniguchi, Y. Odake, K. Sawada, T. Ohnishi, M. Fukumoto, T. Fujita, M. Inoue, in IEEE ISSCC'93 Digest of Technical Papers, p. 44, (1993).

2-2) T. Yamada, Y. Nkata, J. Hasegawa, N. Amano, A. Shibayama, M. Sasago, N. Matsuo, T. Yabu, S. Matsumoto, S. Okada, and M. Inoue, IEEE J. Solid-State Circuits, Vol.26, p.1506, (1991).

2-3) M. B. Heritage, J. Vac. Sci. Technol., 12, 1317, p. 1135, (1975).

2-4) D. L. Spears, H. I. Smith, Electron. Lett., p.102, (1972).

2-5) Y. Sakitani, H. Yoda, H. Todokoro, Y. Shibata, T. Yamazaki, K. Ohbitu, N. Sai5tou, S. Moriyama, G. Matsuoka, F. Murai, M. Okumura, Proc. EIPB'92, (1992).

2-6) A. Heuberger, Proc. SPIE, 448, p.8, (1983).

2-7) 笹子勝, 電気化学および工業物理化学, Vol.55, No.5, p.350, (1987).

2-8) D. A. Smith, IEEE Trans. on Electron. Devices, ED-22, p.471, (1975)

2-9) K. G. Clark, Solid State Technology, August, p.47, (1976)

2-10) D. A. Markle, Solid State Technology, June, p.50, (1974)

2-11) H. J. Schuetze, Solid State Technology, July, p.31, (1966)

2-12) T. Brunner and S. Stuber, Proc. SPIE, 633, 106 (1986).

2-13) 新感光性樹脂, 角田隆弘著, 印刷学会出版部, (1981)

2-14) Introduction to Microlithography, L. F. Thompson Editor, ACS Sympo. Series 219, (1983).

2-15) R. Hanawa, Y. Uetani and M. Hanabata, Proc. SPIE, 1672, p.231, (1992).

2-16) M. Hatzakis and J. M. Moran, J. Vac. Sci. Technol., 5, p.120, (1979).

2-17) K. Morita, A. Tanaka, S. Imamura, T. Tamamura and O. Kogure, Jpn. J. Appl. Phys., 22, L659, (1983).

2-18) B. Roland, R. Lombaerts, C. Jakus and F. Coopmans, Proc. SPIE, 771, p.61. (1987).

2-19) B. J. Lin, Proc. SPIE, 174, p.114, (1979).

2-20) S. A. MacDonald, R. D. Miller and C. G. Willson, Proc. Kodak Interface '82, p.114, (1982)

2-21) A. Brewer, J. Lamb, M. G. Moss, J. Appl. Photo. Eng. &, No.6, p.184, (1981).

2-22) J. M. Moran and D. Maydan, J. Vac. Sci. Technol., 16, p.1620, (1979).

2-23) K. L. Tai and J. M. Moran, J. Vac. Sci. Technol., 5, p.129, (1979).

2-24) D. C. Hofer, R. D. Miller and C. G. Willson, Proc. SPIE, 469, p.16, (1984).

2-25) A. Tanaka, M. Morita and O. Kogure, Preprints 1st SPSJ Int. Polym. Conf., p.63, (1984).

2-26) E. Reichmanis and G. Smolinsky, Proc. SPIE, 469, p.38, (1984).

2-27) Y. Saotome, H. Gokan, K. Saigo, M. Suzuki and Y. Ohnishi, Proc. Electrochem. Soc., 84-2, p.375, (1984).

2-28) Y. Ohnishi, M. Suzuki, K. Saigo, K. Saotome and H. Gokan, Proc. SPIE, 539, p.62, (1985).

2-29) B. J. Lin, Solid State Technol., 5, p.105, (1983).

2-30) E. Ailing and C. Stauffer, Proc. SPIE, 539, p.194, (1985).

2-31) R. M. R. Gijsen, H. J. J. Kroon, F. A. Vollenbroek and R. Vervoordeldonk, Proc. SPIE, 631, p.108, (1986).

2-32) K. Jain, C. G. Willson and B. J. Lin, IEEE Electron Dev. Lett. EDL-3, p.53, (1982).

- 2-33) H. G. Craighead, *J. Vac. Sci. Technol.*, B3, 1, (1985).
 2-34) M. Nakase, *Proc. SPIE*, 537, p.160, (1985).
 2-35) D. J. Ehrich, J. Y. Tsao and C. O. Bozeler, *J. Vac. Sci. Technol.*, B3, 1, p.1, (1985).
 2-36) G. M. Dubroeuq, D. Zahorsky, *Microcircuit Eng-ineering*, p.73, (1982).
 2-37) M. Nakase, *Proc. SPIE*, 774, p.226, (1987).

第3章関連

- 3-1) K. Tsuji, M. Sasago and K. Kugimiya, in *IEEE 1983 VLSI Symp. VLSI Tech. Dig. Tech. Papers*, p.78, (1983).
 3-2) 笹子勝, 遠藤政孝, 野村登, 辻和彦, 釘宮公一, *信学技報*, SSD83-180, (1983).
 3-3) K. Tsuji, M. Sasago, K. Kugimiya, *IEEE Trans. on Electron Devices*, Vol. ED-31, No.12, p.1861, Dec. (1984).
 3-4) Y. Hirai, M. Sasago, M. Endo, K. Tsuji, and Y. Mano, *IEEE Trans. on CAD*, CAD-6, No.3, p.403, May (1987).
 3-5) W. G. Oldham, S. H. Nandgaonkar, A. R. Neureuther and M. M. O'toole, *IEEE Trans. on Electron Dev.*, ED-26, p.717 (1979).
 3-6) F. H. Dill, W. P. Hornberger, P. S. Hauge and J. M. Shaw, *IEEE Trans. on Electron Dev.*, ED-22, p.445, (1975).

第4章関連

- 4-1) B. F. Griffing and P. R. West, *Polym. Eng. Sci.*, 23, p.947, (1982).
 4-2) M. Sasago, M. Endo, Y. Hirai, K. Ogawa and T. Ishihara, *Tech. Dig. of VLSI Sympo.*, p.76, (1985).
 4-3) L. F. Halle, *J. Vac. Sci. Technol.*, B3, p.323, (1985).
 4-4) 仁木博一, 熊谷明敏, 中瀬真, 佐藤隆, *昭和62年春季応物学会予稿集*, 30p-N-6, p.435, (1987).
 4-5) 内野正市, 上野功, 岩柳隆夫, 白井精一郎, 森内昇, *第31回半導体集積回路技術シンポジウム予稿集*, p.1, (1986).
 4-6) S. Uchino, K. Ueno, T. Iwayanagi and S. Nonogaki, *Proc. ACS Polymeric Materials Sci. Eng.*, 55, p.604, (1986).
 4-7) S. Uchino, T. Iwayanagi, T. Ueno, M. Hashimoto and S. Nonogaki, *Proc. SPIE*, 771, p.11, (1987).
 4-8) K. Kaifu, T. Itoh, M. Kosuge, Y. Yamashita, S. Ohno, T. Asano, K. Kobayashi and G. Nagamatsu, *J. Vac. Sci. Technol.*, B5, p.439 (1987).
 4-9) 遠藤伸裕, 福沢真一, 米沢輝彦, 菊地英夫, 林敬一, 梶沢哲明, *昭和62年春季応物学会予稿集*, 30p-N-8, p.436, (1987).
 4-10) P. R. West and B. F. Griffing, *J. Imaging. Sic.*, 25, p.51, (1986).
 4-11) 遠藤政孝, 笹子勝, 小川一文, *高分子学会予稿集*, 33, p.2893, (1985).
 4-12) 新感光性樹脂, 角田隆弘著, 印刷学会出版部, p.74, (1984).
 4-13) M. Endo, M. Sasago, Y. Hirai, K. Ogawa and T. Ishihara, *Preprints 2nd SPSJ Int. Polym. Conf.*, p.167, (1986).
 4-14) M. Sasago, M. Endo, Y. Hirai, K. Ogawa and T. Ishihara, *Proc. SPIE*, 631, p.321, (1986).
 4-15) M. Endo, M. Sasago, Y. Hirai, K. Ogawa, T. Ishihara, *J. Photopolymer Sci. & Tech. Vol.1, No.1*, p.54, Jun. (1988).
 4-16) M. Endo, M. Sasago, Y. Hirai, K. Ogawa, and T. Ishihara, *J. Electrochemical Soc.*, Vol.13, No.2, p.508, Feb. (1989).
 4-17) B. F. Griffing and P. R. West, *IEEE Electron Device Lett.*, EDL-4, p.14, (1983).
 4-18) R. E. Williams, Jr., E. W. Balch, S. Weaver and J. C. Sardila, *Proc. SPIE*, 631, p.162, (1986).
 4-19) M. Blanco, J. Hightower, M. Cagan and K. Monahan, *J. Electrochem. Soc.*, 134, p.2882, (1987).

- 4-20) W. G. Oldham, S. H. Nandgaonkar, A. R. Neureuther and M. M. O'toole, IEEE Trans. on Electron Dev., ED-26, p.717 (1979).
- 4-21) F. H. Dill, W. P. Hornberger, P. S. Hauge and J. M. Shaw, IEEE Trans. on Electron Dev., ED-22, p.445, (1975).
- 4-22) 中瀬真, 信学技報, SSD84-97, (1984).
- 4-23) M. M. O'toole, IEEE Electron Dev. Lett., EDL-6, p.282, (1985).
- 4-24) 笹子勝, 遠藤政孝, 小川一文, 平井義彦, 野村登, 竹山健一, 大曾根隆志, 信学技報, SSD84-144, (1985).
- 4-25) 遠藤政孝, 笹子勝, 小川一文, 石原健, 第29回半導体集積回路技術シンポジウム予稿集, p.12. (1985).
- 4-26) 遠藤政孝, 笹子勝, 平井義彦, 小川一文, 石原健, 電子情報通信学会論文誌C, J71-C, p.179, (1988).
- 4-27) R. Bauer, Zent. Bacteril.Parasitenk. Abt.-II., 98, p.138, (1938).
- 4-28) 中村敏, 油化学, 34, p.865, (1985).
- 4-29) 遠藤政孝, 笹子勝, 小川一文, 高分子学会予稿集, 35, p.499, (1986).
- 4-30) 遠藤政孝, 笹子勝, 平井義彦, 小川一文, 石原健, 高分子論文集, 45, p.245, (1988).
- 4-31) H. Stover, M. Nagler, I. Bol and V. Miller, Proc. SPIE, 470, p.22, (1984).
- 4-32) S. Lee, S. Grilloand and V. Miller, Proc. SPIE, 538, p.17, (1985).
- 4-33) V. Miller and H. Stover, Solid State Technol., p.127, (1985).
- 4-34) M. Tipton, V. Marriott and G. Fuller, Proc. SPIE, 633, p.24, (1986).
- 4-35) H. Fukuda, T.Tanaka and N. Hasegwa, IEEE Electron Dev. Letters, EDL-8, p.179, (1987).
- 4-36) 笹子勝, 遠藤政孝, 石原健, 電子材料, p.46, (1985).
- 4-37) 笹子勝, 遠藤政孝, 平井義彦, 小川一文, 石原健, 応用物理, 56, p.56, (1987).
- 4-38) 笹子勝, 遠藤政孝, 平井義彦, 小川一文, 石原健, 電子材料, 27, p.78, (1988).
- 4-39) M. Toriumi, H. Shiraiishi, T. Ueno, N. Hayashi, S. Nonogaki, F.Sato and K.Kadota, J. Electrochem. Soc., 134, p.936 (1987).
- 4-40) R. F. Leonard and W. F. CordesII, Proc. SPIE, 334, p.188, (1982).
- 4-41) 平井義彦, 笹子勝, 遠藤政孝, 小川一文, 間野洋治郎, 石原健, 信学技報, SSD84-145, (1985).
- 4-42) Y. Hirai, M. Sasago, M. Endo, K. Ogawa, Y. Mano and T. Ishihara, J. Vac. Sci. Technol., B5, p.434, (1987).
- 4-43) A. R. Neureuther and M. M. O'toole, J. Vac. Sci Technol., B5, p.470, (1987).
- 4-44) 平井義彦, 笹子勝, 間野洋治郎, 信学技報, SSD84-146, (1985).

第5章関連

- 5-1) M. Endo, M. Sasago, K. Matsuoka, and N. Nomura, Jpn. J. Appl. Phys., Vol.28, No.3, p.549, Mar. (1988).
- 5-2) M.Endo, M. Sasago, K. Matsuoka, and N.Nomura, J. Vac. Sci & Tech. B, Vol.7, No.5, p.549. Sep. /Oct., (1989).
- 5-3) M. Sasago, M.Endo, Y. Tani, H. Nakagawa, Y. Hirai, and N. Nomura, in IEEE Proc. Int. Electron Devices Meet., p.88, (1988).

第6章関連

- 6-1) G. M. Dubroeuçg and D. Zahorsky, Proc. Int. Conf. Microcircuit Eng., p.73, (1982).
- 6-2) J. R. Sheats, Appl. Phys. Lett., 44, p.1016, (1984).
- 6-3) D. J. Erlich, J. Y. Tsao and C.O. Bozler, J. Vac. Sci. Technol., B3, 1, p.1, (1985).
- 6-4) K. Jain, C. G. Willson and B. J. Lin, IBM J. Res. Dev., 26, p.151, (1982).
- 6-5) K. Jain, C. G. Willson and B. J. Lin, IEEE Electron Dev. Lett., EDL-3, p.53, (1982).
- 6-6) K. Jain and R. T. Kerth, Appl. Opt., 23, p.648, (1984).
- 6-7) Y. Kawamura, K.Toyoda and S. Namba, Appl. Phys. Lett., 40, p.374, (1982).

- 6-8) V. Pol, J. H. Bennowitz, G. C. Escher, M. Feldman, V. A. Firtion, T. E. Jewell, B. E. Wilcomb and J. T. Clemens, Proc. SPIE, 633, p.6, (1986).
- 6-9) 野中美沙子, 佐藤隆, 東川巖, 中瀬真, 昭和62年春季応物学会予稿集, 30a-N-8, p.432, (1987).
- 6-10) M. Nakase, T. Sato, M. Nonaka, I. Higashikawa and Y. Horiike, Proc. SPIE, 773, p.226, (1987).
- 6-11) M. Kameyama and K. Usida, Proc. SPIE, 774, p.147, (1987).
- 6-12) 遠藤政孝, 中川秀夫, 笹子勝, 小川一文, 石原健, 信学技報, SSD86-111, (1986).
- 6-13) J. H. Bennowitz, G. C. Escher, M. Feldman, V. A. Firtion, T. E. Jewell, V. Pol, B. E. Wilcomb and J. T. Clemens, in IEEE Proc. Int, Electron Devices Meeting, p.312, (1986).
- 6-14) M. Sasago, M. Endo, Y. Hirai, K. Ogawa and T. Ishihara, in IEEE Proc. Int, Electron Devices Meeting, p.316, (1986).
- 6-15) V. Pol, J. H. Bennowitz, G. C. Escher, M. Feldman, V. A. Firtion, T. E. Jewell, B. E. Wilcomb and J. T. Clemens, in IEEE Tech. Dig. of VLSI Sympo., p.1, (1987).
- 6-16) T. E. Jewell, J. H. Bennowitz, G. C. Escher and V. Pol, Proc. SPIE, 774, p.124, (1987).
- 6-17) K. F. Walsh, M. M. Dunn, D. S. Holbrook and J. H. Brunning, Proc. SPIE, 774, p.155, (1987).
- 6-18) A. Suzuki, S. Yabu and M. Ookubo, Proc. SPIE, 772, p.58, (1987).
- 6-19) 中川秀夫, 笹子勝, 遠藤政孝, 谷美幸, 小川一文, 石原健, 信学技報, SDM87-146, (1987).
- 6-20) H. Nakagawa, M. Sasago, M. Endo, Y. Hirai, K. Ogawa and T. Ishihara, Proc. SPIE, 994, p.400, (1988).
- 6-21) 遠藤政孝, 笹子勝, 平井義彦, 小川一文, 石原健, 信学技報, SSD86-58, (1986).
- 6-22) 遠藤政孝, 笹子勝, 中川秀夫, 平井義彦, 小川一文, 石原健, 電子情報通信学会論文誌C, J71-C, p.195, (1988).
- 6-23) Y. Kawamura, K. Toyoda and S. Namba, J. Appl. Phys., 53, p.6489, (1982).
- 6-24) T. Matsuzawa, T. Iwayanagi, H. Obayashi and H. Tomioka, Microelectronic Engineering, 1, p.185, (1983).
- 6-25) M. Fukuda, J. Electronic Engineering, 19, p.40, (1982).
- 6-26) H. Ito and C. G. Willson, Polym. Eng. Sci., 23, p1012, (1983)
- 6-27) M. Endo, Y. Tani, M. Sasago, K. Ogawa, and N. Nomura, Jpn. J. Appl. Phys., Vol.27, No.11, p.L2219, Nov. (1988).
- 6-28) M. Endo, Y. Tani, M. Sasago, and N. Nomura, Polymer J., Vol.21, No.8, p.603, (1989).
- 6-29) M. Endo, Y. Tani, M. Sasago, K. Ogawa, and N. Nomura, Polymer Eng. & Sci., Vol. 29, No.13, p.859, mid-Jul. (1989).
- 6-30) M. Endo, Y. Tani, M. Sasago, and N. Nomura, J. Electrochemical Soc., Vol.136, No.9, p.2615, Sep. (1989).
- 6-31) M. Endo, Y. Tani, M. Sasago, N. Nomura, and S. Das, Jpn. J. Appl. Phys., Vol.28, No.11, p. 2357, Nov. (1989).
- 6-32) Y. Tani, M. Sasago, and H. Fujimoto, J. Photopolymer Sci. & Tech. Vol., No.1, p.123, Jun. (1989).
- 6-33) 笹子勝, 石原健, 電気学会誌, 108巻, 11号, (1988).
- 6-34) 谷美幸, 遠藤政孝, 笹子勝, 平井義彦, 小川一文, 電子情報通信学会論分誌C, Vol. J72-C-II, No.5, p.554, (1989).
- 6-35) 笹子勝, 応用物理, 第58巻, 第11号, p.1655, (1989).
- 6-36) 谷美幸, 笹子勝, 高分子39巻, p.620, (1990).
- 6-37) 笹子勝, 谷美幸, 遠藤政孝, 野村登, National Technical Report, Vol 36, 4, p. 444, Aug. (1990).
- 6-38) B. D. Grant, N. J. Cleolas, J. C. Tweieng and C. G. Willson, IEEE Trans. on Electron Devices, ED-28, p.1300, (1981).
- 6-39) C. G. Willson, R. D. Miller, D. R. Mckean and L. A. Pederson, Proc. SPIE, 771, 2, p.2, (1987).
- 6-40) G. Schwartzkopf, Proc. SPIE, 920, p.51, (1988).
- 6-41) M. Sasago, Y. Hirai, M. Endo, H. Nakagawa, K. Ogawa, and N. Nomura, in IEEE Dig. of Papers 1988 MicroProcess Conf., p.54, 1988.

第7章関連

- 7-1) M. D. Levenson, N. S. Viswanathan, R. A. Simpson, IEEE Trans. on Electron Devices ED-29, p.1828, (1982).
- 7-2) Y. Sakitani, H. Yoda, H. Todokoro, Y. Shibata, T. Yamazaki, K. Ohbitu, N. Sai5tou, S. Moriyama, G. Matsuoka, F. Murai, M. Okumura, Proc. EIPB'92, (1992).
- 7-3) N.Furuya, T. Ono, N. Horiuchi, K. Yamanaka, T. Miyata, Proc. SPIE, 1264, p. 520, (1990).
- 7-4) M.Sasago, M. Endo, Y. Tani, S. Kobayashi, T. Koizumi, T. Matsuo, K. Yamashita, and N. Nomura, IEICE Trans. Electron., E76-C, 4, p. 582, (1993).
- 7-5) 笹子勝, 谷美幸, 遠藤政孝, 野村登, National Technical Report, Vol 40, 1, p. 97, Feb. (1994).
- 7-6) 遠藤政孝, 谷美幸, 長井康裕, 藪俊樹, 内藤康志, 岡田昌三, 笹子勝, 信学技報, SDM90-206, (1991).
- 7-7) K. Yamashita, M. Endo, M. Sasago, N. Nomura, H. Nagano, S. Mizuguchi, T Ono, and T. Sato, J. of Vac. Sci. & Tech. B, Vol.11, No.6, p. 2692, Nov./Dec., (1993).
- 7-8) M. Sasago, T. Matsuo, K. Yamashita, M. Endo, K. Matsuoka, T. Koizumi, A. Katsuyama, and N. Nomura, IEICE Trans. on Electronics, Vol.E77-C, No.3,p.416, March, (1994)
- 7-9) 勝山亜希子, 橋本和彦, 山下一博, 遠藤政孝, 笹子勝, 信学技報, SDM-156, p.47, (1993).
- 7-10) 山下一博, 勝山亜希子, 小林智, 松尾隆広, 遠藤政孝, 笹子勝, 信学技報, SDM93-114, p.33, (1993).
- 7-11) K.Wani, Y. Ogata, Y. Watarai, T. Ono, T. Miyata, R. Sano, and Y. Terui, Proc. SPIE's Boston Symp. on Excimer Beam Applications, 988, p.2, Sept. (1988).
- 7-12) P.Lokai, P. Oesterlin, H. -J. Kahlert and D. Basting, Proc. SPIE, 1264, p.35, Mar. (1990).
- 7-13) N.Nishida, J. Sakurai, T. Kawamura, K.Yamagata, N. Kumano, S. Imai, S. Ishida, Y. Fujimori, CLEO'89, THU5, Apr. (1989).
- 7-14) R.K.Brimacombe, T. J. McKee, E. D. Mortimer, B. Norris, J. Reid, and T. A. Znotins, CLEO'89, THU6, Apr. (1989).
- 7-15) N. Shiraishi, S. Hirukawa, Y. Takeuchi, N. Magome, Proc. SPIE, 1674, p. 741, (1992).
- 7-16) T. Sato, M. Nakanishi, T. Ono, M. Nagno, S. Kobayashi, K. Yamashita, M. Sasago, N. Nomura, Proc. IEEE 4th MicroProcess Conference, p72, (1991).
- 7-17) 小林 智, 小泉太一, 山下一博, 笹子 勝, 1994年版超LSI製造試験装置ガイドブック; 電子材料, p. 99, (1993).
- 7-18) Y. Nakanishi, H. Takeuchi, M. Yamamoto, A. Aoki, T. Inoue, M. Kimura, H. Nagano, K. Yamashita, M. Sasago, Abstracts 36th Int. Symp. on Electron, Ion and Photon Beams, J2, (1992).
- 7-19) K. Yamashita and N. Nomura, Proc. SPIE, 1264, p.219, (1990).
- 7-20) 笹子勝, 谷美幸, 遠藤政孝, 野村登, National Technical Report, Vol 36, 4, p. 444, Aug. (1990).
- 7-21) W. E. Feely, Polym. Eng. Sci., 26, p.1101, (1986).
- 7-22) K. F Dossel, Microelectronics Eng., 5, p.97, (1986).
- 7-23) H. Ito and C.G. Willson, ACS. Symp. Ser., 248, p 11, (1984).
- 7-24) J. V. Crivello, Macromolecules, 10, 6, p. 1307, (1977).
- 7-25) O. Nalamasu, M. Cheng, A. G. Timko, V. Pol, E. Reichmanis and L. F. Thompson, J. of Photopolymer Science and Technology, 4, 3, p. 299, (1991).
- 7-26) S. A. MacDonald, N. J. Clecak, H. R. Wendt, and C. G. Willson, Proc. SPIE, 1466, p. 3, (1991).
- 7-27) Y. Tani, M. Sasago, H. Fujimoto, and N. Nomura, in IEEE Digest of Tech. Papers of Symp. on VLSI Technology, p. 7, (1990).
- 7-28) A. Katsuyama, M. Endo, K. Yamashita, M. Sasago, Proc. Polymers for Microelectronics'93, p.72, (1993).
- 7-29) K. Przybilla, H. Roschant, W. Spiep, Ch. Eckes, S. Chatterjee, D. Khanna, G. Powloski and R. Dommel, Proc. SPIE, 1466, p. 174, (1991).
- 7-30) K. Yamashita, M. Endo, M. Sasago, N. Nomura, H. Nagano, S. Mizuguchi, T Ono, and T. Sato, J. Vac. Sci. & Tech. B, Vol. 11, No.6, p. 2692, Nov./Dec., (1993).
- 7-31) H. Nakagawa, T. Koizumi, K. Harfuji, N. Nomura, Jap. J. Applied Physics, 30, 9A, p. 2112, (1991).

- 7-32) Y. Hirai, S. Tomida, K. Ikeda, M. Sasago, M. Endo, S. Hayama, and N. Nomura, *IEEE Trans. on Computer-aided Design of Integrated Circuits and Systems*, 10, p. 802, (1991).
- 7-33) T. Koizumi, S. Kobayashi, M. Endo, M. Sasago, N. Nomura, *J. Photopolymer Sci. and Technol.*, 6, 4, p. 637, (1993).
- 7-34) H. Kotani, H. Akamatsu, Y. Naito, T. Fujii, T. Iwata, T. Tsuji, H. Asaka, Y. Itoh, N. Shimizu, J. Hirase, Y. Shibata, K. Yamashita, T. Hori, and T. Fujita, in *IEEE ISSCC'94 Digest of Technical Papers*, p.142, (1994).
- 7-35) J. C. Matthews and J. I. Willmott. Jr, *Proc. SPIE*, 470, p.194 (1984).
- 7-36) 松尾誠太郎、原田勝征,"新照明系を用いた高解像光リソグラフィ", *応用物理*、第61巻、第11号 p.1139, (1992).
- 7-37) K. Kamon, T. Miyamoto, Y. Myoi, H. Nagata, M. Tanaka, K. Horie, *Jpn. J. Appl. Phys. Vol.30, 11B*, P.3021, (1991)
- 7-38) H. Fukuda, Y. Kobayashi, K. Hama, T. Tawa, S. Okazaki, *Jpn. J. Appl. Phys. Vol.32, 12B*, P.5845, (1993)

第8章関連

- 8-1) M. Sasago, K. Yamashita, M. Endo, T. Koizumi, T. Matsuo, K. Matsuoka, A. Katsuyama, S. Kobayashi, and N. Nomura, *J. Photopolymer Sic. & Technology*, Vol.6, No.4, p.433, 1993.
- 8-2) H.Nakagawa, M.Sasago, Y.Tani, M.Endo, K.Koga, Y.Hirai, and N.Nomura, in *IEEE 1989 VLSI Symp. Tech. Dig. Tech. Papers*, p.9, 1989. (Kyoto,Japan)
- 8-3) 笹子勝, 中川秀夫, 谷美幸, 遠藤政孝, 野村登, 電気学会, 光応用・視覚研究会資料,LAV-89-7, p.7, (1989).
- 8-4) M. Sasago, K. Yamashita, and N.Nomura, *J. Vac. Sci & Tech. B*, to be submitted.
- 8-5) N. Nomura, H. Nakagawa, Y. Tani, K. Koga, N. Araki, T. Sato, and M. Sasago, *Microelectronic Engineering*, Vol.11, p. 183, (1990).
- 8-6) M. Sasago, Y. Tani, M. Endo, and N. Nomura, *Proc. SPIE*, 1264, p. 466, (1990).
- 8-7) M. Sasago, M. Endo, K. Hashimoto, K. Yamashita, A. Katsuyama, T. Matsuo, Y. Tani, and N.Nomura, *IEEE Trans on Electron Devices*, to be submitted.
- 8-8) K. Yamashita, M. Endo, M. Sasago, N. Nomura, H. Nagano, S. Mizuguchi, T Ono, and T. Sato, *J. Vac. Sci. & Tech. B*, Vol11, No.6, p. 2692, Nov./Dec., (1993).
- 8-9) 笹子勝, 山下一博, 電気学会, 電子デバイス研究会資料, EDD-94-10, p.17, (1994).
- 8-10) D. J. Erlich, J. Y. Tsao and C.O. Bozler, *J. Vac. Sci. Technol.*, B3, 1, p.1, (1985).
- 8-11) J. D. Buckley C. Karatzas, *Proc. SPIE*, 1088, p.424, (1993).
- 8-12) 持田省郎, 久保圭司, 長野寛之, 久保田三郎, 松村庚一, 上田修治, *National Technical Report*, 36, 2, p. 172, (1990).
- 8-13) 吉住恵一, 金馬駿之介, 妻鹿浩史, *National Technical Report*, 36, 2, p. 232, (1990).
- 8-14) 山本有美, *光技術コンタクト*, 30, 5, p.267, (1992).
- 8-15) H. W. Lox, *J. Sci. Instrum.*, 16, p. 257, (1939).
- 8-16) 川井友美, *光学*10, p. 270, (1981).
- 8-17) 黒部孝治, 1990年度精密工学会秋期大会学術講演会講演論文集, p.639, (1990).
- 8-18) H. Ito and C.G. Willson, *ACS. Symp. Ser.*, 248, p 11, (1984).
- 8-19) T. Tanaka, M. Morigami, N. Atoda, in *IEEE Dig. of Papers 1993 MicroProcess Conf.*, p.26, (1993).

第9章関連

- 9-1) W. T. Wong, J. Y-C. Pau and J. D. Plummer, in *1992 IEEE/SEMI Int. Semiconductor Manufacturing Science Sympo.*, p.117, (1992).
- 9-2) T. Matsuo, M. Endo, K. Yamashita, M. Sasago, and N. Nomura, *J. Photopolymer Sic. & Technology*, Vol.5, No.1, p.141, (1992).

- 9-3) T. Matsuo, K. Yamashita, M. Endo, M. Sasago, N. Nomura, M. Shirai, and M. Tsunooka, in IEEE 1994 VLSI Symp. Tech. Dig. Tech. Papers, (1994).
- 9-4) K. Matsuoka, K. Yamashita, M. Sasago, and N. Nomura, Jpn. J. Appl. Phys. Vol.32, 1-12B, p6071, Dec. (1993).
- 9-5) M. Sasago, K. Matsuoka, A. Misaka, S. Hashimoto and S. Odanaka, IEEE Trans. on Semiconductor Manufact., to be submitted.
- 9-6) F. Coopmans and B. Roland, Proc. SPIE, 631, p.34, (1986).
- 9-7) M. D. Levenson, N. S. Viswanathan, R. A. Simpson, IEEE Trans. on Electron Devices ED-29, p.1828, (1982).
- 9-8) K. Kamon, T. Miyamoto, Y. Myoi, H. Nagata, M. Tanaka, K. Horie, Jpn. J. Appl. Phys. Vol.30, 11B, P.3021, (1991).
- 9-9) M. A. Hartney, M. Rothschild, R. R. Kunz, D. J. Ehrlich, and D. C. Shaver, J. Vac. Sci. Technol., B8, p.1476, (1990).
- 9-10) M. D. Johnson, M. A. Hartney and R. R. Kunz, J. Photopolym. Sci. Technol., Vol.6, No. 4, p.489, (1993).
- 9-11) M. Shirai and M. Tsunooka, Macromolecules, 25, p.195, (1992).

第10章関連

- 10-1) M. Sasago, K. Yamashita, M. Endo, T. Koizumi, T. Matsuo, K. Matsuoka, A. Katsuyama, S. Kobayashi, and N. Nomura, J. Photopolym. Sci. Technol., Vol.6, No.4, p.433, (1993).

研究業績一覧

● 学術論文

第3章

1) K. Tsuji, M. Sasago, K. Kugimiya; "Submicrometer optical lithography using a double-layer resist by a single development technology", IEEE Trans. on Electron Devices, Vol. ED-31, No.12, p.1861, Dec. 1984.

2) Y. Hirai, M. Sasago, M. Endo, K. Tsuji, and Y. Mano; "Process Modeling for Photoresist Development and Design of DLR/sd (Double-Layer Resist by a Single Development) Process", IEEE Trans. on CAD, CAD-6, No.3, p.403, May, 1987.

第4章

3) 笹子勝, 遠藤政孝, 平井義彦, 小川一文, 石原健, "水溶性ポリマーによる微細パターン形成", 応用物理, 第56巻, 第1号, p.56, 1987.1.

4) Y. Hirai, M. Sasago, M. Endo, K. Ogawa, Y. Mano, and T. Ishihara; "Study of half-micron photolithography by means of contrast enhanced lithography process", J. Vac. Sci. & Tech. B, Vol.5, No.1, p.434, Jan./Feb. 1987.

5) 遠藤政孝, 笹子勝, 平井義彦, 小川一文, 石原健, "光退色性試薬濃度によるコントラストエンハンスト効果の研究", 電子情報通信学会論分誌C, Vol. J71-C, No.2, p.179, 1988.2.

6) 遠藤政孝, 笹子勝, 平井義彦, 小川一文, 石原健, "水溶性コントラストエンハンスト材料の材料特性"高分子論文集, Vol45, No.3, p.245, 1988.3.

7) M. Endo, M. Sasago, Y. Hirai, K. Ogawa, T. Ishihara; "Contrast enhanced lithography using water-soluble photopolymer", J. Photopolymer Sci. & Tech. Vol.1, No.1, p.54, Jun. 1988.

8) M. Endo, M. Sasago, Y. Hirai, K. Ogawa, and T. Ishihara; "Application of water soluble contrast enhancing material to g-line lithography", J. Vac. Sci. & Tech. B, Vol.6, No.5, p.1600, Sep./Oct. 1988.

9) M. Endo, M. Sasago, Y. Hirai, K. Ogawa, and T. Ishihara; "New water-soluble contrast enhancing material for i-line lithography", J. Electrochemical Soc., Vol.13, No.2, p.508, Feb. 1989.

第5章

10) M. Endo, M. Sasago, K. Matsuoka, and N. Nomura; "High-aspect-ratio alkaline surface Treatment method of Dyed photoresist", Jpn. J. Appl. Phys., Vol.28, No.3, p.549, Mar. 1988.

11) M. Endo, M. Sasago, K. Matsuoka, and N. Nomura; "High-aspect-ratio resist pattern fabrication by alkaline surface treatment", J. Vac. Sci. & Tech. B, Vol.7, No.5, p.1076, Sep./Oct., 1989.

第6章

12) M. Endo, M. Sasago, Y. Hirai, K. Ogawa, and T. Ishihara; "New portable conformable masking excimer laser lithography using water-soluble contrast enhanced material", J. Vac. Sci. & Tech. B, Vol.6, No.1, p.87, Jan/Feb, 1988.

13) 遠藤政孝, 笹子勝, 中川秀夫, 平井義彦, 小川一文, 石原健, "KrFエキシマレーザによるレジスト評価", 電子情報通信学会論分誌C, Vol.J71-C, No.2, p.195, 1988.2.

14) M. Endo, M. Sasago, H. Nakagawa, Y. Hirai, K. Ogawa, and T. Ishihara; "Excimer laser lithography using contrast enhancing material", J. Vac. Sci. & Tech. B, Vol.6, No.2, p.559, Mar/Apr, 1988.

15) 遠藤政孝, 笹子勝, 平井義彦, 小川一文, 石原健, "5-ジアゾ-メルドラム酸を用いた遠紫外線コントラストエンハンスト材料", 高分子論文集, Vol45, No.5, p.453, 1988.5.

16) M. Sasago, M. Endo, H. Nakagawa, Y. Hirai, K. Ogawa, T. Ishihara; "Excimer laser lithography", J. Photopolymer Sci. & Tech. Vol.1, No.1, p.92, Jun. 1988.

17) K. Ogawa, M. Sasago, M. Endo, and T. Ishihara; "A KrF excimer laser lithography for half micron devices", Jpn. J. Appl. Phys., Vol.27, No.8, p.1521, Aug. 1988.

- 18) K. Ogawa, M. Sasago, M. Endo, H. Nakagawa, Y. Tani, and T. Ishihara; "Advanced KrF excimer stepper for half micron lithography", *J. Electrochemical Soc.*, Vol.135, No.9, p.2347, Sep. 1988.
- 19) 小川一文, 笹子勝, 遠藤政孝, 中川秀夫, 谷美幸, 石原健, "エキシマレーザーリソグラフィー", *レーザー研究*, Vol.16, No.8. 1988.8.
- 20) M. Endo, Y. Tani, M. Sasago, K. Ogawa, and N. Nomura; "A new photobleachable positive resist for KrF excimer laser lithography", *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol.27, No.11, p.L2219, Nov.1988.
- 21) 谷美幸, 遠藤政孝, 笹子勝, 平井義彦, 小川一文, "新しいレジストを用いたエキシマレーザーリソグラフィ", *電子情報通信学会論分誌C*, Vol. J72-C-II, No.5, p.554, 1989.5.
- 22) M. Endo, Y. Tani, M. Sasago, and N. Nomura; "o-Nitrobenzyl ester based deep UV resist for KrF excimer laser lithography", *Polymer J.*, Vol.21, No.8, p.603, 1989.
- 23) Y. Tani, M. Sasago, and H. Fujimoto; "KrF excimer laser resist using 2-diazo-1, 3-dicarbonyl compounds", *J. Photopolymer Sci. & Tech.* Vol., No.1, p.123, Jun. 1989.
- 24) M. Endo, Y. Tani, M. Sasago, K. Ogawa, and N. Nomura; "Novel positive deep UV resist for KrF excimer laser lithography", *Polymer Eng. & Sci.*, Vol. 29, No.13, p.859, mid-Jul.1989.
- 25) M. Endo, Y. Tani, M. Sasago, and N. Nomura; "Azide-styrene resin negative deepUV resist for KrF excimer lithography", *J. Electrochemical Soc.*, Vol.136, No.9, p.2615, Sep. 1989.
- 26) M. Endo, Y. Tani, M. Sasago, N. Nomura, and S. Das; "Application of contrast enhancement material to photobleachable deep ultraviolet resist", *J. Vac. Sci & Tech. B*, Vol.7, No.5, p.1072, Sep/Oct., 1989.
- 27) M. Endo, Y. Tani, M. Sasago, N. Nomura, and S. Das; "Application of photobleachable positive resist and contrast enhancement material to KrF excimer laser lithography", *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol.28, No.11, p. 2357, Nov. 1989.
- 28) 笹子勝, 谷美幸, 遠藤政孝, 野村登, "KrFエキシマレーザーリソグラフィ対応高透明性レジスト", *National Technical Report*, vol 36, 4, p. 444, Aug., 1990.
- 29) Y. Hirai, S. Tomida, K. Ikeda, M. Sasago, M. Endo, S. Hayama, and N. Nomura; "Three-dimensional resist process simulator PEACE", *IEEE Trans. on CAD.*, Vol.10, No.6, June, 1991.
- 30) M. Endo, Y. Tani, M. Sasago, N. Nomura, and S. Das; "Application of photoacid generating chemistry to photobleachable deep ultraviolet resist", *J. Vac. Sci & Tech. B*, to be accepted.
- 31) M. Endo, M. Sasago, Y. Tani, and N. Nomura, "Improvement of pattern profile with surface treatment for excimer laser lithography", *J. Vac. Sci & Tech. B*, to be accepted.

第7章

- 32) M. Endo, Y. Tani, T. Yabu, S. Okada, M. Sasago, and N. Nomura, "KrF excimer laser lithography technology for 64MDRAM", *J. Photopolymer Sic. & Technology*, Vol.4, No.3, p.361, Jun. 1991.
- 33) Y. Yamada, Y. Nakata, J. Hasegawa, N. Amano, A. Shibayama, M. Sasago, N. Matsuo, T. Yabu, S. Matsumoto, S. Okada, M. Inoue, "A 64-Mb DRAM with meshed power line", *IEEE J. Solid-State Circuits*, Vol.26, No. 11, Nov. 1991.
- 34) M. Sasago, M. Endo, Y. Tani, S. Kobayashi, T. Koizumi, T. Matsuo, K. Yamashita, and N. Nomura; "Quarter micron KrF excimer laser lithography", *IEICE Trans. on Electronics*, Vol.E76-C, No.4, April, 1993.
- 35) T. Koizumi, S. Kobayashi, M. Endo, M. Sasago, and N. Nomura, "Reduction of Multiple interference effect for lithography", *J. Photopolymer Sic. & Technology*, Vol.6, No.4, p.637, Jun. 1993.
- 36) M. Sasago, Y. Tani, S. Kobayashi, T. Koizumi, T. Matsuo, K. Hashimoto, A. Katsuyama, K. Matsuoka, K. Yamashita, M. Endo, and N. Nomura; "Recent development in eximer laser lithography for 64M and 256Mbit DRAMs", *IEEE Trans. on Semiconductor Manufact.*, to be submitted.
- 37) 笹子勝, 谷美幸, 遠藤政孝, 野村登, "KrFエキシマレーザーリソグラフィ対応化学増幅型レジスト", *National Technical Report*, Vol.40, 1, p. 97, Feb. 1994.
- 38) M. Sasago, T. Matsuo, K. Yamashita, M. Endo, K. Matsuoka, T. Koizumi, A. Katsuyama, and N. Nomura, "New technologies of KrF excimer laser lithography system in 0.25 micron complex circuit patterns", *IEICE Trans. on Electronics*, Vol.E77-C, No.3, p.416, Mar. 1994.

39) M. Sasago, A. Katsuyama, M. Endo and K. Yamashita; "A study of denaturation due to DUV irradiation on chemically amplified positive resist", J. Electrochemical Soc., to be prepared.

第8章

40) M. Sasago, M. Endo, K. Hashimoto, K. Yamashita, A. Katsuyama, T. Matsuo, Y. Tani, and N. Nomura; "Challenges in excimer laser lithography for 256Mb dRAM and beyond", IEEE Trans on Electron Devices, to be submitted.

41) M. Sasago, K. Yamashita, and N. Nomura; "Aspherical projective lens performance for ArF excimer laser lithography", J. Vac. Sci & Tech. B, to be prepared.

42) K. Yamashita, M. Endo, M. Sasago, N. Nomura, H. Nagano, S. Mizuguchi, T. Ono, and T. Sato, "Performance of 0.2micron optical lithography using KrF and ArF excimer laser sources", J. Vac. Sci. & Tech. B, Vol11, No.6, p. 2692, Nov./Dec., 1993.

第9章

43) T. Matsuo, M. Endo, K. Yamashita, M. Sasago, and N. Nomura, "Silylation process for quarter micron lithography", J. Photopolymer Sic. & Technology, Vol.5, No.1, p.141, 1992.

44) K. Matsuoka, K. Yamashita, M. Sasago, and N. Nomura, "A new analytical technique for evaluating standing wave effect of chemically amplified positive resist", Jpn. J. Appl. Phys. Vol.32, 1-12B, p. 6071, Dec. 1993.

45) M. Sasago, K. Matsuoka, A. Misaka, S. Hashimoto and S. Odanaka, "Proximity correction design system for random logic gates", IEEE Trans.on Semiconductor Manufact., to be prepared.

第10章

46) M. Sasago, K. Yamashita, M. Endo, T. Koizumi, T. Matsuo, K. Matsuoka, A. Katsuyama, S. Kobayashi, and N. Nomura, "A strategic optical lithography for below 0.25 micron design rules", J. Photopolymer Sic. & Technology, Vol.6, No.4, p.433, 1993.

その他

47) T. Ozone, M. Fukumoto, G. Fuse, A. Shinohara, S. Odanaka, and M. Sasago, "Ion-implanted thin polycrystalline-silicon high-value resistors for high-density poly-load static RAM application", IEEE Trans. on Electron Devices, Vol.ED-32, No.9, p.1749, Sep. 1985.

48) S. Odanaka, M. Fukumoto, G. Fuse, M. Sasago, T. Yabu, and T. Ozone, "A new half-micrometer p-channel MOSFET with efficient punchthrough stops", IEEE Trans. on Electron Devices, Vol.ED-33, No.3, p.317, Mar. 1986.

49) G. Fuse, M. Fukumoto, A. Shinohara, S. Odanaka, M. Sasago, and T. Ohzone, "A new isolation method with boron-implanted sidewalls for controlling narrow-width effect", IEEE Trans. on Electron Devices, Vol.ED-34, No.2, p.356, Sep. 1987.

50) M. Endo, M. Sasago, Y. Hirai, A. Ueno, and N. Nomura; "Two-layer resist fabrication by new portable conformable masking i-line lithography", J. Vac. Sci & Tech. B, Vol.7. No.1, p.55, Jan./Feb. 1989.

51) M. Endo, M. Sasago, H. Nakagawa, A. Ueno, and N. Nomura; "Development methods for submicron optical lithography", Jpn. J. Appl. Phys., Vol.28, No.10, p.2035, Oct. 1989.

52) 遠藤政孝, 笹子勝, 小川一文, "ポジ形フォトレジストの遠紫外線照射効果とそのリソグラフィへの応用", 高分子論文集, Vol.45, No.10, p.771, 1989.10.

53) K. Hashimoto, T. Matsuo, M. Endo, M. Sasago, and N. Nomura; "Alkaline soluble polysiloxane electron-beam resist for 0.2micron rule 256 Mbit DRAM fabrication", J. Vac. Sci. & Tech. B, Vol11, No.2, p. 281, March/April, 1993.

54) N. Matsuo, Y. Nakata, H. Ogawa, T. Yabu, S. Matsumoto, M. Sasago, K. Hashimoto, and S. Okada, "Spread-Vertical-Capacitor Cell (SVC) for high-density dRAM's", IEEE Trans. on Electron Devices, Vol.ED-40, No.4, p.1749, Apr. 1993.

55) K. Hashimoto, M. Endo and M. Sasago; "Novel Silicon-containing negative resist for bilayer application in electron beam direct writing", Jpn. J. Appl. Phys. Vol.32, 1-7, p.3317, July 1993.

● 主要国際学会議講演

VLSI Technology Symposium

- 1) K. Tsuji, M. Sasago, and K. Kugimiya, "Submicron optical lithography using a double layer resist by single development technology", in IEEE 1983 VLSI Symp. VLSI Tech. Dig. Tech. Papers, p.78, 1983. (Hawaii, USA)
- 2) M. Sasago, M. Endo, K. Ogawa, Y. Hirai, N. Nomura, T. Ohzone, and T. Ishihara, "Submicron optical contrast enhanced lithography using water-soluble materials", in IEEE 1985 VLSI Symp. Tech. Dig. Tech. Papers, p76, 1985. (Kobe, Japan)
- 3) S. Odanaka, M. Fukumoto, G. Fuse, A. Shinohara, M. Sasago, T. Yabu, and T. Ozone, "A new half-micron p-channel MOSFET with effient punchthrough stops", in IEEE 1985 VLSI Symp. Tech. Dig. Tech. Papers, p.62, 1985. (Kobe,Japan)
- 4) G. Fuse, S. Odanaka, M. Sasago, M. Fukumoto, A. Shinohara, H. Umimoto, T. Yabu, T. Ozone, and T. Ishihara, "Trench isolation with boron implanted side-walls for controling narrow-width effect of n-MOS threshold voltage", in IEEE 1985 VLSI Symp. Tech. Dig. Tech. Papers, p.58, 1985. (Kobe, Japan)
- 5) M. Endo, H. Nakagawa, Y. Hirai, M. Sasago, K. Ogawa, and T. Ishihara, "Advanced excimer laser lithography", in IEEE 1987 VLSI Tech. Dig. Tech. Papers, p.5, 1987. (Karuizawa, Japan)
- 6) Y. Hirai, M. Sasago, M. Endo, K. Ikeda, S. Tomida, and S. Hayama, "Three dimensional process simulator for photo and electron beam and estimations of proximity effects", in IEEE 1987 VLSI Tech. Dig. Tech. Papers, p.15, 1987. (Karuizawa, Japan)
- 7) H. Nakagawa, M. Sasago, Y. Tani, M. Endo, K. Koga, Y. Hirai, and N. Nomura, "ArF excimer laser projection lithography", in IEEE 1989 VLSI Symp. Tech. Dig. Tech. Papers, p.9, 1989. (Kyoto, Japan)
- 8) Y. Tani, M. Sasago, H. Fujimoto, and N. Nomura, "An available KrF excimer laser lithography with high sensitivity positive resist and high power laser", in IEEE 1990 VLSI Symp. Tech. Dig. Papers, p.7, 1990. (Hawaii,USA)
- 9) M. Endo, K. Hashimoto, K. Yamashita, A. Katsuyama, T. Matsuo, Y. Tani, M.Sasago, and N.Nomura; "Quarter micron KrF excimer laser lithography", in IEEE 1992 VLSI Symp. Tech. Dig. Tech. Papers, p. , 1992. (Seattle, USA)
- 10) T. Matsuo, K. Yamashita, M. Endo, K. Hashimoto, T. Koizumi, A. Katsuyama, M. Sasago, and N. Nomura; "New technoligies of KrF excimer laser lithography system in 0.25 micron complex circuit patterns", in IEEE 1993 VLSI Symp. Tech. Dig. Tech. Papers, p.145, 1993. (Kyoto, Japan)
- 11) T. Matsuo, K. Yamashita, M. Endo, M. Sasago, N. Nomura, M. Shirai, and M. Tsunooka, "Advanced Surface modification process for sub-quarter micron pattern faboication", in IEEE 1994 VLSI Symp. Tech. Dig. Tech. Papets, B.2, 1994. (Hawaii, USA)

IEDM

- 1) M. Sasago, M. Endo, Y. Hirai, K. Ogawa and T. Ishihara, "Half-micron photolithography using a KrF excimer laser stepper", in IEEE Proc. Int.Electron Devices Meet., p.316, 1986. (Los Angels, USA)
- 2) M. Sasago, M. Endo, Y. Tani, H. Nakagawa, Y. Hirai, and N. Nomura, "New high transparent resist and process technology", in IEEE Proc. Int. Electron Devices Meet., p.88, 1988. (San Francisco, USA)
- 3) N. Matsuo, Y. Nakata, H. Ogawa, T. Yabu, S. Matsumoto, M. Sasago, K. Hashimoto, and S. Okada, " Spread-Vertical-Capacitor Cell (SVC) for hbeyond 64Mbit DRAMs", in IEEE Proc. Int. Electron Devices Meet., p.473, 1991. (Washington DC, USA)
- 4) M.Endo, K. Kobayashi, K.Yamashita, A. Katsuyama, T. Matsuo, Y. Tani, M.Sasago, and N. Nomura, "Challenges in excimer laser lithography for 256Mb dRAM and beyond", in IEEE Proc. Int. Electron Devices Meet., p.45, 1992. (San Francisco, USA)

ISSDM

- 1) M. Endo, Y. Tani, M. Sasago, K. Ogawa and N. Nomura, "A new photobleachable positive resist for KrF excimer laser lithography", Extended Abstracts of 1988 Int. Conf.on Solid State Devices and Mateials, p.557, 1988. (Tokyo, Japan)
- 2) M. Sasago, Y. Tani, K. Yamashita, M. Endo, and N. Nomura, (INVITED)"Recent developemnt in excimer laser lithography for 64M and 256Mbit DRAMs", Extended Abstracts of 1991 Int. Conf.on Solid State Devices and Mateials, p.472, 1991. (Yokohama, Japan)
- 3) N. Matsuo, Y. Nakata, H. Ogawa, T. Yabu, S. Matsumoto, M. Sasago, and S. Okada, "Tunnel structured stacked capacitor cell (TSSC) for 64 Mbit DRAMs", Extended Abstracts of 1991 Int. Conf. on Solid State Devices and Mateials, p.475, 1991. (Yokohama, Japan)

ISSCC

- 1) T. Yamada, Y. Nkata, J. Hasegawa, N. Amano, A Shibayama, M. Sasago, N. Matsuo, T. Yabu, S. Matsumoto, S. Okada, and M. Inoue, " A 64Mb DRAM with meshed power line and distributed sense-amplifier driver", in IEEE ISSCC91 Digest of Technical Papers, p.108, 1991. (SanFrancisco, USA)

MPC

- 1) M. Sasago, Y. Hirai, M. Endo, H. Nakagawa, K.Ogawa, and N. Nomura, "Resolution and line-width tolerances in KrF excimer laser end I-line lithography", in IEEE Dig. of Papers 1988 MicroProcess Conf., p.54, 1988. (Tokyo, Japan).
- 2) M. Endo, M. Sasago, Y. Hirai, A. Ueno, and N. Nomura, "High-aspect-ratio resist pattern fabrication by alkaline surface treatment" , in IEEE Dig. of Papers 1988 MicroProcess Conf., p.167, 1988. (Tokyo, Japan).
- 3) M. Endo, Y. Tani, M. Sasago, N. Nomura, and S. Das, "Application of photobleachable positive resist and contrast enhancement material to KrF excimer laser lithography", in IEEE Dig. of Papers 1989 MicroProcess Conf., p.52, 1989. (Kobe, Japan)
- 4) H. Fujimoto, Y. Tani, M. Sasago, N. Nomura, "Process compatibility using high sensitivity resist for KrF excimer laser lithography", in IEEE Dig. of Papers 1989 MicroProcess Conf., p.52, 1989. (Kobe, Japan)
- 5) Y. Tani, T. Koizumi, K. Hashimoto, M. Endo, M. Sasago, and N. Nomura, "Acid catalyzed positive resist for photon and electron beam lithography; in IEEE Dig. of Papers 1991 MicroProcess Conf., p.90, 1991. (Kanazawa, Japan)
- 6) T. Sato, M. Nakanishi, T. Ono, M. Nagano, S. Kobayashi, K. Yamashita, M. Sasago, and N. Nomura; " KrF excimer laser lithography for sub-half micron devices", in IEEE Dig. of Papers 1991 MicroProcess Conf., p.72, 1991. (Kanazawa, Japan)
- 7) Y. Tani, M. Endo, M. Sasago, and N. Nomura; " Stability of chemically amplified positive resist: photo acid generator structure", in IEEE Dig. of Papers 1992 MicroProcess Conf., p.78, 1992. (Yokohama, Japan)
- 8) T. Koizumi, S. Kobayashi, Y. Tani, M. Endo, M. Sasago, and N. Nomura; "Process compatibility of over coat resist process for reducing multiple interference effect in KrF excimer laser lithography" , ; in IEEE Dig. of Papers 1992 MicroProcess Conf., p.64, 1992. (Yokohama, Japan)
- 9) K. Matsuoka, K. Yamashita, M. Sasago, and N. Nomura,"A new analytical technique foer evaluating standing wave effect of chemically amplified positive resist"; in IEEE Dig. of Papers 1993 MicroProcess Conf., p.174, 1993. (Hiroshima, Japan)

SPIE

- 1) M. Sasago, M. Endo, Y. Hirai, K. Ogawa, and T. Ishihara, "Improved bilayer system using contrast-enhanced lithography with water-soluble photopolymer", Proc. SPIE, Advanced in Resist Tech.and ProcessingIII, Vol.631, p321, 1986. (Santa Clara,USA)
- 2) M. Endo, M. Sasago, Y.Hirai, K. Ogawa and T. Ishihara, "Half-micron KrF excimer laser stepper lithography wit new resist and water-soluble contrast enhanced materials", Proc. SPIE, Laser in Microlithography, Vol.774, p.138, 1987.(Santa Clara,USA)
- 3) H. Nakagawa, M.Sasago, M.Endo, Y. Hirai and K.Ogawa, "An advanced KrF excimer laser stepper for

production of 16MDRAMs", Proc. SPIE, Optical/Laser Microlithography, Vol.922, p.400, 1988. (Santa Clara,USA)

4) M. Endo, M. Sasago, Y. Hirai, K. Ogawa and T. Ishihara, "I-line lithography using a new water-soluble contrast enhancing material", Proc. SPIE, Advanced in Resist Technology and Processing ,Vol.920, p.91, 1988. (Santa Clara,USA).

5) M. Sasago, M. Endo, H. Nakagawa, K. Matsuoka, Y. Tani, Y. Hirai, and N.Nomura, "New pattern transfer technology for G-line lithography", Proc. SPIE, Advanced in Resist Tech. and Processing ,Vol.1086, p.300, 1989. (San Jose,USA).

6) Y. Tani, M. Endo, M. Sasago, and K. Ogawa, "A new positive resist for KrF excimer laser lithography", *ibid*, p.30,1989. (*ibid*)

7) M. Sasago, Y. Tani, H. Fujimoto, M.Endo and N. Nomura, "Evaluation of resist materials for KrF excimer laser lithography", Proc. SPIE, Advanced in Resist Tech.and Processing, 1262, p.331, 1990. (San Jose,USA)

8) M. Sasago, Y. Tani, M. Endo and N. Nomura, "Evaluation of resists using ArF excimer laser projection lithography",Proc. SPIE,Optical/Laser Microlithography , 1264, p. 466, 1990. (San Jose,USA).

10) M. Endo, T. Matsuo, K. Hashimoto, M. Sasago, and N. Nomura, "Quarter micron deep UV lithography with silylation process", Proc. SPIE, Advanced in Resist Tech.and Processing , p.472 ,1992. (San Jose,USA)

EIPBS

1) Y. Nakanishi, H. Takeuchi, M. Yamamoto, S. Aoki, T. Sato, T. Inoue, M. Kimura, H. Nagano, K. Yamashita, M. Sasago, and N. Nomura, "Evaluation of TTR alignment for excimer laser stepper", Abstracts of 36th Int. Symp. on Electron, Ion, and Photon Beams, p.J-2, May 1992. (Orland, USA)

2) K. Hashimoto, T. Matsuo, M. Endo, M. Sasago, and N. Nomura; " Electron beam direct-writing technology for 0.2 micron rule 256MDRAM fabrication", Abstracts of 36th Int. Symp. on Electron, Ion, and Photon Beams, p.R-4, May 1992. (Orland, USA)

3) K. Yamashita, M. Endo, M. Sasago, N. Nomura, H. Nagano, S. Mizuguchi, T Ono, and T. Sato, " Performance of 0.2micron optical lithography using KrF and ArF excimer laser sources", Abstracts of 37th Int. Symp. on Electron, Ion, and Photon Beams, p.K-13, May 1993. (SanDiego, USA)

Others

1) M. Endo, M. Sasago, Y. Hirai, K. Ogawa, and T. Ishihara, "Water-soluble contrast enhanced materials", Preprints of 2nd.SPSJ Int. Polymer Conf. p.167, 1986. (Tokyo, Japan).

2) M. Endo, Y. Tani, M. Sasago, K. Ogawa, and N. Nomura, (INVITED)"Novel positive Deep UV resist for KrF excimer laser lithography", Tech. Papers, Photopolymer: Principles, Processes and Materials, p.27, 1988. (Ellenville , NY, USA) .

3) M. Endo, Y. Tani, M. Sasago, and N. Nomura, "New negative deep UV resist for KrF excimer laser lithography", Proc. ACS Div.of Polymeric Materials: Science and Engineering, p.155, 1989, Vol.60, Spring Meeting 1989. (Dallas,USA).

4) M. Endo, Y. Tani, M. Sasago, N. Nomura, and S. Das, "Application of photoacid generating compound to photobleachable deep UV resist", Proc. ACS Div.of Polymeric Materials: Science and Engineering, p.199, 1989, Vol.61, Fall Meeting 1989. (Miami,USA).

5) Y. Tani, M. Endo, M. Sasago, and N. Nomura, (INVITED)"A new positive resist for KrF excimer laser lithography", 1989 Int. Symp. on Carbene-Type Reactive Intemediates (ISCI'89), p.116, 1989. (Kyoto, Japan)

6) N. Nomura, K. Yamashita, M. Endo, and M. Sasago, (INVITED)"Excimer laser lithography", Proc. 4th. Int. Symp. on ULSI Sci. & Tech., May, 1993, (Honolulu, USA)

7) N. Nomura, H. Nakagawa, Y. Tani, K. Koga, N. Araki, T. Sato, and M. Sasago; (INVITED)" ArF quarter-micron projection lithography with an aspherical lens system", Microelectronic Engineering, Vol.11, p. 183, 1990. (London, UK)

8) A. Katuyama, M. Endo, K. Yamashita, M. Sasago, "A study of denaturation due due to DUV irradiation on chemically amplified positive resist", Proc. Polymer for MicroElectronics 1993.p.72, 1993. (Kawasaki, Japan)

● **国内学術会議講演**

応用物理学会講演会	講演 20件全98件中
電気学会研究会	講演 5件全8件
電子情報通信学会技術研究報告 (信学技報)	講演 3件全10件
電気化学協会半導体集積回路シンポジウム	講演 1件全4件
高分子学会講演大会	全3件

● **学術著書**

- 1) 半導体研究34巻, 超LSI技術15, 西沢潤一編, 工業調査会, "エキシマレーザリソグラフィ", p.245, 1991.
- 2) 超LSI プロセスデータハンドブック, 第II編第1章第1節 "光リソグラフィ技術の方式と特徴", 赤坂洋一他編集, サイエンスフォーラム社, p.121-129, 1990.
- 3) 光励起プロセスハンドブック, 第6章第3節"リソグラフィ", 高橋清監修, サイエンスフォーラム社, p.242-246, 1987.
- 4) 入門レーザー応用技術, 13章"エキシマレーザリソグラフィ", 高分子学会編集, 共立出版, p.146-161, 1993.
- 5) ULSIプロセスの基礎技術, 2章"光リソグラフィ", 古川静二郎編, 丸善, p.35-64, 1991.
- 6) 水溶性ポリマー, 16章"エレクトロニクス工業", シーエムシー, p.249-260, 1992.
- 7) 次世代超LSIプロセス技術応用編, 第12章"光学露光技術", リアライズ社, p.287-303, 1988.
- 8) レジスト材料プロセス技術, 第1章半導体用レジストの開発と高感度、高解像度化技術", 技術情報協会, p.48-94, 1991.

● **雑誌投稿**

- 1) 笹子勝, 遠藤政孝, 中川秀夫, 小川一文, 石原健, "ノボラック系の単層レジストで $0.4\mu\text{m}$ を解像", 日経マイクロデバイス, 1987年2月号, p.135.
- 2) 笹子勝, "光はどこまで微細可能か", 電気化学および工業物理化学, Vol.55, No.5, p.350, 1987.
- 3) 遠藤政孝, 笹子勝, 中川秀夫, 平井義彦, 小川一文, 石原健, "エキシマレーザによるサブミクロンリソグラフィ", 応用物理, 第56巻, 第9号, p.1168, (1987.9).
- 4) 笹子勝, 石原健, "レーザーリソグラフィ", 電気学会誌, 108巻11号, 1988.11.

その他; 代表

- 電子材料 5件
- セミコンダクターワールド 4件
- オプトロニクス 2件など

以上