

学位申請論文

電子線リソグラフィを用いた半導体
フォトマスクの超解像技術に関する研究

平成 29 年 3 月

三好 秀龍

目次

第1章 序論	1
1.1 本研究の背景	1
1.1.1 ムーアの法則	1
1.1.2 Internet of Things (IoT: もののインターネット)	5
1.2 本研究の目的	8
1.2.1 微細加工技術・リソグラフィの必要性	8
1.2.2 ITRS	10
1.2.3 研究の目的	12
1.3 本論文の構成	15
参考文献・出典先	16
第2章 電子線リソグラフィ技術の現状と課題	17
2.1 緒言	17
2.2 電子線リソグラフィの原理	17
2.2.1 電子線リソグラフィとは	17
2.2.2 電子線描画の方法	18
2.3 半導体フォトマスクの製造プロセス	21
2.4 電子線描画装置一般と本研究で使用した装置の説明	26
2.4.1 電子線描画装置概要	26
2.4.2 レジスト塗布・ベーク装置	32
2.4.3 現像装置	32
2.4.4 測長 (CD) SEM	33
2.5 電子線レジストの動向	35
2.6 課題	37
参考文献・出典先	39
第3章 電子線リソグラフィを用いた半導体フォトマスクの超解像技術	40
3.1 緒言	40
3.2 実験手順・方法	40
3.3 実験結果と考察	49
3.3.1 希釈 ZEP520A の再現性確認	49
3.3.2 露光後ベーク手法の優位性	50
3.3.3 解像性能に関して	53
3.3.4 露光後ベーク温度の最適化、レジストの感度に関して	67

3.3.5	ラインエッジラフネス (LER) に関して	70
3.3.6	露光後ベーク(PEB)による LER の改善と高解像度のメカニズム	77
3.4	結言	80
	参考文献	82
第4章	電子線リソグラフィの新たな応用分野	84
4.1	緒言	84
4.2	EUV リソグラフィ	84
4.3	MBMW	88
4.4	結言	92
	参考文献・出典先	93
第5章	結論と今後の展望	94
	謝辞	96
	本研究に関する原著論文と学会発表	97

第1章 序論

1.1 本研究の背景

1.1.1 ムーアの法則

IT 業界にいる人であればだれもが必ずは耳にしたことのある「ムーアの法則」。現インテルコーポレーションの共同創業者であるゴードン・ムーア (Gordon E. Moore、1929 年) 氏が、コンピュータ性能の劇的な向上について予測したものである。(インテルコーポレーション: 1968 年設立。ゴードン・ムーアはロバート・ノイス (1927 年)、アンドルー・スティーヴン・グローヴ (1936 年) らと共に半導体メモリーを主力製品としたデバイスメーカから事業を展開) このムーアの法則が発表されたのが 1965 年の 4 月であり、昨年で 50 周年を迎える事になった。

ムーアの法則で最も有名な文言として、「半導体の集積規模は、18~24 カ月で倍増する」という部分がある。ムーア氏の論文が掲載された米国の学会誌「Electronics Magazine」が 1965 年 4 月 19 日に発刊されているが、その論文にある一説の日本語訳がインテル (株) より紹介されたので全文引用する事にする。「安価な集積回路の複雑性は、これまで毎年約 2 倍の比率で増大してきました。長期的に見て、少なくともこの先 10 年は、この増加率が続くと思われれます。(図 1)」「集積回路による電子部品の大きな魅力の 1 つはコスト削減であり、単一の半導体基板により多くの回路機能を実装できるよう、(半導体) 技術が進化すればするほど、コスト優位性はさらに高くなっていきます。」この時点での記述によるとマイクロプロセッサの性能、つまり半導体の集積度は毎年 2 倍のペースで増加するという事であるが、実はその後、1975 年には「約 2 年で 2 倍」と予測を訂正しており、その「半導体の集積規模は約 2 年で 2 倍になる」が「ムーアの法則」として定着している。

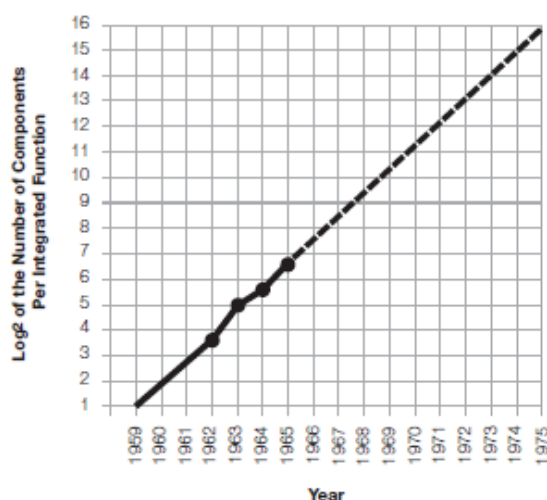


図 1: 集積規模が毎年倍増する事の予測

ムーアの法則は単に技術的要素に対してだけではなく、経済面や社会面も合わせて予測した法則であると言われている。この法則による技術革新は、アップルコンピュータ、グーグル、マイクロソフト、インテルといった膨大な経済価値を持った企業を創出しただけでなく、インターネット接続機器・利用人口の増加など、社会の発展の基盤になっている。

まず、技術面としてムーアの法則に従って進化したトランジスタの現在と過去を比較する事にする。2015年商品化された第5世代14nmアーキテクチャー「インテル Core i5 プロセッサ」と1971年発売された「インテル 4004」とで比較をしてみると、性能は3500倍に、電力効率は9万倍に向上していると言われている。一方、経済面ではコスト単価は6万分の1に縮小しており、これによりトランジスタの単価（図2）と消費電力が著しく低下している事がわかる。

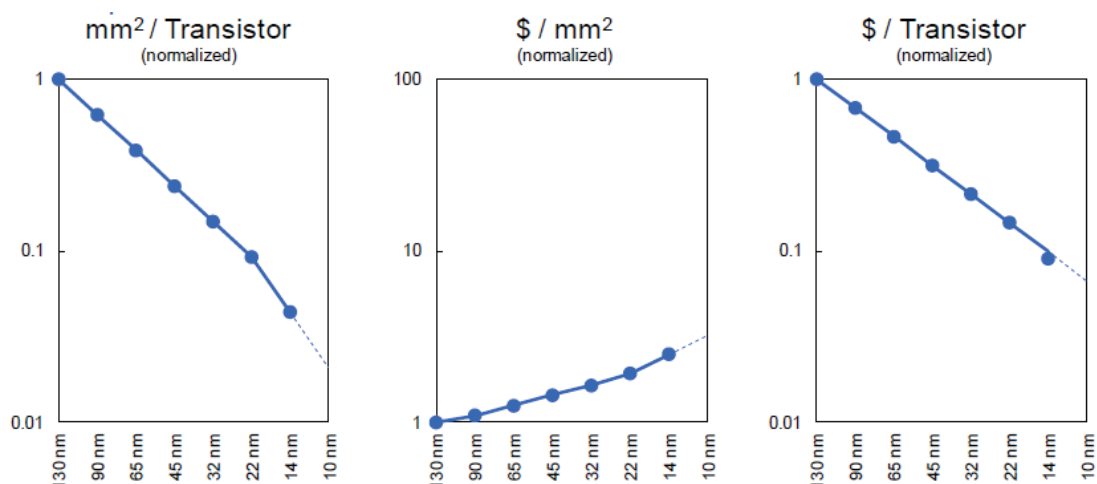


図2：トランジスタの単価推移

ムーアの法則が社会に与えた影響として、パソコンだけではなく携帯電話や自動車など様々な分野で半導体技術が使われるようになった事が挙げられる。半導体のさまざまな機器への活用例として、インターネットに接続するデバイスの増加が頻繁に挙げられる。現在インターネット人口は25億人を超えていると言われているが、2020年には40億人に達し、全人口の過半数を超えるという予測も紹介されている。今後インターネットにつながる機器はますます増加の一途をたどり、2015年にその数は150億個に、2020年には500億個に到達するものとされている。またインターブランド社による2014年ベストグローバルブランドランキングのトップ20社の中で、半導体技術を活用して成長した企業が非常に多く含まれていることから、ムーアの法則が新しい世界経済のインフラを作ることにも貢献していると考えられる。更に興味深いの

がムーア氏の先見性である。1965年当時の論文においてすでにハンディコンピュータ（スマートフォン）の登場や自動車の自動制御ができること、Apple Watchのようなデバイスの登場も想定していた（図3）。その日本語訳を引用する。「集積回路により、家庭用コンピュータ、自動車の自動制御、個人用の携帯通信機器など、素晴らしいものが生まれるでしょう。ディスプレイだけの電子腕時計が実現するでしょう。」



図3：1965年のムーア氏論文に添えられたイラスト

今後ますます市場機会は広がり、ITを活用したさまざまな利用形態が出てくるに違いないと予測される。具体的な活用例を考えるならば、DNAを分析して薬をカスタム化するといったようなことも可能になるかもしれないし、資本主義の概念やビジネスの優先順位が変わるようなことも起こる可能性が高い。至る所にコンピュータが入り、そして人口の過半数がインターネットを使うようになると、今までには考えられないような変化が起こる。

しかしながらムーアの法則が限界を迎えていると言われた時期もあったのは事実である。特に2000年ごろからは、集積密度だけで性能を上げることが困難になってきたためである。しかしその後、歪みシリコンやHi-Kメタルゲート、3Dトランジスタなど、さまざまな技術を取り入れつつトランジスタの性能を向上させた事でムーアの法則を継続させてきた（図4）。現在の量産では、14nmプロセス技術でマイクロプロセッサを量産中であり、また10nmプロセス技術を開発中で、7nmおよび5nmが研究フェーズにある（図5-1,2）。

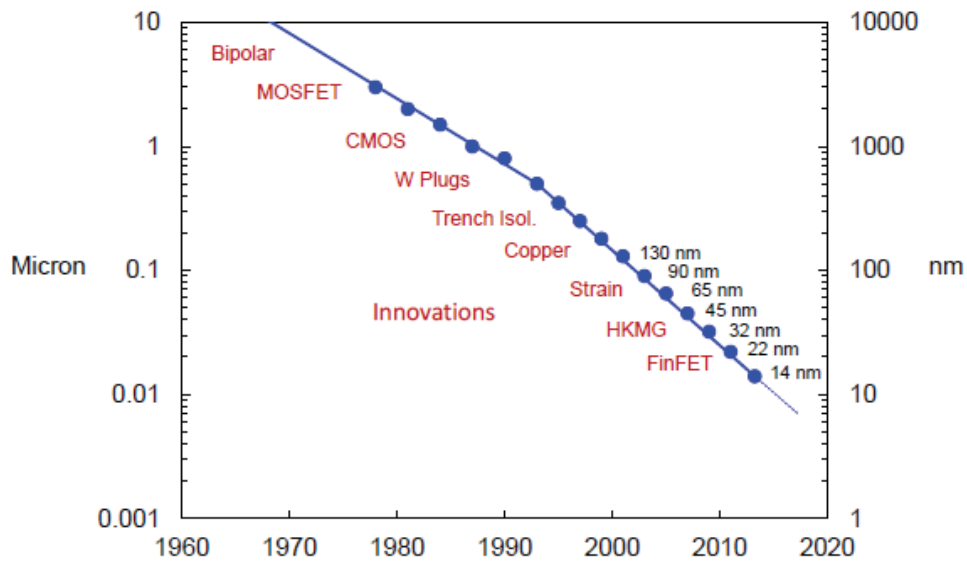


図 4：半導体デバイスのスケーリングと主要技術

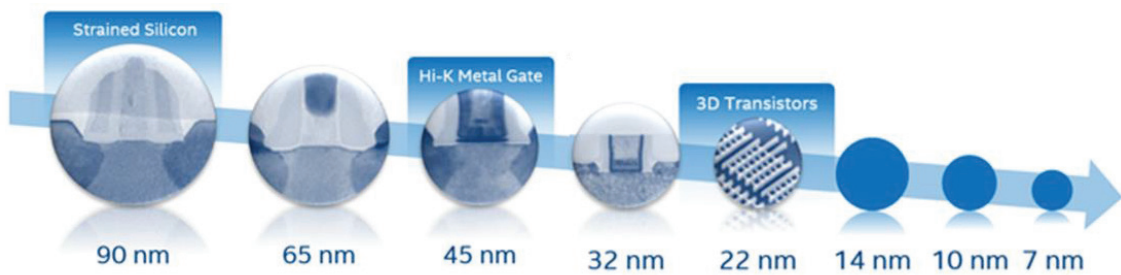


図 5 - 1：テクノロジーノードの進化（90 nm 以降）

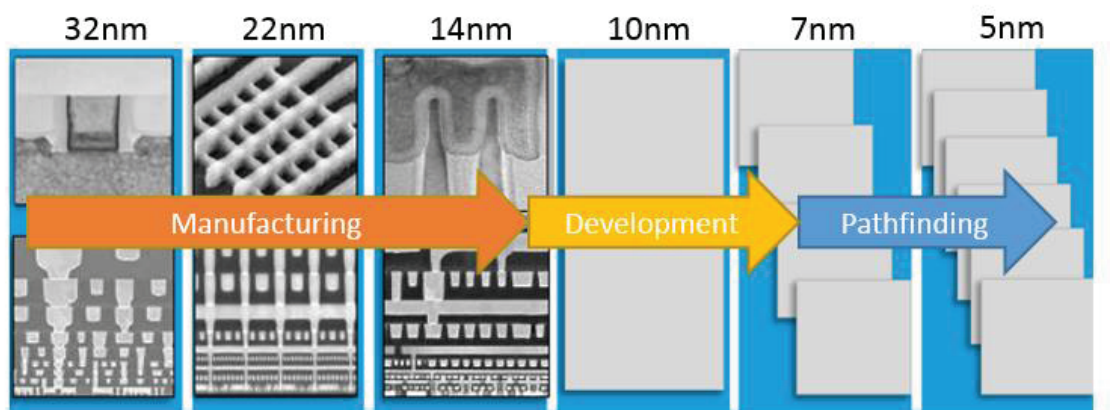


図 5 - 2：テクノロジーノードの進化（32 nm 以降）

ムーアの法則を確実に継続させるため、さまざまなデバイスとプロセスを研究し続けているのが半導体業界の特徴であり、この法則の業界における大きな貢献というのは、進化のペースを定義づけたことにあると考えられてい

る。ムーア氏の”Just remember, whatever has been done can be outdone”

「覚えていてください。すでに実現できたことは、さらにそれ以上のことができることを」という言葉を、着実に実践していると言える。半導体産業の発展のためだけでなく、地球上の全ての人々にスマートで、インターネットデバイスに繋がる機器を提供するために、ムーアの法則がもたらすパワーを最大限に活用する事が必須なのである。

1.1.2 Internet of Things (IoT: もののインターネット)

ムーアの法則が提唱されてから 50 年が経過したわけであるが、近年、半導体業界にとっては、また新しいイノベーションが起こっている。それが Internet of Things (IoT: もののインターネット)と呼ばれているものである。家電がネットワークにつながるスマートホームが普及し、Apple Watch などファッション性も兼ね備えた身につけるためのデバイスや洋服のボタンなどにマイクロプロセッサを組み込み、生活の中で様々なデバイスと連携を図るウェアラブルデバイスなどが登場し、エレクトロニクス産業全体にも大きな変化が訪れている。これこそがムーアの法則の延長線上にあるアプリケーションである。

2020 年、全てのデバイス及びセンサー類はデータセンターやクラウドにつながる時代を迎える。その数は 500 億台であり、2015 年から 3 倍以上増える見込みである事は前述に述べた。従来の組み込み機器がインターネットへ接続され、優れたコンピューティング性能を持ち、意味のある分析結果を得ることによって、より進化した形で価値を提供できると言われている。IoT 市場は 2015 年、世界規模で 220~250 億米ドルになったと言われている。この中にソフトウェアやデータセンターは含まれていなく、単純に組み込み機器を中心としたデータから生まれる市場規模だけでこれほどまでに膨らんでいるのである。分野としては交通・自動車、スマートホーム、産業エネルギーの 3 つが中心になると言われている。

IoT ビジネスへのアプローチを考える前に 20 年にも及ぶ準備期間と 3 つの基本要素が存在していたことは忘れてはならない。まず 1 つ目が、**Embedded Device (組み込み型デバイス)**。IoT は約 20 年前に、より多くの情報を組み込みデバイスから取り出しはじめた時から始まった。この時、IoT の第一段階の基礎ができたと考えられる。第 2 に **Connected Device (接続デバイス)**である。約 10 年前、クラウドコンピューティングの出現によって業界が激変した。コンピューティングパワーの拡張性は、サーバーとストレージへのアクセスのコスト効率が改善されたため、劇的な変化を成し遂げたとされている。そして最後が **Smart Device (スマートデバイス)**である。これが現在進行

中であるわけだが、この3つが基本要素になる。大きく変わったのは、組み込まれてインターネットに接続されたデバイスからデータと分析結果を利用できるようになったことである。以前は利用できなかった情報も、今やビッグデータ分析を通じて利用することが可能になった。つまり、IoTとは「あらゆる場所に知能がある」事だと考えられる。

しかしながら、スマートビルディング、コネクテッドデバイス、インテリジェントカーなどはIoTから期待されている事のほんの一部に過ぎない。以下、4つの重大でかつ危機的な問題に対して、社会ニーズを持って、IoTに対する期待を高く働きかける事が重要だと考えられている。

IoTに期待される4つの社会問題

1. 増加する高齢者のケア
2. 産業の温室効果ガス・二酸化炭素排出量削減
3. 人口の都市集中化
4. 食糧問題

現時点で我々が生み出すことができるリアルタイムの実情報を総動員すれば、こうした重大な社会問題に取り組む事が可能であり、スマートでかつコネクテッドなシステムの検討を充分始められるはずであると考えられる。

高齢化する人口のケアが第1の課題である。2050年までに世界人口の40%が60歳以上となり、これは14歳未満の人口を上回る割合である。米国においては、毎日1万人のベビーブーム世代が65歳に達しており、2020年までに800万人が80歳を超える。残念ながら現社会ではこのようなケアの増大に対する準備ができていないが、IoTを導入して、モーションセンサーや転倒検知などによる住宅のスマート化ができれば、劇的な改善も可能になると考えられる。こうしたシステムで重要となるのが「実用可能なデータと分析」である。

2番目の重大課題は、産業からの二酸化炭素排出量削減である。温室効果ガス排出量の約80%は米国からのものであり、今世紀末までに、世界の気温は7度上昇すると言われている。半導体製造プロセスの一部である拡散エリアの真空ポンプに予測分析を試験導入した例などもあり、予測分析が工場の稼働効率を上げ、二酸化炭素排出量を削減し、予期せぬダウンタイムを低減させることも可能であるという報告が存在する。

3番目の課題は「都市化時代」である。地方から都市への人口移動は、毎年シカゴクラスの都市が7つ誕生するペースという、かつてないスピードで

推移している。世界各地の地方行政と協力して、様々な都市環境への取り組みが開始されている。1つのパイロットプログラムがロンドンで進行しており、ここでは、大気汚染、騒音、水道、ガス、交通が警察および消防データと重ねあわせて調査されている。それらのデータはロンドンの隅々から、あるいは「システムのシステム」を通して収集されている。このパイロットプログラムの重要な点は、「ビッグデータ解析を通して調査可能なデータのタイプを識別する事であり、また都市を各部の集合としてではなく、全体をひとつのシステムとして捉えること」にある。

4番目の課題が、世界規模の飢餓である。世界人口を養うだけの食糧がないというのは誤った通説であると考えている。世界には食料が不足している地域が確かに存在するが、食料全体の1/3にあたる40億トンが廃棄されているのも事実である。この原因は、不適切な市場システムまたは流通システムであると考えられる。1人あたりの食糧生産量は、30年前と比較して17%増加していると言われており、農業の生産性は人口の増加率を上回るスピードで上昇している。食料の生産と流通の改善が絶対に必要だと考える。解決策はあるのかというと、無駄のカット、物流の改善、生産性向上の継続、それらどれもが重要になる。しかしながら、それ以外にも農業に関連して考えなければならないものも存在する。プロセス処理、パッケージング、輸送から生じる温室効果ガスもそのひとつである。IoTをどのように農業に適用するのか？その例が「スマート農業」テクノロジーを導入した米インテル社とAbacco社との米作農家である。Abacco社のチャン・ユー・チーオン氏は、効率が悪かった水道管理システムを、高効率でスマートな水需要管理システムへと作り変えたことだと述べている。農家は水供給の正確な状況をリアルタイムで知ることができるようになり、農作の効率が上がるばかりでなく、水門の開閉は自動化され、手がかからなくなっている。チーオン氏は結論として「水需要制御システムの開発成功によって、米作農家の生活は一変した」と述べている。農業のスマート化により、水の消費を10%節減し、収穫量を50%増やすという強力な効果を発揮することが可能になったという実例が報告されている。

ムーアの法則の偉大さは、業界が前進するペースを設定し、我々に何ができるかを示したことにあると考えられる。次の50年に我々は、シリコン（半導体デバイス）、インターネット、材料で進んでいる技術進歩を、ソフトウェア、データ、分析の力によって結びつけて考える必要がある。これによって、世界の巨大問題に取り組むことができるはずである。

1.2 本研究の目的

1.2.1 微細加工技術・リソグラフィの必要性

1974年、米IBM社のロバート・デナードらが発表したトランジスタの微細化方法に方向性を示したものがある。MOSトランジスタのサイズを縦、横、高さ方向をそれぞれ1/2にし、電圧を1/2にして使えば、基本的なトランジスタの動作は保証され、スイッチング動作は高速でかつ低電力なるという法則がある。これがスケーリング則と呼ばれるもので、ムーアの法則を技術的に裏付けている半導体デバイスの基本的指導原理である。つまりムーアの法則が経験則である事に対して、スケーリング則は理論に基づいた考え方という事になる。デジタルな集積回路というのは、スケーラビリティ、つまり微細化によって、スケーリング則に沿った進化とシステムの拡張が行われてきた。ムーアの法則を継続させるために、微細加工技術・スケーリングの必要性は言うまでもない。図6に14nmのデザインルールにおけるロジックデバイスの積層図を示す。テクノロジーノード・デザインルールというのは、一般的に最少配線ピッチの半分（ハーフピッチ）を微細化の指標としており、この部分をシュリンクしていく必要がある。

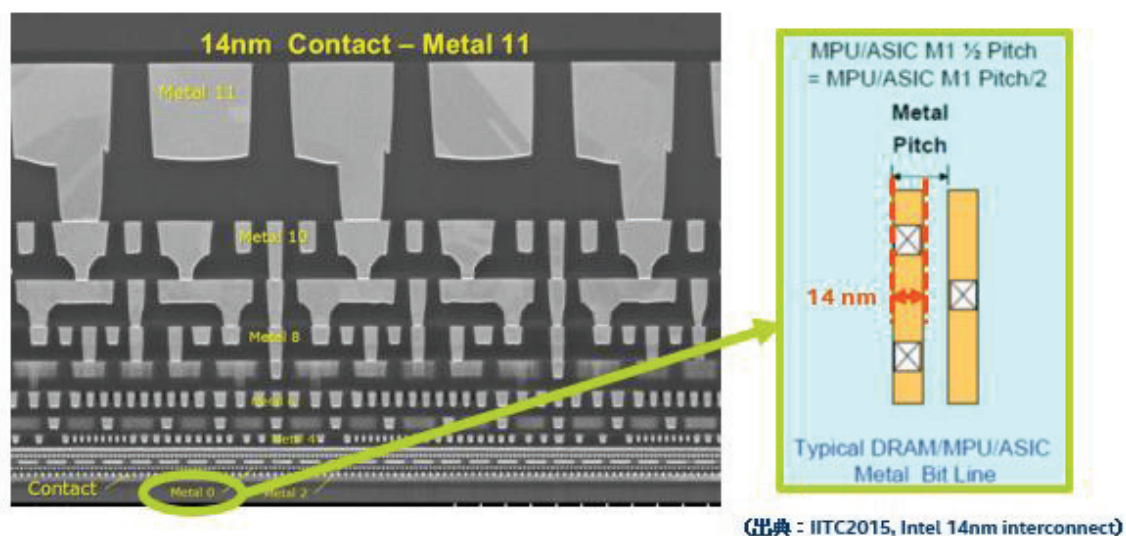


図6：テクノロジーノード、微細化の説明

現在、半導体デバイスのパターンニング形成には、リソグラフィ（lithography）と呼ばれる複雑な光学系ユニットを搭載した装置によりパターンを転写する技術が用いられている。リソグラフィ技術とは型を使って同じ物を複製する印刷技術の一つであり、このリソグラフィに用いられるパターンの原版がマスク（mask）と呼ばれるものである。リソグラフィ技術の中で光、すなわちフォトン（photon）を用いてパターンを転写する技術がフォトリソグ

ラフィ (photolithography) 技術であり、そこで用いるマスクをフォトマスク (photomask) と言う。リソグラフィ技術は量産性だけでなく、精密性、微細性、再現性に優れている。現在の電子工業界においては、平面基板上にパターンを形成する製造技術として、印刷技術と共に広く用いられていて、今日もとどまることなく進歩、発展し続けている重要な要素技術の1つである。

フォトマスクがリソグラフィの工程でどのように使われるか、露光装置の観点からまとめてみる。原版であるマスクパターンを、目的とする製品基板上に光学的に転写する方式には、単純な影絵方式の密着露光 (コンタクト露光、contact printing) あるいは近接露光 (プロキシミティ露光、proximity printing) と投影結像光学系を用いた方式の投影露光 (プロジェクション露光、projection printing) などがある。投影露光方式はマスクと基板の間に結像光学系を挿入した転写方法で、等倍投影方式と縮小投影方式がある。縮小投影方式は現在の半導体デバイスの生産方式であるが、本来は IC (integrated circuit) 製造用のフォトマスクを作るために開発された技術であり、マスクにおける生産技術として発達したリソグラフィ技術にあった。その技術が 1970 年代末に半導体デバイス製造に転用され、LSI 製造のステッパやスキャナの露光方式の原型となったわけである。現在、LSI 製造では 1/4 の縮小投影露光方式が主流である (図 7)。光源から発生された光が様々な照明光学系を通り、マスクに照射される。この時マスクパターンを転写する光は、マスク基盤の裏面から入射しなければならない。その後、非常に複雑な縮小投影露光の光学系を通り、ウエハに 1/4 縮小で転写される。このなかでも今回、研究テーマとしてとりあげたいのが、マスクの製造技術に関してである。

マスクパターンを転写する光はマスクの基板裏面から入射し、Cr 遮光膜の開口部分から出た光が製品基板のレジストを感光させるという仕組みになる。パターンのコントラストは、転写光学系の迷光や回折光を無視したとして、マスク開口部を通った光強度と遮光パターンを透過した光の強度比で表される。コントラスト確保のため、遮光膜の光の透過性を光学濃度 (Optical Density : OD) で規定することが一般的である。OD は遮光膜を通過した光強度 I と開口部を通過した光強度 I_0 の比の逆数の対数、 OD (Optical Density) = $\log(I_0/I)$ 。Cr の膜厚は 100nm 程度で光学濃度を 3 以上に、すなわち透過率を <0.1% 以下に制御できる。

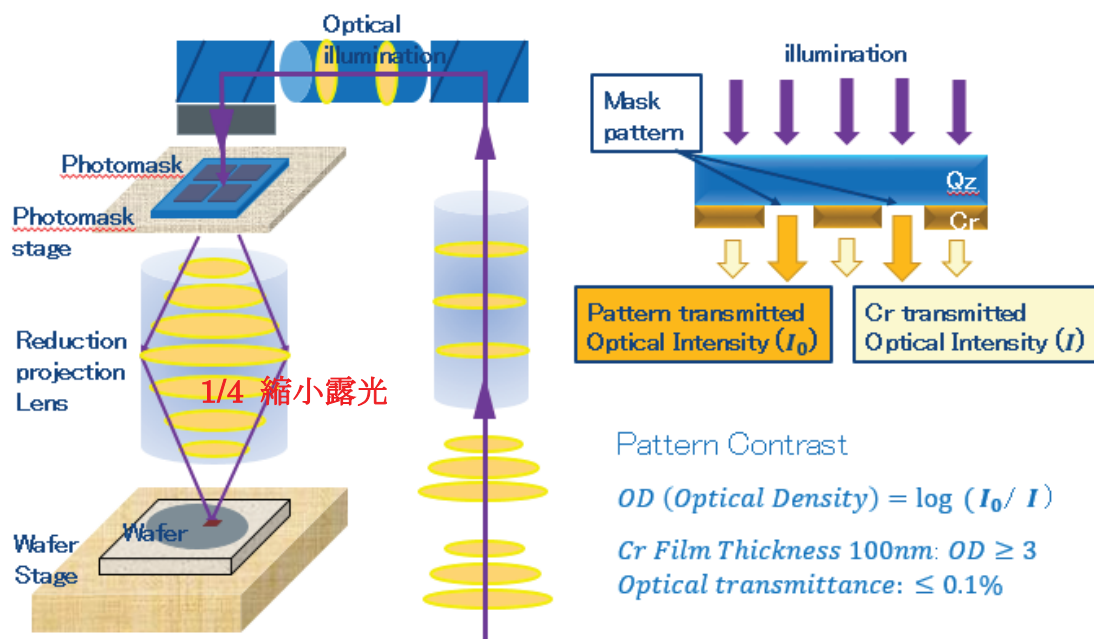


図 7：リソグラフィ装置概略図とフォトマスクの原理（縮小投影露光）

更に縮小投影方式の最大の長所としては、マスク欠陥やマスクの付着異物がパターンと同じ割合でウエハに縮小転写されることである。密着露光や等倍投影露光ではマスク欠陥が大きな技術開発課題であったが、縮小投影方式が導入されたことにより、マスク欠陥は製造技術課題として取り上げるようになった。また、縮小投影方式はマスクを消耗することなく繰り返し使用できるため、マスク製造における品質保証の割合を大きくすることとなった製造技術である。

1.2.2 ITRS

2015 年度版国際半導体技術ロードマップ（ITRS: international technology roadmap for semiconductors）に次世代フォトマスク製造における技術目標値が掲げられている（表 1）。

表 1 : 2015 年度版 ITRS フォトマスク技術要求

Year of Production	2014	2015	2016	2017	2018
MPU/ASIC Metal 1 (M1) ½ Pitch (nm)(contacted)	26	24	22	20	18
Mask minimum primary feature size	80	80	80	80	80
Mask sub-resolution feature size (nm) opaque	50	44	40	40	40
Image placement (nm, multipoint)	3.1	2.9	2.6	2.4	2.2
CD uniformity (nm, 3sigma) isolated lines (MPU gates), binary or attenuated phase shift mask	1.2	1.1	0.9	0.8	0.8
CD uniformity (nm, 3sigma), contact/vias	0.8	0.6	0.5	0.5	0.5
Defect size (nm)	23	20	18	16	14

Solution exist
Solutions are known
Solution are NOT known

まず見方に関してだが、黄色が生産可能な解決策が現在知られている、赤が、生産可能な解決策が知られていない、というふうに分類されている。上から順にロジックのメタル1のハーフピッチサイズ、マスクの最小パターン寸法値、補助パターンの寸法値、そしてパターンの位置座標精度に関して、CDの均一性、同じCDでもコンタクトとビアの均一性、最後に欠陥となっている。この中でも特に重要とされているのがCDの均一性と解像度に関してであり、それぞれの表の意味を下記に記す。

- MPU/ASIC Metal 1 (M1) ½ Pitch (nm)(contacted): コンタクトあり
- Mask Minimum Primary Feature Size, マスク最小パターン寸法: 実際に転写されるマスク上の最小パターン寸法: Rayleigh レイリーの方程式 $d = k \lambda / NA$, $K > 0.25$, 193nm, NA:1.35
- Mask Sub-Resolution Feature Size, 補助パターン寸法: マスク上にあり転写されない孤立線のアシストバー(assist bar)とか SRAF(sub-resolution assist feature)と呼ばれている補助パターンの寸法
- Image Placement: パターン位置精度、等方的倍率誤差を除いて定義された理想格子とパターン中心との位置ずれの最大値(X および Y)。この値はペリクル装着や露光装置へのマスク固定によって生ずるパターン位置精度誤差は含まない。(ペリクルに関しては第2章参照)
- C D Uniformity: CD 均一性、同トーンで同寸法のマスクで重要とされている形状部分のマスク上での実際のパターン寸法の 3σ 。バイナリーマスクまたはハーフトーン位相シフトマスクの孤立線の X, Y に適用する。(マ

スクの種類に関しては第2章参照)

- **CD Uniformity** : CD 均一性コンタクト、ビアホールの均一位。繰り返しピッチ部分の穴面積の平方根の 3σ 。
- **Defect Size** : 欠陥サイズ、マスク欠陥とは転写された意図しないあらゆるマスク異常のことで、転写されたパターンサイズを 10%以上変化させるものである。ロードマップに記載されているマスクの欠陥サイズとは当該世代に転写されると予測される黒欠陥あるいは白欠陥の面積の平方根である。転写される 180 度位相欠陥はこの値の 70%である。

1.2.3 研究の目的

この中でも特に重要と考えているのが、Mask Sub-Resolution Feature Size : 補助パターンの形成に求められる解像性能である。ITRS では 2016 年以降は 40nm の解像性という表記でしか記載されていないが、昨今のマスク産業会主体で行っている学会 SPIE, PMJ, BACUS などでは、高解像性能を重視した報告が頻繁に見受けられる。今後間違いなく、30nm, 20nm といった高解像性能が求められるであろう。現在、一般的な pCAR 導体用フォトマスク (ポジ型化学増幅型レジスト) を用いた 30nm レベルでの解像性能は報告されている (図 8)。しかしながら 20nm オーダーでの解像性は未だ確立されているわけではない。

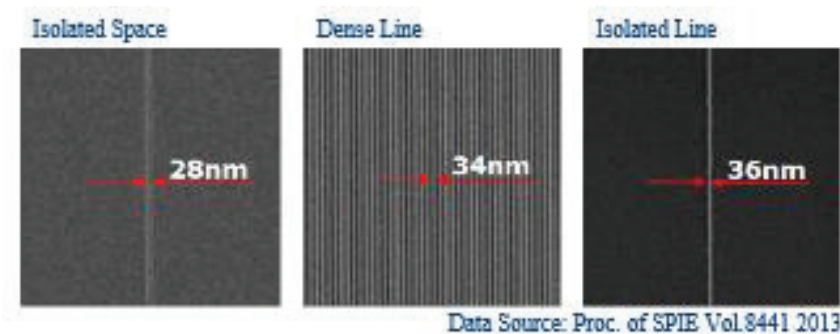


図 8 : pCAR レジストを用いた IS – 孤立スペース、Dense line、IL – 孤立ラインの解像性能

また、既存のフォトマスク製造では酸発生材 PAG (photo acid generator) を含んだレジスト感度の高い、化学増幅型レジストを使用するのが一般的である。しかしながら、この酸の発生材があるがゆえに様々な問題を抱えている。その一つが、材料起因の問題として挙げられるレジスト塗布後の安定性や露光後の安定性である。塗布後安定性 (Post Coating Delay stability : PCD)、露光後安定性 (Post Exposure Delay stability : PED) である。

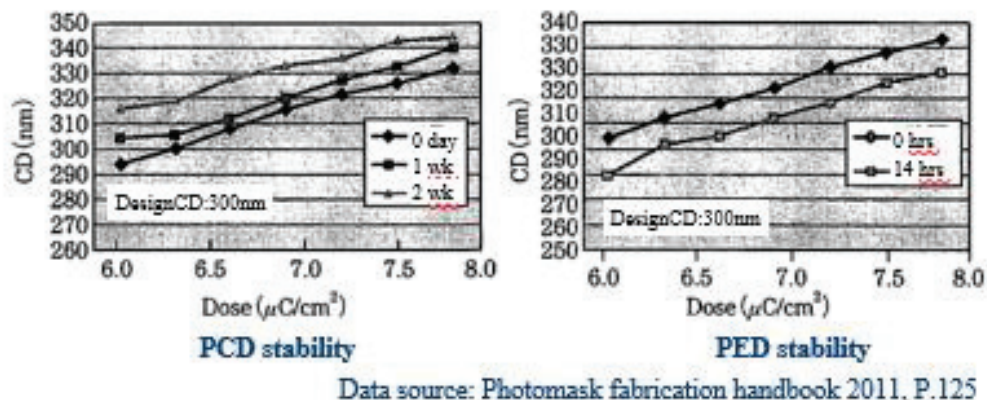


図 9 : レジスト塗布後の安定性・露光後の安定性

図 9 にマスク用途で広く使用されてきたレジストとして住友化学工業(株)の NEB シリーズでの PCD、PED のデータを示す。レジスト塗布後の放置時間によってかなりの CD のばらつきが存在する事、露光後の安定性に関しても同様に規定 CD 寸法値からのずれが確認できる。PCD および PED は塗布・現像装置と露光装置が一体となったウエハプロセスでは通常は問題とならない。すなわちこれらの問題はマスク特有の問題であり、その結果ウエハ工程での適用に比べて実用化が遅れてしまった。現在でもこのプロセスにおける CAR レジストの評価検討は盛んに行われている。

もう一つの CAR レジストにおける問題として有名なのは、高ラインエッジラフネス (LER : Line Edge Roughness)である (図 10)。材料やプロセスが原因で引き起こされるラインエッジの局所的な揺らぎの事を示している。

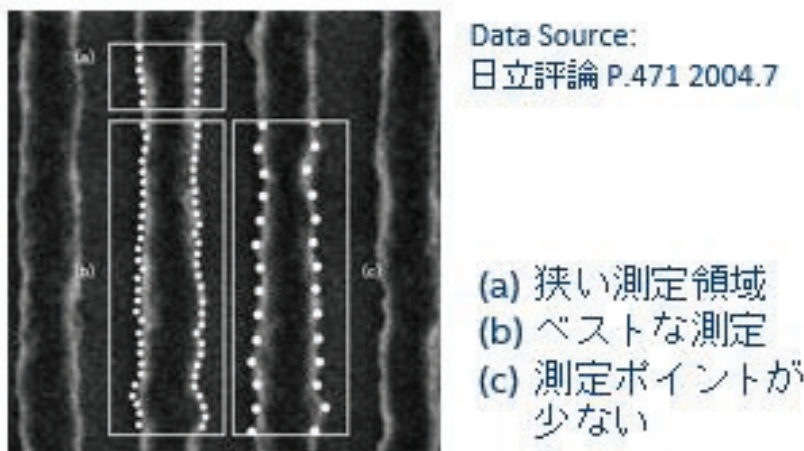


図 10 : ラインエッジラフネス

電子ビーム露光によって少量の酸が発生して高分子を切断すると、その反応により酸発生材から新たな酸が発生する。露光後 100°C 程度のベーク (PEB : Post Exposure Bake) を行うと、この反応が加速されて次々に酸の発生反応が起こり、露光の際、酸の発生反応が少なくてもパターンニングが出来てしまう。そのため現像後のフォトレジストの形状は、表面反応不足になったり、すそ引きの状態になったりする。これが LER を悪くしてしまう原因の一つである (図 11)。

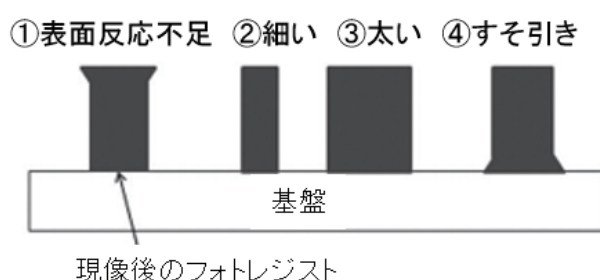


図 11 : 化学増幅型レジストの異常形状

そこで本研究では、酸の発生材が含んでいない非化学増幅型レジスト (Non CAR : Non Chemically Amplified Resist) を用いて高解像を狙う事を試みている。

更にフォトマスク製造以外のアプリケーションでは、非化学増幅型レジストに露光後ベークを加えるとライン幅を増大させ、ライン間隔を狭める効果がある事が確認されている。この手法をフォトマスクの製造プロセスに適用し、評価を行う事にした。

もう一つのユニークな点として、本研究で使用する電子線描画の手法を取り上げたい。電子線描画の基本は細く絞った円形ビームをマスク基板上に縮小転写する方法である。描画速度を向上させる手段として矩形ビーム方式、三角ビーム方式のほかに繰り返しパターンの一括転写方式がある。円形ビーム方式は比較的簡単に精度良くビームを絞り込める。電子線の強度がガウス分布をしていることからガウシアンビームとも呼ばれる (ポイントビーム方式とも呼ばれる)。矩形ビーム方式や三角形ビーム方式では図形の大きさを可変する方式 (Variable Shaped Beam : VSB) が主流であり、現在のマスク製造における主流装置である。最大で 1~2 μm 程度までビームサイズを可変できるので、サイズの小さい円形ビームに比べ一度に露光される面積が広いため生産性に優れた方式である。しかしながら制御が複雑で高価な成形光学系を必要とするのもの特徴の一つである。円形ビーム方式・ポイントビームの手法を用いた上記非化学増幅型レジストを使った露光後ベークの研究は、いくつかの論文が

紹介されているが、可変成形型（VSB）方式での描画手法では主だった研究成果が報告されていない。従って、本研究では、非化学増幅型レジストに露光後ベークを適用し、実際のフォトマスク製造でも使用されている可変成形型・VSB方式の描画機を利用する事で 20 nm オーダーの高解像を狙う事を目標とし、既存 CAR レジストプロセスの代替案として、次世代フォトマスク製造の新たなプロセス構築を行う事を目的とした。

1.3 本論文の構成

本論文は、第 1 章から第 5 章により構成され、以下に本論文の構成を示す。本章は、序論として近年の半導体産業を支えてきた基本的理念・考え方であるムーアの法則から技術的概念としてのスケーリング則を紹介し、半導体デバイスの微細化・高集積化の必要性を説いている。そのアプリケーションとして昨今、非常に話題になっている IoT（もののインターネット）についても触れている。その他、ITRS の技術動向などを紹介し、本研究の背景から必要性・目的を述べている。

第 2 章では電子線リソグラフィ技術の現状と課題として、本研究で用いた装置、材料及び処理技術で構成されるレジストプロセス、及びその問題点について紹介する。これらを語る上でフォトマスクの製造プロセスについて十分な理解が必要であるため、この章の初めに製造工程のフローを紹介している。

第 3 章が本論文の主要部分であり、非化学増幅型レジストに露光後ベークを使用した際の解像性データを様々な角度から実験・検証を行った結果を報告する。単純に実験結果を報告するだけでなく、本手法の物理特性・メカニズムについても触れる事にする。

第 4 章では電子線リソグラフィの新たな応用分野（NGL : Next Generation Lithography）として、EUV (Extreme Ultraviolet Lithography)、マルチビーム描画方式についても触れ、今後の技術動向を紹介し、本研究の発展性について報告している。

最後の第 5 章では本研究により得られた成果・結果について総括する。

参考文献・出典先

- 1 G.E. Moore, Electronics 38 (1965) 114.
- 2 M. Bohr, Intel 14nm Technology Announcement, Aug 11, 2014.
- 3 D. Davis, The Internet of Things and the Next 50 Years of Moore's Law, Semicon West 2015.
- 4 Y. Borodovsky, Institute of Electrical and Electronics Eng (IEEE) - IITC 2015
- 5 Y. Borodovsky, Moore's Law Innovation in need of Exploration Synopsis, Tech Forum, 23 February 2015, San Jose, CA, USA.
- 6 Kevin Fischer, Institute of Electrical and Electronics Eng (IEEE) - IITC 2015
- 7 O. Semenov, Nov 12th, International conference IoT 2014, St.Pete University of Telecommunications.
- 8 ITRS, International Technology Roadmap for Semiconductors, 2016 Edition, table LITH Optical Requirements, <http://www.itrs.net>.
- 9 N. Takamizawa, Proc. SPIE 8441 (2013).
- 10 J.F. Van Steenbergen, N. Ootsuka, X. Buch, B. Icard, C. Sourd, C. Constancias, B. Dalzotto, L. Pain, Proc. SPIE 8323 (2012) 83232M.
- 11 H. Ito, Proc. SPIE 3678 (1999).
- 12 N. Unno, J. Taniguchi, M. Shizuno, K. Ishikawa, J. Vac. Sci. Technol. B 26 (2008) 2390.
- 13 Isao Tanabe, Yoichi Takehana, Photomask fabrication handbook 2011.

第2章 電子線リソグラフィ技術の現状と課題

2.1 緒言

本章では電子線リソグラフィ技術の原理、そして実際の半導体フォトマスクの製造プロセスを紹介し、本研究で使用した装置の概要説明、電子線レジストの最新動向を述べる。

2.2 電子線リソグラフィの原理

2.2.1 電子線リソグラフィとは

リソグラフィ技術とは石版画を表すリトグラフ (lithograph) に由来する言葉であり、型を用いて同じものを複製する印刷技術の1つを示している。このリソグラフィで運用されるパターンの原版のことをマスク (mask) と言い、リソグラフィ技術の中で光、つまりフォトン (photon) を用いてパターンを転写する技術がフォトリソグラフィと言われ、電子線 (electron) を用いて同じくパターンを形成させる方法を電子線リソグラフィと言う。半導体製造工程でシリコン (Si) ウエハ上にパターンを形成させる際のプロセスをフォトリソグラフィといい、このプロセスに使われるマスクの事をフォトマスクと呼んでいる。このフォトマスク自体は、電子線技術によりパターン形成されるので、フォトマスク自体は、電子線リソグラフィによって形成される事になる。

電子工業界の中でリソグラフィ技術といえば、基板上にパターンを作り出す製造技術を総じて呼んでおり、基板上にパターンを描き出すパターン描画技術とパターンの原版を製品基盤に複製させるパターン転写技術の両方の意味を含んでいる。本論文で用いられているフォトマスクは転写技術で使用するパターンの原版である。フォトマスク製造は電子線リソグラフィ技術が基本となっており、パターン描画技術と転写技術を2つとも使用する。

電子線リソグラフィは、基板上に塗布したレジストに電子ビームを照射する事でレジストを反応させ、現像液に浸すことによって微細なパターンを形成させる技術である。電子線リソグラフィ技術と他のリソグラフィ技術との比較を露光波長と解像度の観点から図 12 に示す。光リソグラフィの解像度は露光波長に比例するのだが、解像度は光学系の開口数やその他のパラメータで制限されるため、露光波長の $1/2$ や $1/3$ になってしまう。その他エネルギーにも反比例すると同時にレジストの膜厚自体にも大きく依存する。しかしながら電子ビームリソグラフィは、現状、最も解像性の高い技術である事は確かである。

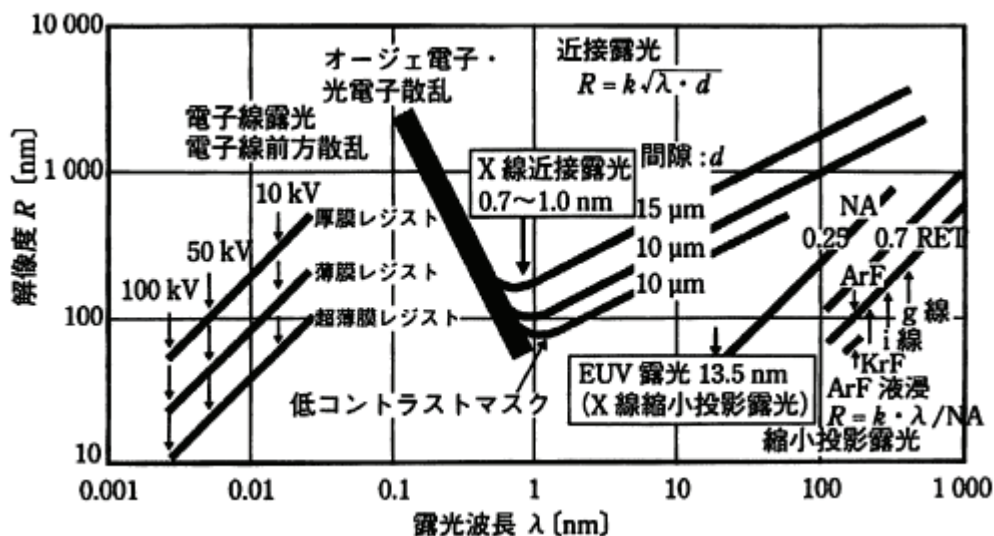


図 12：露光波長と解像度の関係

2.2.2 電子線描画の方法

電子線描画の方法について、電子ビームとステージの制御方法に関わるビーム形状、ビーム走査方式、ステージの移動方式、加速電圧について述べる。

- ① ビーム形状：電子線描画の基本は細く絞った円形ビームをマスク基板上に縮小転写する方法で、描画速度を向上させる手段として矩形ビーム方式、三角ビーム方式の他に繰り返しパターンの一括転写方式などが挙げられる。円形ビーム方式は比較的簡単に精度良くビームを絞り込む事が可能である。電子線の強度がガウス分布をしていることからガウシアンビームとも呼ばれる。ビームサイズは通常 100 ~ 500 nm φ が一般的であるが、微細パターン描画用に 10 nm 以下に絞ることも可能である。矩形ビーム方式や三角形ビーム方式では図形の大きさを可変する方式(Variable Shaped Beam: VSB)が主流である。最大で 1 ~ 2 μm 程度までビームサイズを可変できるので、サイズの小さい円形ビームに比べて一度に露光される面積が広い。また描画速度がショットサイズの影響を受けにくく、10 nm 以下の微細ショットサイズの場合、生産性に優れた方式である。しかし、制御が複雑な光学系を必要とする。ある領域のパターンをあらかじめ電子線用マスクとして作りこんで置き、電子線描画装置で一括して露光転写する一括転写方式も提案されているが、マスク製造ではまだ実用化に至っていない。
- ② ビーム走査方式：走査方式には、ラスタ走査とベクタ走査がある。ラスタ走査は描画領域全面を走査して、パターン部分のビームだけを ON する方式である。テレビ走査方式とも呼ばれる。ベクタ走査はパターンのある部分だけを走査する方式である。円形ビームとラスタ走査を組み合わせた方式はシス

テムが簡単で、スループットにも優れていたため、当初、マスク描画装置の主流になった。ラスタ方式の描画はネガ・ポジの反転が容易にできる利点を持つが、描画速度が描画データの最小ショットに依存するため、パターンの微細化が進むとスループットが低下する欠点を持つ。図 13 にビーム形状と走査方式の組み合わせの模式図を示す。現在主流となっている描画方式は可変成形ビームとベクタ走査を組み合わせた方式である。ベクタ方式はラスタ方式と比べてパターンの微細化には対応しやすいが、電子ビームを制御するシステムが複雑になるため、システムの安定性と描画精度向上を両立させることが非常に重要な技術開発課題となっている。先端製品では描画時間が 10 時間以上になる場合が多々あるが、描画装置の安定性、信頼性が向上したため、長時間描画に耐えられるシステムが実用化している。

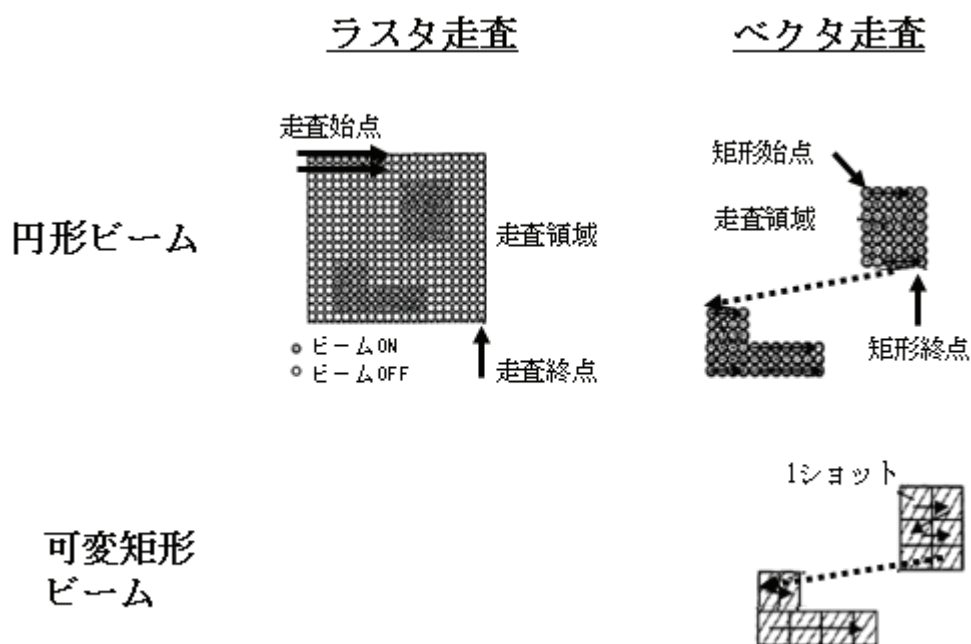


図 13：ビーム形状と走査方式の組み合わせ図

- ③ ステージの移動方式：マスク基板を所望の描画位置に移動させるステージ移動の方式にはステップアンドリピート (step and repeat) 方式と連続移動方式がある。ステップアンドリピート方式は、ステージが停止した状態で描画する。円形ビーム・ラスタ走査方式では、ビーム制御系が比較的単純であったこともあり、電子ビーム制御とステージ制御を連動させた連続移動方式の装置が実用化された。これにより、当時としては高速のマスク描画が実現し

た。可変成形ビームでかつベクタ走査方式の装置は、ステップアンドリピート方式が主流であったが、1990年代になって連続移動方式の装置が実用化され、現在主流になっている。

- ④ 加速電圧：マスク描画用の電子ビーム加速電圧は、マスク製造に導入された当初は10～20 kVであったが、現在は50 kVが主流である。円形ビーム・ラスタ走査方式の装置の場合、電子銃からマスク基板までの距離が短く、装置の設置環境に依存する外部磁場の影響や電子同士の反発作用である空間電荷効果(coulomb effect)を受けにくい。そのため、加速電圧は10～15 kVを用いていた。ベクタ方式の場合、複雑な電子光学系を搭載している鏡筒を用いるため、電子銃からマスク基板までの距離が比較的長い。初期の装置の加速電圧は20 kVであったが、50 kVに加速電圧を上げて、ビームの位置精度やレジスト上のパターン形状を改善する事となった。ただし加速電圧が大きくなると、照射された電子線はレジスト膜を突き抜けてしまい、レジスト感度が低下してしまう。また下地からの反射電子が増えて電子線の近接効果補正も必要になる。超微細パターン用ウエハ直接描画に加速電圧100 kVの装置が開発されており、今後、マスク製造への適用も検討されている。

2.3 半導体フォトマスクの製造プロセス

続いて、代表的な半導体用フォトマスクの製造工程を説明する。図 14 に現在半導体デバイス製造で広く普及されている液浸露光装置用に使われているハーフトーン位相シフトマスク製造のフロー図を示す。液浸露光装置とは、最先端半導体デバイス製造に用いられている露光機で、投影レンズとウエハの間に液体（純水）を満たして露光する技術である。またハーフトーン型位相シフトマスクとは、最先端デバイス用マスクセットのうち微細パターンが特に必要なクリティカルレイヤーに広く用いられるマスクブランクスで、上からクロム遮光膜・ハーフトーン膜・石英基板の構造になっている。クロム遮光層は、マスク外周部の遮光に用いられるが、ハーフトーン膜エッチングのハードマスクとしての機能もあるのが特徴である。ハーフトーン膜の設計は、透過率、位相シフト量、反射率の光学特性と、エッチング選択比特性の4つを考慮して行う必要があり、材料としては、モリブデン系、タンタル系、ジルコニウム系などが提案された経緯があるが、現在はモリブデン系が主流になっている。

設計寸法の記載されたパターンデータを電子ビーム描画機にインストールし、レジスト塗布後、(1)の電子ビーム描画（EB-Writing）が行われる。その後、(2) 露光後ベーク・現像が行われ、(3) ドライエッチングプロセスにより Cr 膜を削りこむ。そして、(4) レジスト剥離を行い、(5) 2 回目のレジスト塗布が行われる。これはハーフトーン膜のパターンを形成するためである。2 回目のレジスト塗布後、(6) レーザによる描画が行われる。(7) 現像、(8) ドライエッチングにより Cr の剥離、(9) レジスト剥離が行われ、最終的にマスクパターンが完成する。しかしながらこれだけでは、マスクの品質を保証する事は出来ないため、(10) 欠陥検査やそのレビュー、規定寸法通りの(11) CD 値に仕上がっているかどうかの確認が行われる。最終的に(12) 洗浄工程やペリクルと呼ばれるパターンの保護膜を取り付けて完成になる。半導体デバイスの製造工程に比べると極めてシンプルで単純なプロセスになっている。マスク一枚当たりの製造コストというのは、クリティカルレイヤーと呼ばれるもので、数百万から1千万程度し、製造工程 (1) 電子ビーム露光工程、(10) 欠陥検査工程の2つに掛かるコストが大多数を占めていると言われている。確かにレジストなどの材料費も高価なものは多いのだが、やはり上記2つの工程に必要な装置の値段が突出して高い(数10億円以上)事が原因である。以降 (1)~(12) までの概要をまとめる。

(1) 電子ビーム描画（EB-Writing）

「2.4 電子線描画装置一般と本研究で使用した装置の説明」の箇所で詳しく述べる事にする。

(2) ベーク・現像工程（PEB・Development）

実際のフォトマスクの製造プロセスで使用されるベークという表現には、2種類ある。一つはレジスト塗布後にレジストに残っている有機溶媒を蒸発させるためのベークであり、ホットプレート・オープン方式の加熱機構部分が、自動搬送で塗布機と一体構造になっている装置が一般的である。このベークの事を **Post Applied Bake: PAB** という表現を使う。もう一つの意味が、電子ビーム露光後にレジスト中に含まれる酸の反応を促進させ、レジストの感度向上をはかる目的で行われるベークである。これが **Post Exposure Bake: PEB** と呼ばれるものである。こちらもホットプレート方式が一般的であり、現像後、自動搬送される一体型の装置が一般的である。現像に関しては、溶解反応を均一にすることがポイントになる。そのためには、現像液が最初にレジスト表面に当たるときの均一性、および表面が現像液に覆われた後の均一性、の両方を制御する事が重要である。そのために、現像液のノズル形状および吐出方法に関しては、各社様々なノウハウが存在している。

(3) ドライエッチング

クロム遮光膜のエッチングは、その膜厚が 100nm 程度と薄く膜厚も均一であったために、長い間ウェットエッチングを行ってきた。しかし、180 nm 世代になるとウェットエッチングでの CD 精度確保が困難になり、1990 年代の後半からドライエッチングが主流になってきた。また同じ時期に位相シフトマスクの実用化が始まり、ドライエッチングの対象は Cr 膜の他に、ハーフトーンに用いられる MoSi 膜と、レベソソ型 PSM の製作に必要な石英 (Qz) 基板のエッチングにも適用されることになった。複数のエッチングガスに対応するために、マルチチャンバー構成になっているのもそのためであり、標準的な反応エッチングガスとしては、Cr 用は Cl_2 、MoSi 用は CF_4 あるいは SF_6 を利用する事が多い。エッチングのエンドポイント検出には反射光学方式、あるいは開口部の透過率検出方式が用いられる。Cr 用には反射光学方式が適していると言われている。

(4) レジスト剥離

(3) のドライエッチングの前処理として、現像後のマスク基盤をプラズマ処理する工程がある。現像後のエッチングされるべき領域に残ったレジスト膜の除去などを行う目的で、酸化雰囲気化でのプラズマ処理を行う。(3)の遮光膜をドライエッチングする際にもこの方法が一連のエッチングプロセスの中で行われ、レジスト剥離のためにも利用される。その他の最近の手法としては、汚染除去も兼ねて、オゾン水によるレジスト剥離なども存在する。

(5) レジスト塗布

レジスト塗布はスピン塗布方式が一般である。マスクは矩形の厚さのある平板であり、基板回転の際、四隅で激しく乱流が発生するため膜厚が大きくな

り、塗布フリンジ (fringe) とされる色の変わった縁ができる。現在、乱流を発生させない工夫を行い、四隅までレジスト膜厚が均一になる縁なし塗布が一般的である。実際の塗布膜厚はレジストの粘度、基板の回転数、回転立上り加速度などから決定できる。レジスト膜厚の不均一性はパターン寸法ばらつきの原因となる。外観品質に大きな影響を与えるのが回転塗布時の跳ね返り、レジスト液中の異物、吐出ノズル周辺の異物などであるが、基板の側面や裏面に付着したレジストは後の工程で異物の原因となる。基板端面や基板最外周部分のレジストを除去した塗布方式も行われている。

(6) レーザ描画

レーザ描画装置は微細加工性では電子ビーム描画装置に劣るが、真空系が不要なために異物管理・設備保守が容易で、真空排気時間がないなど生産性にも優れている。ウエハプロセスと同じレジストを使用できるメリットも大きい。そして最大の利点はスループットが優れていることである。

(7) 現像

(2) 参照

(8) ドライエッチング

(3) 参照

(9) レジスト剥離

(4) 参照

(10) 欠陥検査・レビュー

パターンの形状不良欠陥が製品に害を及ぼさない場合には、パターン欠陥の対象からは除外するべきだと考えるのが自然である。しかしながら、実際のマスク製造作業では、実害の有無までを明確に判定することは非常に難しい。そのため、マスク製造方法としては、一定の大きさ以上の形状不良は、実害の有無によらず欠陥と定義してしまい、欠陥修正を行うなり、マスクを再製作することになっている。半導体用の先端マスクでは、欠陥の判定に転写シミュレーション顕微鏡を用いて欠陥候補を個別に判定することが行われている。通常、欠陥と判断する大きさは最小パターン寸法の 1/3 程度とされている。光透過領域の付着異物も転写欠陥を発生させるので、通常、広義のマスク欠陥として扱う。なお、洗浄で除去できる付着異物は欠陥とは言わず、異物として取り扱われている。投影露光方式では、マスクの寿命は半永久的であり、マスク欠陥は初めからできる限り減らしておく必要がある。特に、縮小投影用マスクの場合や、製品サイズが大きく、マスクに含まれる製品数が少ない液晶用デバイスのマスクの場合には、製品設計の原則として、マスクを無欠陥で作ることが一般化している。

欠陥検査の基本アルゴリズムとして、欠陥の可能性のある信号はすべて

欠陥と判定しながら、マスク全面を自動検査する。その後、検出された個々の欠陥信号箇所を光学像を、目視判定して、欠陥か否かを1つ1つ個別に判定する。判定を検査装置の光学系とは別の解像性の良い光学顕微鏡を用いたり、AFMや光学的転写シミュレータを用いて判定することも行われている。画像のデータ処理ソフトウェアで、欠陥を自動判定する方式も提案されている。欠陥修正とは、欠陥検査結果から修正対象とした欠陥を、1個1個修正していくものである。マスクを修正装置にセットし、欠陥検査装置の欠陥位置情報を入力する。当該欠陥パターンを光学像として、あるいは荷電粒子線像として表示させる。表示画面上で修正領域を指定して、プログラムされた方法で欠陥を修正する。従来は観察した欠陥パターン像だけの情報で修正していたが、最近では、隣接するパターン像情報を利用したり、設計データ情報を利用することによって、作業性良く、高精度に修正する方法も実用化されている。LSIにおいては一般的に、欠陥修正の後で修正された部分を露光波長による転写光学シミュレータを用いて評価・確認して、必要な精度で修正されたことを確認する工程が含まれている。

(11) 測長 (CD) SEM

マスクパターンのCD寸法測定はサブミクロンパターンを除いて透過光方式が標準的計測方法となっている。透過光ではエッジ検出できないレジストパターンは、画像処理方式か散乱光方式が必要である。そのため計測装置は、通常、光学顕微鏡による透過光および反射光のパターン観察機能と透過光方式と、散乱光方式の寸法測定部を併設した構成が一般的である。サブミクロンサイズの微小パターンは電子線を用いたCD-SEMで測定されている。CD-SEMの画像処理方式と従来の透過光方式では原理的にエッジ位置の定義が異なっているので、リニアリティ評価を含めて行う必要がある。本来の計測目的は、マスクパターンが設計された通りに転写できるパターンとなっているか否かをマスク段階で事前に検証することである。そのため、計測したマスクパターン寸法とマスクを転写したウエハのレジストパターン寸法の相関データの取得が重要である。LSIでは通常技術世代ごとにマスクとリソグラフィ工程の校正が行われている。

(12) 洗浄工程・ペリクル

洗浄装置にはバッチ処理方式と枚葉処理方式がある。バッチ処理では、循環されている洗浄槽にマスクを浸漬処理するので使用薬液の効率は良い方である。しかし基本的にマスクは単品生産であること、また枚葉処理では常に新しい薬液を用いること、またスピン方式では表面の流れが粒子を運び去る作用もあることなどにより、最新の装置ではウエハ工程同様に枚葉処理が主流になっている。装置の構成はプラズマあるいはオゾン水などによる前処理、

硫酸過水(SPM)・アンモニア過水(APM)などの強い洗浄、機能水洗浄と純粋リンス、乾燥の順が一般的である。APM 洗浄や機能水洗浄にはメガソニックを併用することが多い。またペリクル装着前の最終洗浄には、脱硫酸洗浄を使用するのが最近のプロセスである。

ウエハの露光方式が密着露光から投影露光に移ったことで、リソグラフィ工程の消耗品であったフォトマスクは、リソグラフィ工程の備品として長期間その品質を維持することが必要となった。簡単な確認作業だけでマスク品質を維持できる方法がマスクに防塵保護膜を貼り付けておくことである。この防塵保護膜がペリクル (pellicle) といわれ、1985 年ごろから次第に実用化された技術である。1990 年代には投影露光用マスクはペリクルを貼って使うことが一般的になった。ペリクル貼付は、洗浄の終了したマスクとペリクルケースに入ったペリクルを用意すれば、自動的に貼り付けて、ステップ用のマスクケースに収納した状態で取り出せる自動ペリクル貼付機も市販されている。

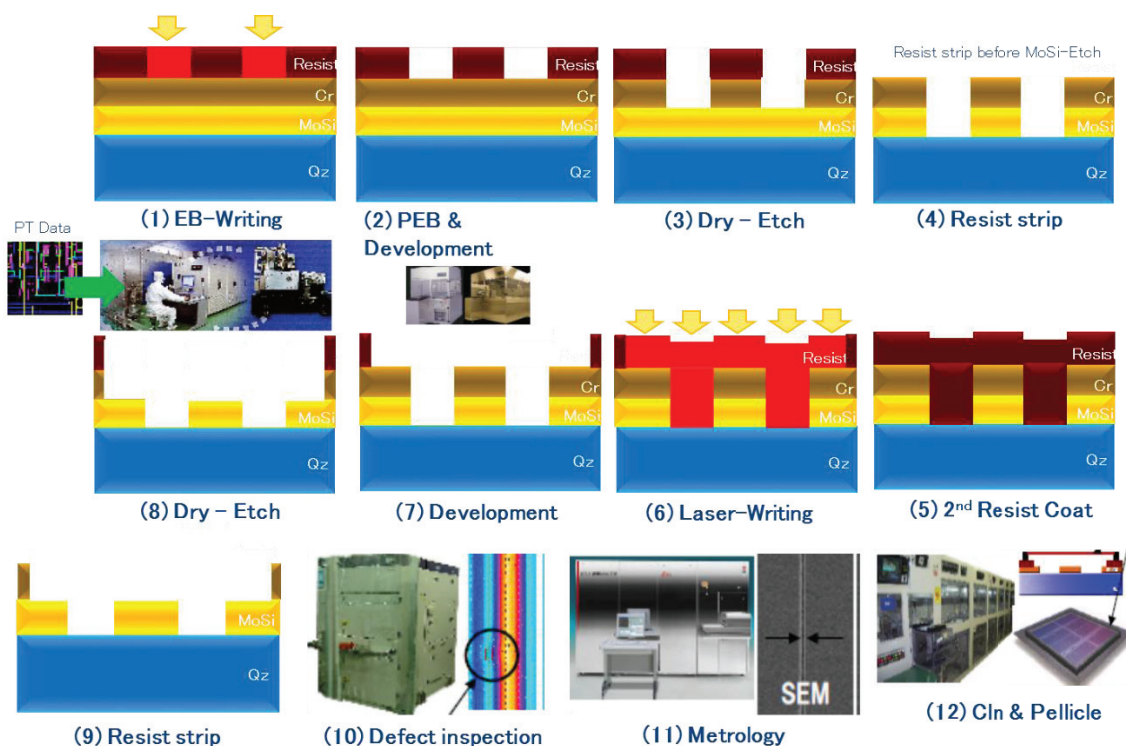


図 14 : ArF - ハーフトーン位相シフトマスクの製造工程概要

図 14 補足 : ブランクスに関しては、下から石英の基盤、ハーフトーン膜である MoSi (60 nm)、遮光膜 Cr (50 nm)、その上にレジスト(40-50 nm)を塗布。

2.4 電子線描画装置一般と本研究で利用した装置の説明

一連のマスク製造工程の中でマスクの品質を作りこむ工程が“描画”と“マスクプロセス”である。マスクパターンの描画は、電子線を用いる方式とレーザーを用いる方式がある。一般的には、微細パターンの加工は電子線方式が優位であり、スループットではレーザー方式が優位である。実際には、対象マスクの内容によって使い分けられている。電子線描画の方法に関しては、前章で述べたので、ここでは電子線描画装置の一般概要を述べる事にする。その他、本研究で利用した塗布・ベーク装置、現像装置、測長 SEM 装置についても概要を述べる。

2.4.1 電子線描画装置概要

(1) 寸法 (CD) 精度の要因

近年、マスクの要求 CD 精度はますます厳しくなり、ナノオーダの精度が要求されるようになってきている。この CD 精度を決めるのは、描画精度とレジストプロセス（特に遮光膜のエッチング）である。ここでは、電子線描画装置に起因する主な CD 精度要因について説明する。

(a) レンズ収差

マスク描画装置に用いられる電子光学系の例を図 15 に示す。電子光学系は、結像光学の理論を用いて電子線がブランクス表面に結像するように設計されている。このような結像理論による投影像というのは、必ず収差の影響を受けて像の変形が起こる。電子レンズの収差というのは、①レンズの機械加工の誤差などによって起こる、また電磁界の非軸対称性に起因する収差、②近軸線条件が厳密に満たされていないことによる広義の意味での球面収差、③電子線エネルギーが単一でないために起こる色収差、の 3 つに分類することができると言われている。これらの収差で結像の質に最も影響するのは球面収差であり、円形ビームより結像パターンが大きい矩形ビームの方が影響を受けやすくなっている。この影響を小さくするためには、対物レンズの焦点距離を長くすれば良いはずであるが、一方で外部磁場の影響やクーロン効果の影響を受けやすくなる。また、電子線の偏向走査に起因する近軸軌道からのずれによっても、収差が生じてしまうためこのような収差の影響を小さくする補正機能として、ダイナミックフォーカス補正、ダイナミックスティグマ補正などが用いられる。特に、偏向量が大きくビームサイズも大きい可変成形型の装置で、これらの補正技術が重要になってくる。

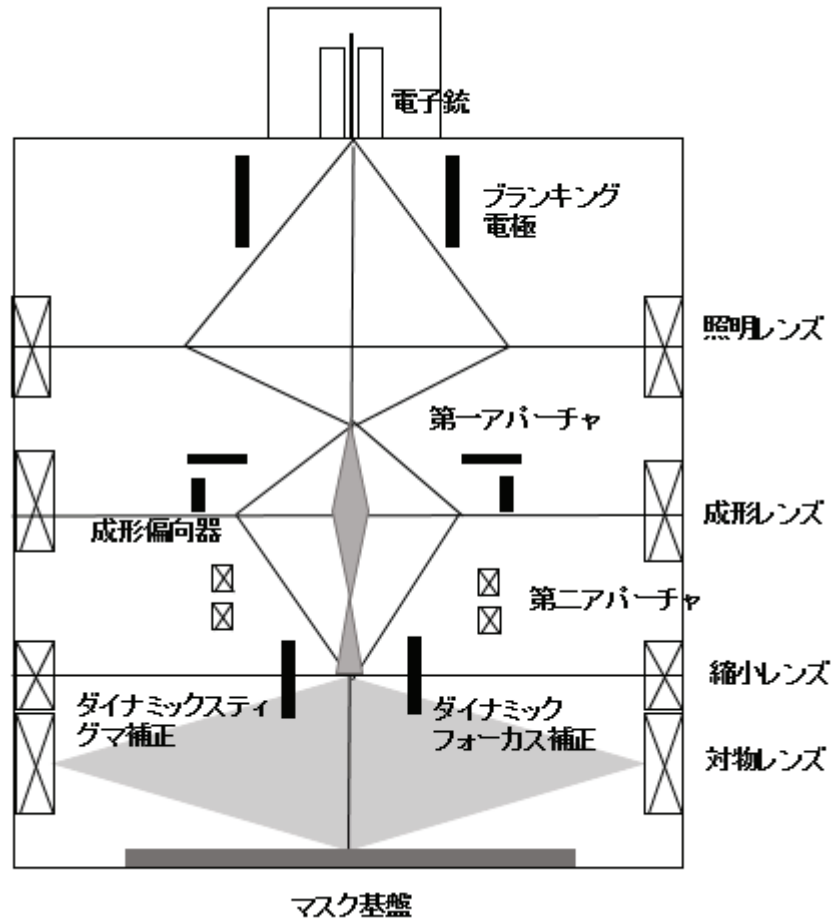


図 15 : マスク用電子線描画装置の電子光学系の例

(b) クーロン効果

ビームのボケ量はビーム電流 I に比例し、加速電圧 V の $3/2$ 乗に反比例する。これは電子の負電荷による反発に起因する現象であり、空間電荷効果またはクーロン効果と呼ばれている。クーロン効果を小さくするには、電流密度を小さくするか、もしくは加速電圧を大きくすればよいが、電流密度を小さくすると照射時間が長くなり、スループットが低下する。一般的に電子線描画では、精度とスループットは相反する問題であることが多い。

$$\delta \propto I/V^{3/2} \quad (\text{ビームのボケ量 } \delta)$$

(c) 近接効果

レジストの現像特性とは、電子線から受けた堆積エネルギーで決まる。そのエネルギー分布はレジスト膜中の前方散乱とブランクスからの後方散乱の和になるはずである。この分布関数を $f(r)$ とすると、 $f(r)$ は次式で表わされる。

$$f(r) = k [\exp(-r/\beta_f^2) + \eta\beta_f^2/\beta_b^2 \exp(-r^2/\beta_b^2)]$$

ここで、 k は定数、 η は前方散乱と後方散乱の比である。図 16 はこの $f(r)$ で表わされるエネルギー分布を示したもので、破線が前方散乱、点線が後方散乱である。このようなエネルギー分布の結果、現像後のレジストパターンは後方散乱の影響により、図 17 に示すように形状が変化する。このようにパターンの大きさ、あるいは隣接するパターンとの相互の位置関係による形状の変化を近接効果と呼び、近接効果の影響を補正する技術を近接効果補正(Proximity Effect Correction : PEC)と呼ぶ。低 k 値のリソグラフィで問題となっている光近接効果補正(Optical Proximity Correction : OPC)と混同しないよう注意する必要がある。加速電圧を高くすると前方散乱は小さくなり、逆に後方散乱は大きくなる。マスク製作の加速電圧は 50kV が主流で後方散乱が問題になるため、後方散乱の影響を見かけ上打ち消す補正が実用化されている。

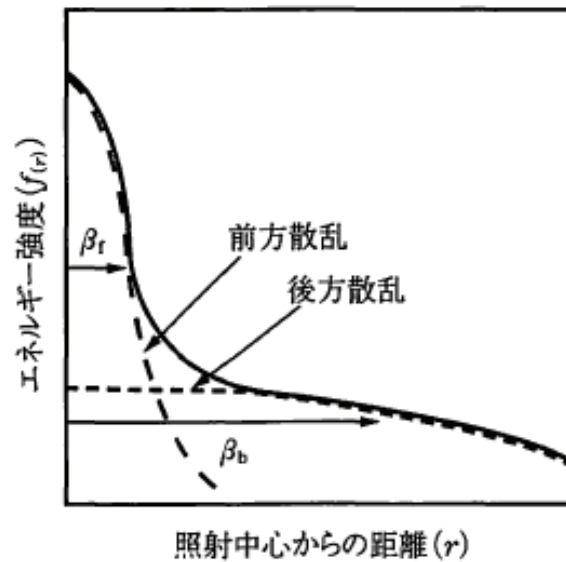


図 16 : 電子線照射のエネルギー分布図

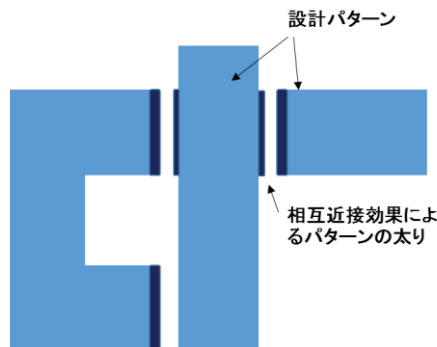


図 17 : 近接効果によるレジストパターンの形状変化

(d) フォギング効果

後方散乱電子がレジスト膜を抜けて、ブランクスに面している電子光学鏡筒下部の部分に達し、さらに反射されて広範囲のレジストを再照射する現象をフォギング効果と呼ぶ。これは、10～20kV の低加速の装置では問題にならなかったが、50kV で問題になった。このために、電子光学系下部を電子が反射しにくい構造にするハード面の対策と再照射のエネルギー分布を計算してドーズ量にフィードバックするソフト面の対策が実用化されている。

(e) 制御系ノイズ

ビームの位置およびサイズの制御には静電偏向を用いており、偏向電極への電圧印加で行っている。この偏向制御には高速 DAC・アンプが用いられる。数十ボルトの電圧を数十ナノ秒で制御する必要があり、この電子回路のノイズ成分が精度に大きな影響を与える。このノイズ成分には、構成部品、電源、アースなど各種の要因が考えられる。なお、本要因は次の IP 精度にも大きな影響を与える。

(f) その他

ビームサイズの計測精度、電子光学鏡筒内部のチャージアップなどがある。その対策としては多重計測による平均化、電子光学鏡筒内部の定期的クリーニングなどがある。

(2) 位置精度(Image Placement, IP)の要因

電子線描画では、X-Y ステージ上にセットしたマスクブランクに偏向制御された電子線を照射してパターンを描画する。その電子線の照射位置の精度に及ぼす主な要因は下記の4項目である。

(a) ステージ系

X-Y ステージはレーザ干渉計によりその位置が計測され、その位置情報を電子線にフィードバックすることで、高精度な座標位置制御を実現している。レーザ干渉計計測値を正確に反映するためには、高精度な真直度、直交度が必要である。また、マスクはウエハと比較して重量があり、特に描画中の加速・減速に起因するブランクスの位置ずれが生じない保持が重要である。固定には静電チャックが使用できないため、機械的に固定する必要があるが、ブランクスの変形を生じさせない固定方式が工夫されている。

(b) 偏向制御と高さ補正

偏向制御のノイズについては寸法精度のところでも述べた。もう1つの重要な項目はZ軸の補正である。偏向された電子線は角度を持ってブランクスに照射されるので、ブランクス表面のZ値がずれると照射位置がシフトする

ことになる。実際の装置では、ブランクス表面 Z 値を計測して、偏向系にフィードバックしている。

(c) 環境（温度、振動、外部磁場）

温度変化、振動、外部磁場変動は、ナノオーダの精度が要求される電子線描画の位置精度に大きな影響を与える。そのために徹底した対策がとられている。温度制御は、描画部全体が $\pm 0.05^\circ$ 程度に制御されたサーマルチャンバーに設置され、ステージ・光学鏡筒も水冷温調されている。描画部はアクティブ制御の除振台と一体になっている。外部磁場対策としては、サーマルチャンバーに磁気シールドを行うことが一般的であり、外部磁場変動を1~5 ガウス程度に抑えている。設置環境によっては、変動磁場キャンセラーを用いる場合もある。

(d) チャージアップ

ブランクのクロム膜は、描画装置にセットされた状態ではアースがとられている。このアースが不十分であると、ブランク全体がチャージアップして電子ビームの照射位置がシフトする。レジスト自体は絶縁体であるが、下のクロム膜がアースされていれば以前は問題とはならなかった。しかしながら近年の半導体デバイスの進化により、IP エラーに求められる数値も数 nm 以下と非常に厳しくなってきた。従って、このチャージアップをいかに抑制するかが重要となってきた。その他、レベンソン型位相シフトマスクの2 回目描画では石英面が現れている部分がチャージアップする場合がある。これらの対策として近年、導電性ポリマーをレジスト表面に塗布することで対策を行っており、本材料、導電性ポリマー(Charge Dissipation Layer: CDL)の研究も盛んに行われている。

この導電性ポリマー: CDL は、実際のマスク製造にも使用されているわけだが、IP エラーの抑制 (図 18) だけでなく、別の特徴 (図 19) も兼ね備えている。

Image Placement error evaluation results

Proc. of SPIE Vol. 9051, 90510U

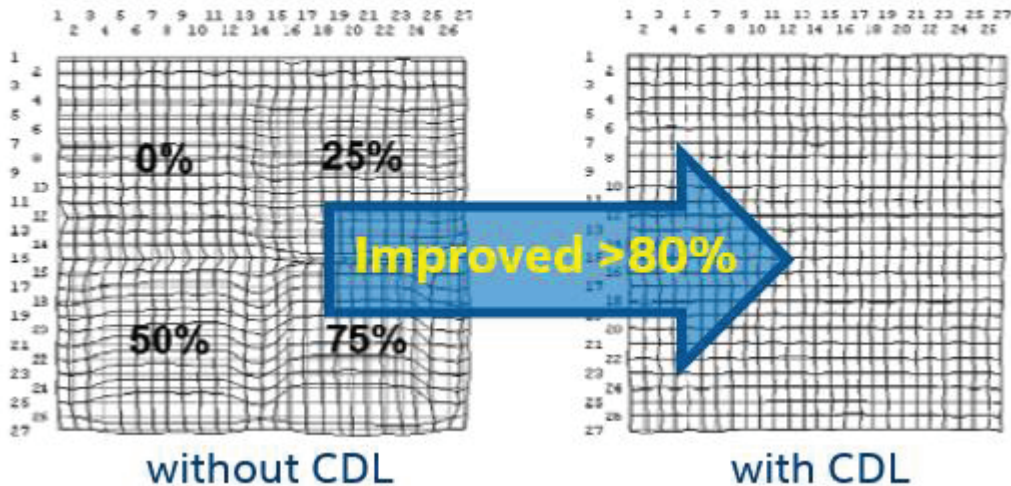


図 18 : CDL 有り無しでの位置座標ずれ抑制の様子

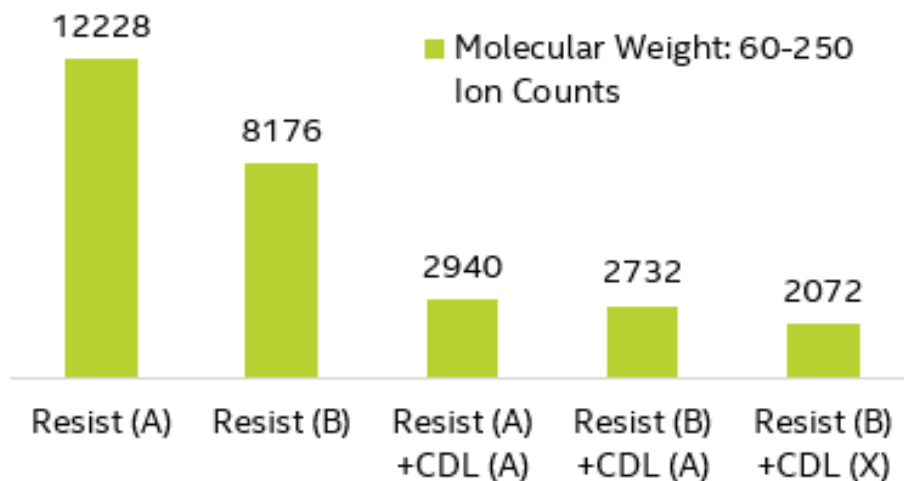


図 19 : レジストアウトガス抑制効果の様子

図 19 は、レジストからのアウトガスを測定した結果で、レジストの上に CDL を塗布した場合、アウトガスが完全にブロックされている様子が分かる。電子線描画装置は非常に高価な装置で、複雑な光学系を兼ね備えているため、レジスト自体からのアウトガスを特に嫌う傾向がある。このように CDL でレジストアウトガスをブロックしてしまうのが最近のマスクプロセス技術の傾向である。

2.4.2 レジスト塗布・ベーク装置

マスク製造の原材料であるマスク基板は、通常、レジストが塗布された状態で購入して保管される。遮光膜が付いただけのマスク基板を購入し、マスク製造工程をレジスト塗布から始める方法もある。レジスト塗布自体は回転塗布（スピン塗布）方式である。マスクは矩形の厚さのある平板であるため、基板回転の際、四隅で激しく乱流が発生するため膜厚が大きくなってしまい、塗布フリンジ（fringe）と言われる色が変わった縁ができる。現在、乱流を発生させない工夫を行っており、四隅までレジスト膜厚が均一になる縁なし塗布が一般的である。現在のフォトマスク製造におけるレジスト膜厚は 100~300 nm が一般的である。微細パターンを安定して作るために、レジストとパターンのアスペクト比はできるだけ小さくすることが得策である。本研究の様に微細パターン加工のため、塗布膜厚をさらに薄くする試みも行われているが、ドライエッチ選択比やホール密度などの実用性能のため、薄膜化には限界がある。外観品質に大きな影響を与えるものとしては、回転塗布時の跳ね返り、レジスト液中の異物、吐出ノズル周辺の異物であるが、基板の側面や裏面に付着したレジストは後の工程で異物の原因となってしまう。基板端面や基板最外周部分のレジストを除去した塗布方式も行われている。

塗布後ベーク (Post Applied Bake : PAB) の目的の 1 つは、レジストに残っている有機溶媒を蒸発させることである。ホットプレート方式の加熱機構部が、自動搬送で塗布部と一体構造となっている装置が一般的である。ベーク温度は溶媒の沸点とレジストのガラス転移点が目安であるが、ベークによりレジスト構成物質の絡み合いの状態が変化する。そのため、ベーク温度と時間がレジスト感度に影響する場合があります、ベークの条件は冷却方法を含めて、注意深く設定する必要がある。

2.4.3 現像装置

レジストが感光された後の現像工程の処理フローは、現像液によるパターン形成とポストベークによる遮光膜へのレジストの密着性確保である。これらの処理は自動搬送機構とともに 1 つの装置構成となっていることが多い。

レジストの現像方法には浸漬法、スプレー法、パドル法がある。図 20 に各現像法の概念図を示す。浸漬法は他の方式と比べて異物および使用液量が多い問題がある。スプレー法は、浸漬法より均一性に優れているが、有機溶媒現像の場合は引火の危険性が高く、静電気対策も必要であり、密閉型チャンバーとする場合もある。また、現像液はスプレーの際、蒸気圧の高い有機物が断熱膨張し、液温が低下するため、チャンバーの温度制御も必要である。

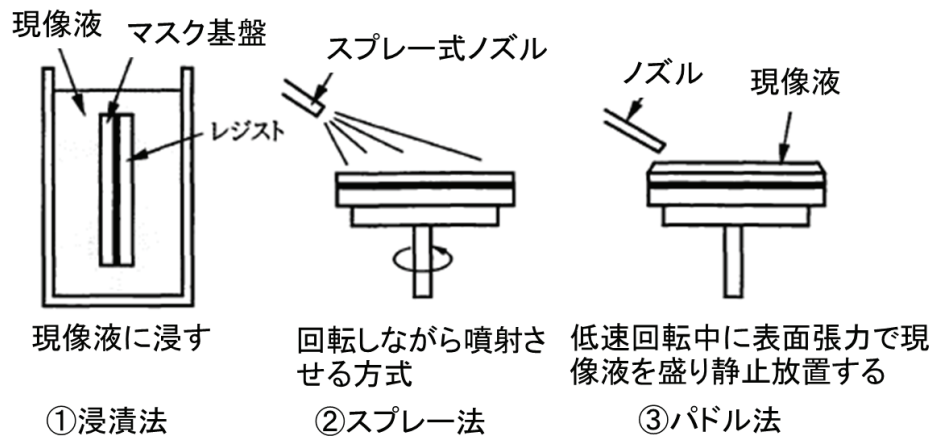


図 20：現像方法の概念図

アルカリ水溶液現像の場合は、ウエハ製造でも一般に用いられているパドル現像法が温度管理上も優れた方法である。現像液をマスク基板に供給する方法が種々工夫されている。最近、スプレー損傷や同心円状 CD 分布を改善する方法として、スリット型のノズルスキャン現像も導入されている。

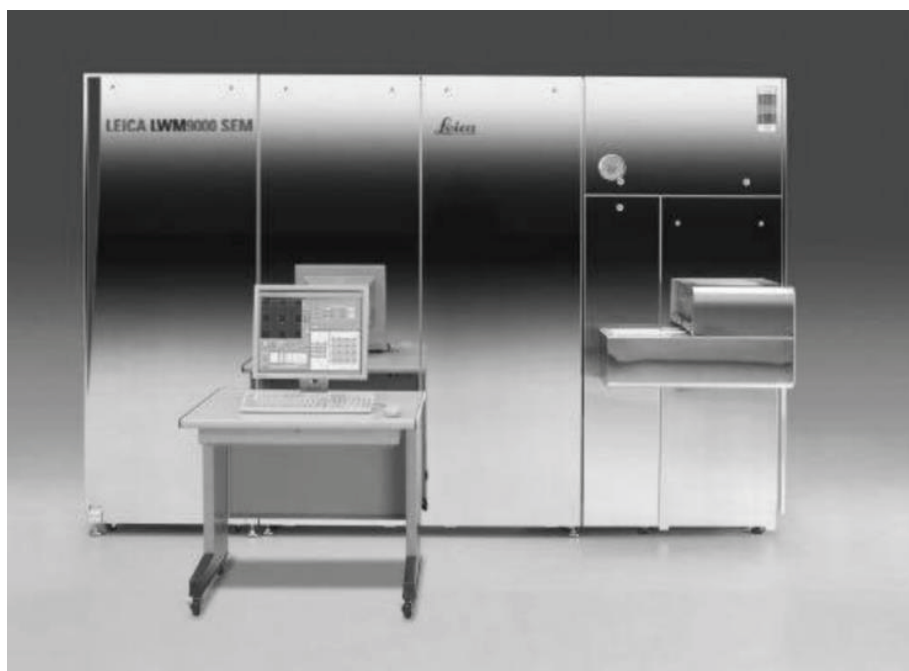
2.4.4 測長 (CD) SEM

マスクの CD 計測には、マスクが光の透過パターンを転写する用途で用いられることもあり、光学式の透過型顕微鏡が用いられてきた。パターンの微細化に伴い、その光源も白色光から g 線, i 線, DUV 光と短波長化してきた。しかし、ハーフピッチ 130nm 世代以降から DUV 光学系の解像限界に近づき、マスク用 CD-SEM の適用が拡大している。このほかの CD 計測技術としては、光波散乱計測、あるいは SPM 法がある。光波散乱計測は規則正しく配置されたパターンを計測する技術であり、任意のマスクパターン計測には適用するのは困難である。マスクの分野では、プロセスモニターなどに適用される可能性はある。SPM 法は位相シフトマスクなどの形状計測にはすでに適用されているが、スループットが低く、マスクの多点測定への適用には向いていない。CD の均一性およびリニアリティなどの CD 精度が厳しくなるのに従い、1 枚のマスクの測定点数が急増しているのが現状であり、それにより、計測精度の他にスループットと自動計測対応も重要な課題になっている。自動計測には、高精度位置決め機能とパターン認識機能が必要になる。

ウエハの CD 計測では早い段階から光学方式から SEM に切り替わっている。ウエハと同時期にマスク用途に SEM が適用されなかった理由は、透過光測定にこだわったこと、および 4 倍体であり光学方式でも対応可能なサイズであった事だけではない。真空処理による異物付着、ビジネスマーケットが小さい

ことによる参入臨時、そして最大の問題は、絶縁体である石英基板上の SEM 計測で避けられないチャージアップに起因する計測精度劣化をいかに防ぐかの技術的課題であったと言われている。しかし測定対象が 200 nm 以下になる頃から光学方式では困難になってしまい、90 nm 世代以降 SEM 方式が主流になっている。マスクの CD 計測専用の装置は、KLA-Tencor Corporation およびホロン(株)が初期の段階で商品化し、その後アプライドマテリアル、そして Leica が参入している。以下、本実験でも取り上げた Leica LWM 9000SEM について解説する。

LWM 9000SEM はアドバンテストとライカマイクロシステムズによって開発された測長装置である。アドバンテストの電子線技術とライカの LWM および IPRO でのマスク計測のノウハウを組み合わせ、65 ~ 45 nm 世代用に開発された。システム構成を図 21 に示す。制御系、電子光学僅筒・真空チャンパと XY ステージ・防振システム、真空系などからなる本体部、そしてマスクハンドリング部で構成される。マスク SEM ではチャージアップ防止が最大の技術課題で、その基本は照射電子と二次電子・後方散乱電子などの出てくる電子を等価に保つことである。この放出電子は、クロムと石英の面積比などマスクパターンの形状により変化する。その状況に対応するために、加速電圧あるいは照射電流などをいかに制御するかがチャージアップ防止のポイントになり、各社工夫している。もう1つの問題が電子線照射による有機物付着の問題がある。照射時間に応じて付着量が変わることで、測定再現性が劣化する。LWM9000SEM ではこの問題をオゾンによるチャンバークリーニングで対応している。



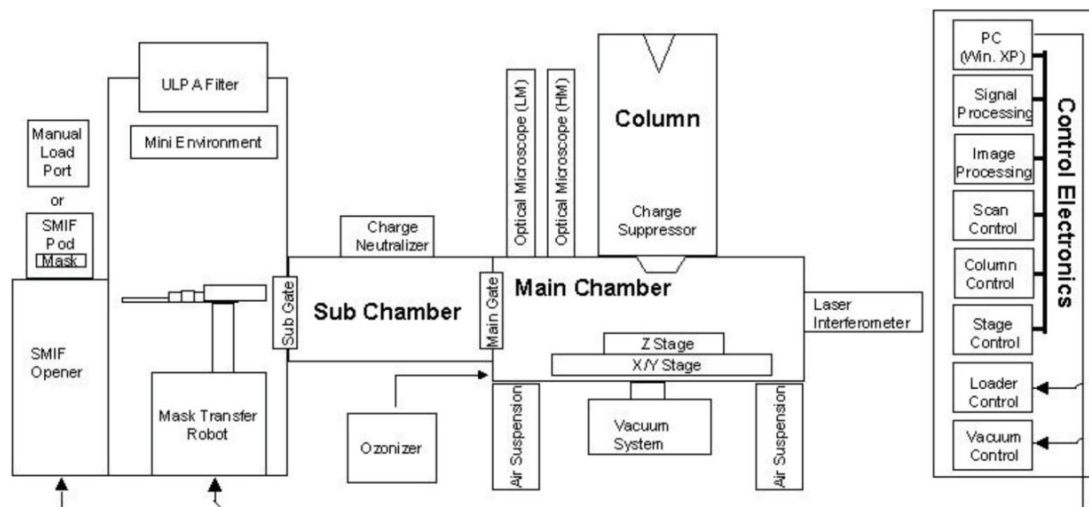


図 21 : LWM9000SEM のシステム構成図

2.5 電子線レジストの動向

フォトリソグラフィの進歩を支えているのは、露光装置、マスク、そしてレジストである。レジスト材料はリソグラフィの主要技術の 1 つであり、フォトリソグラフィの進歩に大きな役割を果たしてきた。レジストの重要性はマスク製作においても同じである。しかし、マスクビジネスは規模が非常に小さく、開発競争原理もあまり働かない現実があり、電子線レジストの性能改善のスピードはフォトリソグラフィに比較すると遅く、結果として寿命が長いレジストが多い。ここではマスク技術における重要性の観点から、電子線レジストの種類とその技術的動向について説明する。電子線レジストの用途は、マスク製作用とウエハ直接描画用がある。初期の電子線レジストは将来大きな市場となるとの想定で、レジストメーカーがウエハ直接描画用に開発したものである。しかしウエハ直接描画の市場が拡大する可能性が低くなり、現在では限られたメーカーが先端マスク用に化学増幅型レジストをマスク用途として開発している状況になっている。

(a) 非化学増幅型レジスト (ZEP シリーズ)

まず代表的な非化学増幅型レジストとして日本ゼオン (株) が開発した ZEP シリーズを紹介したい。高解像性と耐ドライエッチング性を有しているポジ型電子線レジストである。90 年代以降のドライエッチング化に対応して広く用いられるようになった。ZEP-7000 は現在でも用いられており、感度は 50kV で、 $20\text{-}25\ \mu\text{C}/\text{cm}^2$ 程度である。基本構造は α -メチルスチレンと α -クロロアクリル酸の共重合体である。また ZEP520 も、感度は低いが高解像レジストとして研究開発用途などで現在でも広く用いられている。また本研究でもこの改良版

を使用している。

(b) 化学増幅型レジスト (ポジレジスト)

化学増幅型レジスト (Chemically Amplified Resist: CAR) はアルカリ水溶液現像を前提に設計されたレジストであり、IBMにより実用化された。酸発生剤 (Photo Acid Generator: PAG)を含んだレジストは露光により酸が発生する。レジストの溶解性を酸触媒反応を利用して制御することで高い感度と高解像度が達成できる。酸による増感処理のため露光後ベーク (Post Exposure Bake: PEB) 処理を行うことが従来のレジストにないプロセス上の特徴である。露光により発生する酸の量子効率小さくても、露光後にレジストを加熱することによりレジストの溶解性を变化させる酸触媒反応が次々とレジスト内で起こるとい原理である。このため酸発生剤の量子効率以上に化学的に大きく増幅された感度を持つようはなる。レジスト感度は露光後の加熱温度と加熱時間により制御できる。環境成分やレジスト下地に塩基性物質がある場合は、感度が変化したりレジスト形状が劣化する。酸発生剤としてはトリフェニルスルホニウム塩のオニウム塩が代表的である。オニウム塩の光分解による酸発生反応を図 22 に示す。電子線によっても同様の分解反応が起こり、酸が発生する。

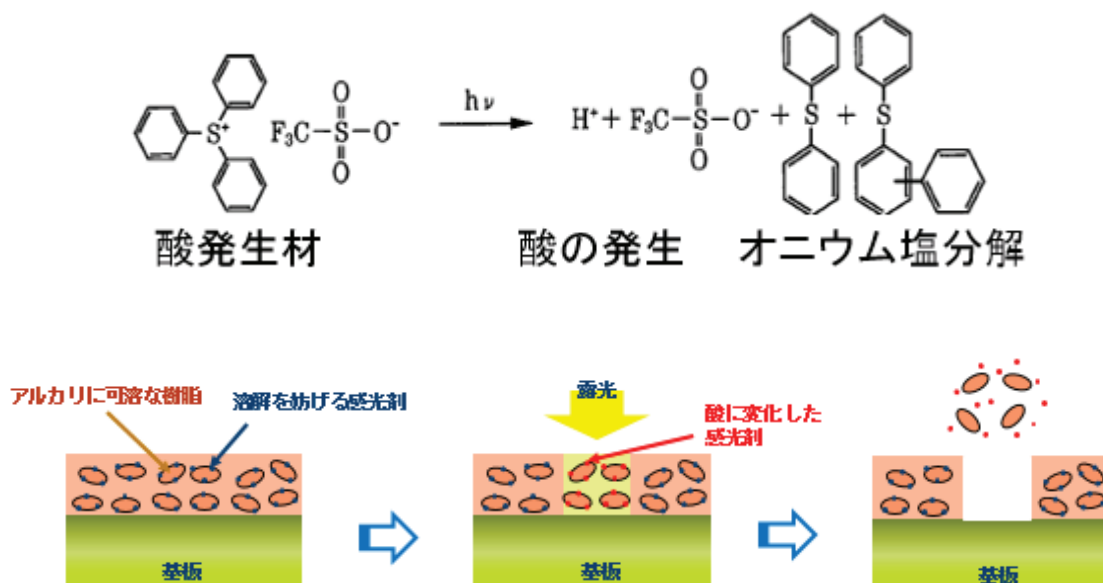


図 22 : 酸発生剤の光分解反応

電子線レジストにおける酸発生機構の詳細は未だ解明されていないが、光露光のように露光エネルギーが直接酸発生剤に吸収される確率は小さいと考えられている。露光エネルギーは主成分樹脂と照射電子線との相互作用によって大部分が吸収されるので、これによって生じた励起状態の樹脂からのエネル

ギー移動やその際発生した二次電子からのエネルギーによって分解反応が起こり、酸が発生すると考えられている。ポジレジストは、アルカリ不溶性で酸に対する反応性の高い官能基を備えた樹脂と電子線照射で酸を発生する酸発生剤とで構成されている。

(c) 化学増幅型レジスト (ネガレジスト)

ネガレジストは、アルカリ可溶性樹脂に反応性の高い架橋剤と酸発生剤を加えた構成が一般的である。代表的なネガレジストのアルカリ可溶性樹脂にもパラヒドロキシスチレン (p-hydroxystyrene : PHS) 樹脂が用いられている。露光部分のレジストは露光後ベークの加熱によって PHS 樹脂と架橋剤が酸を触媒とした縮合架橋反応を起こす。このため 3 次元構造の巨大な高分子体構造となり、現像液に不溶化する。未露光部分の PHS 樹脂はアルカリ可溶性であり、現像により溶解除去される。酸発生剤を現像液によって加水分解する構造としたことで、未露光部分の疎水性物質を水溶性物質にと極性変化させる事で高い現像コントラストを出した報告も存在する。

2.6 課題

90 年代の中頃から高感度レジストの必要性が高まり、マスクプロセスへの CAR の導入検討が本格的にスタートした。その後いろいろな CAR の評価検討が行われたが、実用化のためには CAR の材料に起因するレジスト供給側の問題、および CAR 対応のマスクプロセス設備の開発などのマスク製造側の問題の解決が必要であった。材料起因の問題としては、塗布後安定性(Post Coating Delay stability: PCD)、露光後安定性(Post Exposure Delay stability : PED)の問題などがある。PCD および PED は塗布・現像装置と露光装置が一体となったウエハプロセスでは通常は問題とならない。すなわちこれらの問題はマスク特有の問題であり、その結果ウエハ工程での適用に比べて実用化が遅れた。本格的に生産に適用されたのは 2000 年代に入ってからであり、現在もこの問題を抱えている。その為、本研究では CAR プロセスの代替案として Non-CAR によるプロセス構築を提案している (図 23)。

近年の半導体技術の進歩により、レジストの解像性要求が非常に厳しくなってきた。レジストの感度と解像度の関係は、どうしてもトレードオフの関係にあり、解像性を上げるためには、レジスト感度は鈍くなる。レジスト感度が低下すると、描画時間が長くなり、コストメリットが出なくなるため、なるべく感度を損なわず、高解像性能が可能なレジスト開発が必要不可欠になってきている。

	解像性能	描画手法	スループット (レジストの感度)
化学増幅型レジスト + 露光後ベーク		VSB方式	スループット：高 レジスト感度 (1:1 LS) 20 ~ 50 $\mu\text{C}/\text{cm}^2$
非化学増幅型レジスト		ポイントビーム方式	スループット：低 レジスト感度 150 ~ >1,000 $\mu\text{C}/\text{cm}^2$
		VSB方式	スループット：中 レジスト感度 (1:1 LS) 150 ~ 300 $\mu\text{C}/\text{cm}^2$
非化学増幅型レジスト + 露光後ベーク	チャレンジ!!	VSB方式	スループット：中 レジスト感度 (1:1 LS) 150 $\mu\text{C}/\text{cm}^2$

図 23 : 非化学増幅型レジスト + 露光後ベーク手法への期待

参考文献・出典先

- 1, 裏克巳, “電子光学” 共立出版, p.87 (1979)
- 2, F. Murai et al. :J. Vac. Sci. Technol., Vol. B10, No6, p. 3072 (1992)
- 3, 村井他, “電子線リソグラフィ用帯電防止膜形成材料の特徴と応用, 電子材料, No12, p.48(1990)
- 4, T. Komagata, et al. Development of E-beam Lithography System for 100-90nm Node Reticle" Proc. SPIE, Vol.5130, p.328 (2003)
- 5, H. Kawano, et al. “Advanced CD Control Technologies for EB Mask Writer" Proc. SPIE, Vol.5567, p.929 (2004)
- 6, T.Hirai, et al. J. Electrochem. Soc. Vol.118, p.669 (1971)
- 7, 上野巧, 第7章レジスト技術, はじめての半導体リソグラフィ技術, 工業調査会(2003)
- 8, 田邊功, “フォトマスク 電子部品製造の基幹技術” 東京電機大学出版 2011年
- 9, Gerhard W.B.Schluter, Takayuki Nakamura, Jun Matsumoto, “Reticle CD-SEM for 65-nm technology and beyond” Proceedings of SPIE Vol. 5567
- 10, フォトマスク・テクノロジー 株) 工業調査会 2008年

第3章 電子線リソグラフィを用いた半導体フォトマスクの超解像技術

3.1 緒言

ロジックデバイスにおけるテクノロジーノード 10 nm 世代以降では、20 nm オーダーの解像性能が必要不可欠になってくるであろう事、並びに既存の化学増幅型レジスト (CAR) プロセスの問題点などを前章に記載した。ここでは、現在量産で運用されている CAR プロセスの代替案として、非化学増幅型レジスト (Non-CAR) プロセスに着目し、高解像へのアプローチを述べている。

初めに、実験手順やその方法を詳細に記載し、Top down による SEM 像、SEM 断面図、レジスト感度カーブ、コントラストカーブ、LER など様々な実験結果を紹介している。また本手法の有効性を明らかにするため、AFM やマイクロハードネス測定装置での検証結果も報告し、考察として本プロセスの物理特性にも触れ、手法の優位性を述べている。

最後に結言として、実験結果のまとめと総括を行い、高解像手法の一つとして、非常に優位な手法を開発した事を述べている。

3.2 実験手順・方法

①マスクブランクス

まず初めに本実験に用いたマスクブランクスについて触れる事にする。HOYA (株) のもので最下層がクオーツの基盤、それから遮光膜としてクロム (Cr) を 60 nm 膜付けしたものを使用している。

②レジスト・塗布

そしてレジストであるが、非化学増幅型レジストとして日本ゼオン (株) の ZEP520A を使用している。レジスト自体の塗布膜厚を薄くするために希釈を行っている。これは、パターン倒れによる影響を少なくするのが狙いである。希釈液には同じく日本ゼオンからの ZEP-A アニゾール 98% (mehoxybenzene) を用いて、ZEP520A : ZEP-A を 1:1 で希釈している。ZEP レジストを希釈する事自体は、一部製造ラインでも一般的に行われている行為である。しかしながら希釈を行う事で、レジスト塗布の安定性、並びに CD 値のばらつきが出てしまう懸念事項は拭えない。従って本研究では、これらの再現性も確認する事にしていく。(図 31)

レジスト塗布の方法は、一般的なスピコート塗布方式を使用している。装置は、シグマメルテック (株) の CTS8000 シリーズ (図 24) を使用している。本装置は、レジスト塗布及び端面レジスト剥離を行うもので、機能としては、塗布前洗浄、レジストコート、膜厚 1% の面内均一性、基盤端面のレジスト剥離、導電膜コートなどが挙げられる。



図 24 : シグマメルテック (株) CTS8000 レジスト塗布機

塗布条件としては、1500 rpm 時に 2 sec 間のレジスト塗布ステップを設け、その後 1000 rpm で 60 秒間のメインステップを入れている。この条件にて、50 nm \pm 5 nm の塗布膜厚制御が可能であり、表 2 にその膜厚結果の一例を示す。

表 2 : レジスト塗布後の膜厚データ

測定ポイント	Thickness[A]	X [mm]	Y [mm]
1	478	62.4	62.4
2	480	41.6	62.4
3	482	20.8	62.4
4	476	0	62.4
5	475	-20.8	62.4
6	473	-41.6	62.4
7	468	-62.4	62.4
8	472	-62.4	41.6
9	478	-41.6	41.6
10	482	-20.8	41.6
11	483	0	41.6

12	484	20.8	41.6
13	480	41.6	41.6
14	478	62.4	41.6
15	481	62.4	20.8
16	483	41.6	20.8
17	485	20.8	20.8
18	486	0	20.8
19	486	-20.8	20.8
20	483	-41.6	20.8
21	478	-62.4	20.8
22	480	-62.4	0
23	486	-41.6	0
24	489	-20.8	0
25	488	0	0
26	491	20.8	0
27	489	41.6	0
28	484	62.4	0
29	486	62.4	-20.8
30	490	41.6	-20.8
31	491	20.8	-20.8
32	491	0	-20.8
33	494	-20.8	-20.8
34	488	-41.6	-20.8
35	484	-62.4	-20.8
36	480	-62.4	-41.6
37	487	-41.6	-41.6
38	487	-20.8	-41.6
39	489	0	-41.6
40	488	20.8	-41.6
41	487	41.6	-41.6
42	484	62.4	-41.6
43	478	62.4	-62.4
44	481	41.6	-62.4
45	483	20.8	-62.4
46	484	0	-62.4

47	483	-20.8	-62.4
48	481	-41.6	-62.4
49	480	-62.4	-62.4

測定ポイント： 49 箇所

Minimum : 468 nm

Maximum : 494 nm

Range : 26

Mean : 483.1428571 nm

SD : 5.361902647 nm

%3SD : 3.33%

%Range : 2.69%

%MinMax : 2.70%

その後、レジスト中に含まれる有機溶媒を飛ばす目的で高温ベークを行う。装置自体も塗布機にインテグレーションされているオーブンを使用し、レジスト塗布後、180℃にて 10 分間行うようにしている。この条件は、レジストメーカーからの推奨条件を使用している。この高温ベークの事を本論文では PAB (Post Applied Bake) という表現を用いて統一している。露光後ベークの PEB と混同しない様に注意が必要である。

③電子ビーム露光・マスクパターンレイアウト

レジスト塗布・ベーク (PAB) を行った基盤は、その後、電子ビーム露光へのプロセスと続く。電子ビーム露光機には、日本電子 (株) JBX9000 シリーズを用いている (図 25)。本装置は、走査方式をベクタ、加速電圧 50 kV、ビーム形状は可変成形 (Variable Shaped Beam : VSB) で現在でも広くマスク製造に使用されている装置である。最先端の電子線描画装置市場としては、(株)ニューフレアテクノロジーズの EBM シリーズと本研究で使用した日本電子 (株) 製のものだけでも過言ではなく、前社のほぼ独占市場になってしまっている。ベクタ走査型の装置では偏向領域を大きくするとスループットが良くなるが、偏向精度の悪化および偏向に起因するビーム形状の差が大きくなる問題がある。従って、偏向に伴うビーム形状の歪および、偏向量の誤差が小さい電子光学系とその制御技術が重要で、精度を優先するために偏向領域を小さくする傾向にある。スループットは制御系の高速化で対応し、アドレスサイズも 1 nm 以下と小さくなっている。偏向領域間の接続部分では誤差が

最大になってしまい、ベクタ方式の欠点の1つとなっている。この影響を低減するために、偏向領域をシフトして多重描画する手法が導入されている。解像性能を確保するために、50 kVの加速電圧を採用しているが、近接効果およびフォグング効果が大きくなってしまふ。それらの補正技術も、初期の50 kV装置に比較して大幅に改善されている。最先端の描画装置で10 nm以下の精度が実現されているのは、上述の改善の他に、各種のノイズなどエラー成分の徹底的解析とその対策が行われたことによる。またスループット改善のために、電流密度も大きくする傾向にあるのが最近の傾向である。



図 25：日本電子（株）製 JBX9000 シリーズ

本装置の描画条件に関しては、実験結果の箇所で詳細に説明するので、続いて、どのようなパターンを本装置で描画したのかの説明に移る。図 26 に本研究でメインに使用したマスクパターンのレイアウトを添付した。

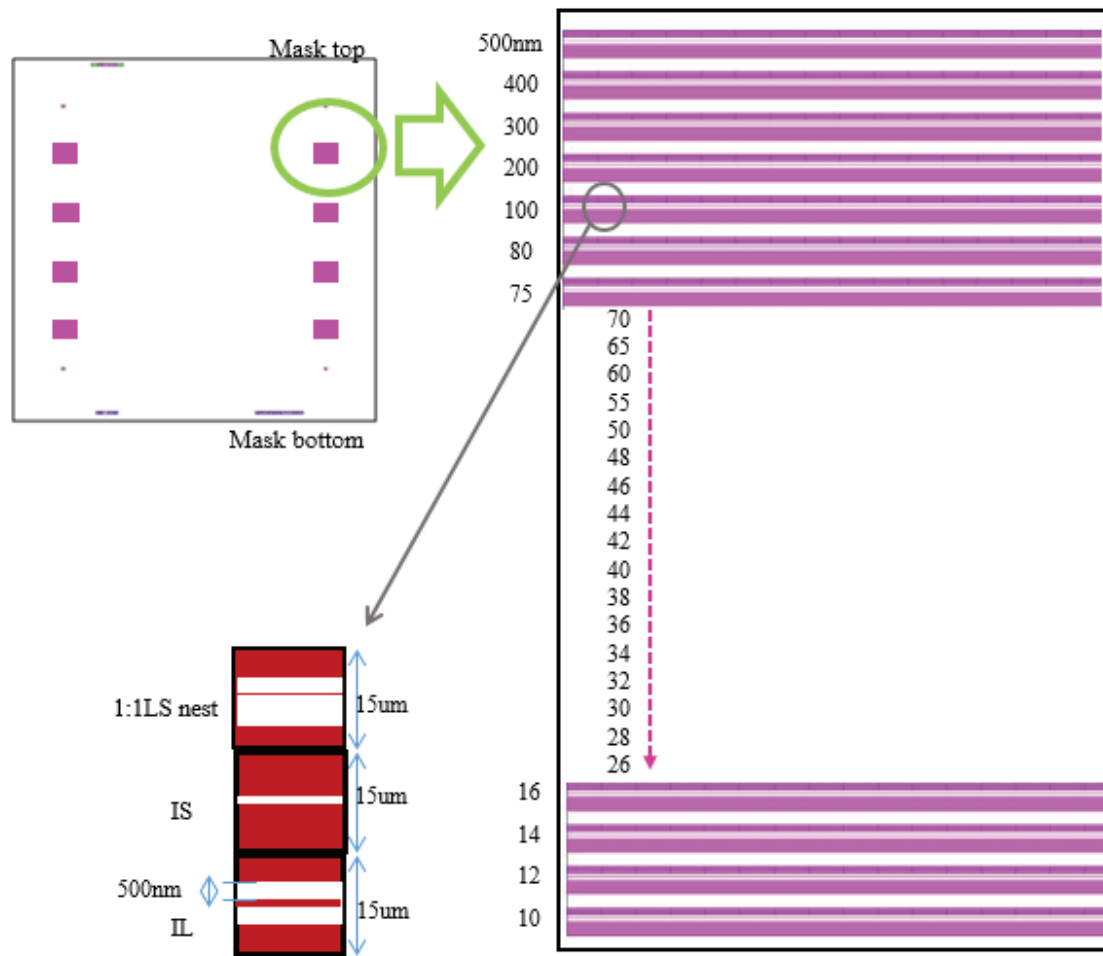


図 26：本研究で使用したマスクパターンのレイアウト

矩形マスク上に 8 つのパターンエリアを設けており、電子ビーム露光時、異なるドーズ量でビーム照射を行いたいため、このように複数個所の同一パターンを設けている。その中身は、500 nm から 10 nm までの線幅を設計値として入力しており、それぞれ 1 : 1 のラインアンドスペース (1:1 Line and Space)、孤立スペース (Isolated Space)、孤立ライン (Isolated Line) を 15 μm 間隔でパターンニングしている。解像性能を検証する上では、この 3 つのパターンを全て見ていく事が重要だと考えている。特に孤立ラインに関しては、パターンのレイアウト上、ドーズ量が多くなってしまい、最も成型が困難な箇所でもある。いずれにせよ、どれか一つのパターン形状だけではなく、3 つ全てを検証していく事に重点を置いている。実際にパターンされた現像後のマスク基盤が図 27 になる。レイアウト通り、8 箇所の測定領域があるのが確認できる。

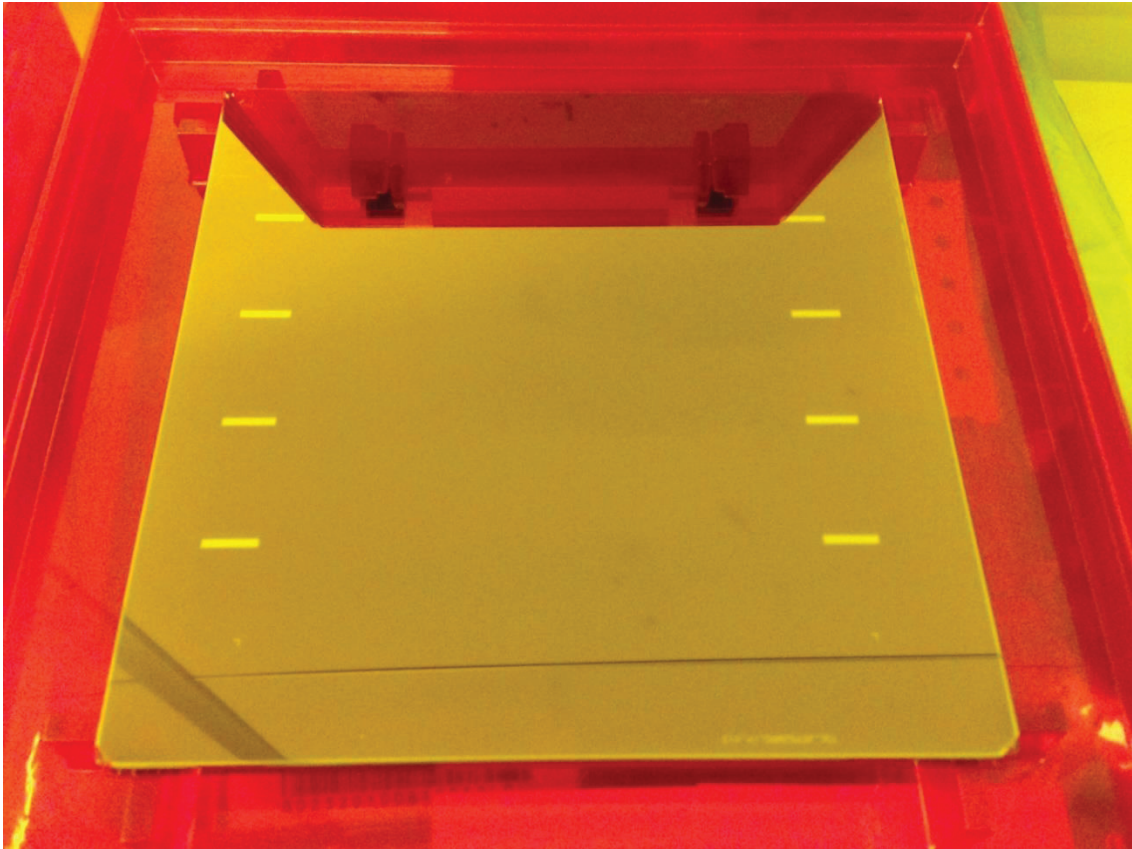


図 27 : 描画・現像後のマスク基盤

④ 露光後ベークと現像

電子ビーム露光後、高温ベークのプロセスを入れている。これが本研究のユニークなところである。第 1 章でも簡単に触れたが、**Nano Imprint Lithography : NIL** などのプロセスで、非化学増幅型レジストに露光後ベークを加えて解像性を向上させた実績があるのをヒントにしている。露光後の高温ベークプロセスの事を **Post Exposure Bake : PEB** という表現を用いて説明する事にしているが、今回この PEB 温度を 90℃、120℃、135℃、150℃と変化させ、CD 値の変化、断面の形状を計測している。尚、ベーク時間に関しては、10 分間と統一して実験を行っている。

現像に関しては、一般的な有機溶剤現像を行っており、特に特別な装置などは使用していない。日本ゼオン (株) からの **ZED-N50 (n-酢酸アミル)** を現像液に使用し、常温環境 (20 ~ 23℃) にて 80 秒間浸している。その後、リンス工程として、IPA 9%リンス を 20 秒間程行い、ブローア-にて十分に乾燥させている。

⑤ 測長 SEM

現像後のマスク基盤にて、様々な CD 値を計測するために第 2 章で述べたライカマイクロシステムズによる LWM9000SEM (図 28) を使用している。計測ポイントとしては、規定寸法値である、デザイン CD 値の 100 nm、70 nm、50 nm、44 nm、40 nm、以下計測可能な領域までを測定する事になっている。ビームエネルギーを 500 eV とし、電流値を-4.8pA としている。また SEM の倍率に関しては、通常は 200,000 倍率で測定し、図表・データ比較のため 75,000 倍で測定しているものもある。CD 値の計測方法として、測定再現性なども考慮するため、一つのパターンに対して異なる 5 箇所の平均値をデータとして用いている。また、Line Edge Roughness : LER についても同じように一つのパターンに対して、異なる 5 箇所を測定し、それぞれの平均値をデータとして用いている。



図 28 : ライカマイクロシステムズによる LWM9000SEM 装置写真

⑥ その他の計測機

表面のラフネスを検証したり、エッチング後の残膜を計測するために Atomic Force Microscope : AFM を使用している。一般的に広く普及してるデスクトップ型の顕微鏡であり、メーカー・モデル名などは割愛する事にする。データ取得例として、本研究時に残膜厚を測定した結果 (図 29) を添付する。図 29-1 がマスク基板上にパターンニングされているアライメントマークである。狙い通り、正確に現像が出来ているかどうかを確認する方法として、このアライメントマークの残膜をまず初めに調べる事になっている。段差を調べてみても 40 ~ 50 nm 程度はエッチングされている事が確認できる。図 29-2 がデザイン CD 500 nm の 1:1 LS であり、こちらも同様の値ぐらいは削れている事が確認でき、おおよそ、狙い通りの現像が出来ているのではないかと予測が可能であ

る。

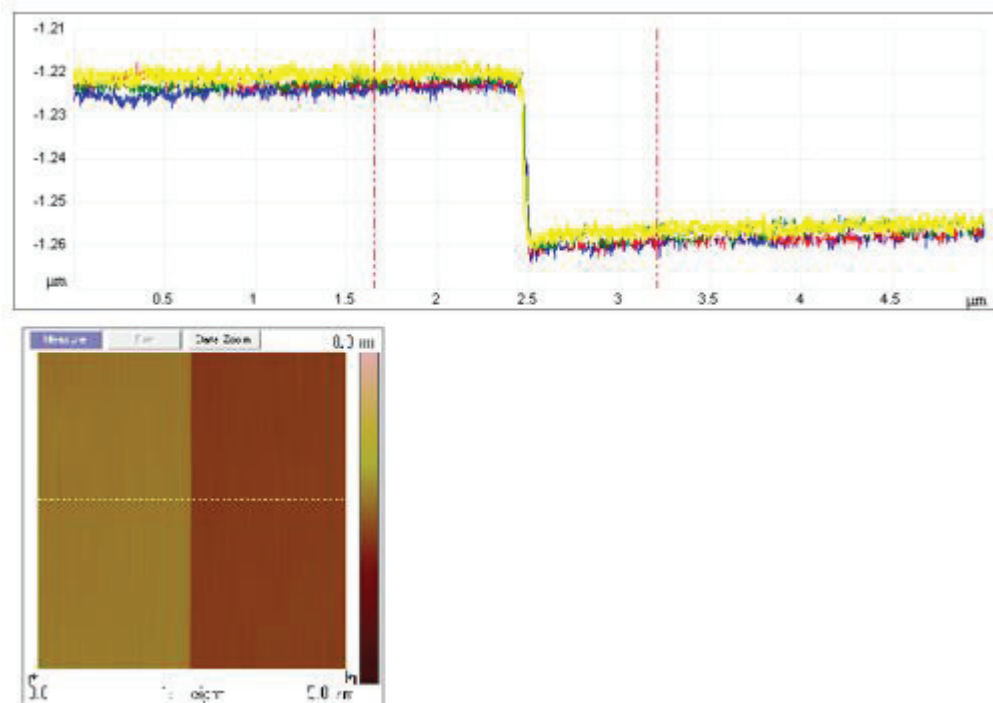


図 29-1 : アライメントマーク

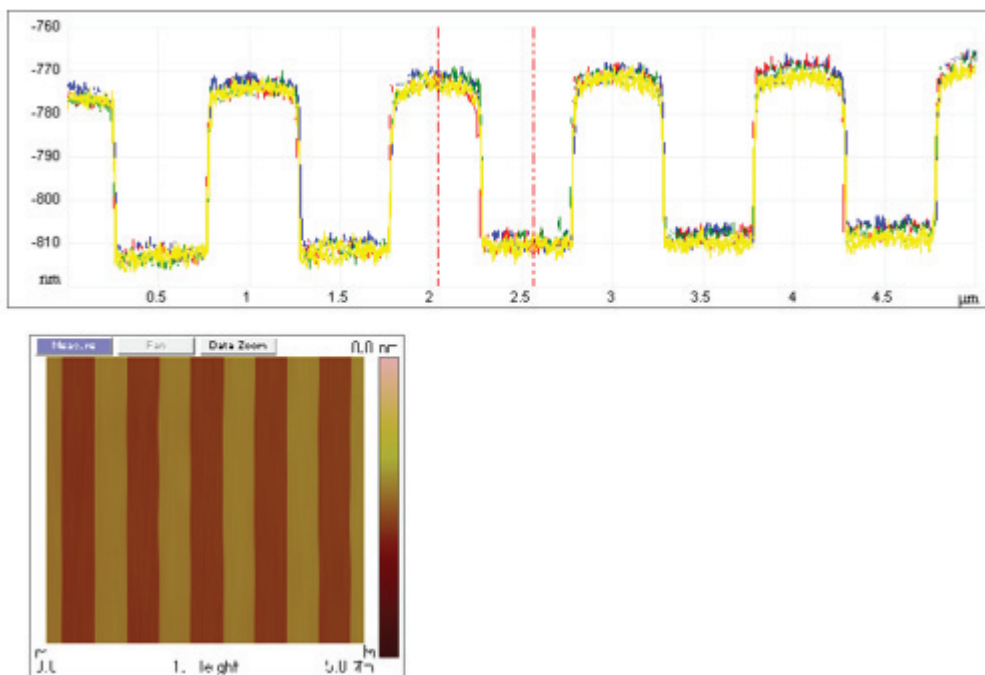


図 29-2 : エッチング後のデザイン CD 500 nm での残膜測定結果

表面のラフネス測定に関しては、より詳細な説明を実験結果の項目で紹介する事にする。

もう一つ、高温ベークのメカニズムを裏付ける実験として、レジスト膜の硬度測定を行っている。この実験に使用した装置が、島津製作所製、ダイナミック超微小硬度計 DUH-211 (図 30) である。負荷と押しこみ深さの関係をリアルタイムに計測し、押しこみ深さを自動測定し、個人誤差無く金属材料を始めとし、薄膜、表面処理層、微小電子部品、プラスチック、ゴム、セラミックスなど、あらゆる材料の表面物性評価が可能な機器を使用している。硬度測定に用いたレジスト塗布サンプルは、クーポンサイズ (18 x 18 mm) のため、露光装置に関しては、ELIONIX 社製 ESA-2000 シリーズにて全面露光している。露光条件は、加速電圧 10 kV、ビーム電流 900 pA、ドーズ量 $50 \mu\text{C}/\text{cm}^2$ である。



図 30 : 島津製作所製、ダイナミック超微小硬度計 DUH-211

3.3 実験結果と考察

3.3.1 希釈 ZEP520A の再現性確認

まず初めに希釈された ZEP520A の再現性の確認として、デザイン CD 100 nm での LS、IS、IL 測長結果のばらつきを測定した (図 31)。別々の日に (計 3 回) 同一方法にて希釈を行い、LS、IS、IL の計測をそれぞれ 5 点ずつ行った。CV 値 (標準偏差/平均値) がそれぞれ 1.01~1.15 であり、尚且つ有意水準である 5%以内を十分満たしているため、統計的に見てもこれらのデータは、非常に有意な値であると考えている。従って、希釈によるレジストサンプルの違いは無いものと考えるのが妥当であると思われる。

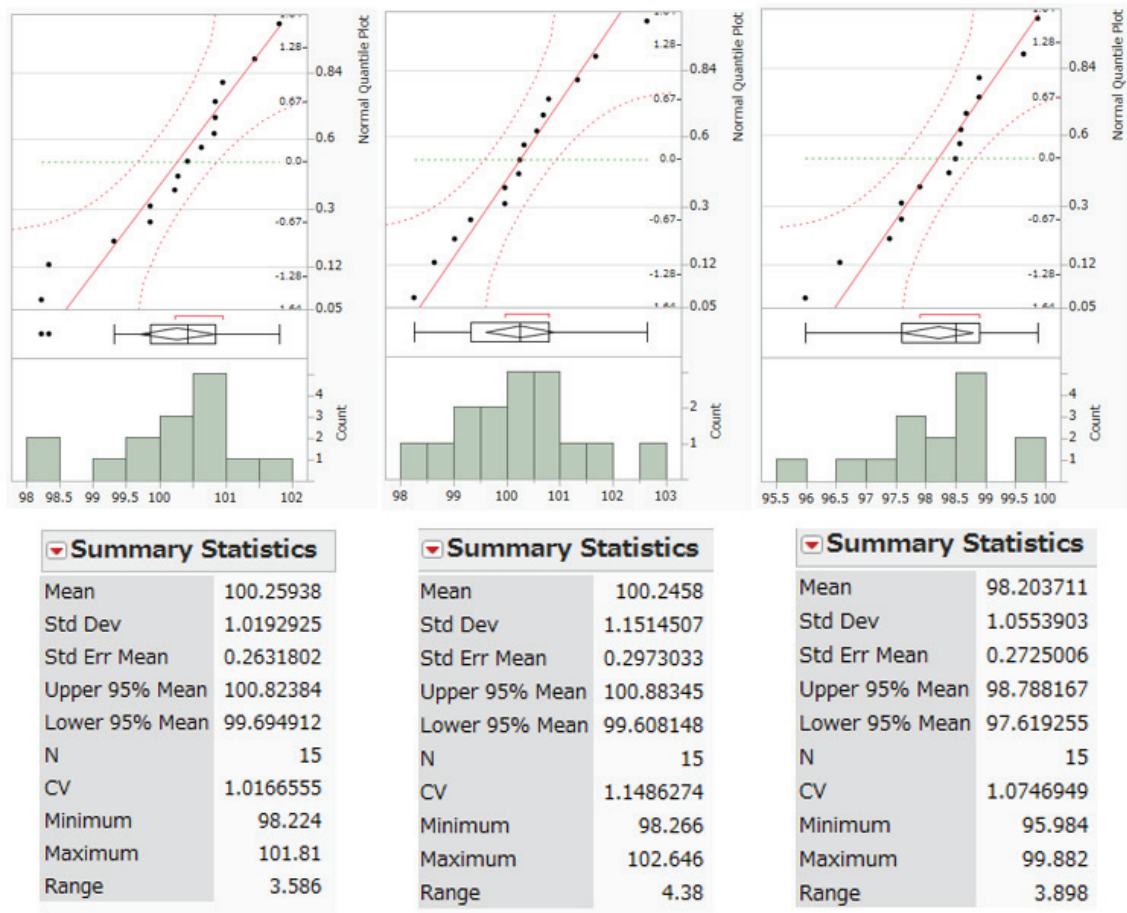


図 31 : 左から 100 nm デザイン CD 1:1 LS、真ん中が IS、右側が IL パターンの測長結果のばらつき。3つの希釈レジストサンプルに対してそれぞれ 5 点ずつ測定

3.3.2 露光後ベーク手法の優位性

続いて、デザイン CD 100 nm での LS、IS、IL の露光後ベーク温度依存性を示す (図 32)。装置の設定ドーズを $240 \mu\text{C}/\text{cm}^2$ とし、露光後ベーク温度の違いによってスペース幅やライン幅がどのように変化するか、その特徴を調べている。図 32 の最上部が露光後ベークを加えていない場合の LS、IS、IL であり、下に行くにつれて、ベーク温度を 90°C 、 120°C 、 135°C 、 150°C と上げている。LS と IS に関しては、スペースの CD 値を計測しており、IL に関しては、ライン幅を計測している。まず初めに LS の測長結果を見てみると、露光後ベークを加えていない場合が、107 nm。その後ベーク温度を上げていくにつれ、107 nm (PEB 90°C)、103 nm (PEB 120°C)、100 nm (PEB 135°C)、80 nm (PEB 150°C) とスペースの幅が縮小しているのが分かる。同様に IS の測長結果もベーク温度を上げていくにつれ、109 nm (PEB 90°C)、104 nm (PEB 120°C)、101

nm (PEB 135°C)、79 nm (PEB 150°C)とスペース幅の縮小が確認できる。露光後ベーク 150°Cと無しとで比較すると、おおよそ 28%も CD 値が変化している事が確認できる。一方、IL に関しては、ライン幅が広がる方向に変化が見られる。ベーク温度を上げるにつれ、86 nm (PEB 90°C)、88 nm (PEB 120°C)、97 nm (PEB 135°C)、101 nm (PEB 150°C)とライン幅が増大する傾向が確認できる。

更に露光後ベーク 120°C後の CD 計測値から露光後ベーク無しの CD 値を引いた値 (CD error) を算出した結果を図 33 に示す。横軸にデザイン CD 値を縦軸に CD error 値を記載している。露光後ベークを加える事により、スペース幅を縮小させ、ライン幅を増大させる効果がある事がこのグラフからも明らかに読み取れる。もう一つの特徴としては、この CD error 値はデザイン CD の大きさに依存していない事である。

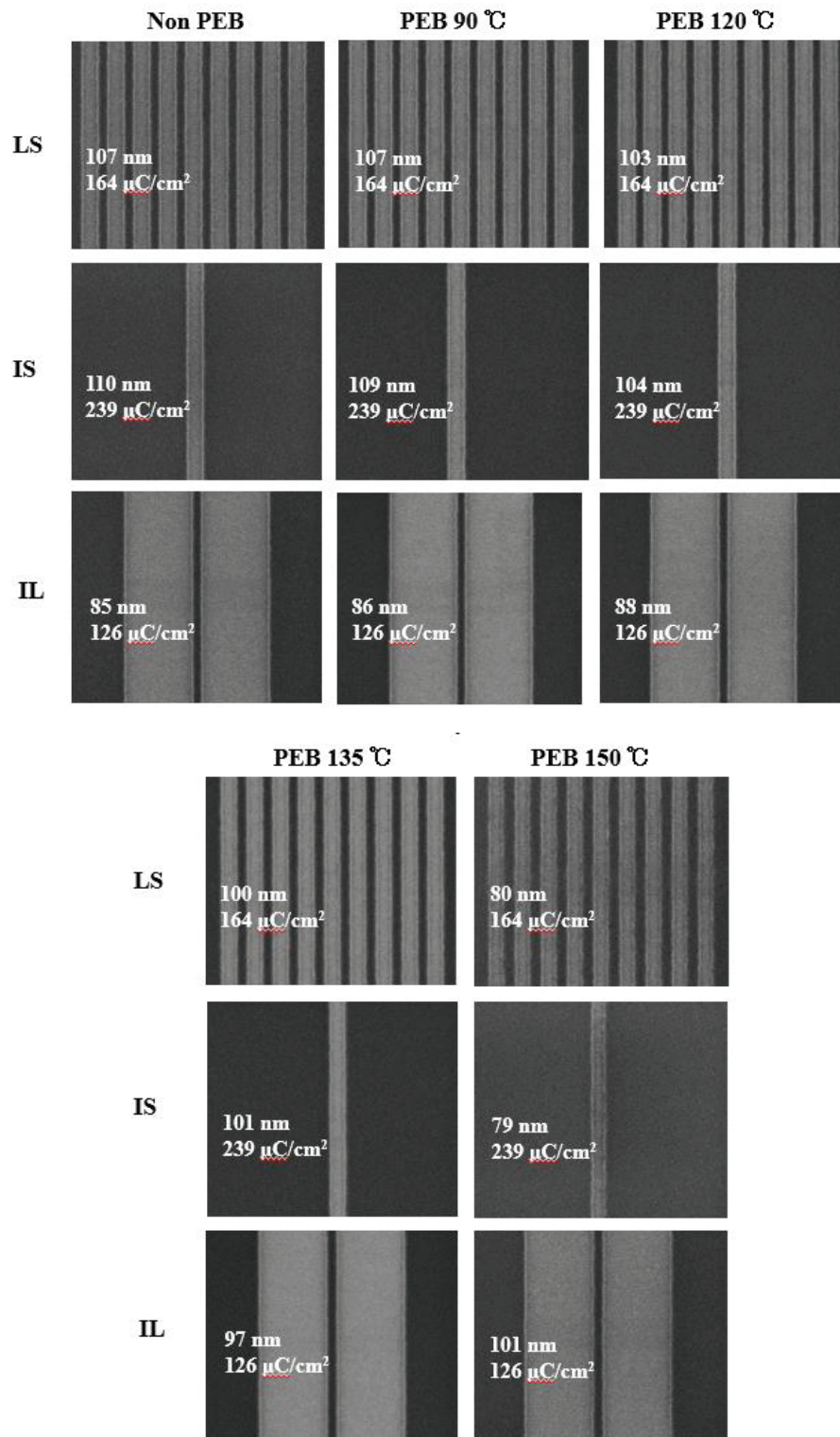


図 32 : デザイン CD 100 nm での LS、IS、IL の露光後バーク温度依存性
(灰色の箇所が電子ビーム照射された領域)

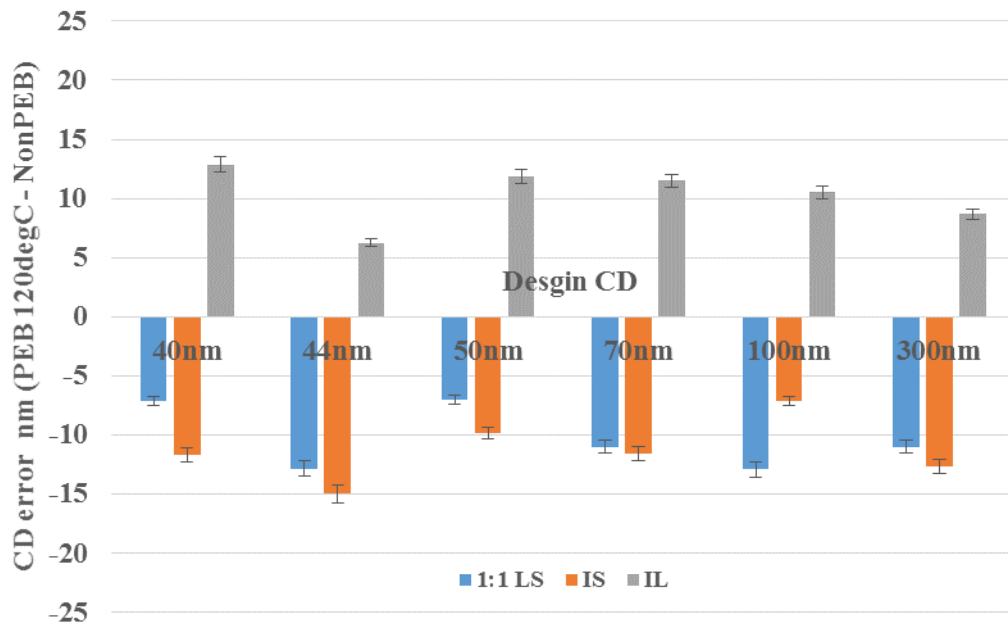


図 33 : デザイン CD 100 nm での CD error 値 (PEB120°C-Non PEB)、Error Bar : 95% confidence interval

3.3.3 解像性能に関して

続いて、PEB 温度を変化させた場合におけるレジストの解像性能を示す。まず初めに PEB 無しの場合における CD-SEM 像を図 34 に添付する。デザイン CD 36 nm の IL では、断線のようなものが確認でき、またデザイン CD 32 nm の LS や 28 nm の IS ではブリッジのようなものが確認できる。解像性能としては、LS : 36 nm、IS : 32 nm、IL : 40 nm (デザイン CD) 程度が妥当なところだと考えている。

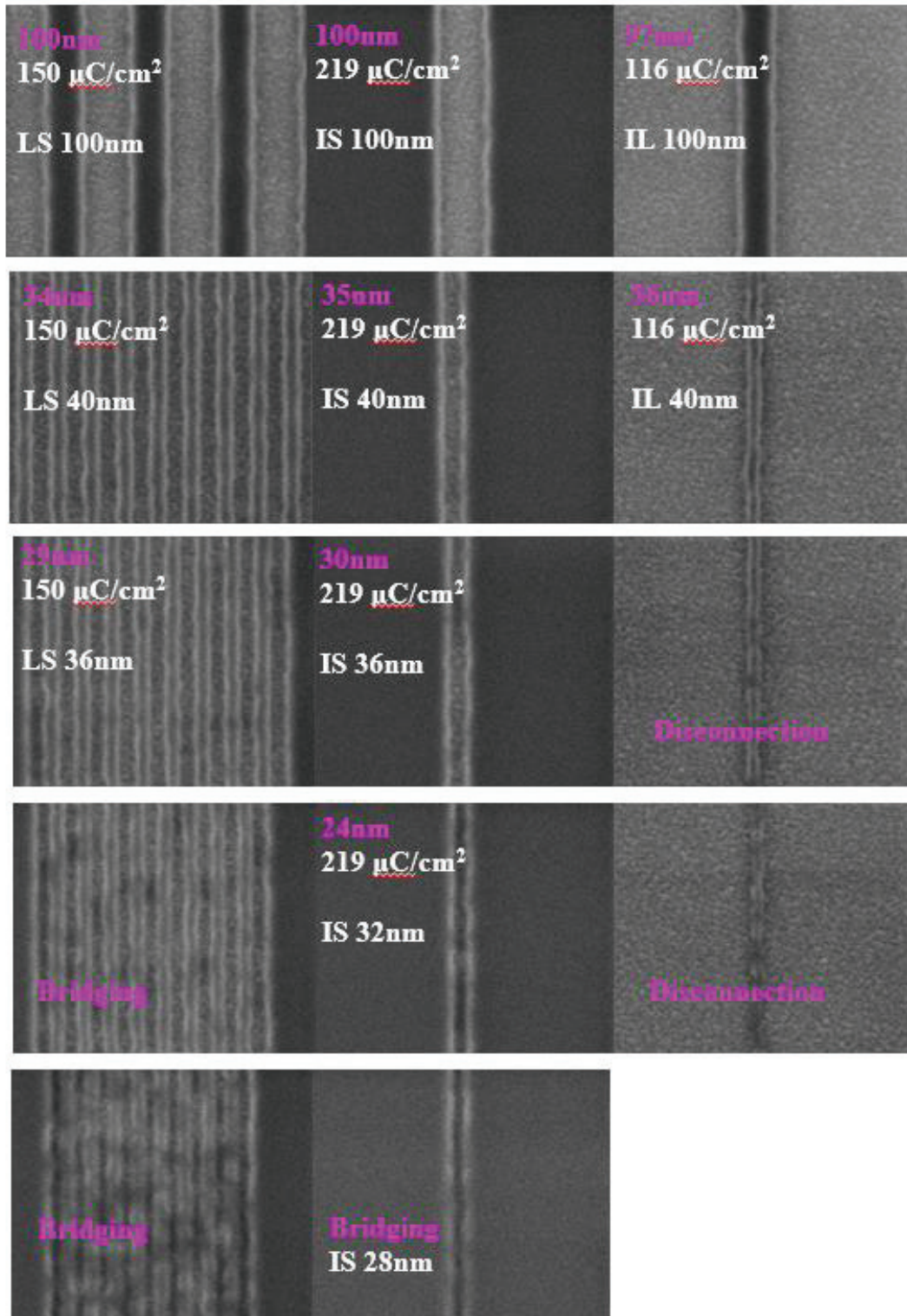


図 34 : PEB 無しにおける CD-SEM Top down のイメージ図

次に PEB 温度が 90℃ の場合をしてみる事にする (図 35)。デザイン CD 32 nm の LS、28 nm の IS、36 nm の IL 辺りが解像性能値と考えてお

り、PEB 無しの状態に比べて解像性能が各パターンで向上している事が確認できる。

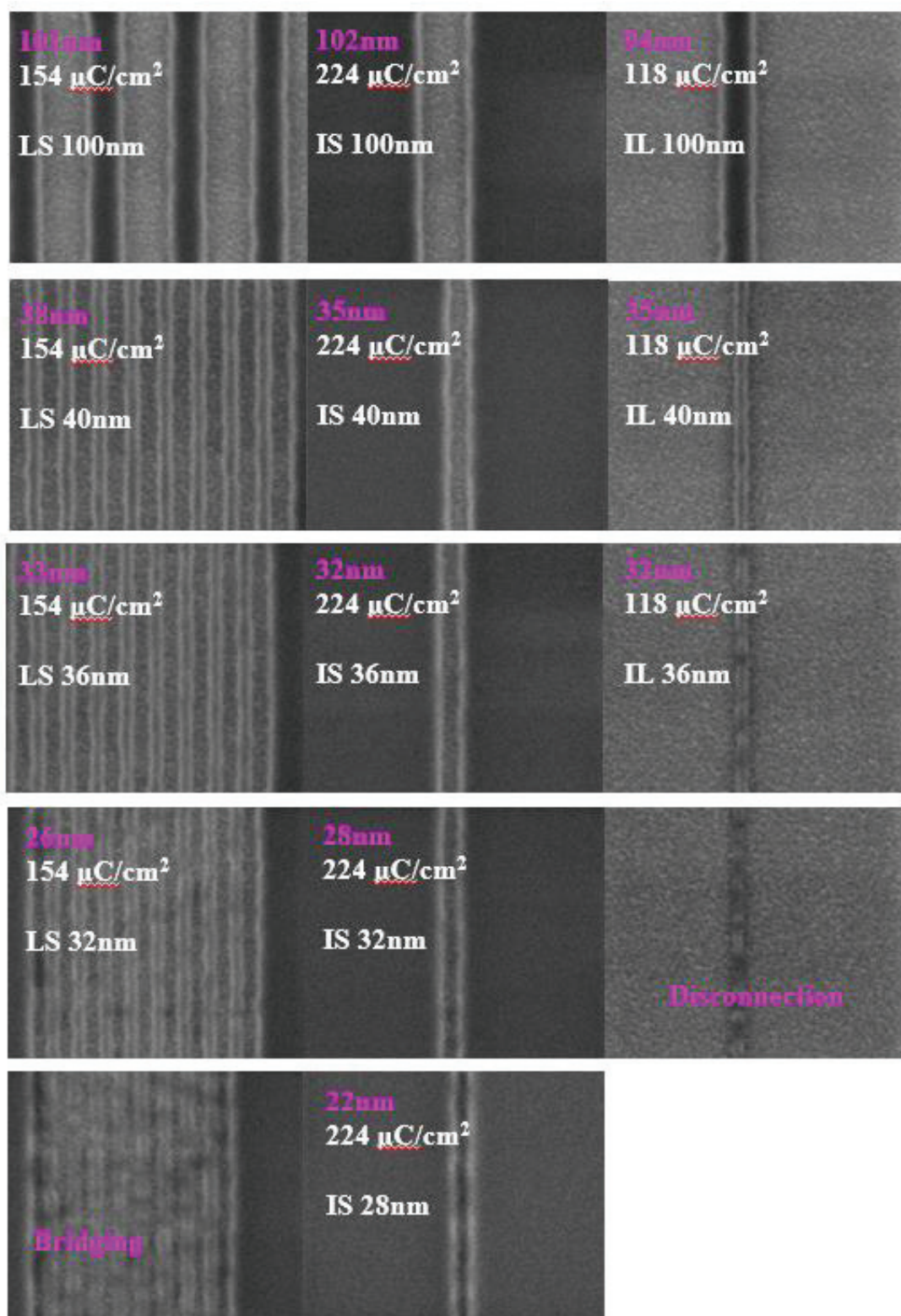


図 35 : PEB90°Cにおける CD-SEM Top down のイメージ図

更に PEB 温度をあげ 120°C の状態を観察してみる (図 36)。PEB90°C の時に比べて、IL が更に向上し、デザイン CD 32 nm 程度は解像可能であることが確認できる。従って、デザイン CD 32 nm の LS、28 nm の IS、32 nm の IL 辺りが解像性能値と考えている。

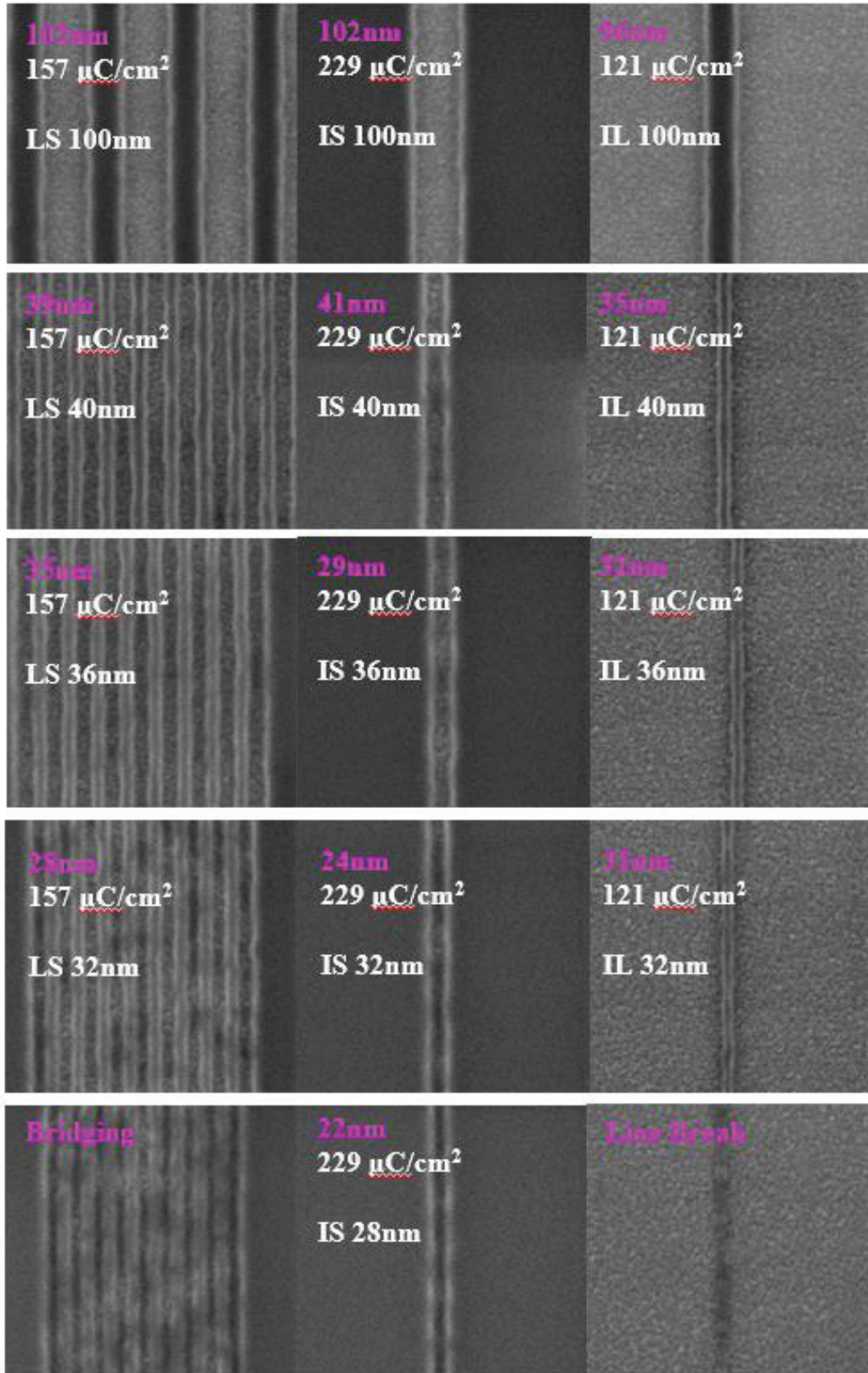


図 36 : PEB120°Cにおける CD-SEM Top down のイメージ図

続いて PEB 温度 135°C の状態を見る事にする (図 37)。今度は、レジストが低感度化しすぎてしまって、解像性能が極端に悪くなってしまっているのが確認できる。PEB を加えていない状態よりもさらに悪くなってしまっている。

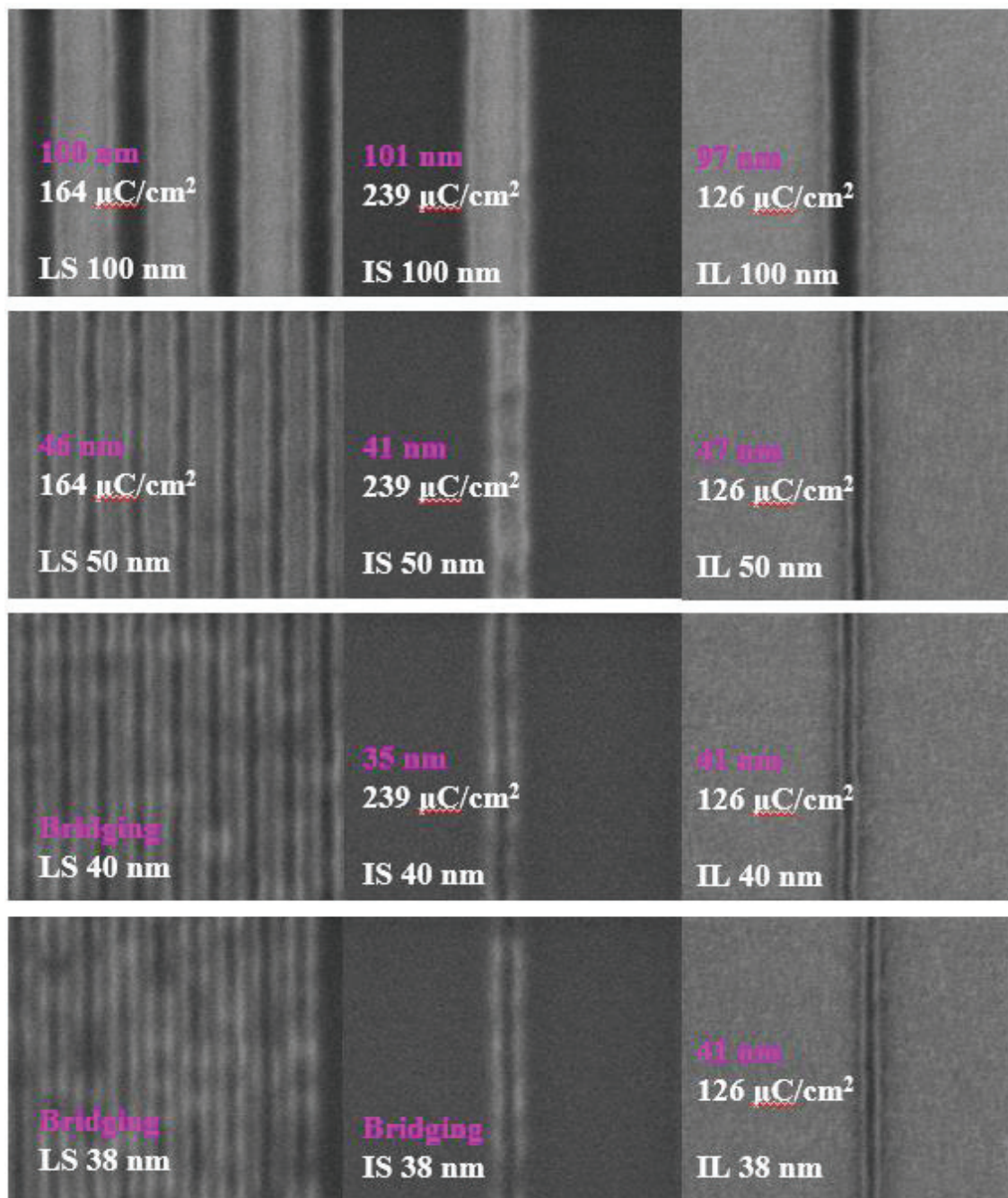


図 37 : PEB135°Cにおける CD-SEM Top down のイメージ図

更に PEB 温度を 150°C まで上げた場合の結果が図 38 である。PEB135°C よりも更に解像性能は劣り、完全にレジストが低感度化しすぎてし

まっており、明らかにドーズ量が足りない様子が伺える。

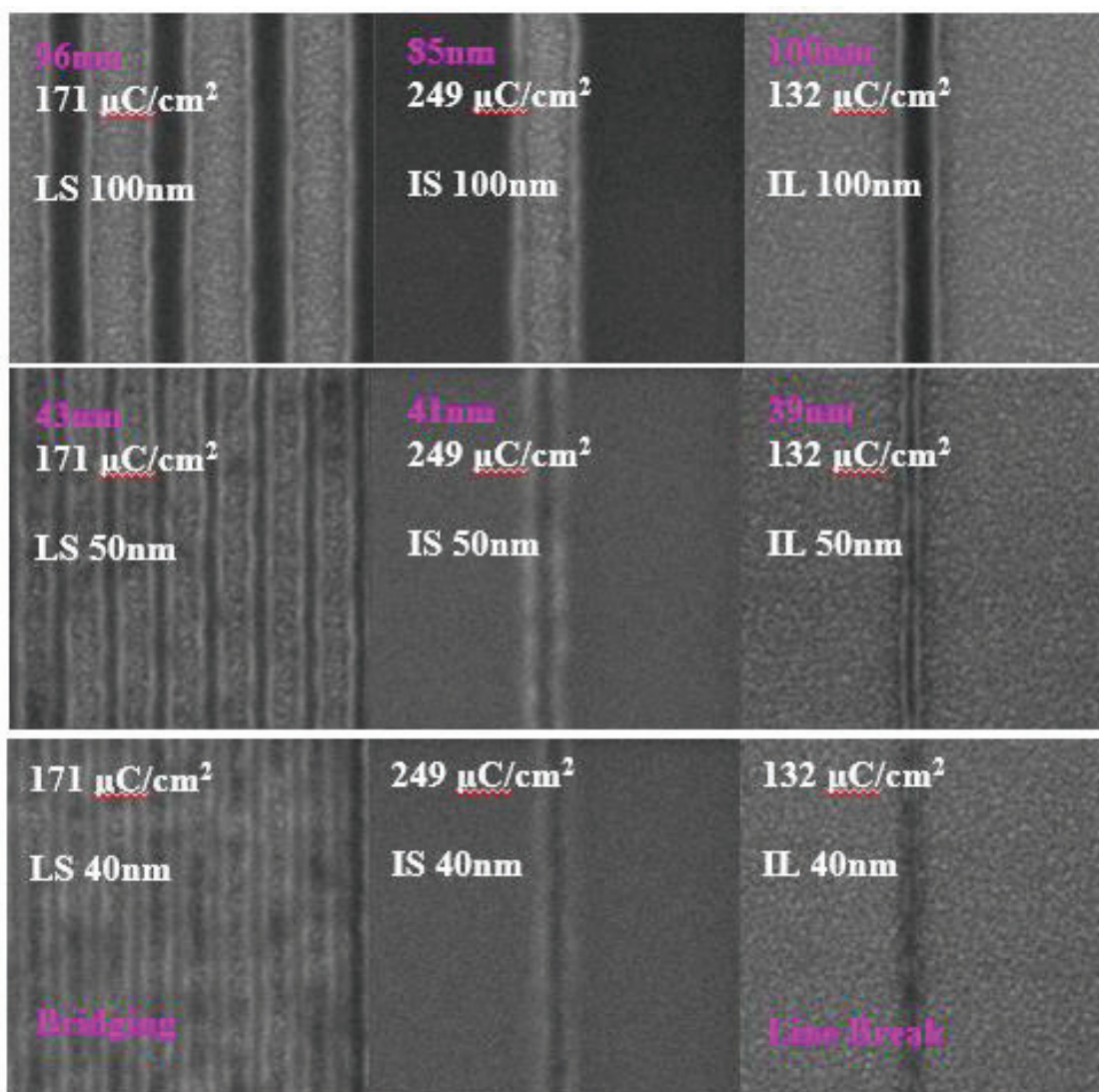


図 38 : PEB150°Cにおける CD-SEM Top down のイメージ図

これらの Top down SEM 像の比較から、レジストの解像性を考察すると、露光後ベーク（PEB）には必ず最適値が存在するという事が言え、それが PEB120°Cである事が確認できた。Top down SEM 像でおおよその解像性能は確認できるが、パターンのブリッジング・倒れは、断面を正確に測定する必要がある。従って、以降、断面の SEM 像にて解像性を議論している。

まず初めにベストドーズでの PEB 無しの場合における断面図を見る事にする（図 39）。CD-SEM での解像性能（赤枠）とほぼ同一の見解である。デザイン CD 32 nm の IS では若干のブリッジが確認できるが、Cr 膜までは解像しきれておらず、この残は後の洗浄やドライエッチングの工程で十分取り切れる領域だと判断している。デザイン CD 28 nm の IS では、Cr 膜ま

で十分にエッチング（現像）されていなく、この領域は解像しきれていないと判断している。一方、デザイン CD 36 nm の IL に関しては、一見パターン形成が可能かと思われるが、残膜が半分以下になっており、これでは十分な解像とは言えないため、40 nm 近辺が妥当だと考えている。

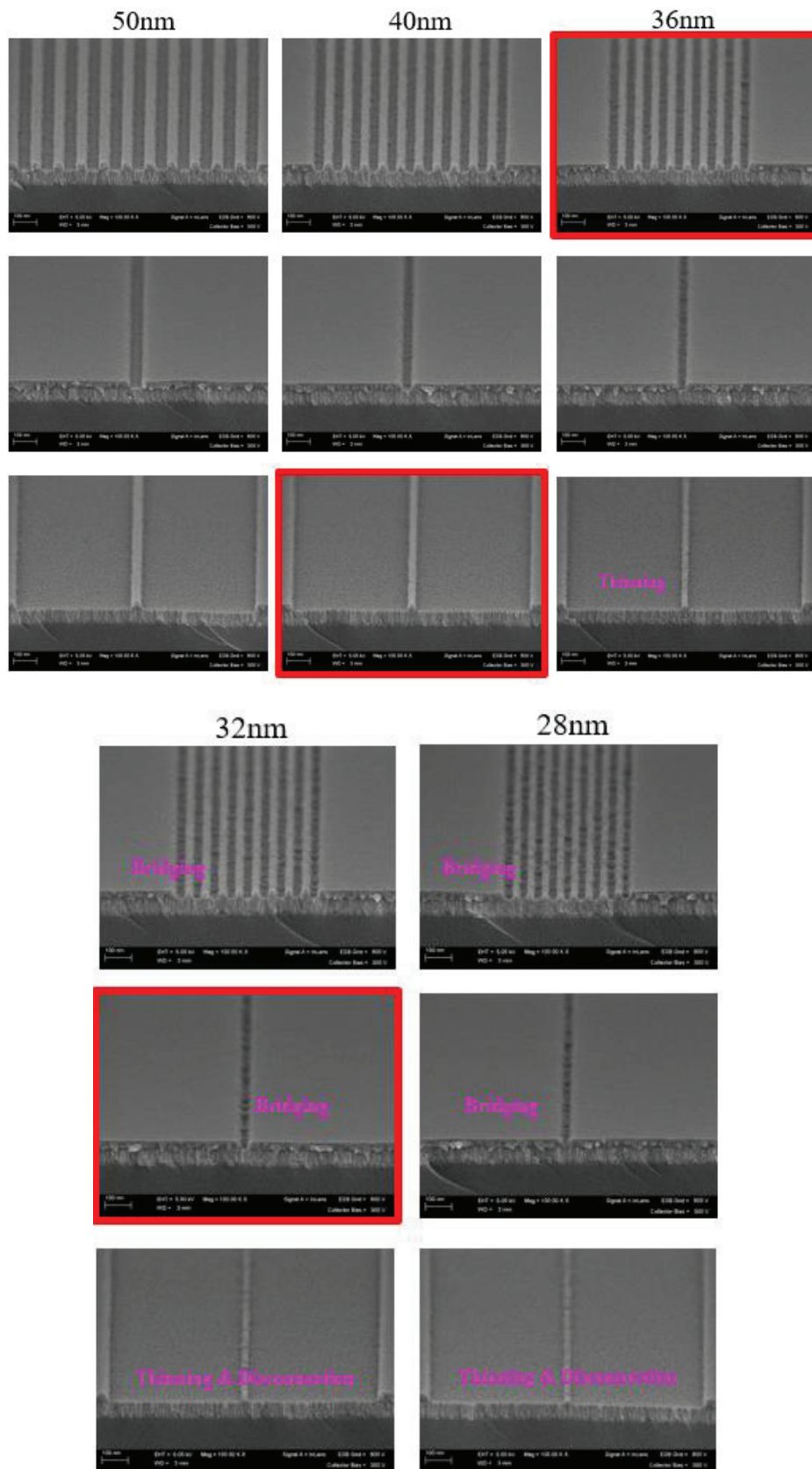


図 39 : PEB 無しにおける断面 SEM のイメージ図 (上から LS, IS, IL)

そして、図 40 が PEB90°Cの時の断面 SEM 像である。LS や IL に関しては CD-SEM と同様の解釈ができるが、IS に関しては、デザイン CD 28 nm レベルは解像できるとは言えない。多少の残は、その後の洗浄や Cr のドライエッチング工程で剥離できるかと思われるが、Cr 膜までエッチングできていない場合は形成困難である。従って、デザイン CD 32 nm の IS が妥当なところであると考えている。

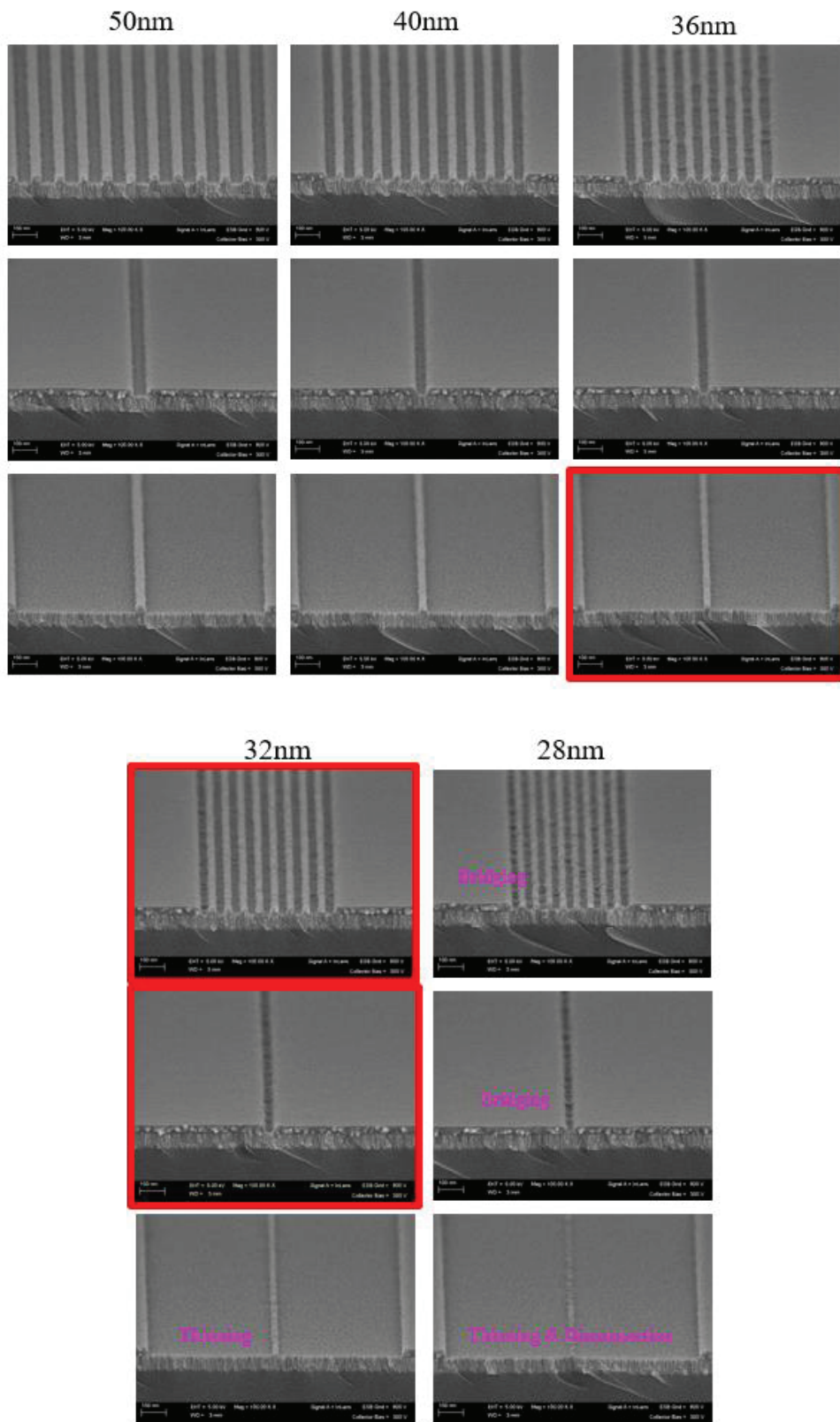


図 40 : PEB90°Cにおける断面 SEM のイメージ図 (上から LS, IS, IL)

そして、最も解像性が良いと予想している PEB120°Cが図 41 である。LS、IL に関しては CD-SEM と同等の解釈が得られ、IS に関しては、これまでの議論と同様、デザイン CD 26 nm では Cr 膜まで十分にエッチングされていないためデザイン CD 28 nm が解像限界値だと考えている。デザイン CD 32 nm LS、28 nm IS、32 nm IL が解像限界値として妥当であり、実測値としては、LS : 28 nm、IS : 22 nm、IL : 31 nm が解像性能値と言える。

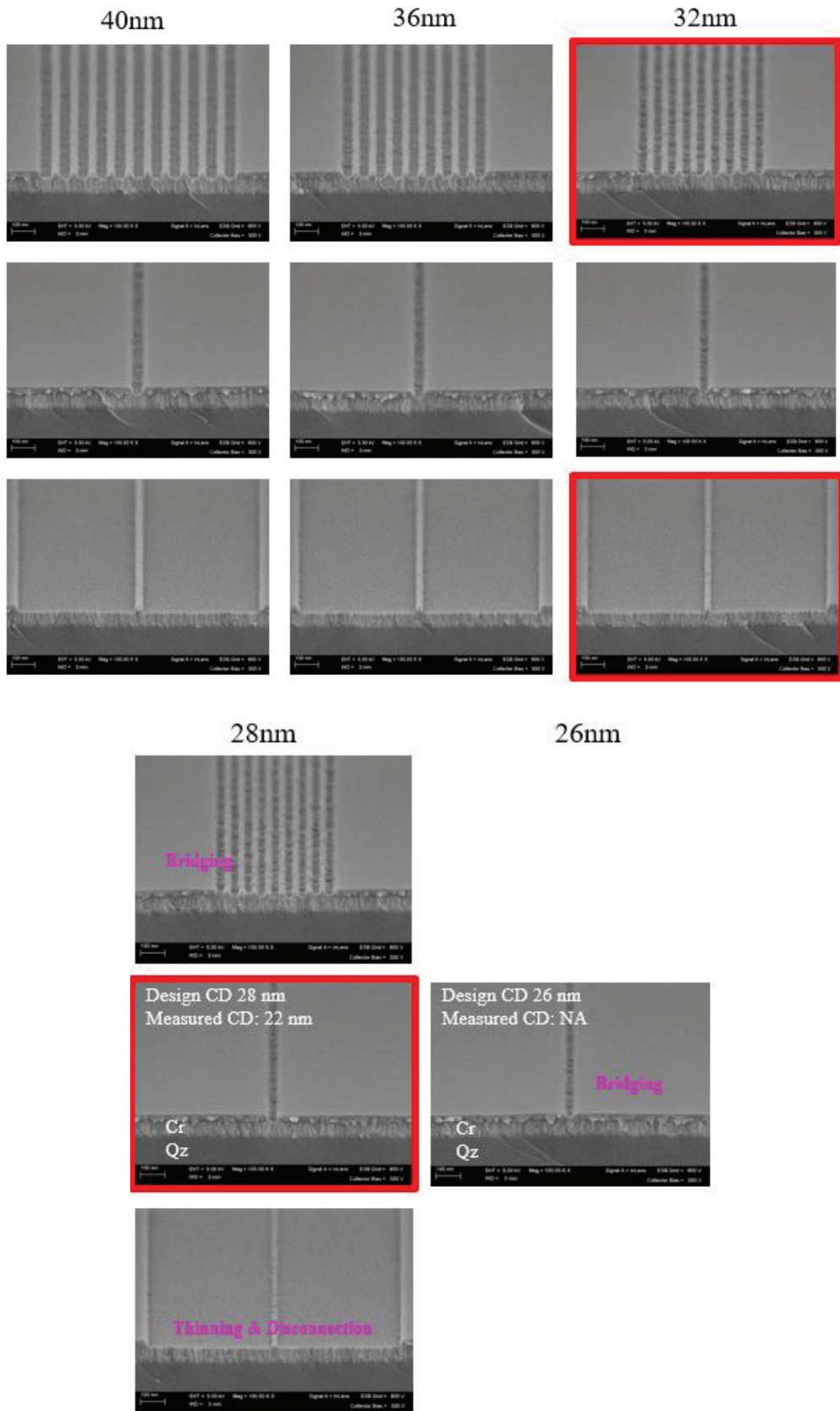


図 41 : PEB120°Cにおける断面 SEM のイメージ図 (上から LS, IS, IL)

そして最後に、PEB135°C、PEB150°Cでの断面 SEM 像を図 42、43 に示す。レジストの低感度化が容易に確認できる。低感度の様子のみ確認し、解像性能値は記載していない。

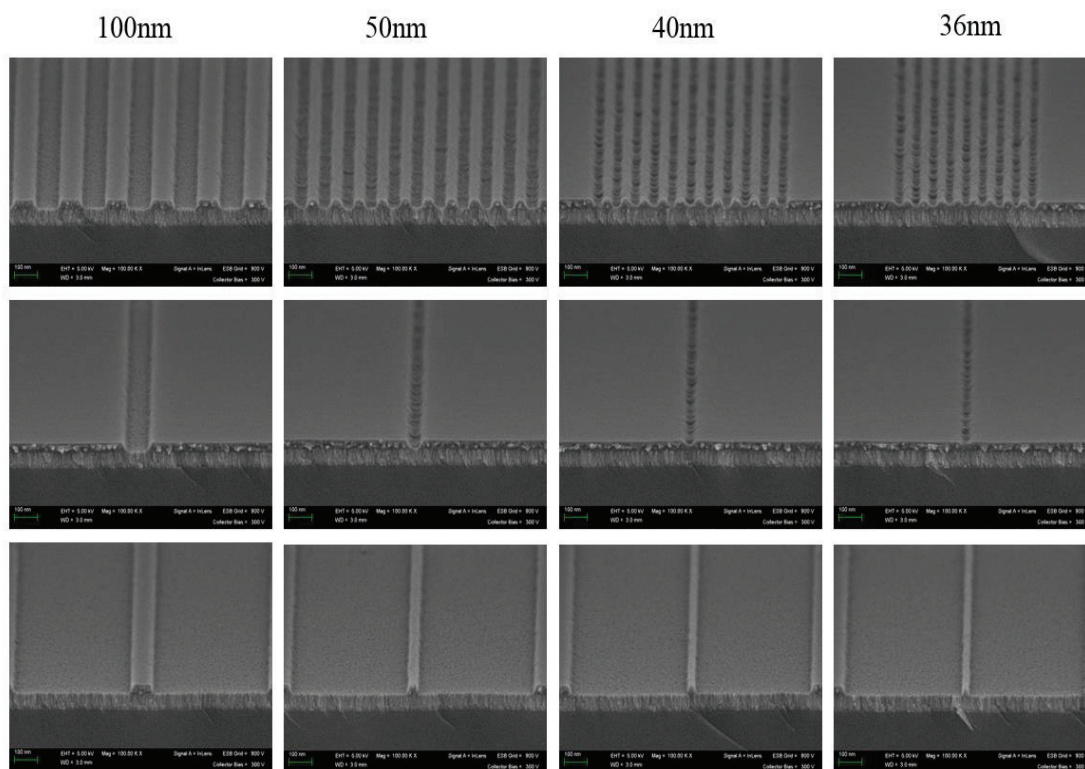


図 42 : PEB135°Cにおける断面 SEM のイメージ図 (上から LS, IS, IL)

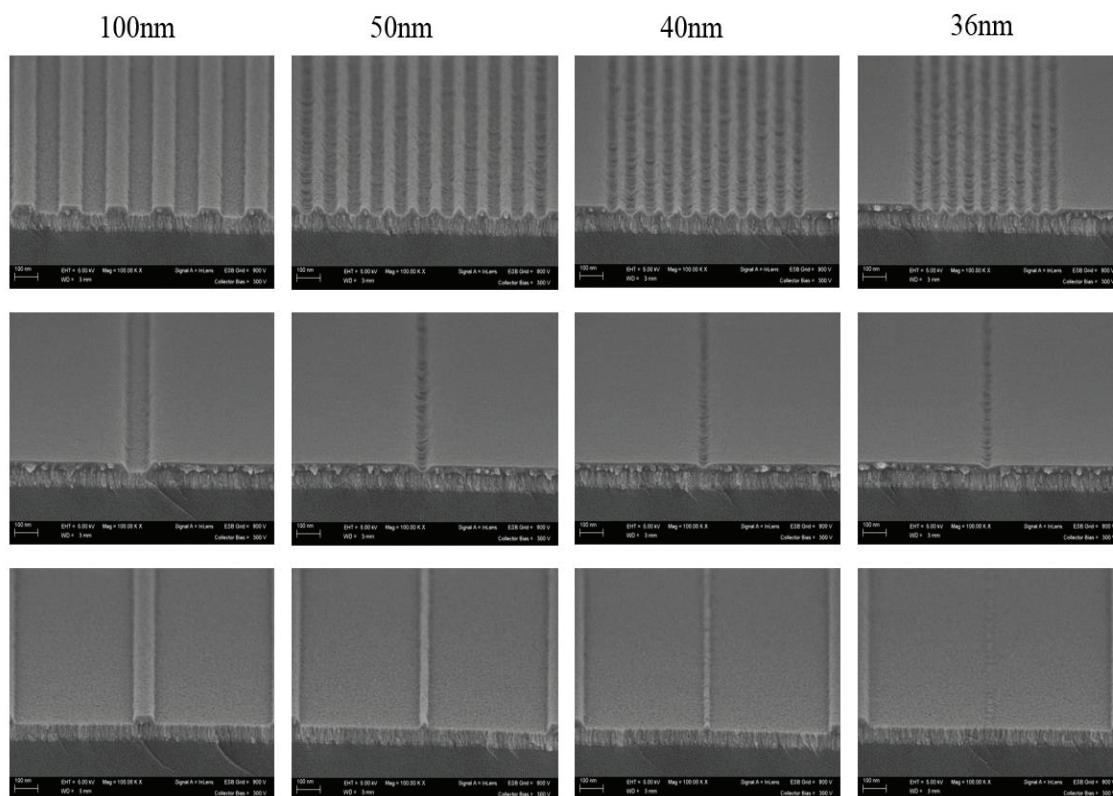


図 43 : PEB150°Cにおける断面 SEM のイメージ図 (上から LS, IS, IL)

Top down の SEM 像それから断面 SEM 像を用いて、PEB 温度変化によるレジストの解像性を十分に追及できた。最終的に PEB120°C の場合が最も解像性能が高く、LS : 28 nm、IS : 22 nm、IL : 31 nm が解像限界値 (図 44) である事も確認できた。従って、非化学増幅型レジストに露光後ベークを加える事、そしてその温度を最適化する事で 20 nm オーダーの解像性が得られる事を検証できた。

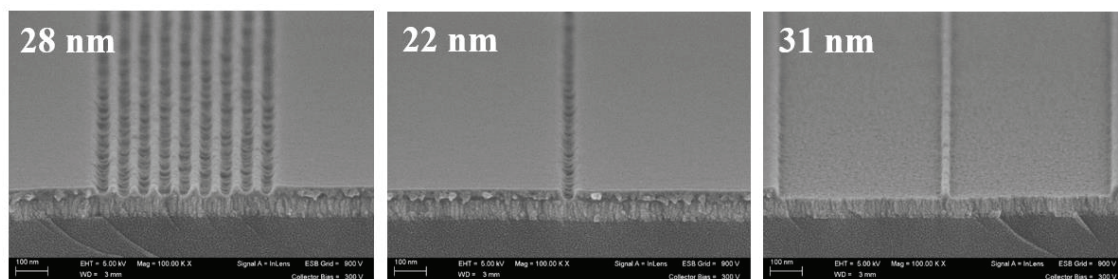


図 44 : ZEP520A - PEB120°Cでの解像性能限界、断面 SEM 像

3.3.4 露光後ベーク温度の最適化、レジストの感度に関して

スペース幅の縮小やライン幅の増大が何によって引き起こされるのか

を検証するため、図 45 にデザイン CD100 nm におけるレジストの感度カーブを添付する。横軸に実効ドーズを縦軸に規定寸法値からのずれ量を CD Error という表記で表している。ここで、実効ドーズの計算方法に関して少しふれる事にする。

描画装置にはレシピ作成の段階で、ある一定のドーズ量を指定するわけだが、この値はあくまでも装置上の設定値であって、実際のパターンに照射されるドーズ量というのは、パターンの形状によって異なる。今回、1:1 の LS、IS、IL のパターンを用いているので、そのパターン密度と描画装置の構成を考慮してメーカーから実効ドーズへの換算式が提示されている。残念ながら換算式自体は、メーカーの IP になっているため開示不可だが、実効ドーズで吟味する事によって、より詳細な感度特性が把握できる。

図 45 の見方に関して、説明を補足する。左から青、オレンジ、黒の固まりが確認できるが、これらがパターンの形状の違いになっている。青い集団が、IL。オレンジの集団が、1:1 の LS。黒の集団が、IS になっている。測長 SEM の倍率は Mag : 200K で、IL に関してだけは、測定対象がライン幅になるため、スペース値に変換している。その他、測定のポイント数として、IL、LS、IS それぞれ 1 サンプル 8 箇所（図 24 参照）ずつ。サンプル数が PEB 温度を変化させたものになっている。IL、LS、IS それぞれ左側から PEB 無し、PEB90℃、PEB120℃、PEB135℃、PEB150℃と PEB の温度を増加させるにつれ、感度が鈍く（ドーズ量が大きく）なっているのが確認できる。つまり、PEB 温度を増加させることによって、レジストの感度を鈍くさせている事が言える。

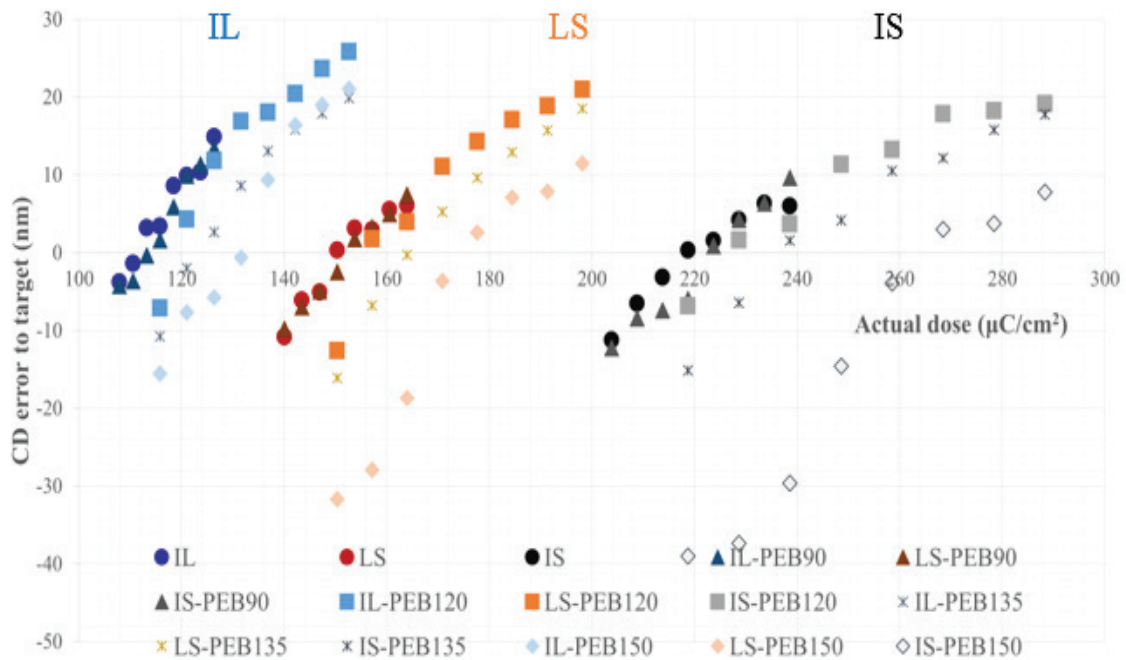


図 45：デザイン CD 100 nm におけるレジストの感度カーブ

規定寸法値からのずれ量がゼロ、つまりジャストドーズの箇所を表 3 にまとめた。LS の箇所をみると、PEB 無しと PEB150℃では 21 $\mu\text{C}/\text{cm}^2$ もレジストを低感度化させている事が確認できる。低感度化の様子として、図 46 に PEB 無しと PEB150℃での IS における断面図を添付した。PEB150℃に至っては、トレンチの側壁の形状がかなり緩やかなものになっているのが確認でき、電子ビーム露光の効果が和らいでいる、つまりレジストが低感度化してしまっている事が確認できる。

表 3：レジストの感度テーブル

	Non PEB	PEB 90 °C	PEB 120 °C	PEB 135 °C	PEB 150 °C
LS	150	154	157	167	171
IS	222	224	227	242	271
IL	111	113	116	124	130

unit: $\mu\text{C}/\text{cm}^2$

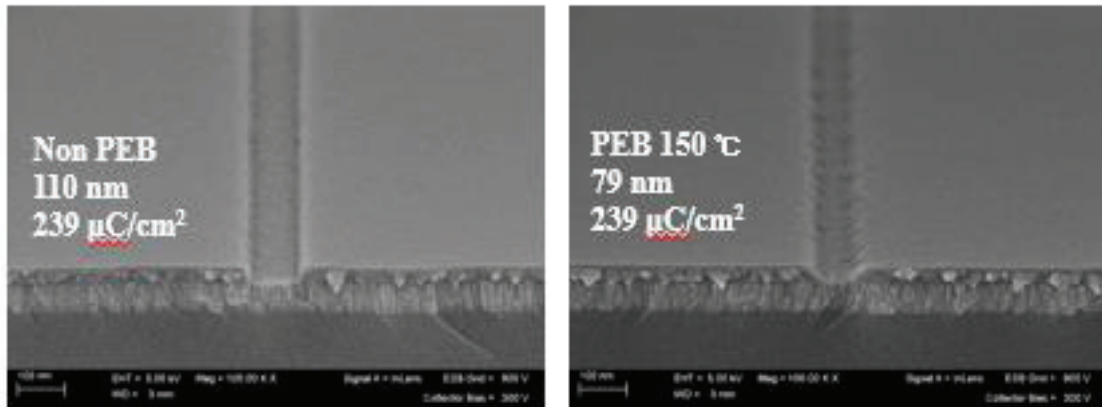


図 46 : PEB 無し、PEB150°Cでのレジストの低感度化の様子

3.3.5 ラインエッジラフネス (LER) に関して

それでは、なぜ非化学増幅型レジストに露光後ベークを加えると解像性能が増すのかについて考察していく事にする。その手がりの一つとして、ラインエッジラフネス (LER) を解析する事にした。図 47 に PEB 温度を変化させた時のデザイン CD 100 nm における断面図を添付している。数値がそれぞれの LER 値である。PEB 無しの場合では、LS、IS、IL それぞれ 8.7 nm、7.1 nm、8.9 nm であるのに対し、PEB90°C で 6.3 nm、6.0 nm、7.9 nm と LER 値が改善され、最も良くなるのが PEB120°C の時で 5.1 nm、4.4 nm、6.6 nm と解像性能値が最もよくなった場合の温度と同じである。それ以上、PEB 温度を上げてしまうと、解像性能同様、レジストの感度が低下し LER の値が大きくなっていく。つまり、最適な PEB 温度であればトレンチの側壁の形状が改善され LER 値も低くなり、コントラストが増す。その結果、解像性能も向上するというわけである。LER の改善と解像性能の関係に関しては、かなりの論文が発表されている。

もう少しコントラストに関して、定量的な議論を進めたい。図 48 に PEB 無し、PEB120°C、PEB150°C でのコントラストカーブを添付した。このコントラストカーブから γ 値と呼ばれるレジストの解像度の目安となる値を算出できる。 γ 値は以下の式で定義される。 D_0 、 D_{100} はコントラストカーブ上の規格化膜厚 (残膜厚/初期膜厚) が 0.5 の点で接線を引き、規格化膜厚が 0 及び 1 と交差した点のドーズ量である。

$$\gamma = |\log_{10}(D_0 / D_{100})|^{-1} \quad (D_0: \text{残膜厚}, D_{100}: \text{初期膜厚})$$

それぞれの γ 値が PEB 無しで 7.2、PEB120°C で 12.8、PEB150°C で 2.9 となり、やはり PEB120°C が最もコントラストがはっきりしている事が確

認できる。

デザイン CD 50 nm についても同様に断面 SEM、LER 値を確認・測定し、PEB120℃での最適温度値を再確認している（図 49）。

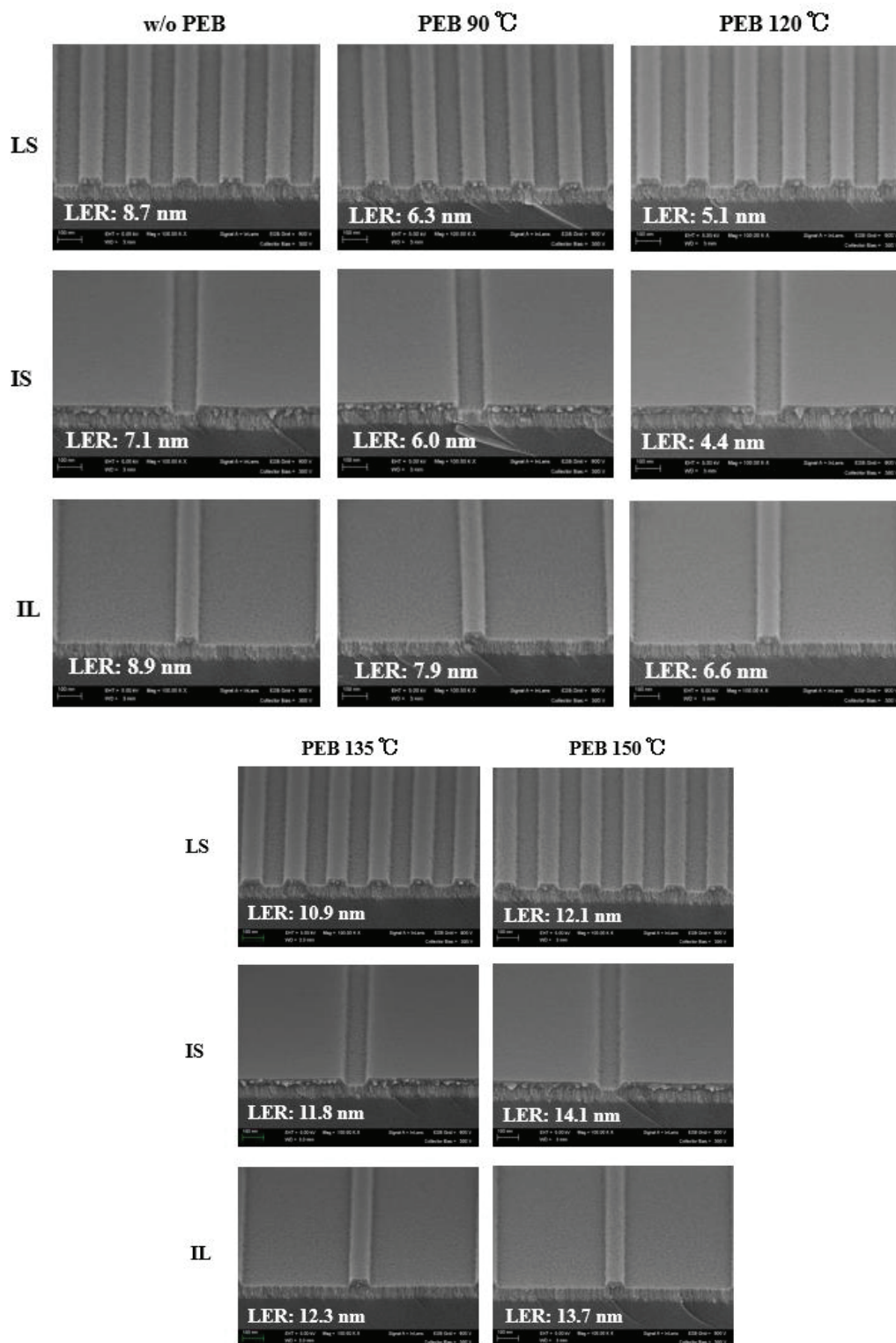


図 47 : PEB 温度を変化させた時の LER 値の推移（デザイン CD 100 nm）

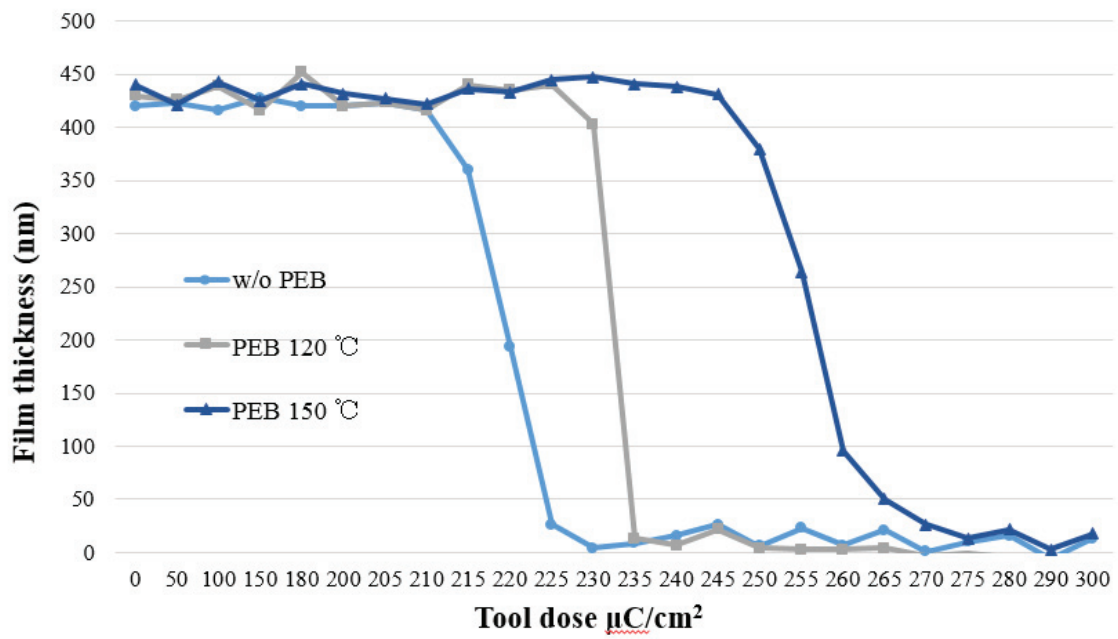


図 48 : デザイン CD 100 nm コントラストカーブ

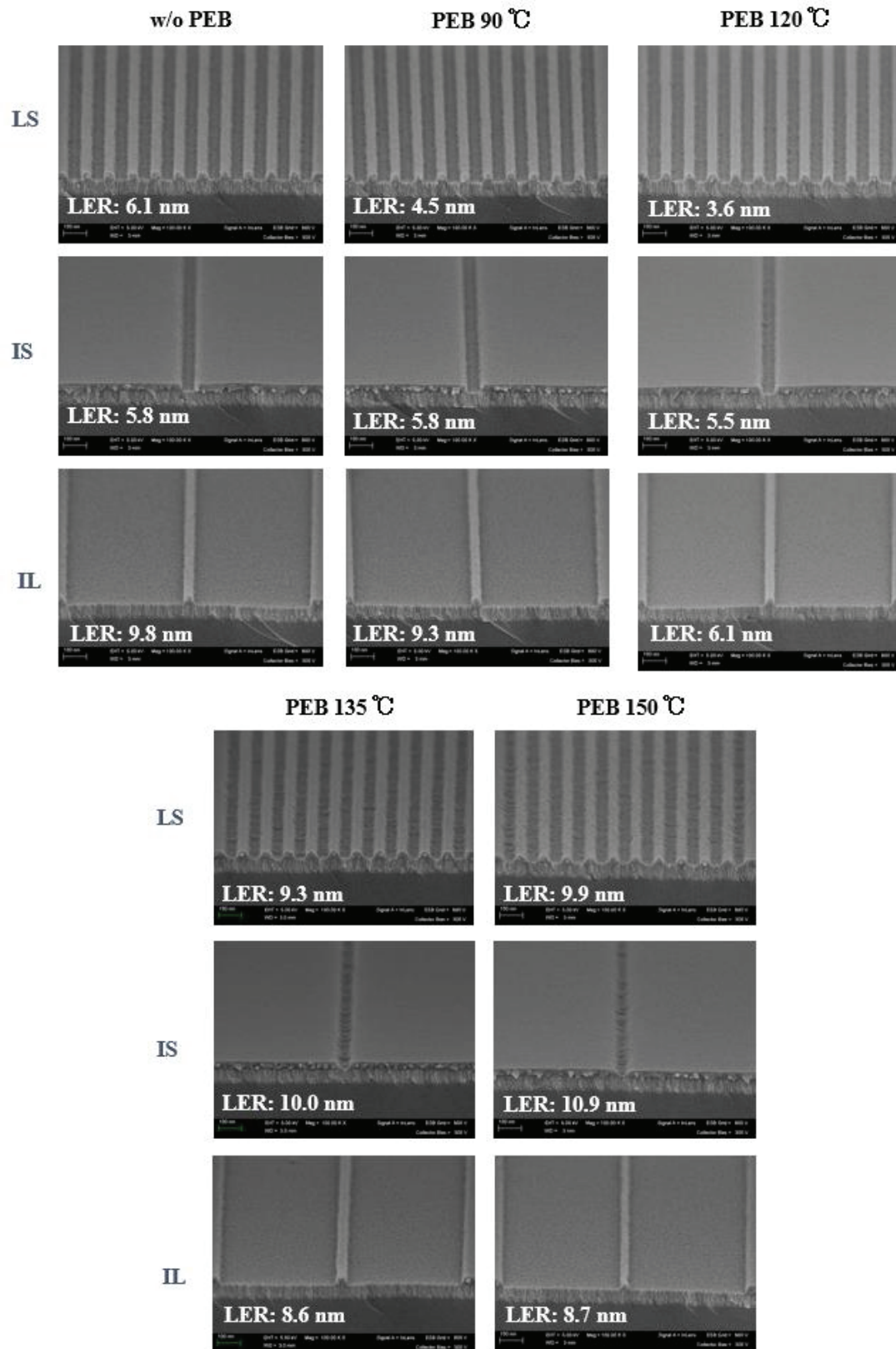
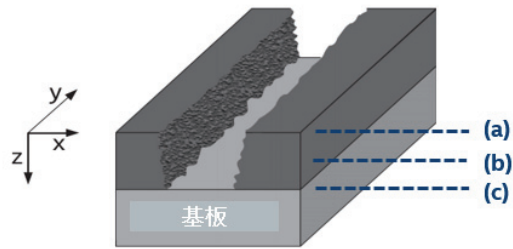


図 49 : PEB 温度を変化させた時の LER 値の推移 (デザイン CD 50 nm)

LERの結果からも同様に温度に関して、最適値が存在する事が明らかであると言える。電子ビーム照射された領域、つまり一次電子の周辺には、二次電子によりドーズ量が多くなってしまいう箇所が存在するが、その部分の閾値が鋭ければ（コントラストが高ければ）高解像を示す事になる。図 50 に電子ビーム露光時のエネルギー分布としてモンテカルロシミュレーションの結果を示す。加速電圧 50 KeV、ドーズ量 640 $\mu\text{C}/\text{cm}^2$ 、膜厚 300 nm 時における各膜中(a)(b)(c)の電子の広がりを示したものである。レジスト下部(c)での二次電子の広がりが 100 nm 以上確認できるが、これは 300 nm という圧膜での計算によるものである。一方、50 nm 程度の薄膜の場合における二次電子の広がりは、10 ~ 50 nm の Z 方向、10 ~ 20 nm X-Y 方向と報告されており、これらレジストは二次電子のような低いエネルギー（数 10 eV ~ 1 keV）でも十分に感光される。今回の実験から露光後ベークによって <10 nm 程度のスペースの縮小が存在するならば、この低いエネルギー（数 10 eV ~ 1 keV）で照射されたところは PEB によって回復する領域であると考えられる。

露光後ベークでは、二次電子で照射された箇所が露光後ベークによって照射されていない部分と同じようになっていけば PEB による回復領域の説明が可能かと思われる。露光後ベークのメカニズムの根拠の一つとして、レジストの硬化測定を行っている。図 51 が模式図で、露光されたエリアは分子鎖が切断され柔らかく、つまり現像されやすくなっていて、未露光部というのは現像に対して鈍感な硬い状態になっていると考えられる。実験自体のサンプルは、1.8 mm 角フィールド上に全面露光有り、無しで比較している。図 52 がマイクロハードネステスト、硬化測定の結果で、PEB 無しでの露光エリアが最も柔らかく、PEB 有りでの未露光部が最も硬い状態になっているのが確認できる。



電子ビーム露光・現像後の3Dモデル

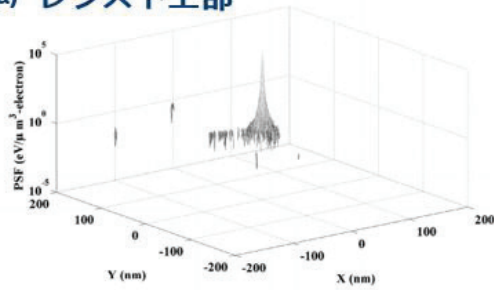
Monte Carlo simulation
 加速電圧：50 keV
 ドーズ量：640 $\mu\text{C}/\text{cm}^2$
 膜厚：300 nm

二次電子の薄膜レジストへの広がり
 X-Y方向: 10 ~ 20 nm, Z方向: 10 ~ 50 nm

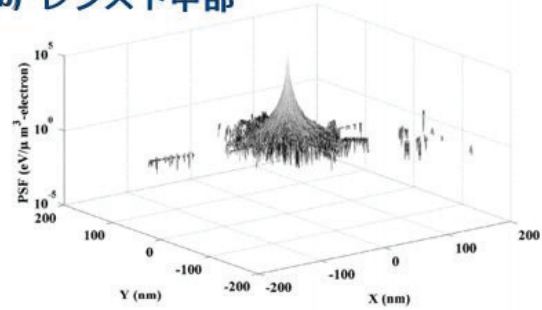
J. Chem. Phys. 69, 3931 (1978)

J. Vac. Sci. Technol. B, Vol.17, 2512 (1999)

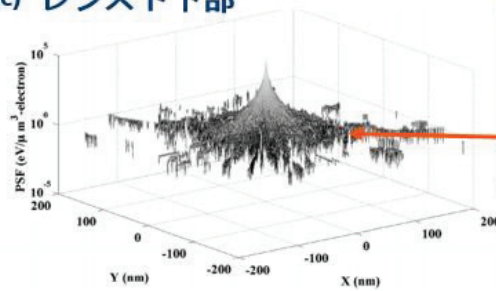
(a) レジスト上部



(b) レジスト中部



(c) レジスト下部



数10eV ~ 1KeV 程度
 の弱いエネルギー：
 厚膜のため二次電子
 の広がりが多い

J. Vac. Sci. Technol. B, Vol.32,
 No. 6 Nov/Dec 2014

図 50：電子ビーム露光時のエネルギー分布

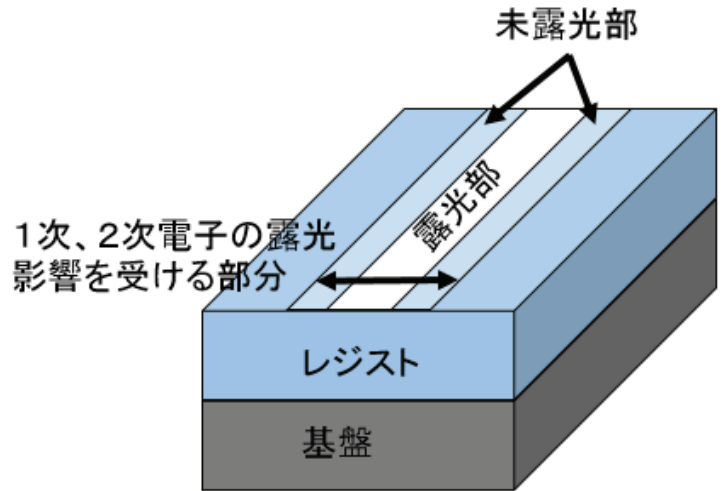


図 51 : 露光部と未露光部の模式図

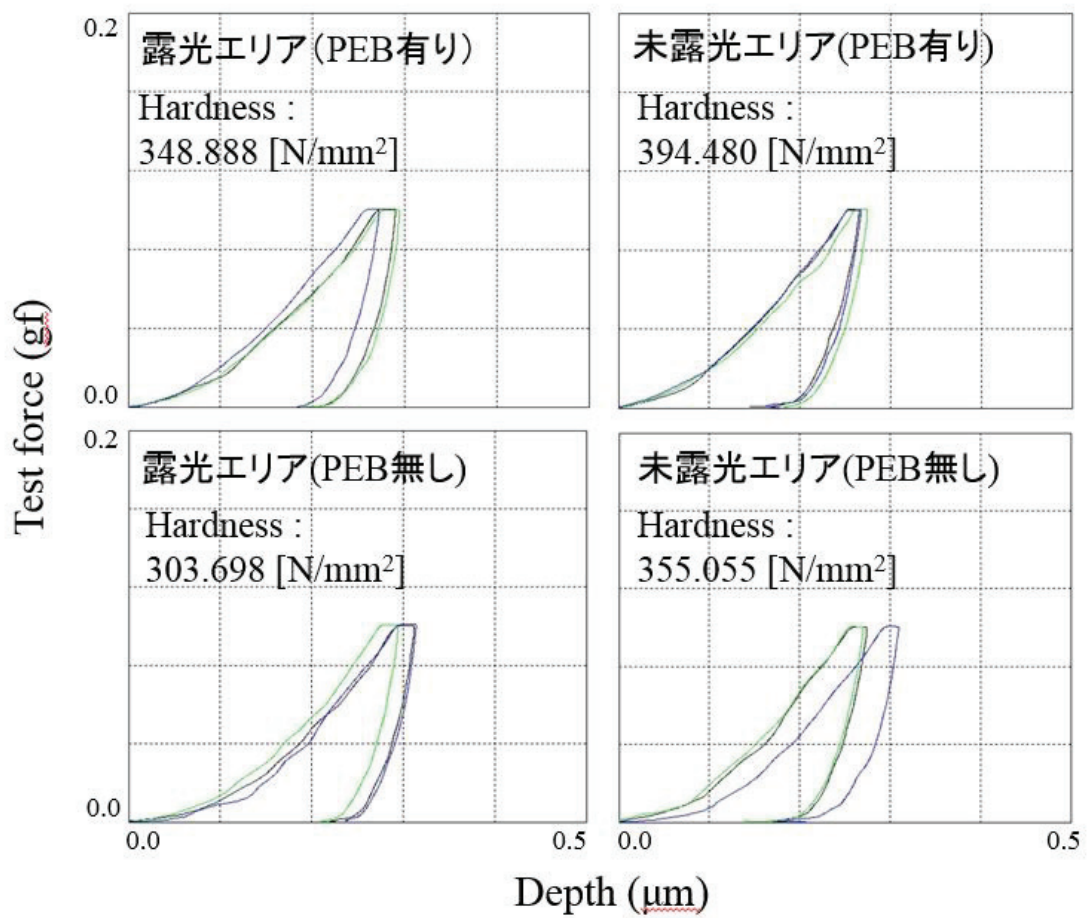


図 52 : 露光エリア・未露光エリアでのレジスト硬化測定結果

PEBによってEB照射された領域の一部分、つまり高エネルギーの一次電子で照射された領域だけが現像され、弱いエネルギーで照射された部分は、PEBを行う事で回復され、均質膜の硬い状態になり、現像に対して鈍感になったと考えている。これにより、1次電子ビーム照射領域の設計値に近い範囲で描画が可能だと考えている。

LERと解像性の関係は明確になったが、それではなぜ最適なPEB温度を加える事によってLERが改善するのか？レジストの物理特性を考慮しながら議論を進めたいと思う。

3.3.6 露光後ベーク(PEB)によるLERの改善と高解像度のメカニズム

LERの改善手法や高解像手法を検証する方法として、近年、レジストのポリマー表面の平滑性からLERを考察する研究がいくつか確認されている(図53)。ポリマーの化学構造をもとに考察を進めたいため、ZEPの他にも非常に構造が似通っているPMMAでも文献値をもとに比較する事にした。

図54にZEP520AとPMMAでの化学構造図を示す。ZEP520Aは、PMMAの様な分子鎖切断タイプのポジ型レジストであり、塩素とフェニル基を含む塩素系ポリスチレンの一種(α -クロロアクリレートと α -メチルスチレンの共重合体)で、高い分解能と感度を併せ持つレジストである。塩素系のポリスチレンは、EB露光により素早く主鎖切断や架橋を引き起こす。

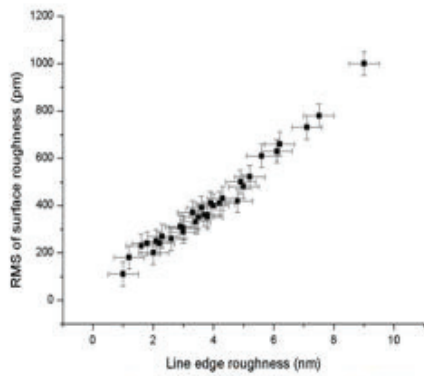
ZEP520Aはスピコート後、レジストに残っている有機溶媒を蒸発させるためにベークさせる必要がある。このベーク温度が低かったり、時間が足りなかったりするとレジストは粒状形状のままになる。この粒状形状の膜というのは、均質で平滑なものではない。最適な温度でベークさせ、ポリマー分子を拡散させると、粒状形状が抑えられ均質で平滑な膜になる。ZEP520Aのガラス転移温度は105℃であり、この温度以上で粒状形状を均質・平滑にさせる必要がある。

EB露光の際、ZEP520AやPMMAなどの分子鎖切断タイプのレジストでは、一次電子や二次電子、基盤からの後方散乱による電子などでポリマー主鎖である炭素-炭素結合部の切断が起こることが報告されている。この切断によって分子量の小さい状態になり粒状形状になる。その後、現像の際には粒状形状単位で現像されるため、現像ムラが発生し、最終的に解像性が悪くなる。この再現実験が図55であり、(a)(b)がZEP520Aレジスト塗布後の表面平滑性の結果で1.05 nm RMSとなっている。その後、塗布後のベークを行う事で表面の平滑性が一時的に0.45 nm RMSと良くなっているのが分かる(c)(d)。

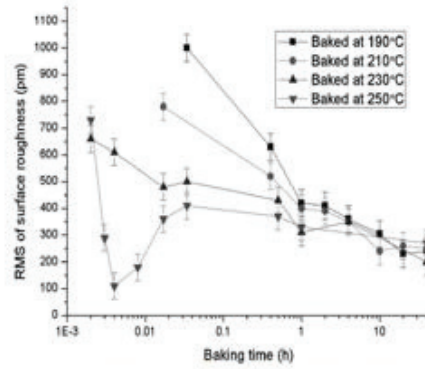
塗布後のベークで均質・平滑化した膜にEB露光し、PEBをかけると、EB照射によって分子鎖切断された粒状形状の膜が再び均質で平滑な膜に

なる部分ができる。これ（EB 照射によって形成された粒状形状の一部、つまり弱いエネルギーで露光された部分）は低温ベークで粒状形状のままの状態や分子量が小さい分子鎖切断された粒状形状とほぼ等しく、この状態のポリマーは、熱を加えたことで均質で平滑な膜になり、粒状形状でないため現像液に溶けなくなる領域が存在している。図 55 の(e)(f)が EB 露光後の表面平滑性データで、1.77 nm RMS と最も悪くなっている。(g)(h)が露光後ベークを行ったもので、1.26 nm RMS と平滑性が良くなっている。今回の最適 PEB 温度はガラス転移温度より上の 120°C で均質かつ平滑な膜になっている。これはレジスト塗布後のベークで 180°C 10 分行っていたため、高温側にガラス転移温度がシフトしたと考えている。また 200°C を超えるような高温ベークでは粒状形状は抑えられるが、膜べりが酷くなることが報告されている。しかしながら今回の 180°C によるレジスト塗布後のベークでは、膜べりは確認されなかったので均質膜が形成できていたと考えている。

さらに、分子鎖タイプのレジストでは、加速電圧 10 ~ 60 keV の露光（ドーズ：100uC/cm² ~ 540uC/cm²）で 1 ~ 50nm の深さ方向、10 ~ 20nm の横方向に対する二次電子のレジストへの広がりが報告されている。加速電圧 1keV 以下の低エネルギーで、分子鎖切断を検証している報告もあり、これらレジストは、二次電子のような低いエネルギーでも感光される事がいえる。これは数 10eV ~ 1keV での分子鎖切断領域になり、EB 露光後、PEB をかけた場合の再度均質膜になった部分と考えている。PEB によって EB 照射された領域が全て現像されないわけではなく、高エネルギーの一次電子で照射された領域が現像され、二次電子のような弱いエネルギーで照射された部分は、PEB で回復し、均質膜になり、現像されないと考えている。これにより、1 次電子ビーム照射領域の設計値に近い範囲で描画が可能だと考えている。



LERと表面粗さの関係



ベーク温度・時間と表面粗さの関係

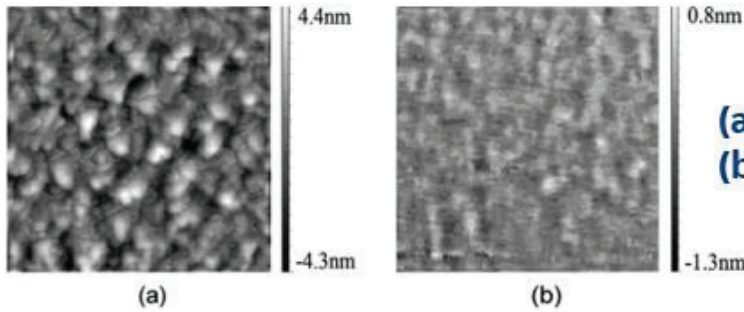


図 53 : LER と表面平滑性の関係

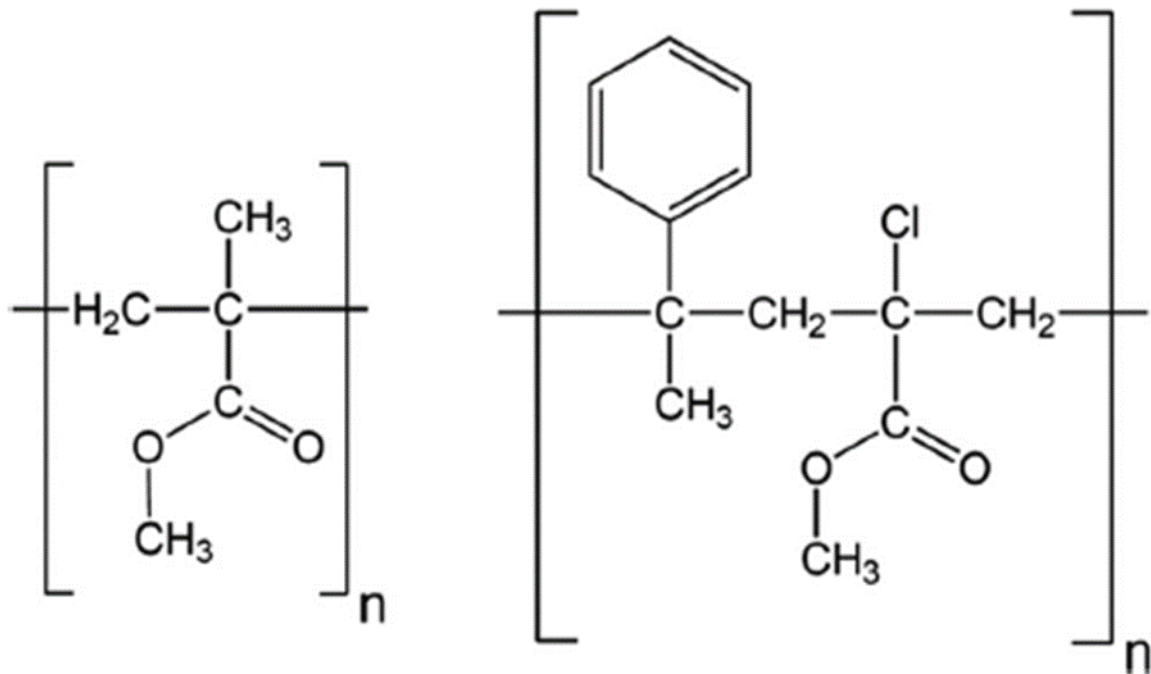


図 54 : ZEP520A (右) と PMMA (左) における化学構造図

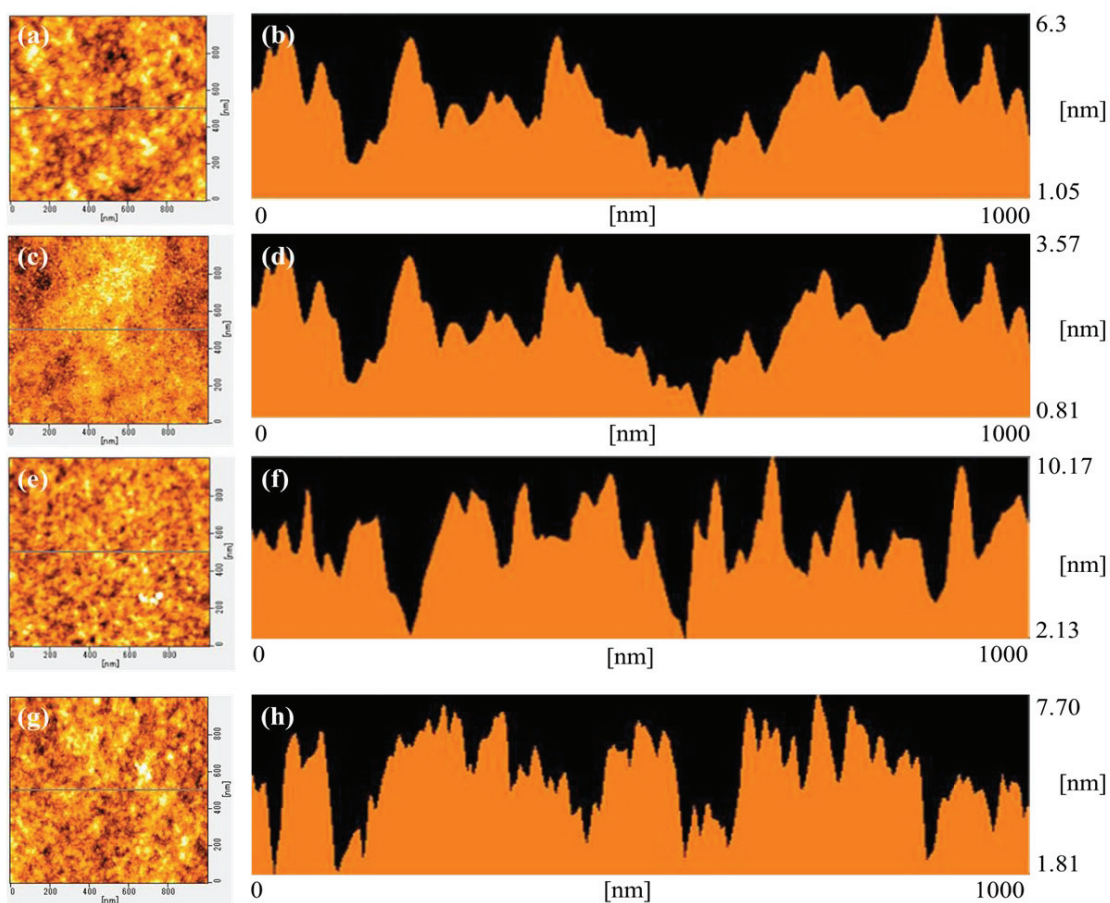


図 55 : 様々なプロセスにおける ZEP520A 表面平滑性データ

3.4 結言

ZEP520A に露光後ベーク 120°C 10 分を加える事で、LS : 28 nm、IS : 22 nm、IL : 31 nm の解像性能が確認でき、本手法のフォトマスク製造プロセスの優位性を検証できた。一方、露光後ベークのメカニズムに関しては、今回の実験結果や過去の文献から下記の事が言えると考えている。

レジスト自体は、そもそも粒子状 (granular) 形状を持っており、レジスト塗布後にベークを加える事で、レジスト中の有機溶媒を蒸発させ、粒子状形状が抑えられる。結果、表面の平滑性が一時的に良くなる。その後、電子ビーム露光を加える事で、レジストの主鎖切断である炭素-炭素結合の切断が起こり、

分子量が小さくなっていく。従って、粒子状形状が再び現れ、表面の平滑性が悪くなる。そこで、ここに露光後にベークを加える事で、粒子状構造を抑制し、平滑性を良くする事で LER の改善につながり、結果、高解像性を示す事に成功した。(図 56)

加えて、表面の平滑性とベーク温度・時間の関係、それから表面の平滑性と LER の関係などの報告から、①LER の改善には、最適な露光後ベーク温度と時間が確実に存在していて、それが解像性の向上に繋がるという事。②ベーク温度 (or 時間) が足りないとポリマー分子が十分に拡散せず粒子状の形状を保ったままになってしまう。つまり表面の平滑性が悪くなることを意味しており、結果 LER も解像性も悪くなる。③一方でベーク温度が高すぎるとポリマーの主鎖が崩れ、全ての solvent が蒸発し、膜べりも起きて、結果表面の平滑性、LER ともに悪くなる。以上、3つのことが考察できる。

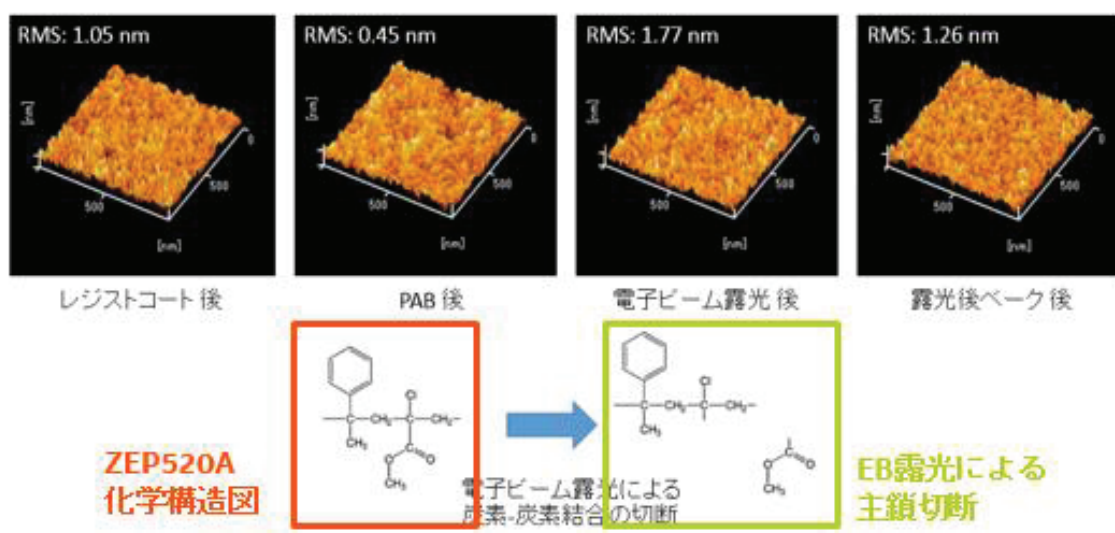


図 56: 露光後ベークのメカニズム

参考文献

1. J. F. Van Steenberg, N. Ootsuka, X. Buch, B. Icard, C. Sour, C. Constancias, B. Dalzotto, and L. Pain, Proc. SPIE 8323, 83232M (2012).
2. H. Ito, Proc. SPIE 3678 (1999).
3. R. A. Lawson and C. L. Henderson, Microelectron. Eng. 86, 741 (2009).
4. ZEON Corp., ZEP520A Technical Report, Version 2, <https://www.zeonchemicals.com/pdfs/ZEP520A.pdf> (accessed June 2015) (2010).
5. N. Unno, J. Taniguchi, M. Shizuno, and K. Ishikawa, J. Vac. Sci. Technol. B 26, 2390 (2008).
6. S. Warisawa, K. Kuroda, S. Chen, R. Kometani, and S. Ishihara, J. Photopolym. Sci. Technol. 25, 37 (2012).
7. H. Afifi and E. Hasan, Polym.-Plast. Technol. 42, 543 (2003).
8. T. Komagata, Y. Nakagawa, N. Gotoh, and K. Tanaka, Proc. SPIE 4343, 736 (2001).
9. T. Komagata, Y. Nakagawa, N. Gotoh, and K. Tanaka, Proc. SPIE 4409, 248 (2001).
10. L. Raffaele, C. Pogliani, G. L. Cassol, G. Bianucci, S. Murai, S. Murata, R. Hikichi, H. Katsuki, and S. Noguchi, Proc. SPIE 5992, 59924W (2005).
11. H. Miyoshi and J. Taniguchi, Microelectron. Eng. 143, 48 (2015).
12. G. W. B. Schlueter, T. Nakamura, J. Matsumoto, M. Seyama, and J. M. Whittey, Proc. SPIE 5567, 876 (2004).
13. K. Koshelev, M. A. Mohammad, T. Fito, K. L. Westra, S. K. Dew, and M. Stepanova, J. Vac. Sci. Technol. B 29, 06F306 (2011).
14. T. Nishida, M. Notomi, R. Iga, and T. Tamamura. Jpn. J. Appl. Phys. 31, 4508 (1992).
15. N. Arjmandi, L. Lagage, and G. Borghs, J. Vac. Sci. Technol. B 27, 1915 (2009).
16. Y. M. Georgiev, W. Henschel, A. Fuchs, and H. Kurz, Vacuum 77, 117 (2005).
17. A. Gangnaik, Y. M. Georgiev, and J. D. Holmes, J. Vac. Sci. Technol. B 33, 041601 (2015).
18. V. M. Bermudez, J. Vac. Sci. Technol. B 17, 2512 (1999).
19. J. J. Ritsko, L. J. Brillson, R. W. Bigelow, and T. J. Fabshi, J. Chem. Phys. 69, 3931 (1978).
20. M. Aktary, M. Stepanova, and S. K. Dew, J. Vac. Sci. Technol. B 24, 768

(2006).

21. H. Namatsu, M. Nagase, T. Yamaguchi, K. Yamazaki, and K. Kurihara, *J. Vac. Sci. Technol. B* 16, 3315 (1998).
22. M. A. Mohammad, K. Koshelev, T. Fito, D. A. Z. Zheng, M. Stepanova, and S. Dew, *Jpn. J. Appl. Phys.* 51, 06FC05 (2012).
23. H. Wang, G. M. Laws, S. Milicic, P. Boland, A. Handugan, M. Pratt, T. Eschrich, and S. Myhajlenko, *J. Vac. Sci. Technol. B* 25, 102 (2007).

第4章 電子線リソグラフィの新たな応用分野

4.1 緒言

本章では、本研究の応用範囲として次世代リソグラフィ技術（NGL：Next Generation Lithography）を2点、紹介したいと思う。まず初めに EUV（Extreme Ultra-Violet Lithography）リソグラフィ用マスクについて紹介する。EUV マスクであっても本研究対象である Non-CAR プラス PEB 手法がプロセス構築に貢献できる可能性があるからである。ロードマップにおける EUV リソグラフィの位置づけや、システム構成などを紹介し、EUV マスクに求められるレジスト材料に関しても触れてみたいと思う。

2 番目にマルチビーム方式による描画手法を紹介したい。本研究では非化学増幅型レジストを使用するためどうしても感度においてデメリットな点があり、描画時間が長くなってしまう。この問題を払拭する意味でもマルチビーム方式による描画機はスループットの向上という観点で昨今、非常に注目を集めている。

4.2 EUV リソグラフィ

(1) EUV リソグラフィ概要

ITRS 2016 年度版によると、EUV リソグラフィは 2018 年には量産が開始されると予測されている 7 nm デバイス世代向けのリソグラフィ候補の一つである。

13.5 nm の EUV 光は軟 X 線領域の光であり、物質に対する透過性が極めて小さいため、透過光学系を用いて縮小投影を行うことが難しい。EUV リソグラフィでは複雑な反射光学系を用いることで縮小投影露光を実現しているのである（図 57）。光源からの EUV 光は、照明光学系で集光されマスクを照射されている。反射光のマスクパターン像は、縮小光学系にて 1/4 に縮小転写される。EUV 光の反射縮小光学系では光リソグラフィと比べて小さな NA しか実現できないが、露光波長の 1.5 倍から 2 倍程度の解像度は得られると言われており、波長の短い EUV リソグラフィの実用的な解像限界は 30nm 以下に達すると予想されている。

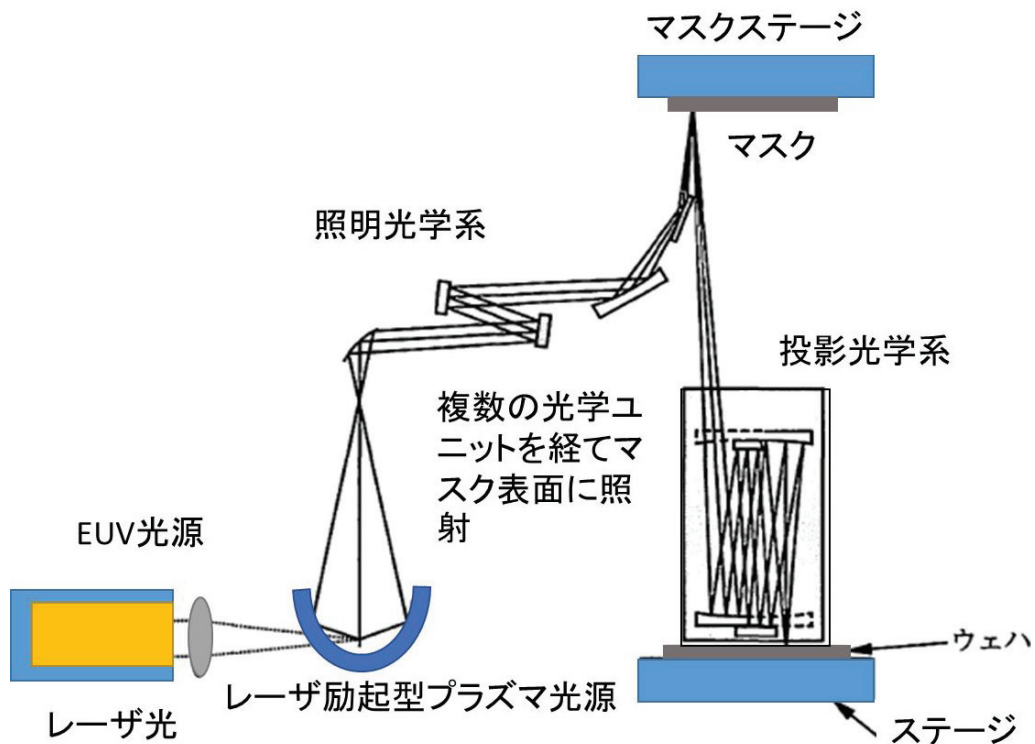


図 57 : EUV リソグラフィの露光システム・装置構成

(2) EUV リソグラフィ用のマスク構造と材料に関して

EUV マスク構造は、SEMI の標準規格に明記されており、それを図 58 に示す。入射角 6 度でマスクに照射される波長 13.5nm の EUV 光は吸収体積層膜 (absorber stack) 部分で吸収されるが、吸収体の開口部分で、は下地 Mo/Si 多層積層膜 (multilayer stack) で反射され、その反射光が倍率 1/4 の投影光学系に取り込まれる。

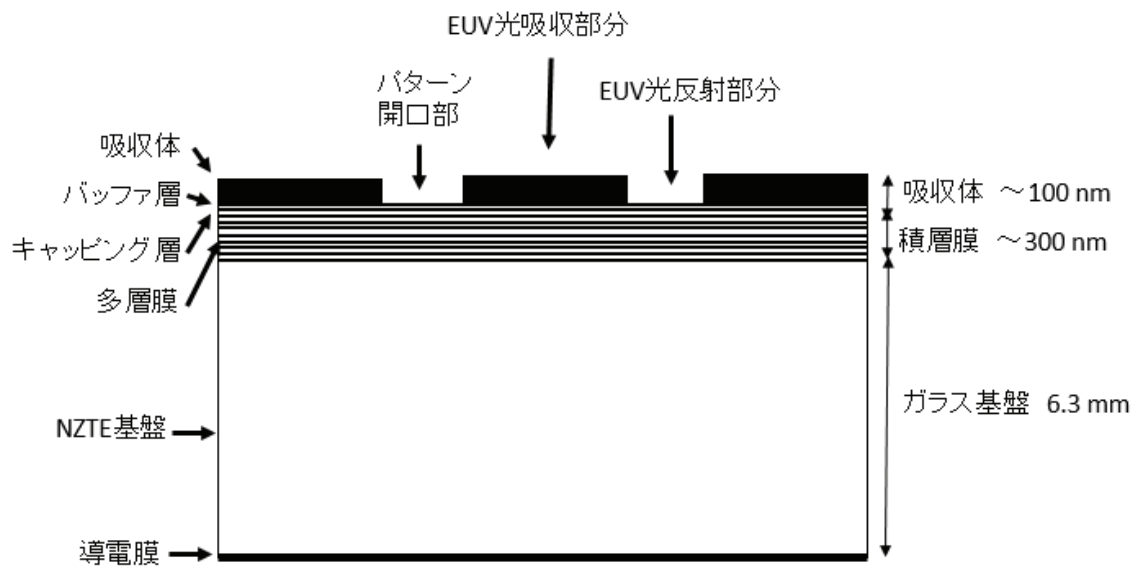


図 58 : EUV マスク構造図

マスクパターンとなる吸収体 (absorber) には EUV 露光コントラストが大きく取れることだけでなく、EUV 光検査コントラストが大きく取れること、成膜時の応力制御性が高いこと、エッチング加工性が良好なことなどが必要で、現在 TaN、TaBN、TaGeN などが材料候補となっている。膜厚は 100nm 弱程度である。バッファ層 (buffer layer) は、吸収体のエッチストップパーの役割とパターン修正時の多層膜保護のために必要である。吸収体とのエッチング選択比と可視光パターン検査コントラストが大きく取れることが必要で、CrN や SiO₂ などが候補となっている。パターン形成後、開口部分のバッファ層は除去されるので、吸収体とバッファ層で構成されている吸収体積層膜が実効的な EUV 露光コントラストを決めることになる。キャッピング層 (capping layer) は多層膜 (multilayer : ML) の最上層に設けている保護膜で、パターン形成後の開口部分ではマスクの最表面層となる。ルテニウム (ruthenium : Ru) やシリコンが提案されている。多層膜は約 3nm 厚のモリブデン金属と約 4nm 厚のシリコン単体の薄膜を交互に 40~50 層程度積み重ねた構造で、300nm 程度の膜厚である。Mo/Si 多層膜の反射率はキャッピング層を含めた多層積層膜の反射率で定義されている。

(3) EUV マスクのプロセスフロー

Mo/Si 多層膜が無欠陥であるならば、マスクの吸収体を所望のパターンとして加工する方法は、パターンの品質保証を含めて従来のフォトマスクと同じプロセスで行える。外観的には従来のフォトマスクとほぼ同じである (図 59)。

日本における EUV マスク技術開発はつくば半導体コンソーシアム (Tsukub Semiconductor Consortium : TSC)において半導体先端テクノロジーズ (Semiconductor Leading Edge Technologies : Selete)が中心となって、技術研究組合超先端電子技術開発機構 (ASET) および (独) 産業技術総合研究所 (AIST) ならびに半導体メーカー、マスクメーカー、材料メーカーが参加して取り組まれている。米国では SEMATECH が主導する形で Sematech-North・Albany に設置された EUV の MBDC (Mask Blanks Development Center) に半導体メーカーやマスクメーカー、材料メーカー、装置メーカーが参加して取り組まれている。次世代リソグラフィの最有力候補と位置づけて積極的な検討を行っている半導体メーカーもある。欧州では MEDIA+プログラムとして EUV リソグラフィを EU の戦略技術と位置づけて取り組んでおり、マスク技術開発にも多くの半導体メーカー、材料メーカー、装置メーカーが参加している。

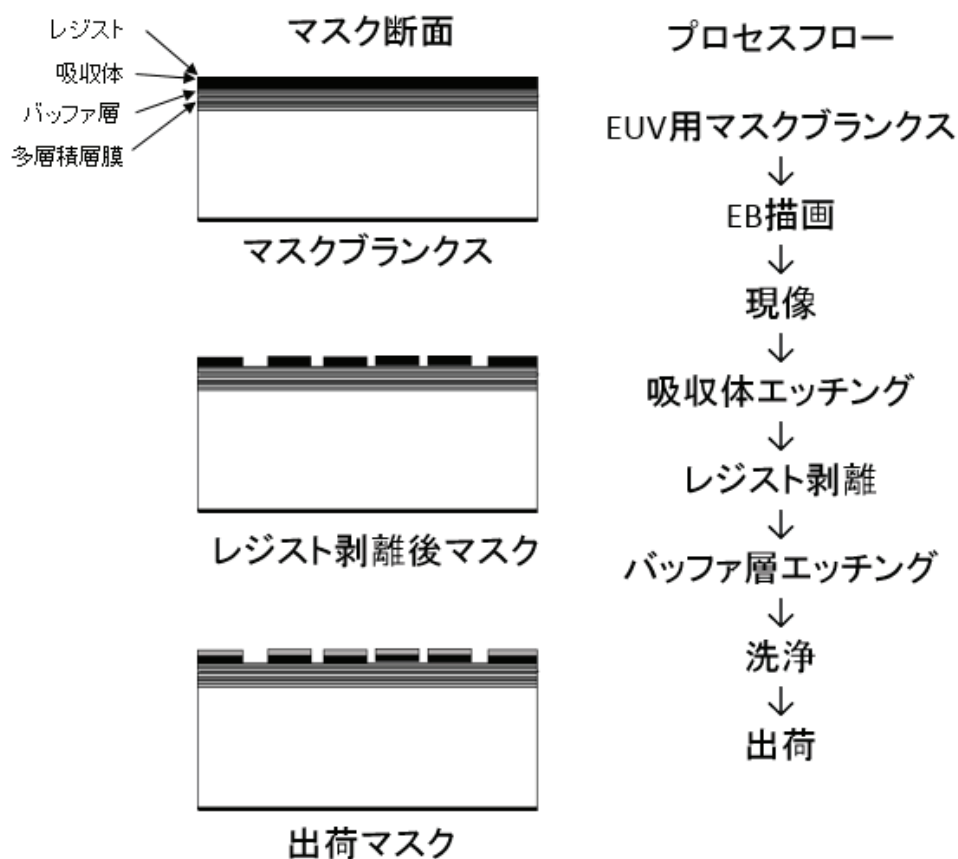


図 59 : EUV マスクプロセスフロー

(4) EUV レジストの動向

現在主流である光学マスク用の CAR レジストを転用するケースが考え

られる。EUV用とは言っても既存のレジスト材料からはそれほど主だった変化はない。変更点としては、やはりスループット・解像性を意識したレジスト感度に関する点であり、事項に述べるマルチビーム方式の描画手法と密接に関わってくる。現在、マスク EUV用のレジストを開発しているメーカーは数社存在するが、いずれもこのマルチビーム方式の描画機の動向に注目せざる終えないのが現状である。

4.3 MBMW

Multi-beam Mask Writing Lithography (MBMW)で昨今非常に注目を集めているのがオーストリアの研究機関である IMS Nanofabrication 社の eMET (electron Mask Exposure Tool) 装置である。本装置は、大日本印刷(株)、米インテル社と台湾フォトリソクス社とで共同出資し、技術開発を行っているものである。マスクメーカーが2社入っているのがユニークな点で、現状主流であるニューフレアテクノロジーズ社の描画機に対抗する形で、技術的にもコスト的にもマスク業界として、本技術の動向には非常に注目している。

まずは、そのニーズに関して触れる事にする。図 60 は描画機のショットカウントにおける半導体デバイス・デザインノードの依存性を示したものである。描画機のショットカウントが、デザインノードがシュリンクしていくにつれ急激に上がっているのが分かる。複雑なパターン形状を描画する高速で、かつ正確な描画機が NGL には求められている。

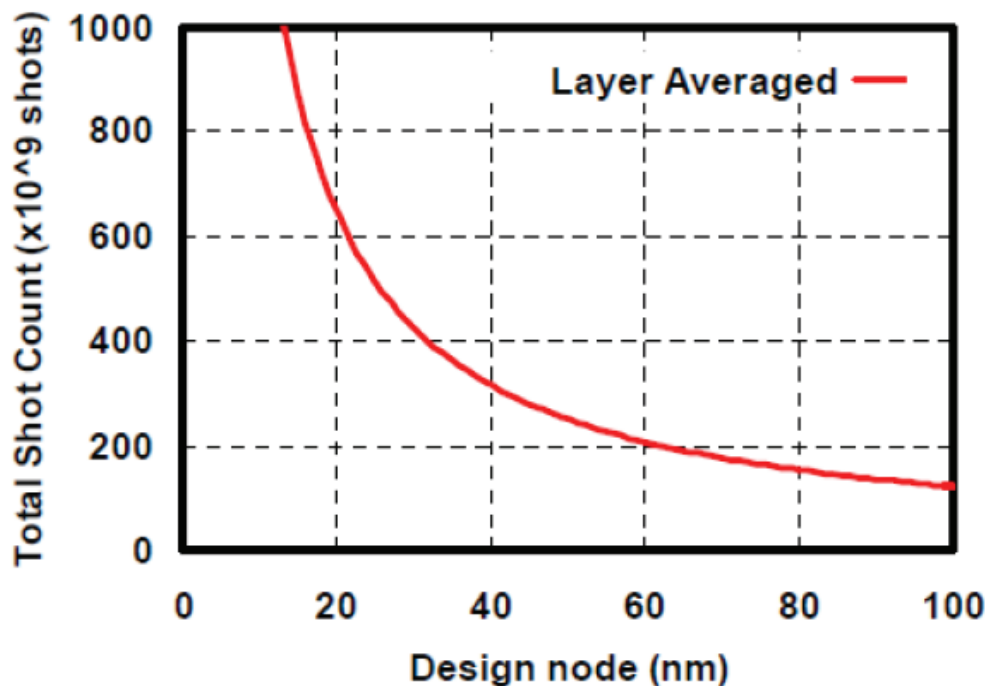


図 60：描画機ショットカウントの半導体デバイス・デザインノード依存性

ニューフレアテクノロジー社が公開している各装置毎の描画時間の比較データが存在している。(図 61)

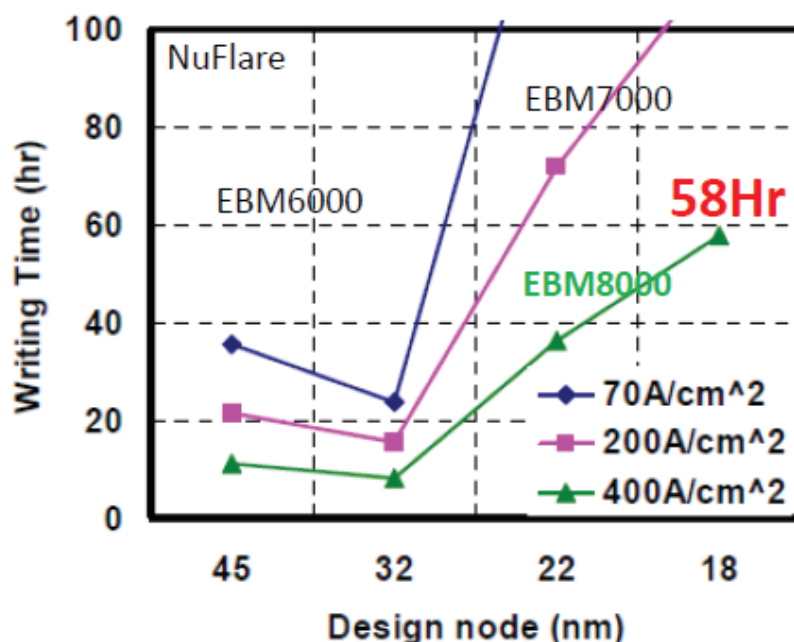


図 61：ニューフレア社描画機の描画時間比較

あるマスクパターン（18 nm ノード世代）におけるニューフレア社の描画時間を比較したグラフで、現在主流生産装置である EBM8000 シリーズでも 58 時間もの描画時間が実測されている。シングルビームでの描画手法では sub 20 nm のノードには対応困難である事が確認できる。

(1) eMET 装置構成

装置構成図を図 62 に示す。現状のビーム本数は 256×1024 本であり、最終的な量産装置であってもこのビーム本数での予定である。電子ビーム源より引き出された 5keV の電子ビームをコンデンサーレンズによって均一に伸ばし、APS (Aperture Plate System) を通して 50keV マルチ電子ビームとなる。この時、それぞれのビームラインはブランキング機構により ON・OFF 制御され、最終的に 1/200 倍縮小光学系にて収束された後、対象試料に照射される。照射時のビームアレイ領域は試料上にて 82 μm 角四方程度である。それぞれのビーム直径は 10~20 nm であり、ON・OFF 信号のデータレートは最大 12.8Gbps になり最終的にはその 10 倍 120 Gbps までを目指す。デザインパターンとの各ビーム位置の xy ずれは目標値の 3.0nm 以下(3σ)を達成している。照射電流密度は 2012 年の時点で 1 A/cm² である。この時の描画時間は 10cm²/h (100 μ

C/cm² 照射時) 以下である。最終的には 4 A/cm²、10 nm ビーム直径にて 10 h/mask 以下を目指している。2016 年までのパフォーマンスロードマップが IMS から公開されている (表 4)

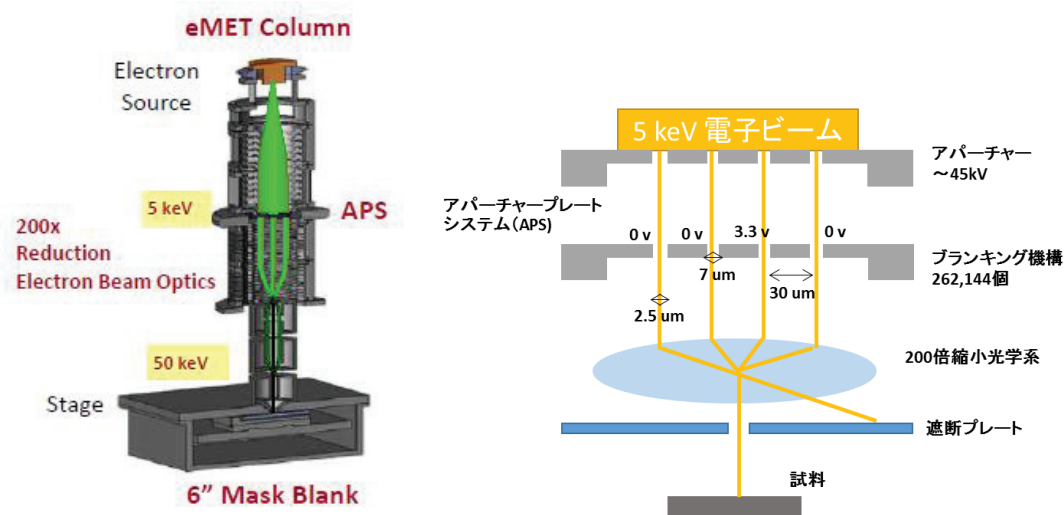


図 62 : eMET 装置構成図 (左) eMET APS 部分の概略図 (右)

表 4 : eMET スケジュール

	POC 2012	Alpha 2014	Beta 2015	1 st HVM 2016
Tech node	11nm HP (8nm logic)	11nm HP (8nm logic)	11nm HP (8nm logic)	11nm HP (8nm logic)
Data path & APS speed	12.8 Gbits/s	12.8 Gbits/s	120 Gbits/s	120 Gbits/s
Beam Array Field	82 um x 82um	82 um x 82um	82 um x 82um	82 um x 82um
Max current density	1 A/cm ²	1 A/cm ²	1 – 4 A/cm ²	1 – 4 A/cm ²
# beam (K=1024)	256k	256k	256k	256k
Beam size	20 nm	20 nm	20 – 10 nm	20 – 10 nm
Max current	1 uA	1 uA	1 uA	1 uA
TPT (> 100uC/cm ²)	10 cm ² /h	15h / mask	10h / mask	10h / mask

(2) eMET 装置の課題

本装置の解像性能やスループットの向上は、最近の実験結果より検証されてきている。しかしながら本装置を運用するにあたっての問題点は別のところがあり、それはマスクデータの転送速度であると言われている。本研究のテーマからは大きく逸脱するので、障りだけ述べる事にする。

現状 14 nm 世代での **Critical layer** と呼ばれるマスクパターンのデータを描画機に転送する時間と、10 nm 世代でのデータ転送時間を比較すると、約 3 倍以上も時間が掛かってしまう事が報告されている (図 63)。ダブルパターンや更なる **Critical layer** によるマスク枚数の増大も考慮すると非常に深刻な問題となっている。



図 63 : マスクデータの転送時間の比較

その原因は、本装置の描画手法にあり、Edge の Fidelity を考慮するために非常に複雑なデータ処理を行っている事である。(図 64) 現在、マスク寸法、マスクパターンサイズや描画機にデータを転送する際のもとなるデータの定義を見直す工夫がされている。

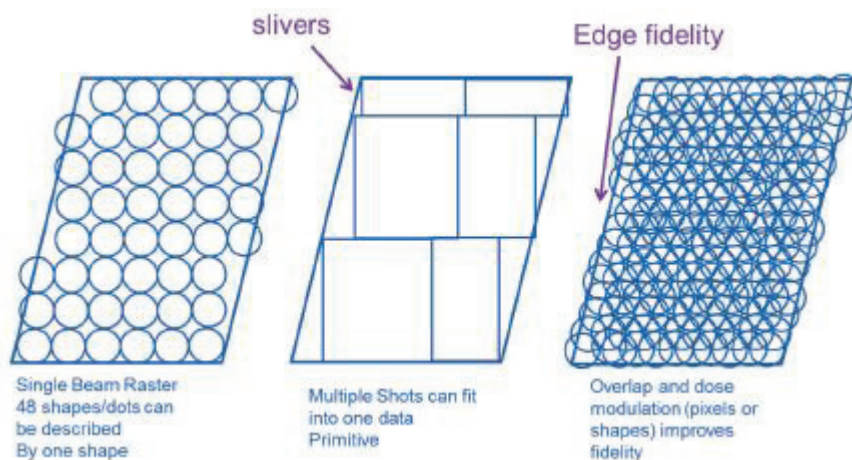


図 64 : 描画手法の比較

4.4 結言

本研究の懸念点の一つである描画時間・スループットに関しては、将来的に MBMW の手法を採用する事に対応する事を述べた。しかしながら MBMW 機はまだ開発段階であり、マスクデータの増大など解像性やスループット以外の技術的課題も多く含まれている。既存量産ラインで運用されている VSB 描画手法から徐々に移行される可能性が現時点では濃厚だが、今後の技術動向を十分に見極めていく必要がある。

参考文献・出典先

- 1 Isao Tanabe, Yoichi Takehana, Photomask fabrication handbook 2011.
- 2 C. Klein, H. Loeschner, and E. Platzgummer, Proc. SPIE 8880, 88801E (2013).
- 3 E. Platzgummer, C. Klein, and H. Loeschner, J. Micro/Nanolithogr., MEM, MOEMS 12, 031108 (2013).
- 4 F. E. Abboud, M. Asturias, M. Chandramouli, and Y. Tezuka, Proc. SPIE 9235, 92350W (2014).
- 5 Elmar Platzgummer, Christof Klein, and Hans Loeschner (2012). In Proc. SPIE 8522, Photomask Technology 2012, 85221H (December 6, 2012).
- 6 Mihir Parikh. Journal of Vacuum Science & Technology, vol. 15, No. 3, (pp. 931—933), May/Jun., 1978.
- 7 Andrew Jamieson, Yong Kwan Kim, Bennett Olson, Maiying Lu, Nathan Wilcox (2011). In proceeding of SPIE 8166, Photomask Technology 2011, 816616 (October 13, 2011); doi:10.1117/12.898901.
- 8 Takeshi Ohfuji, Naoko Kuwahara, Masa-aki Kurihara, Naoki Kitano, Shigekazu Fujimoto, Naoya Hayashi, David H. Hwang; Proc. SPIE 4562, 21st Annual BACUS Symposium on Photomask Technology, 830 (March 11, 2002) doi:10.1117/12.458366.
- 9 Andrew Murray, Frank Abboud, Frederick Raymond and C. N. Berglund (1993). In proceedings of J. Vac. Sci. Technol. B 11, 2390 (1993); <http://dx.doi.org/10.1116/1.586992>.

第5章 結論と今後の展望

次世代フォトマスクの製造プロセスにおいて、非化学増幅型レジスト (Non-CAR) に露光後ベーク (PEB) を加えるという本手法の優位性を十分に検証する事が出来たと共に、下記3つの研究成果が得られた。

1. 露光後ベーク手法の優位性の検証から、20 nm オーダーの解像性能を実現出来た事

1:1 LS で 28 nm、IS で 22 nm、IL で 31 nm の解像性能が確認でき、本手法の次世代フォトマスク製造プロセスにおける優位性を検証できた。また現行の CAR プロセスの代替案としても本手法が非常に有意であることが確認できた。

2. 露光後ベーク温度の最適化

露光後ベーク温度の条件だしにより、SEM 像の Top View 観察、及び断面観察を行った結果、最も解像性能が高い最適温度値を検証できた。また、温度が低すぎるとレジスト感度が高すぎ、温度が高すぎるとレジスト感度が低くなりすぎる事も感度カーブなどから考察できた。

3. 露光後ベークによる LER の改善と高解像度のメカニズム

表面の平滑性とベーク温度・時間の関係、それから表面の平滑性と LER の関係などの報告から、以下3つの事が確認できた。

- ① レジスト自体は、粒子状形状を持っており、レジスト塗布後にベークを加える事で、レジスト中の有機溶媒を蒸発させ、粒子状形状が抑えられる。結果、表面の平滑性が一時的に良くなる。
- ② その後、電子ビーム露光を加える事で、レジストの主鎖切断が起こり、分子量が小さくなっていく。従って、粒子状形状が再び現れ、表面の平滑性が悪くなる。
- ③ そこで、露光後にベークを加える事で、粒子状構造を抑制し、平滑性を良くする事で LER の改善につながり、結果、高解像性を示す事が可能。

これらの研究成果によって、露光後ベークの最適化とそのメカニズムを検証し、次世代フォトマスクの製造プロセスへの応用を実現した。その結果、20 nm オーダーでの解像性能を得る事に成功し、新たなプロセス手法を確立した。

表 5 に本研究の総括をする。非化学増幅型レジストに露光後ベークを加える事

で 20 nm オーダーの高解像性能が得られる事が実証されたが、レジスト自体の感度に関しては、改善の必要性を感じている。本手法が、次世代フォトマスクの製造プロセスへ応用されるためにも、高感度タイプ (数 10 $\mu\text{C}/\text{cm}^2$) の非化学増幅型レジストによる検証なども今後、非常に有益な研究対象になってくると思われる。

表 5 : Non-CAR PEB 手法への期待と本研究の総括

	解像性能 (nm)	LER (nm)	描画手法	スループット (レジストの感度)
化学増幅型レジスト + 露光後バーク	IS: 28, LS: 34, IL: 36	IS: 5.6, LS: 5.1, IL: 6.5 (@ 50 nm)	VSB方式	スループット: 高 レジスト感度 (1:1 LS) 20 ~ 50 $\mu\text{C}/\text{cm}^2$
非化学増幅型レジスト	LS: 21 - 800 $\mu\text{C}/\text{cm}^2$	LS: 3.2 (@ 300 nm)	ポイントビーム方式	スループット: 低 レジスト感度 150 ~ >1,000 $\mu\text{C}/\text{cm}^2$
	IS: 30, LS: 30, IL: 34	IS: 6, LS: 4.5, IL: 6 (@ 50 nm)	VSB方式	スループット: 中 レジスト感度 (1:1 LS) 150 ~ 300 $\mu\text{C}/\text{cm}^2$
非化学増幅型レジスト + 露光後バーク	IS: 22, LS: 28, IL: 31	IS: 3.6, LS: 5.5, IL: 6.1 (@ 50 nm)	VSB方式	スループット: 中 レジスト感度 (1:1 LS) 150 $\mu\text{C}/\text{cm}^2$

20% ~ 30% 改善

謝辞

本研究は、インテル（株）と（米）インテルコーポレーションの支援の下、フォトマスク製造プロセスの開発業務の一環として行われました。

本研究の遂行にあたって、実験計画から得られたデータの分析や考察に至るまで終始有意義なご討論とご助言を頂き、そして温かくご指導賜りました指導教員である谷口淳教授に心より感謝いたします。また本論文をまとめるにあたり、ご指導とご尽力を頂きました、東京理科大学基礎工学部電子応用工学科 相川 直幸 教授、佐竹 信一 教授、原田 哲也教授、ならびに、同学部材料工学科 向後保雄教授に心より感謝申し上げます。

本研究に必要なプロセス装置・評価装置の借用やレジスト材料、マスク基盤などの提供と様々なサポートをして頂いた（米）インテルコーポレーション マスク製造本部インテグレーション部門長 **Farnsworth, Jeff** 氏、並びに描画装置やマスクメーカー様との調整を行って頂いた（米）インテルコーポレーション マスク製造本部事業部長 **Abboud, Frank E** 氏に心より感謝申し上げます。その他、各データ分析やその解釈などで様々な有意義な議論をさせて頂いた（米）インテルコーポレーション マスク製造本部前工程部門長 **Jamieson, Andrew T** 氏に心より感謝申し上げます。

最後に、本研究の完成まで温かく支援して頂きました妻、美里。一般企業で働きながら学業にも専念させて頂くために様々な苦勞をかけた子、結菜、涼雅に深く感謝致します。

本研究に関する原著論文と学会発表

主論文を構成する論文

1. 題目

Fabrication of a high-resolution mask by using variable-shaped electron beam lithography with a non-chemically amplified resist and a post-exposure bake

(非化学増幅型レジストと露光後ベーク手法を用いた可変成形型電子線リソグラフィ技術による高解像フォトマスク製造に関する研究)

印刷公表の方法および時期

Hidetatsu Miyoshi, Jun Taniguchi

Microelectronic Engineering 143 巻 48-54 頁 (2015)

2. 題目

Fabricating a high-resolution mask with improved line-edge roughness by using a nonchemically amplified resist and a postexposure bake

(非化学増幅型レジストと露光後ベーク手法におけるラインエッジラフネス改善による高解像フォトマスク製造に関する研究)

印刷公表の方法および時期

Hidetatsu Miyoshi, Jun Taniguchi

Journal of Vacuum Science & Technology B 33 巻 6 号 06FD05 頁 (2015)

3. 題目

Characterization for the photomask fabrication based on a high-resolution technique with a non-chemically amplified resist and a post-exposure bake

(非化学増幅型レジストと露光後ベーク手法を用いた高解像フォトマスク製造技術の解析)

印刷公表の方法および時期

Hidetatsu Miyoshi, Jun Taniguchi

Microelectronic Engineering 155 巻 7-13 頁 (2016)

学会発表

国際会議における発表（英語口頭発表 査読有り）

1. Hidetatsu Miyoshi, Jun Taniguchi, 「Characterization for the photomask fabrication based on a high-resolution technique with a non-chemically amplified resist and a post-exposure bake」、『41st Micro and Nano Engineering』、Tue-A3-C3、Hague, Netherlands、2015年9月

国際会議における発表（ポスター発表 査読有り）

1. Hidetatsu Miyoshi, Jun Taniguchi, 「Fabrication of a high-resolution mask by using variable-shaped electron beam lithography with a non-chemically amplified resist and a post-exposure bake」、『40th Micro and Nano Engineering』 P4-74-Th (Original ID: 8074)、Lausanne, Switzerland、2014年9月
2. Hidetatsu Miyoshi, Jun Taniguchi, 「Fabricating a high-resolution mask with improved line-edge roughness by using a nonchemically amplified resist and a post exposure bake」、『The 59th Electron, Ion, and Photon Beam Technology and Nano fabrication』、P05-01、San Diego, United States of America、2015年5月