

シンクロトロン放射光による
X線リソグラフィの研究

Research on X-Ray Lithography
by Synchrotron Radiation

2003年3月

豊田英二郎

目次

第1章 序論	1
1-1 背景	1
1-2 X線リソグラフィの原理	3
1-3 実用化の現状	4
1-4 研究の目的	7
1-5 リソグラフィの従来法	7
1-6 X線リソグラフィの競合技術	10
1-6-1 電子ビーム露光	10
1-6-2 極紫外光露光	11
1-6-3 イオンビーム露光	12
1-7 研究の成果	12
引用文献	15
第2章 小型放射光源の開発	17
2-1 緒言	17
2-2 点光源と放射光	17
2-3 超小型放射光源の開発	19
2-3-1 開発状況全般	19
2-3-2 超伝導シンクロトロン AURORA の開発	20
2-3-3 常伝導シンクロトロン AURORA-2 の開発	23
2-4 結言	25
引用文献	26
第3章 高強度ビームラインの開発	27
3-1 緒言	27
3-2 ビームラインの要求特性と構成	27
3-2-1 光の伝播	27
3-2-2 反射ミラー	28
3-2-3 ビーム取り出し窓	29
3-3 ビームラインの実施例	31
3-4 コンパクト大強度ビームラインの開発	32
3-4-1 水平面内の光学系の検討	32
3-4-2 サグの再評価	34
3-4-3 垂直面内の光学系の検討	35
3-4-4 ランアウト角の改善	36
3-5 均一な露光強度を得るベリリウム窓の設計	37
3-5-1 強度分布の解析	37

3-5-2	ベリリウム窓形状の計算	40
3-5-3	スキャン速度の制御	42
3-5-4	計算結果とその検討	42
3-5-5	ベリリウム窓形状の簡素化	44
3-6	光取出し窓の破損対策	45
3-6-1	新しいADLの設計	45
3-6-2	応答性シミュレーション	46
3-7	大面積露光に対するレジストパターンの均一化	50
3-8	試作ビームラインによる性能実証	52
3-9	結言	53
	引用文献	55
第4章	X線マスクの熱変形が転写性能に及ぼす影響	57
4-1	緒言	57
4-2	マスクの要求特性と構成	57
4-3	マスクの製作法	58
4-4	マスクの熱変形の転写性能への影響	59
4-5	結言	63
	引用文献	65
第5章	従来の露光法によるパターン形成限界の検討	67
5-1	緒言	67
5-2	分解能向上の検討	67
5-3	シンクロトロンの短波長化対応	71
5-4	ビームラインの短波長化対応	72
5-5	レジストの短波長化対応	72
5-6	システムの総合性能	73
5-7	結言	76
	引用文献	77
第6章	新しい露光法によるパターン形成限界の拡張	78
6-1	緒言	78
6-2	ステッパによるギャップの限界	78
6-3	半影ボケによる限界	79
6-4	Rayleighの基準の検証	82
6-5	多重露光による許容ギャップの拡大	84
6-6	拡大パターンマスク	86
6-7	干渉スリットマスク	90
6-8	X線収束マスク	93

6-9 連続描画法	94
6-9-1 各種マスクの適用性	94
6-9-2 連続描画法の生産性	98
6-9-3 連続描画用ビームライン	99
6-10 X線リソグラフィの限界	101
6-11 結言	105
引用文献	107
結論	109
付録1 シミュレーションプログラムの開発	112
1. 緒言	112
2. ビームライン光学系設計プログラム BLOD	112
3. ビームライン真空系設計プログラム BLVAC	116
4. 露光シミュレーションプログラム BLEX	117
5. 結言	127
引用文献	127
付録2 露光コストの比較	128
1. 緒言	128
2. 露光コストの計算法	128
3. 光縮小投影露光のコスト計算	130
4. 電子線露光のコスト計算	131
5. 極紫外光露光(EUV)のコスト計算	132
6. X線露光のコスト計算	133
7. 結言	134
引用文献	135
謝辞	136
略語表	137
研究業績目録	138

第1章 序 論

1-1 背景

本論文は、シンクロトロン放射光を用いた X 線リソグラフィに関するものである。リソグラフィとは半導体集積回路の生産工程において、微細回路パターンを半導体素子に転写・形成する技術を指し、半導体産業の中核となっている技術である。X 線リソグラフィは 1980 年代から実用化が期待されながら、以下に述べる事情により未だに実用化に至っていない。本研究は、一般に認識されている X 線リソグラフィに関する諸問題を根本的に解消し、今後数世代にわたって実用可能とするものである。次章以下でその詳細を述べるに先立ち、本章でリソグラフィ技術に関する総括的な説明を行う。

1960 年代末には集積回路のリソグラフィ工程で X 線リソグラフィと同様な手法の等倍近接露光が用いられていた。当時の光は青色可視光で、マスクとウエハの間隔を $25\ \mu\text{m}$ に保ち線幅 $5\ \mu\text{m}$ の回路を転写していたが、フレネル回折の影響によりイメージ形成の限界に近づきつつあった。1969 年、IBM では X 線を用いてフレネル回折の影響をなくする研究が始められたが社内の方針により公表されなかった。¹ 1972 年、MIT の H. I. Smith 教授のグループの発表² が X 線リソグラフィのはじまりと一般には理解されている。当時は X 線リソグラフィの要素機器は殆ど未開発の状態、生産への導入は時期尚早とされていた。

一方、等倍近接露光に代わり、マスクパターンを縮小して露光する縮小投影露光（通称光リソグラフィ）が急速な進歩を遂げた。特に日本では 1976 年に発足した官民一体となった超 LSI 技術研究組合の成果は目覚しく³、メモリ素子（DRAM）の分野では日本の技術は欧米を圧倒し、1984 年には日本の半導体メモリは世界市場の 60% を占めるに至り、日米半導体摩擦が表面化するに至った。米国では日本に対抗して 1988 年、官民合同の半導体開発会社 SEMATEC を発足させた。⁴ 残念ながら日本ではその後、超 LSI 技術研究組合に相当するような国家的開発政策はとられず、米国および開発途上国の台頭に押されて半導体産業の地位は再び逆転し、現在に至っている。

縮小投影露光には当初水銀灯の g 線（波長 $436\ \text{nm}$ ）が用いられた。当時は波長の 1.5 倍の線幅が解像限界とされていた。したがって、4 メガビット DRAM の線幅 $0.7\sim 0.8\ \mu\text{m}$ への対応が限界と考えられた。次世代の 16 メガ DRAM では対応が困難になると見られ、波長 $1\ \text{nm}$ の軟 X 線を用いる X 線リソグラフィの検討が業界で開始された。X 線リソグラフィでは光源としてシンクロトロン放射光（通称、放射光または SR 光）の利用が有力視され、1980 年代には工場に導入可能な小型シンクロトロンの開発競争が激化した。⁵ 一方では縮小投影露光の延命のための開発がステッパメーカーを中心に精力的に進められ、その結果、高圧水銀灯を用いた i 線（波長 $365\ \text{nm}$ ）による短波長化に成功した。さらに位相シフト法、変形照明法等の超高解像技術が開発され、波長の $1/2$ の線幅の形成が可能になった。これらの超高解像技術の進歩により X

線リソグラフィの出番は一挙に後退した。縮小投影露光は紫外光源のさらなる短波長化を目指して水銀灯からエキシマレーザへと進化し、KrF レーザ(248 nm), ArF レーザ(193 nm)の開発に成功し、さらに最近ではF₂ レーザ(157 nm)の開発が進められている。しかしながら、F₂ レーザの波長域は光学レンズの光透過性能の限界にさしかかっており、また、コスト面でも問題視されている。たとえ実用化に成功しても、さらなる短波長化はもはや不可能な状態にある。

縮小投影露光の限界が見えてきたことにより、半導体業界では次世代のリソグラフィ技術の実用化に迫られている。次世代技術としては、X線露光の他に電子線露光、極紫外光(波長13 nm)を用いたEUV露光法およびイオンビームによる直接描画法がある。これらの内容については1-5節に述べるが、それぞれ一長一短があり、評価が確定していないのが現状である。米国では半導体技術の将来動向について、SEMATECの関係機関がロードマップ(ITRS)を発表している。このロードマップ作成の背景には半導体メーカー間の駆け引きがあるので、技術動向を正確に反映しているものではない。図1-1に1999年版と2001年版のリソグラフィ技術に関するロードマップを示す。この図を見ても、2年間で技術評価が大きく変わっている。特にX線リソグラフィについては線幅50 nm以下の実用性に対する評価が定まっていなかったことが見てとれる。

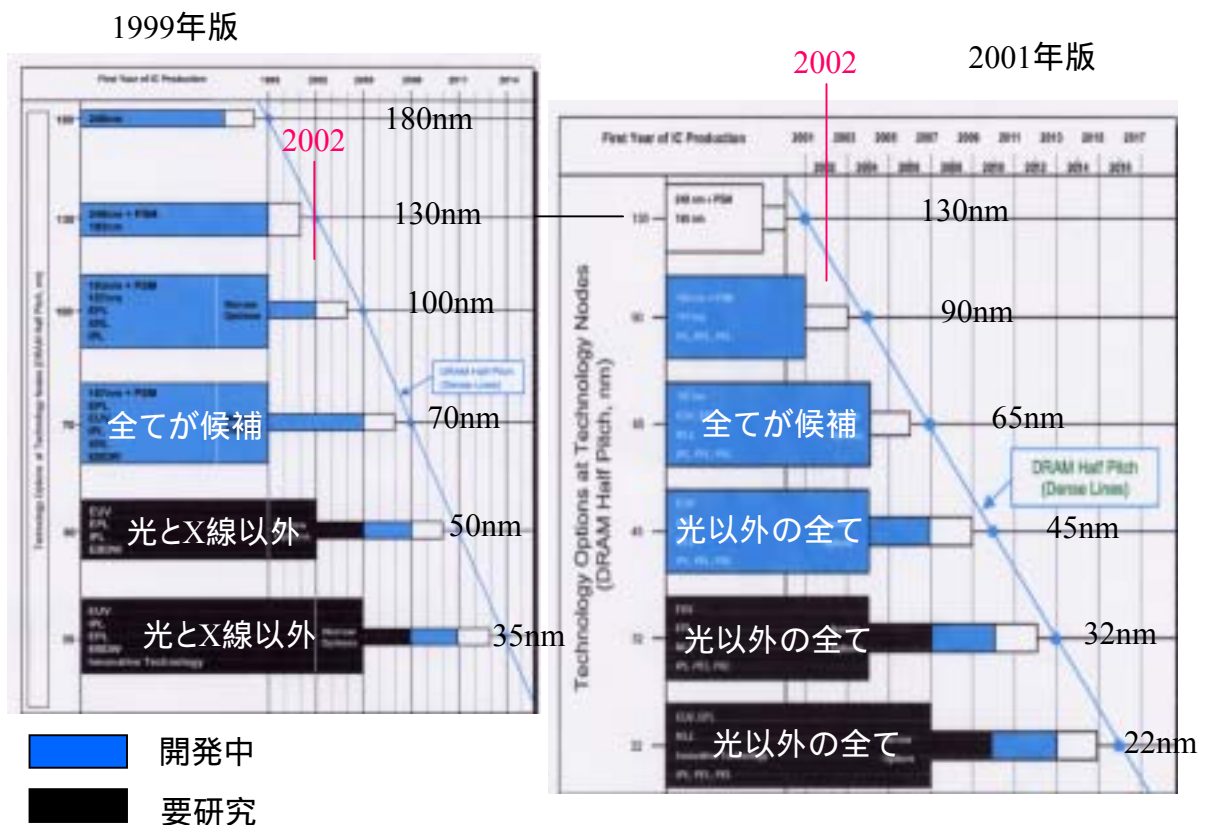


図 1-1 ITRS によるリソグラフィ技術のロードマップ

1-2 X線リソグラフィの原理

半導体素子生産における X 線リソグラフィのプロセスをその前後工程と共に図 1-2 に示す。X 線リソグラフィ用マスクは図 1-2(a)に示すようにマスク基膜（例えば SiC 薄膜）上に吸収体（例えば W）で回路パターンを描いたものである。マスク基膜は X 線を透過させ、吸収体を膜上に保持する役目をする。吸収体は X 線を遮断する目的で重金属が用いられる。露光対象としては、酸化皮膜処理（目的によって異なる）を施したシリコンウエハ表面にレジストと呼ばれる感光剤を塗布したものが用いられる。マスクとウエハは通常 20 μm 程度の間隔（近接ギャップ）で配置されている。

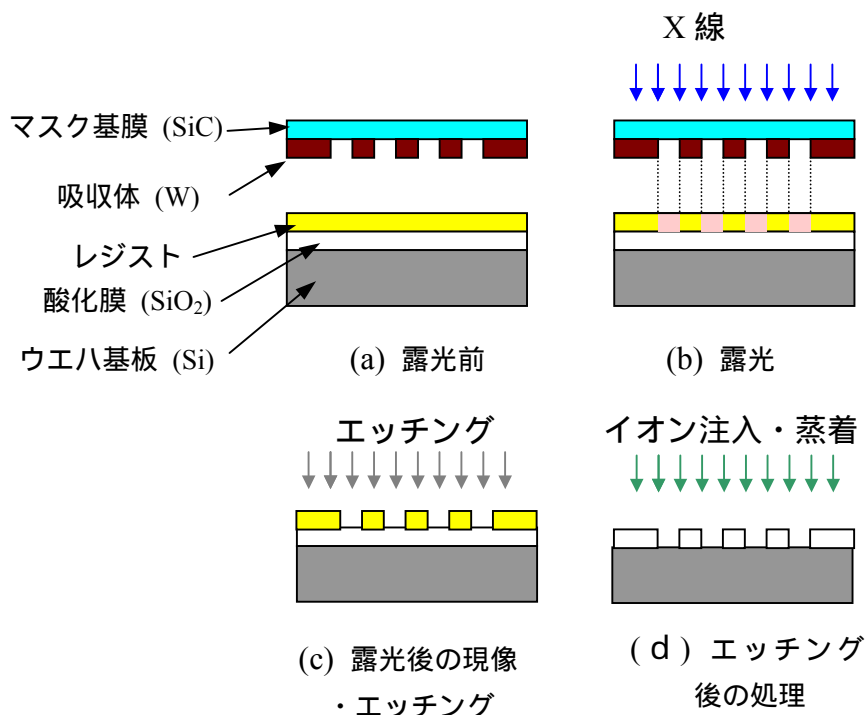


図 1-2 X線リソグラフィ工程

図 1-2(b)のようにマスク上方から X 線を照射すると、吸収体がない部分では X 線はウエハ上に到達し、レジストに吸収される。レジストには X 線を吸収すると分子結合鎖が分解し現像液に溶解するタイプ（ポジ型レジスト）と分子結合が強くなり現像液に溶解しなくなるタイプ（ネガ型レジスト）がある。図 1-2(c)にはポジ型レジストを現像した状態を示す。リソグラフィ工程は、ウエハにレジストを塗布する工程から露光後現像するまでの工程を指す。リソグラフィの目的は、現像したレジストをマスクとして図 1-2(c)のように酸化膜のエッチングを行い、図 1-2(d)のように酸化膜をマスクとしてイオン注入を行ったり、図 1-2(c)の現像後、酸化膜上に配線用金属の蒸着を行ったりする工程に引き継ぐものである。

X 線の波長は約 1 nm の軟 X 線領域のものが使用される。これはマスク基膜透過光と吸収体透過光の光強度のコントラストを最大にする条件から決定されている。X 線光源としては点光源とシンクロトロン放射光による SR 光源がある。点光源では図

1-2(b)のように光を上方から照射する。SR 光源では光は水平方向に照射されるので、マスクとウエハは垂直方向に配置される。点光源としては、当初は電子を金属ターゲットに衝突させて発生させる制動 X 線が光源として検討された。特に医療用 X 線発生装置を小型化する開発が試みられたが、十分なパワーの確保が困難で実用化には至っていない。高温プラズマから放射される X 線を利用する研究は現在も続けられているが、現状では出力が不足している。これにはガス流にレーザを照射する方法と放電によりプラズマを発生する方法がある。点光源は、当初は光縮小投影露光装置の光源を置き換え、レンズ系を取り外すだけでシステム構成が容易になると考えられていたが、出力の点で実用域に達していないので、現在は小出力でも使用可能な研究用に特化しつつある。レーザプラズマ光源の開発はむしろ 1-5-3 節で述べる極紫外線用光源（波長 13 nm）の方が本命となっている。

シンクロトロン放射光(Synchrotron Radiation: SR 光)は、光速に周回する電子から軌道の切線方向に放射される光

である。SR 光源による X 線リソグラフィシステムの基本構成を図 1-3 に示す。ハード機器は三つに大別される。即ち、光源としてのシンクロトロン、光を伝播するビームラインおよび露光ステーションとしてのステッパである。シンクロトロンから放射される SR 光は電子の周回

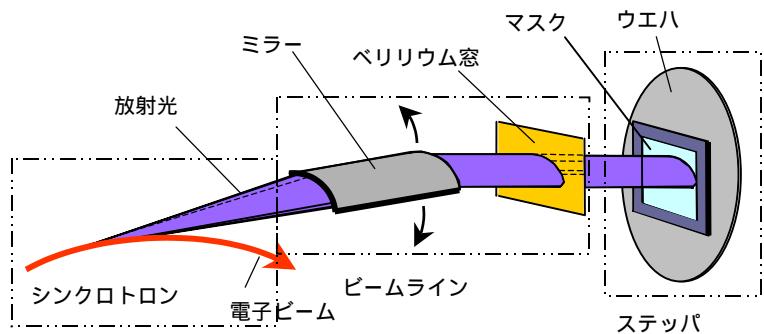


図1-3 X線リソグラフィシステムの基本構成

平面の 360° 全方向に放射されるので、光を有効に利用するためビームラインおよびステッパはシンクロトロンの周りに十数台配置される。ビームラインは、シンクロトロンから水平面上に発散された SR 光を集光し平行ビームにする。SR 光は垂直方向には 1mrad の範囲に集中しているので、ミラーを揺動することにより SR 光を垂直方向に走査・拡散させる。SR 光は大気中では吸収されるのでステッパに到達するまでは高真空を保つ必要がある。したがってビームラインの終端にはベリリウム箔を用いた光取り出し窓（通称ベリリウム窓）が設けられ真空を遮断している。ステッパはマスクとウエハ間の近接ギャップを保ちながら露光する機構と、露光後ウエハ位置を次の照射位置に逐次移動する（ステッパの語源）機構を持っている。マスクおよびウエハは X 線を透過できるようヘリウムガス雰囲気または真空中（粗真空）に配置されている。

1-3 実用化の現状

前述(1-1 節)のように X 線リソグラフィの実用化研究は 1980 年代にスタートした。現在までに世界的に十数箇所以上の施設で専用のシンクロトロンが建設された。建設

の歴史的経緯を図 1-4 に示す。光源の開発競争は 1980 年代末には一段落し、その後は露光実験が主体となったが、現在その開発規模は世界的に縮小されている。光縮小露光技術の延命により X 線リソグラフィの出番が遅れている状態では毎年多額の研究開発費を維持しきれないことが、開発規模が縮小された主な理由である。米国ではナノテクノロジー技術開発の一環として DARPA を主体に国家的財政支援が行われており、ウイスコンシン大学を主体に開発が継続されている。日本では経済産業省と半導体メーカーによる共同開発体 ASET で次世代リソグラフィ技術の開発体制が維持され、三菱電機では自社の施設を用いて実験を継続している。これらの困難な問題を抱えてはいるが、1990 年代にこれらの施設を利用して開発された成果は顕著であり、X 線リソグラフィの実用性は殆ど実証されたと言える。

1980 年当初の X 線リソグラフィの問題点は、工場に導入可能な小型シンクロトロンが実現できるかどうかであった。図 1-4 に示すような激烈な開発競争を経て、現在では商品として完成したレベルまで進歩した。ビームラインに関する多くの方式が提案、建設され、住友重機のシンクロトロン(AURORA-2)⁶とビームライン⁷では露光面上で必要とされる露光強度 50 mW/cm² をすでに達成している。⁸ ステップは

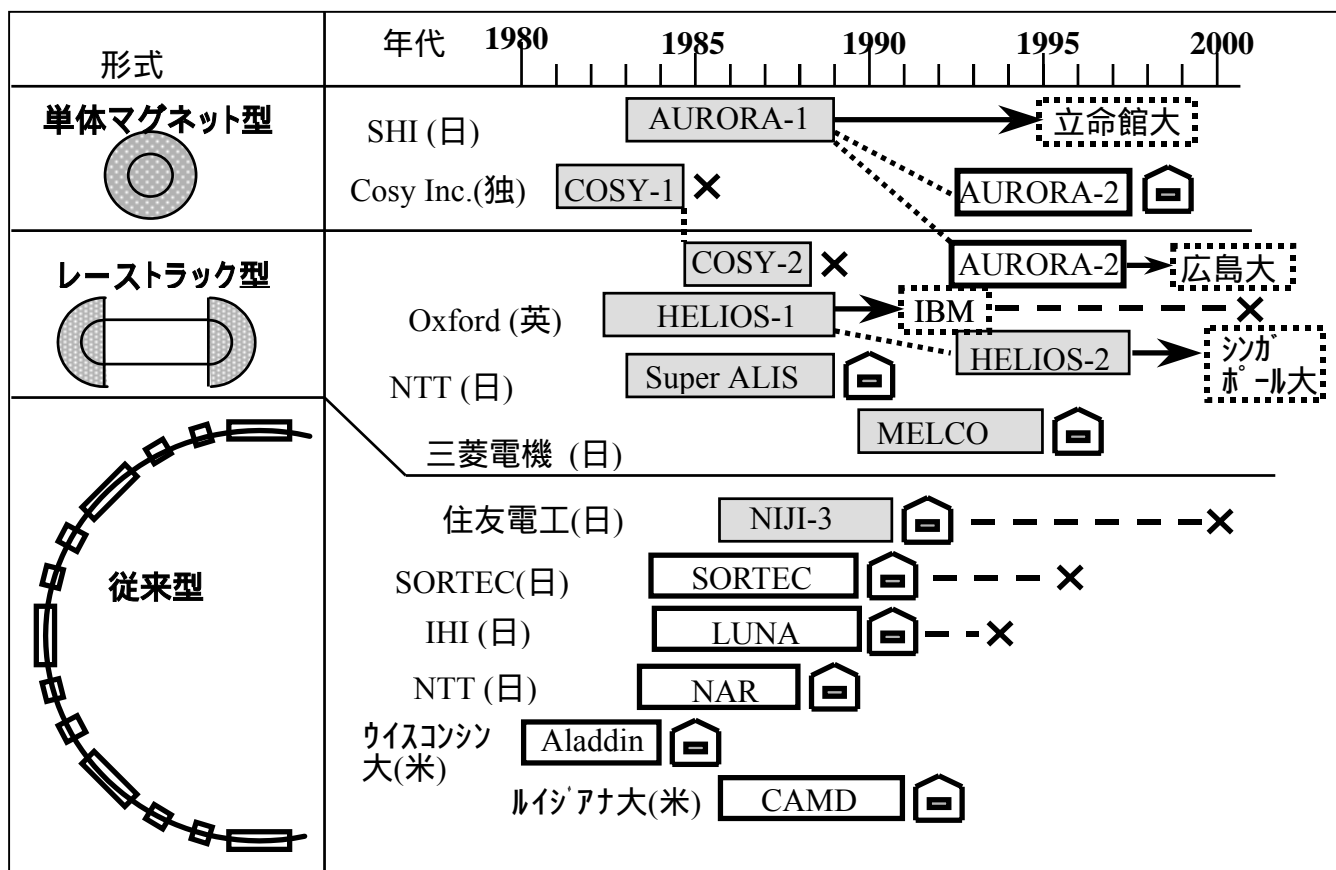
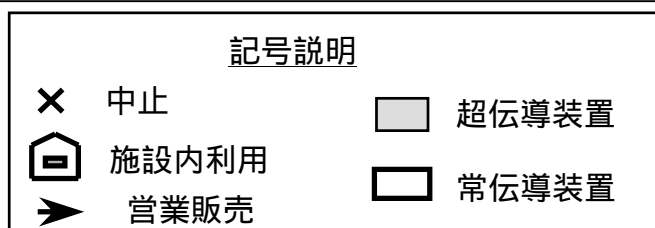


図 1-4 X 線リソグラフィ用光源と利用施設建設の年表



日本ではキャノン、NTT、住友重機が、米国では SAL 社、SVGL 社が X 線用ステッパを開発し、1998 年の時点で位置決め精度 20 nm 以下 (3σ) を達成している。⁹ これは線幅 70 nm のパターン形成が可能であることを示している。住友重機のステッパを用いた実験では線幅 70 nm の一次元パターンが近接ギャップ 15 μm で形成されたことが報告されている。¹⁰

光縮小露光ではマスクパターンは逆に拡大されているので、マスクの製作精度に関しては特に困難はない。しかし、X 線リソグラフィは等倍露光であるので形成パターンと同等以上のマスク精度が要求される。光源の問題が解決されると、次にマスクの製作精度の問題がクローズアップされてきた。X 線マスクパターンの描画には電子線ビームが用いられる。皮肉なことに、電子線描画法は 1-5-2 節に述べるように X 線リソグラフィの競合技術であったので、装置メーカーからの協力は必ずしも十分ではなかった。結局 NTT および IBM 自身が性能向上を積極的に進めた結果、要求性能を達成することができた。マスクの組み立て方法、材質の選定についてもひずみを除去するための多くの改善が積み重ねられた結果、IBM、三菱電機、NTT でマスクの供給が可能になった。現在では線幅 100 nm レベルのマスクは商業レベルで入手可能になっている。¹¹

X 線リソグラフィによる集積回路の具体的な製作実績としては、1998 年時点での SEMATEC の報告書では表 1-1 のような製作例が報告されている。⁹ これらの回路のリソグラフィ工程の全てに X 線が用いられたわけではなく、表に示したように特にクリティカルな線幅の部分の製作に適用されたものである。

表 1-1 X 線リソグラフィによる集積回路の製作例

製作対象	メーカー	対象線幅	報告年
64 Mb DRAM 相当	NEC, 住重	0.2 μm	1993
64 Mb DRAM	IBM	ゲートレベル (数値未詳)	1995
1 Gb DRAM	三菱電機	0.14 μm	1995
4 Gb DRAM	東芝、NTT	0.24 ピッチ (推定線幅 0.12 μm)	1996
CMOS(64 kb SRAM 含む)	IBM	0.2 μm	1994
CMOS(12 kb SRAM 含む)	NTT	0.2 μm	1995
CMOS(1 Mb SRAM 含む)	Motorola	0.375 μm	1996
CMOS	IBM	0.1 μm	1995

X 線リソグラフィの一般的な評価を要約すると、2004 年に量産開始が予想されるパターン線幅 90~100 nm のデバイスについては、これまで蓄積した技術で対応可能である。2007 年頃に予想される線幅 70 nm のデバイスについては今後の技術改良により対応可能になると見られる。しかし、現在の等倍露光システムで線幅 50 nm を実現できるかどうか予測は困難である。新しい生産技術を現場に導入するには最低 3 年の準備期間が必要であり、少なくとも 2 世代 (70 nm, 50 nm) 先の可能性が見通せることが重要である。この点で X 線リソグラフィは厳しい状況にある。

1-4 研究の目的

著者は 1980 年代から X 線リソグラフィの研究開発に携わっている。その間、光源としてのシンクロトロンおよび放射光を伝搬するビームライン等のハード機器に関する研究開発、さらに露光プロセスのシミュレーション技術等のソフト面に関する研究も行ってきた。特に従来の等倍露光にも縮小効果が現れる現象¹²を詳細に検討し、新しい X 線マスクによる縮小露光法を開発するに至った。^{13,14} これらの成果を最大限に発揮させるには光源から露光面に至る光路に関わる全てのハード機器の仕様を露光プロセスと併せて最適化を図る必要がある。しかし、今日まで X 線リソグラフィ全体システムの個別のハード機器仕様と露光プロセス全体の最適化を詳細にかつ総合的に検討した研究はなされていない。そこで著者は、今日まで取得した放射光による X 線リソグラフィの研究成果を基に、個別のハード機器の特性および露光プロセスの適用性を明らかにすると共に、新しい X 線マスクによる露光法と最適化された露光システムを新たに提案するものである。また、同システムによる X 線リソグラフィの限界をシミュレーションにより検証するものである。

1-5 リソグラフィの従来法

集積回路製作の初期段階では解像度の要求は数 μm のオーダーであり、可視光を用いてマスクをレジスト膜上から離して露光（近接露光）しても十分であったが、解像度の要求が厳しくなるにつれてレジスト面に密着させて露光（密着露光）する必要が生じた。しかし、マスクの損傷や位置合わせの困難性から密着露光装置に代わって

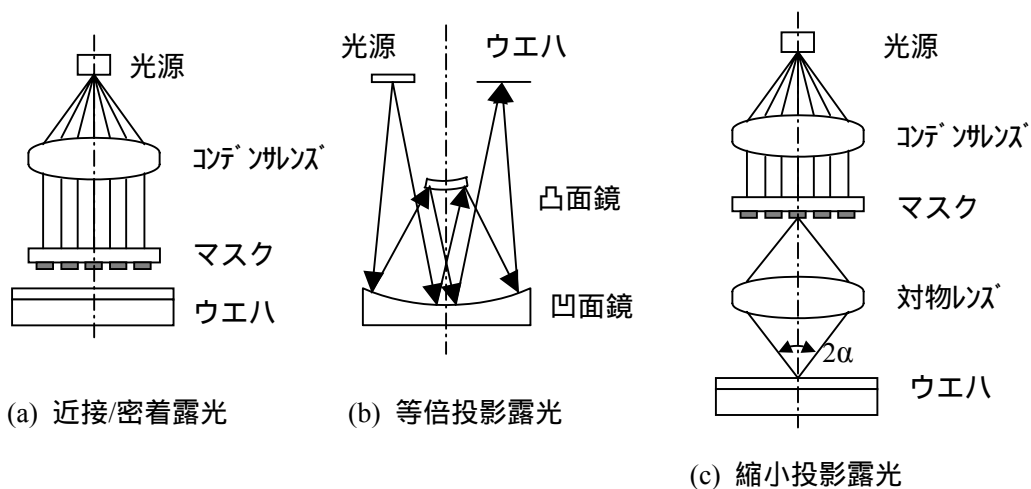


図 1-5 光を用いた露光方式

投影露光方式が採用されるようになった。投影露光ではマスクとウエハの距離を離してマスクパターンをウエハ上に投影する。当初は等倍投影露光装置として色収差が発生しない反射鏡を用いた露光装置が用いられたが、パターンの微細化に伴い拡大マスクを縮小して投影露光する縮小投影露光装置が使用されるようになり現在に至っている。これらの光学系の概念を図 1-5 に示す。

縮小投影露光の主要性能は解像度と焦点深度である。解像度 R は次式で表される。

$$R = k_1 \frac{\lambda}{NA} \quad (1-1)$$

ここで、 k_1 はプロセス定数、 λ は波長、 NA は開口数と呼ばれるもので、

$$NA = \sin \alpha \quad (1-2)$$

として表される。 α は図 1-5(c) に示す角度である。

焦点深度 DOF (Depth of Focus) は次式で表される。

$$DOF = k_2 \frac{\lambda}{NA^2} \quad (1-3)$$

ここで k_2 は k_1 同様プロセス定数である。解像度を上げる (R を小さくする) には波長を小さくするか NA を大きくすることになる。解像度が上がると式(1-3)により焦点深度が浅くなるというトレードオフの関係があるが、 NA を大きくするよりも λ を小さくする方が焦点深度への影響が少なく、まずは解像度を上げることが先決とされた。その手段として短波長光源の使用が考えられた。表 1-2 に縮小露光に用いられる光源とその波長を示す。表 1-2 で、h 線、g 線、i 線には超高圧水銀アークランプやキセノン・水銀アークランプが用いられる。KrF、ArF、F₂ はエキシマレーザである。この中で F₂ レーザは現在開発中である。

表 1-2 縮小露光用光源

光源	波長(nm)
g 線	436
i 線	365
KrF	248
ArF	193
F ₂	157

g 線が使用されていた 1980 年代では露光装置 (ステッパ) の NA は 0.35、 k_1 は 0.8 程度で、したがって波長の 2.3 倍 (1 μm) の解像度しか得られていなかった。最近の予想では NA は 0.8、 k_1 は 0.4 程度まで可能とされ、波長の 1/2 の解像が可能と見られている。図 1-6 は過去 20 年の k_1 値の実績と予測を示したものである。¹⁵

NA 値が大きくなったのはレンズ設計技術の進歩であり、 k_1 値が小さくなったのは超解像技術と総称される光学系の種々の工夫によるものである。

図 1-7 は各種の超解像技術をまとめて示したものである。¹⁶

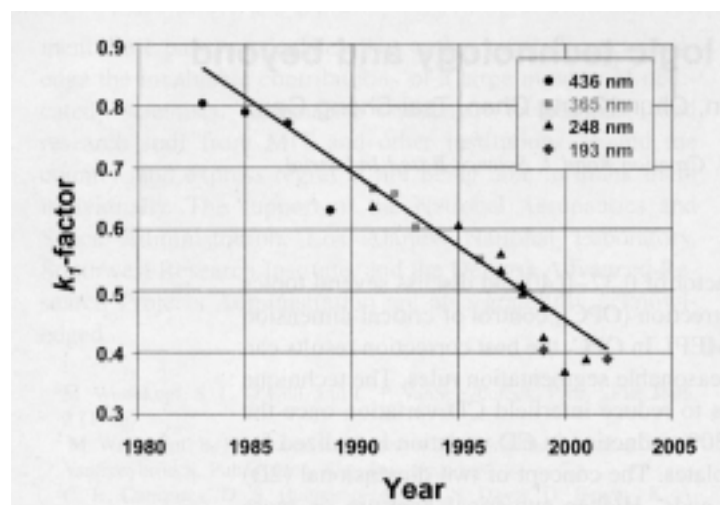


図 1-6 k_1 値の実績と予測 (A. Yan et al.)

これらの技術は、照明系、マスク（レチクルとも呼ばれる）投影レンズ系の三つに大別される。照明系ではフライアイレンズの下に偏向板を設けたり、輪帯状の開口部を設けたりして0次光を斜め入射させることにより解像度および焦点深度を改善する。マスクに関しては位相シフトによる改善効果が顕著である。位相シフト法については各種の方法が提案されている。図 1-8 にその 1 例を示す。¹⁶ 図のように 2 本のスリットからの光は左図の位相シフターがない場合は中央部で位相が重なり合うのでイメージの分離は困難である。右図のように、一方のスリットに波長が反転する位相シフターが存在すると、中央部での光強度は 0 になり解像性が向上する。投影レンズに関しては、瞳フィルタ法として瞳位置に位相や吸収を変更する光学素子を挿入する方法がある。

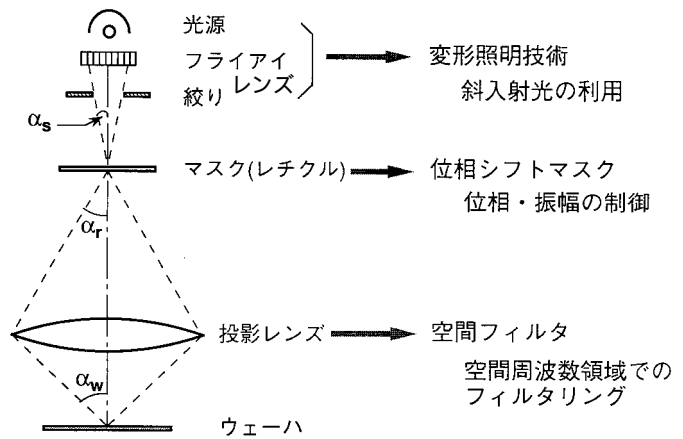


図 1-7 各種の超解像技術

これらの超解像技術の導入、NA の改善、および短波長光源開発の成功により、光による縮小投影露光法は当初予想されていた技術の限界を突破して現在に至っている。F₂ レーザが実用化され、さらに露光技術の改良が進むと線幅 70 nm のパターン形成も実現する可能性がある。

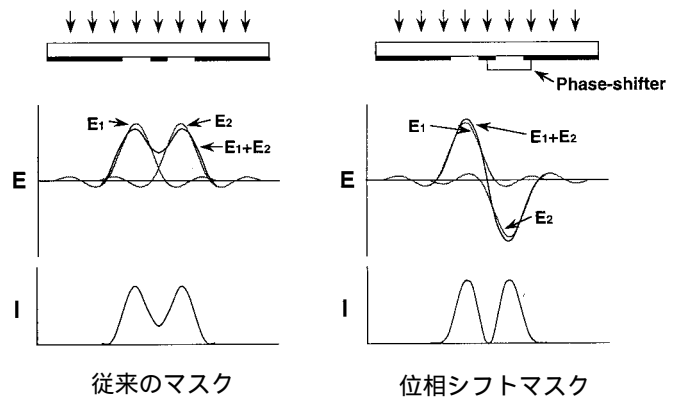


図 1-8 位相シフトマスクによる解像性の向上

一方で、F₂ レーザの波長 157 nm では図 1-9 に示すように¹⁷ 光を透過するレンズ材料が CaF₂ (フッ化カルシウム) に限定されるので、屈折率の異なる材料を組み合わせる設計手法が用いられなくなり、光学系の設計が果たして可能か解決すべき問題は大きい。また、波長 157 nm の光を通すには光路雰囲気中の O₂、H₂O を 1ppm 以下に抑える必要がある。これらの諸問題が技術的に解決できたとしてもコストの上昇は避けられない。g 線時代のステツパが 1 台 2 億円であったが、ArF ステツパでは 20 億円台になると云われており、採算性の問題も生じてきている。いずれにせよ F₂ レーザ以降の光縮小投影露光は考え

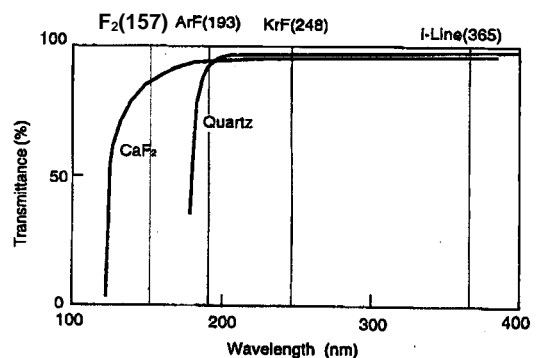


図 1-9 レンズ材料の透過率

られず、次世代リソグラフィ（NGL）の決定が半導体業界の緊急課題となっている。

1-6 X 線リソグラフィの競合技術

1-6-1 電子ビーム露光

a) 直接描画法

電子線ビーム露光にはマスクを製作するツールとして古くから用いられている電子線直接描画装置がある。これは電子銃から出た電子を露光面上に収束し、テーブルを移動させて所望の形状を描画するもので電子線顕微鏡と同様の技術である。パターンをウエハ上に直接描画することも可能であるが、生産性（スループット）が低いので、殆どがマスク製作専用に使われている。図 1-10 は連続描画の代わりに電子ビーム形状を矩形にして一括露光することにより描画効率を高めたものである。しかしながら、描画効率を向上する努力よりもメモリ容量の増加が上回る傾向が続いているので、直接描画装置はマスク生産用および少量生産用装置と位置付けられている。

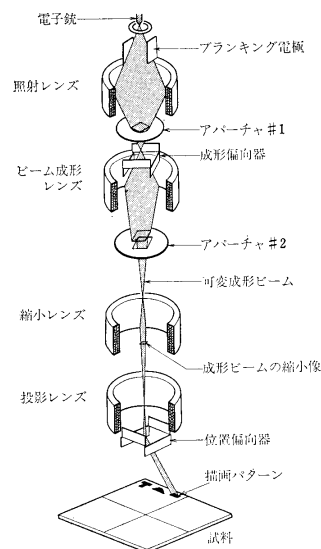


図 1-10 電子線直接描画装置の電子光学系
(日本電子 JBX-6A カタログ)

b) 縮小露光法

電子線を用いて光の場合のように縮小露光を行う方法が開発されている。電子線がマスク基膜を透過するためにはマスク基膜を極めて薄くするか穴あきマスク（ステンシルマスク）を用いる必要がある。米国の開発プロジェクト SCALPEL¹⁸ ではマスク基膜に厚さ 0.1 μm の窒化珪素(SiN)膜を、吸収体（正確には電子散乱体）に厚さ 30~60 nm のクロム・モリブデンを使用している。IBM とニコンが共同開発しているプロジェクト PREVAIL¹⁹ ではマスク基膜に厚さ 2 μm のシリコン結晶を用い、電子はその開口部を通過する。縮小率は 1/4 である。マスク基膜が極めて薄いのでマスクの単位面積は SCALPEL の場合 1 x 15 mm^2 、PREVAIL の場合 1 x 1 mm^2 で、周囲に枠を設けて補強している。どちらも電子ビームの断面寸法は 1 x 1 mm^2 で、SCALPEL では 15 mm のスキャン、PREVAIL では逐次露光を行う。1 回の露光面積が小さいので一つの集積回路を露光す

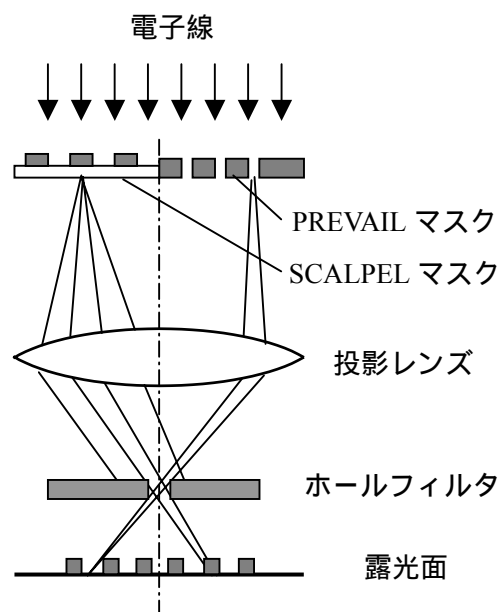


図 1-11 電子縮小露光の光学系

るにはマスクを逐次移動して露光イメージをつなぎ合わせる(stiching)ことが必要で、この装置の大きい技術的課題である。図 1-11 に縮小露光装置の光学系（マスク下流）の概念を示す。図中のホールフィルタは散乱電子を除去しコントラストを上げるものである。SCALPEL は 1989 年当時は次世代リソグラフィとして米国では最も注力されていたが、マスクとイメージのつなぎ合わせ技術の開発が難航し、2001 年になって開発プロジェクトは中止されている。

c) 等倍露光

電子線露光に用いられる電子エネルギーは通常 50~100 keV である。これは 0.5 μm 程度の厚さのレジストを感光させるために必要であるが、レジストの厚さを無視して 2 keV 程度の低エネルギーの電子を穴あきマスク(ステンシルマスク)に適用するとマスクからの電子散乱の影響を無視でき、X 線リソグラフィと同様の等倍露光法が成り立つ。この場合、レジストは二層レジストを使用することになるが、露光装置の構成は図 1-12 に示すように簡素になる。技術的には縮小露光同様、ステンシルマスク(0.5 μm 厚ダイヤモンド膜)の製作とイメージつなぎ合わせ技術がポイントである。

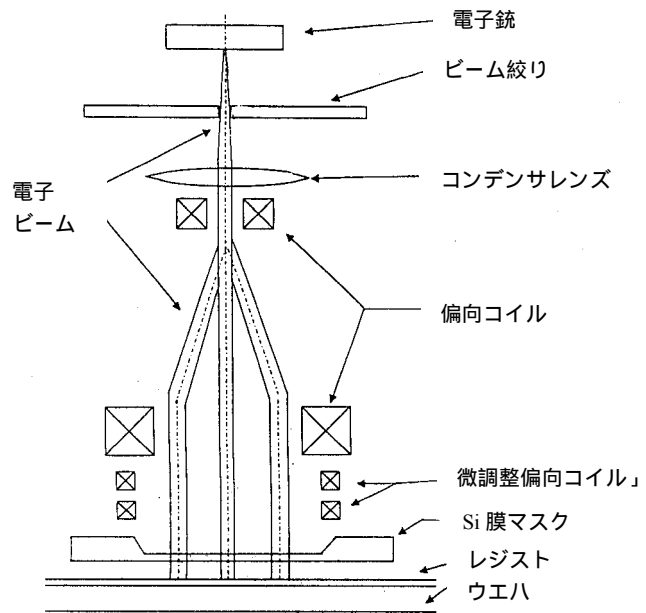


図 1-12 電子線等倍露光の光学系

装置が小型でコスト的に有利であることが特徴である。この装置は LEEPLE²⁰ という名称で、現在日本国内 13 社がコンソーシャムを結成し、開発中である。

1-6-2 極紫外光露光 (EUV 露光)

等倍 X 線露光の問題点はマスク製作が困難なことにある。縮小露光が可能ならマスクの問題は解決される。X 線の縮小光学系としては、フレネルゾーンプレート、全反射ミラー、シュワルツシルド型ミラー光学系が考えられる。現在最も有力なのは多層膜ミラーを用いた光学系である。多層膜全反射ミラーとしては波長 13 nm で高反射率を示す Mo/Si 多層膜が用いられる。この波長帯は一般には X 線領域であるが、X 線等倍露

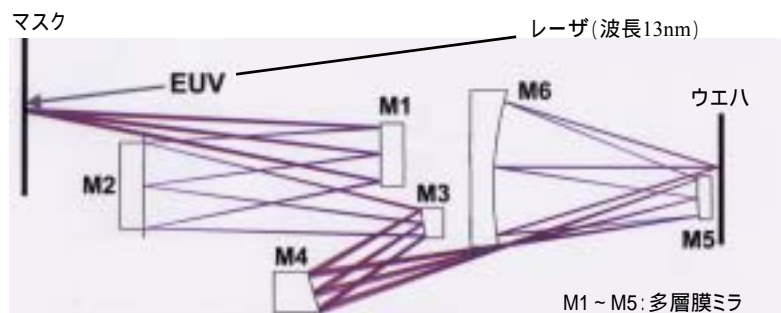


図 1-13 EUV 露光の光学系

光との混同を避けるため極紫外光露光（EUV 露光）と呼ばれている。図 1-13 に光学系の例を示す。開発状況としては、1997 年設立の米国 EUVLLC 社が世界をリードしている。開発は EUVLLC 社の委託で Sandia National Lab., Lawrence Livermore, Lawrence Berkeley が形成する VNL(Virtual Network Lab.)が行っている。日本では ASET の国家プロジェクトで要素技術の開発と露光実験が行われている。

量産時の光源強度としてキセノンを用いる LPP(Laser Produced Plasma)で 50 ~ 150W、寿命 10^{11} ショットが要求されているが、現状は 10W、 10^8 ショットのレベルであり、目標とする 50 nm 世代に開発が間に合うか懸念されている。²¹

1-6-3 イオンビーム露光

イオンビームは電子線と同様、収束、偏向できるので電子線露光装置と同様の形態が考えられる。直接描画ではレジストを使用せずイオン注入を直接行うことも考えられる。イオンビームの利点は質量が大きいのでレジストとの相互作用が大きく感度が高い点である。技術的な問題点はイオン源、ビームの制御およびステンシルマスクにある。イオン源としては高輝度でスポット径の小さいビームを引き出すため液体金属イオン源およびフィールドイオン源が開発されている。液体金属イオン源は金属細管の先端に液体金属を供給し、高電界を加えてイオンを引き出すものである。フィールドイオン源はガスを電極先端に低温で物理吸着させて供給、放出を行うものである。ヨーロッパでは 1998 年、米国を加えた国際開発プログラム MEDEA がスタートし、当面 100 nm レベルの形成を目指したプロセス開発機の製作を進めている。図 1-14 は同装置の立体図で、1/4 縮小露光を行う静電式レンズ系が組み込まれている。

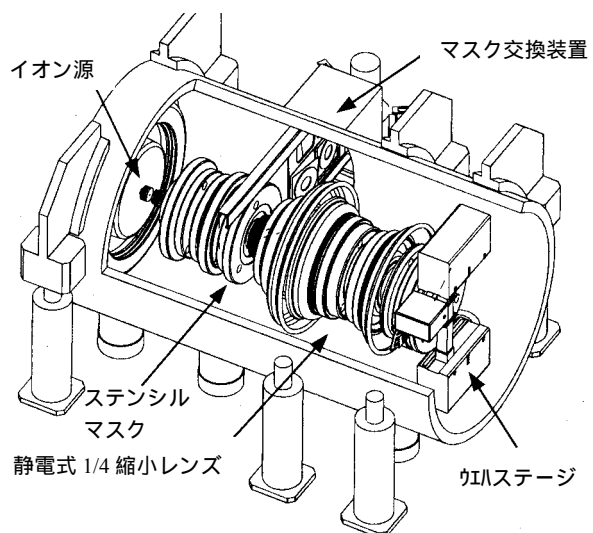


図 1-14 イオンビーム露光装置²²

1-7 研究の成果

本論文は放射光による X 線リソグラフィシステムに用いられる各機器、材料について、これらに要求される特性および機器の改良と効果について報告・考察する。また、X 線リソグラフィの限界の拡張について新しい露光方式を提案し、その性能を検証するものである。本論文は 6 章の本文と 2 編の付録から構成される。第 1 章では本研究の背景、リソグラフィ技術の状況全般を述べ、本研究の位置付けを明確にする。第 2 章から第 4 章は X 線リソグラフィの要素機器および材料に関するものである。第 5 章は、微細化に向けての要素機器の改善に関するもので、第 6 章は新しい露光法と

その性能検証に関するものである。研究成果は以下のように要約される。

第1章では、序論として半導体産業におけるリソグラフィ技術の進化の経緯を競合技術の説明と併せて産業史的視点から記述した。

第2章では、半導体工場に導入する小型シンクロトロンの開発に関する成果を記載した。最初に超伝導シンクロトロン AURORA (住友重機械) について、開発内容を詳述した。AURORA は電子軌道直径 1m の世界最小のシンクロトロンで、新しいビーム入射法を開発することにより従来不可能であったマグネットの単体化 (非分割) を実現した。さらに、超伝導の保守性と高コストの問題を解決するため、常伝導により従来の 2 倍の高磁場 (2.7 Tesla) を発生する小型シンクロトロン AURORA-2 の開発を行った結果について述べた。これらの装置の開発により半導体工場に導入可能な超小型シンクロトロンの実用化開発に成功した。

第3章では、放射光を露光ステーションまで伝播するビームラインの新しい設計について記述した。ビームの伝搬効率を高めるには光学系を 1 枚のミラーのみで構成するのが望ましいが、1 枚ミラーではスキャン時に露光形状が変形する問題があり、従来はミラーを 2 枚用いて露光形状の変形および露光分布を補正する方法がとられていた。本研究では 1 枚ミラーの揺動方法を工夫することにより露光形状が一定にできることを理論的に証明し、均一な露光強度分布を得るベリリウム窓の形状を理論計算とシミュレーションにより求めた結果、これまでにない高強度で均一な露光強度を得ることに成功した。次に、ビームラインの弱点であるベリリウム窓が破損した場合の対策について検討し、新しい構造の ADL (Acoustic Delay Line) を提示し、シミュレーション計算によりその有効性を示した。さらに、露光強度分布が均一でも現像後のレジスト線幅が変動する現象について研究し、意図的に露光強度分布に傾斜をつけることにより均一な線幅を得る解決法を示した。これらの成果を基に、新設計によるビームラインを試作し、世界最強の露光強度を得たことにより設計理論を実証した。

第4章では、X 線マスク上をビームがスキャンする際、マスクの温度上昇による熱歪が転写性能に及ぼす影響について検討を行った。円弧状断面のビームがマスク上を移動する際のマスクの二次元熱歪について有限要素法を用いて精密な計算を行った。最終的にマスクの熱歪が転写誤差に及ぼす影響は、実用上問題ないことを証明した。

第5章では、パターンの微細化に対応するため、X 線リソグラフィの各システム機器仕様の最適化について、解像性能の検討を行った。露光スペクトルを個々の光子エネルギーに分解して線量分布のコントラストを分析し、全体スペクトル改善の方向付けを行い、各システム機器に対し設計仕様の最適化を図った。これらの検討結果を織り込んでシミュレーションを実施した結果、従来の X 線露光方式 (等倍露光) の場合でも少なくとも 1 世代のパターン形成限界の拡張が得られることを確認した。

第6章では、従来の X 線リソグラフィの限界をさらに拡張する新しい露光プロセスの研究結果を示した。一次元パターンよりも形成条件が厳しい二次元パターンに対して検討を行った。従来の等倍露光に関しては、多重露光を併用することにより許容ギャップが拡大できることを見出した。新しい露光プロセス用マスクとして、2 種類

のマスク（拡大パターンマスクと干渉スリットマスク）を提案した。イメージ縮小効果の原理を理論的に解明し、多重露光を用いた稠密度パターン形成の計算結果を示した。これらのマスクを用いて連続描画を行う方法を提案した。連続描画の適用例、問題点とその解決法、生産性の比較、連続描画用ビームラインについて夫々検討を行い、適用条件を明確化した。次に、半影ボケの影響について、光源の広がり、マスクの熱歪、レジスト内の二次電子散乱効果に対して理論的検討と計算を行った。これらの検討結果を用いて各種露光法の限界を二次元パターンに対しシミュレーションにより計算し、結論として線幅 18 nm までのパターン形成が可能であることを示した。

巻末の付録 1 では、本研究の計算基盤となる独自に開発したシミュレーションプログラム、BLOD、BLVAC および BLEX について説明した。また付録 2 では、各競合露光法とのコスト比較を行い、X 線リソグラフィがコスト面でも最も優位であることを定量的に示した。

引用文献

1. E. Spiller (1993) Early history of X-ray lithography at IBM, *IBM J. Develop.* **37**(3), pp 291–297
2. D. L. Speers and H. I. Smith (1972) X-Ray Lithography—A New High-Resolution Replication Process, *Solid State Technol.* **15**, pp21-26
3. 垂井康夫 (1982) ICの話 日本放送出版協会
4. 佐々木元 他 (1986) 超LSIの話 日本電気文化センター
5. 日経ビジネス (1989) 7月31日号 P104
6. T. Hori (1999) Ten years of compact synchrotron light source AURORA, *Proceedings of the Particle Accelerator conference*, New York, pp2400-2402
7. E. Toyota (1998) Design study of compact beam lines for x-ray lithography, *J. Vac. Sci. Technol.*, **B16**, pp3462-3465.
8. S. Hirose, T. Miyatake, X. Li, E. Toyota, M. Hirose, K. Fujii, and K. Suzuki (2000) Performance of compact beamline with high brightness for x-ray lithography, *J. Vac. Sci. Technol.*, **B 18**, pp2986-2989.
9. J. Silverman (1998) A white paper for the 1998 Sematech Next Generation Lithography Workshop. (非公開)
10. T. Miyatake, X. Li, S. Hirose, T. Monzen, K. Fujii, and K. Suzuki (2001) Compact synchrotron radiation lithography system for 70 nm device manufacturing, *J. Vac. Sci. Technol.*, **B 19**, pp2444-2447.
11. 小田政利、嶋田勝、土沢泰、内山真吾、大久保高志 (2001) 高精度 X 線マスクの開発 *NTT R&D* **50**, pp414-423.
12. Y. Vladimirovsky, A. Bourdillon, O. Vladimirovsky, W. Jiang, and Q. Leonard (1999) Demagnification in proximity x-ray lithography and extensibility to 25 nm by optimizing Fresnel diffraction, *J. Phys. D* **32**, ppL1-5.
13. E. Toyota, T. Hori, M. Khan, and F. Cerrina (2001) Technique for 25 nm x-ray nanolithography, *J. Vac. Sci. Technol.*, **B 19**, pp2428-2433.
14. E. Toyota and M. Washio (2002) Extendibility of proximity x-ray lithography to 25 nm and below, *Proceedings of the 46th International Conference on Electron, Ion and Photon Beam Technology and Nanofabrication, California*.
15. A. Yen, S. Yu, J. Chen, C. Chen, T. Gau, and B. Lin (2001) Low- k_1 optical lithography for 100 nm logic technology and beyond, *J. Vac. Sci. Technol. B* **19**, pp2329-2334.
16. 羽入勇 (1994) Sub-0.2 μm 光露光技術、放射光への半導体への応用技術研究委員会第二回公開セミナー資料, p8.
17. 岡崎信次 (1998) 0.13 ミクロンの壁を破るリソグラフィ技術、*ISS Japan* セミナー資料, p14-3.
18. C. Martin, W. Semke, G. Dicks, R. Engelstad, E. Lovel, J. Liddle, and A. Novembre

(1999) Mechanical and thermal modeling of the SCALPEL mask, *J. Vac. Sci. Technol. B* **17**, pp2878-2882.

19. S. Kawata, N. Katakura, S. Takahashi, and K. Uchikawa (1999) Stencil reticle development for electron beam projection system, *J. Vac. Sci. Technol. B* **17**, pp2864-2867.

20. T. Utsumi (1999) Low energy electron-beam proximity projection lithography: Discovery of a missing link, *J. Vac. Sci. Technol. B* **17**, pp2897-2902.

21. 堀田和明 (2001) EUV 光源、電気学会第 12 回次世代リソグラフィ技術調査専門委員会での講演.

22. R. Kaesmaier, H. Loeschner, G. Stengl, J. Wolfe, and P. Ruchhoeft (1999) Ion projection lithography: International development program, *J. Vac. Sci. Technol. B* **17**, pp3091-3097.

第2章 小型放射光源の開発

2-1 緒言

X線リソグラフィ用光源としては当初、医療用X線管が考えられたがパワーが不十分であることからシンクロトロン放射光（SR光）が検討されるようになった。シンクロトロン放射光とは、高エネルギーで周回する電子から軌道の切線方向に放射されるX線を主成分とする指向性の強い光である。電子シンクロトロンを運転した際に観測されたので、シンクロトロンの名が付けられているが、日本では単に放射光（またはSR光）と呼ばれることが多い。1970年代にIBMが初めてX線リソグラフィの実験に用いたドイツ（ハンブルグ）の7.5 GeVの電子シンクロトロン DESY¹は核物理研究用に建設された巨大なものであった。当時の加速器技術では工場に導入されるようなX線リソグラフィ専用シンクロトロンの実現は困難視されていた。1970年代末からX線リソグラフィ専用シンクロトロンの開発の必要性が唱えられ、世界的に研究開発が進められた。一方で、シンクロトロン以外の点光源の開発研究も精力的に行われた。

本章では、これらの開発の歴史的経緯を最初に説明し、次に著者が開発に携わった小型シンクロトロンの開発¹⁹について業界の動向と併せて記述する。シンクロトロン放射光の物理的計算の詳細については本章では省略し、末尾付録1に掲載したシミュレーションコード開発の説明に含めた。

2-2 点光源と放射光

半導体産業界のX線リソグラフィシステムに対する当初のイメージは、従来用いられている光縮小投影露光の縮小レンズ系を取り除き、光源をX線管のような点光源に取り替えればよいと考えられていた。X線管は図2-1に原理を示すように電子線を金属ターゲットに当てて制動X線を発生させるものである。ターゲット材料と発生する特性X線の波長を表2-1に示す。（（）内は原子軌道を示す）

表 2-1 ターゲット材料と特性X線

ターゲット材料	Al	Si	W	Pd
特性線波長 (nm)	0.83 (K)	0.71 (K)	0.7 (M)	0.44 (L)

X線管の欠点は発生パワーが小さいことである。X線の露光強度は距離R(図2-1)の二乗に反比例する。実用化には50W/cm²程度の露光強度が必要になるが、過去の実験例ではその1%程度の強度しか得られていない。² ターゲットの熱負荷を軽減する

ため回転ターゲットを用いる等、多くの試みがなされたが実用レベルに到達するに至らず、現在では小規模な実験用に用途が限定されている。X線管に代わる点光源として、高温プラズマから発生するX線の利用が考えられる。この原理は図2-2に示すように高速で開閉する弁から円筒状に噴出した稀ガス（NeまたはKr）を放電によりプラズマ化させると同時に放電の電磁力により軸方向に圧縮し高温プラズマ（内発プラズマ）を発生させるものである。³

高温プラズマを発生させるには固体にレーザーを注入してプラズマを発生させる（レーザー励起プラズマ）方法も開発されている。このような内発プラズマおよびレーザー励起プラズマの発生パワーはX線管よりもはるかに改善されたが、依然として実用レベルに到達しておらず、パルス数の向上および電極部の損耗とデブリの発生が問題点として残されている。内発プラズマ光源で商品化されたものはまだないが、レーザープラズマ光源では米国では国家的支援のもとにJMAR社が商品化計画を発表している。⁴

電子シンクロトロンを用いた放射光（Synchrotron Radiation）は上記点光源と異なり、光強度については理論的に実用可能とされていた。しかしながら図2-3にレイアウトの例を示すように、1台の光源（シンクロトロン）が十数台の露光装置（ステッパ）に対応することになるので、光源が故障した場合の操業リスクが大きくなる。またシンクロトロンは点光源に比べ巨大で高価な装置であるので経済的に見合うような装置の小型化と低コスト化が実用化の当面の目標とされてきた。

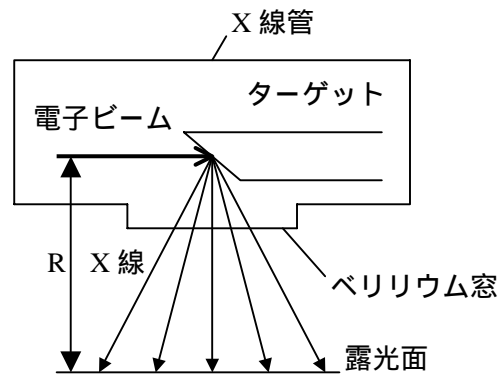


図 2-1 X線管の原理

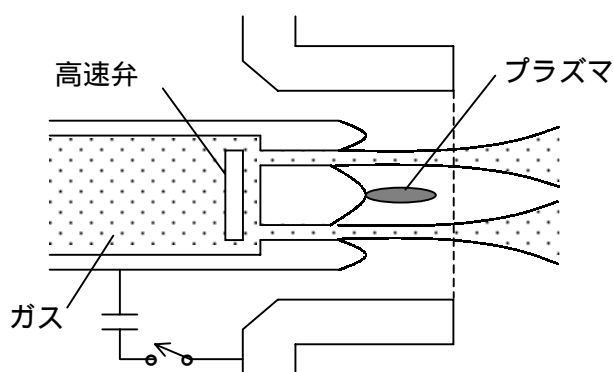


図 2-2 プラズマ X線源の原理

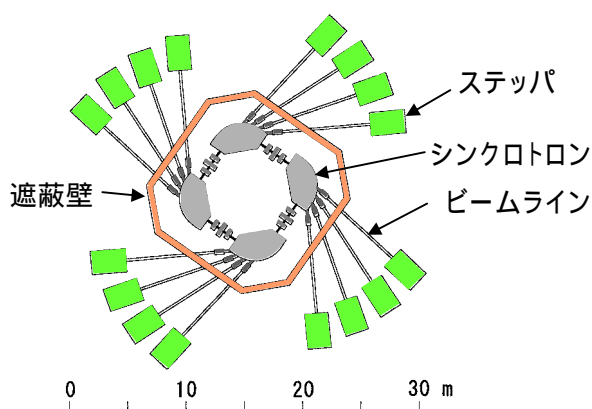


図 2-3 放射光施設レイアウト例

2-3 超小型放射光源の開発

2-3-1 開発状況全般

放射光による物性研究は 1960 年代までは核物理研究用の巨大加速器に寄生する形で行われていたが、1970 年代には世界各地に放射光研究専用のシンクロトロンが建設されるようになった。日本では筑波にフォトンファクトリーと呼ばれる 2.5 GeV シンクロトロンが建設された。これらのシンクロトロンは巨大(直径 60m)で、最初に X 線リソグラフィを研究し始めた研究者達は、これらの巨大装置にビームラインを設置して基礎研究を行っていた。したがって、1970 年代末に X 線リソグラフィの必要性が高まった時期には、工場に導入可能な小型シンクロトロンの実現が最も緊急で重要な問題と位置付けられていた。

表 2-2 世界の X 線リソグラフィ用小型シンクロトロン⁶

種類	国名	機関名	装置名	エネルギー (GeV)	磁場強 度 (T)	軌道周 長 (m)	臨界波 長(nm)
常 伝 導	日本	ソテック		1.0	1.2	45.7	1.55
	日本	NTT	NAR	0.8	1.44	52.8	2.02
	日本	IHI	LUNA	0.8	1.33	23.5	2.2
	米国	U. Louisiana	CAMD	1.2	1.37	55.2	0.95
	日本	住重	AURORA-2 ¹⁰	0.7	2.7	9.0	1.4
超 伝 導	日本	NTT	Super-ALIS	0.6	3.0	18.8	1.73
	日本	住重	AURORA	0.65	4.33	3.1	1.02
	日本	住電工	NIJI-	0.62	4.1	15.5	1.2
	日本	三菱電機 ¹¹		0.8	4.5	9.2	0.65
	英国	Oxford	HELIOS	0.7	4.5	9.6	0.84

この要請に応じて表 2-2 に示すように多くのシンクロトロンが開発された。最初に構想を発表したのはドイツ Fraunhofer 研究所の COSY 計画で、真円軌道の単体超伝導電磁石を用いるものであった。しかし、真円軌道に電子を入射する方法が解決できず、COSY 計画は結局実現しなかった。上表に示すように、建設されたシンクロトロンは常伝導型と超伝導型に分類される。常伝導型では住友重機械の AURORA-2 を除いては、技術的に新規性は乏しい。小型化の目安としては、軌道周長で見るのが明快で、常伝導型では AURORA-2 が断然小さいことが判る。超伝導型についても住友重機械の AURORA が圧倒的に小さい。したがって、著者がリーダーとして開発に携わった AURORA および AURORA-2 について報告することで小型光源に関する説明の目的は十分達成されるはずである。

2-3-2 超伝導シンクロトロン AURORA の開発

前述のようにシンクロトロンを可能な限り小型化することが開発当初の目的であった。そのための手段と付帯する問題点について述べる。

(1) 基本構想

従来の研究用光源では入射器、シンクロトロン、蓄積リングの3台の加速器から構成される例が多かった。この場合はシンクロトロンで最大エネルギーまで加速して蓄積リングに入射する方法がとられる。今回はシンクロトロンと蓄積リングの2台の加速器を1台のシンクロトロンで兼用することで小型化をはかった。シンクロトロンは小型化の究極の姿として超伝導単体磁石により構成するものとした。入射器も小型化をはかるためレーストラック型マイクロトロンを採用した。図 2-4 に完成した AURORA 全体の写真を示す。

臨界波長 λ_c を 1 nm 近辺に設定することから、電子エネルギー $E(\text{GeV})$ 、偏向半径 $\rho(\text{m})$ 、磁場強度 $B(\text{T})$ が次式により求められる。⁵

$$\lambda_c = 0.59 \frac{\rho}{E^3} = 1.86 \frac{1}{E^2 B} \quad (2-1)$$

軌道半径を 0.5m に決定し、順次、表 2-3 に示すような基本仕様を決定した。

表 2-3 AURORA の主要仕様

項目	数値
エネルギー	650 MeV
ビーム電流	300 mA
臨界波長	1.02 nm
ビーム寿命	>24 h
磁場強度	4.34 T
曲率半径	0.5 m
入射エネルギー	150 MeV
RF 周波数	190.86 Hz
RF 電圧	120 kV
真空度	3×10^{-10} Torr
ビームサイズ	$1.2 \times 0.14 \text{ mm}^2$



図 2-4 AURORA と入射用マイクロトロン

(2) 円形電磁石の開発

単体電磁石を使用したためシンクロトロンの収束方式は弱収束型になる。弱収束型は磁極間のスペースを大きくできるので好都合である。また、強収束型と異なり、蓄積ビームの形状を円軌道上で一様に保つことができるのでビームの取り出し、利用に有利である。磁石形状は単純な軸対称、上下対称で、中立面に設けたドーナツ状の真空槽内に軌道系機器が収納される。上下一対の超伝導コイルはヨーク材の上下にそ

それぞれ炭素繊維強化プラスチックの支持材で固定されている。ヘリウム液化機的能力は $25 \text{ l/Hr} \cdot 4.5\text{K}$ である。磁石の上半分はリフトにより持ち上げられるので真空槽は容易に取り出すことができる。ヨーク材は超伝導コイルを囲む構造になっているのでコイル間に働く力が緩和され、支持材が小型化されることにより熱侵入負荷を軽減している。ヨーク材は全体で 120 トンの重量があるが、半導体工場内での保守を考慮して 1 ピース 5 トン以下に分割されている。また、ヨーク材は放射線シールドの役目を兼ねている。電磁石の断面形状を図 2-5 に示す。

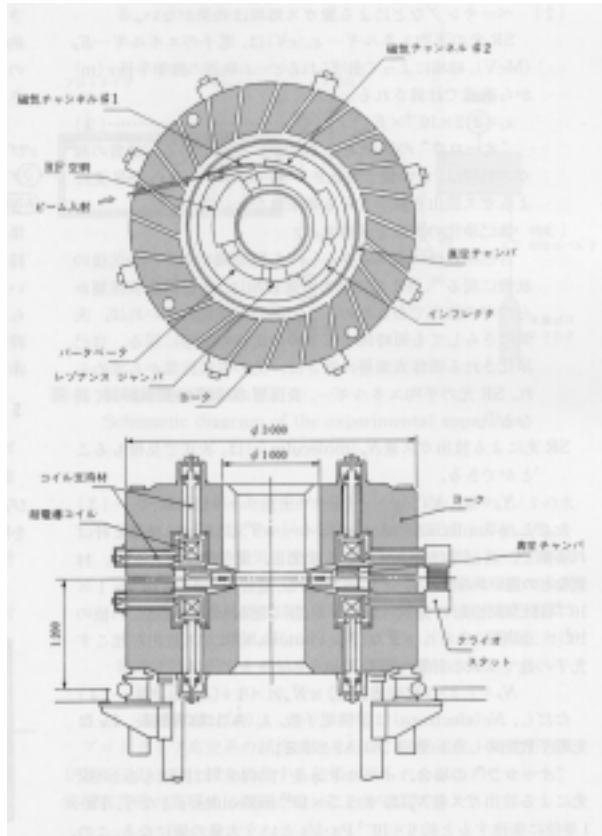


図 2-5 AURORA の断面図

(3) 新しい入射機構の開発

真円軌道を実現するための最も大きい問題は電子ビームの入射方法である。入射エネルギーは低い方が望ましいが、エネルギーが低いとタウチェック寿命が短くなり、入射・加速する間にビームが消滅するので、入射エネルギーとして 150 MeV が必要になる。入射ビームを蓄積軌道に切り替えるには高速でかつ強いパルス磁場を発生する必要があるが、1 回の電子周回時間を 10 ns 以内に行うことは不可能である。そこで新しい入射方法としてベータトロン振動を利用することを考えた。AURORA では入射時に中心軌道のまわりに $n=0.7$ (n は磁場勾配) となる弱収束安定軌道をつくっている。そのやや外側と内側に $n=0.75$ となる領域をつくり、2 回転して閉じる軌道を発生させ、その軌道に沿って電子を入射する。⁷ 図 2-6 はその様子を誇張して示したもので、インフレクタ電極から入射したビームは 2 回転閉軌道の周りを振動しながら回転する。電子が数十回転した後インフレクタ電極に衝突する前にパターベータと呼ばれる 8 極パルス磁石の磁場を操作し n 値を 0.7 に切り替え、電子を中心軌道に導く。この操作を繰り返すことにより、入射した電子は逐次中心軌道に蓄積する

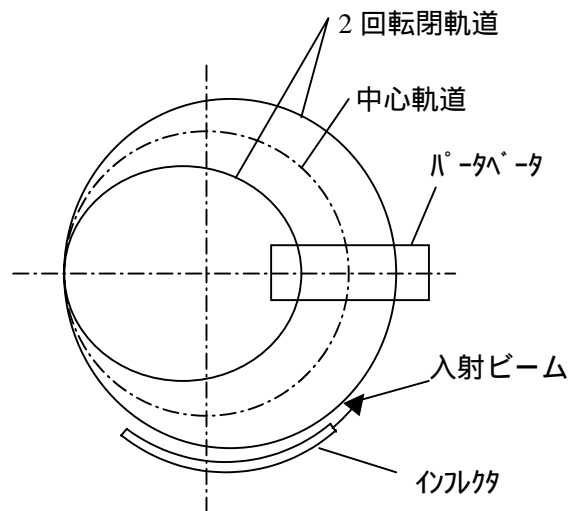


図 2-6 1/2 共鳴入射法の原理

ことができる。元来、加速器の設計では共鳴条件を避けることが鉄則であるが、この場合は共鳴状態を積極的に作り出すことにより強磁場中でのビーム入射を可能にしたもので、¹⁴1/2 共鳴入射法として加速器技術の分野では高く評価されている。⁸ この入射用機器の具体的設計には著者の考案した設計機構（特許⁹）が使用されている。

(4) 超高真空システムの開発

電子が周回する真空槽には前述の入射用機器をはじめ高周波加速空洞、ビームモニタ装置などがぎっしり詰め込まれている。外部に取り出される以外の放射光は真空槽に設けたビームダンプに当たりガスを放出する。この放出ガスを排気し真空槽を 1.3×10^{-7} Pa 以下に保つためには 46000 l/s 以上の大排気速度をもつ真空ポンプが必要になる。従来の外部取り付け型ポンプでこのような大排気量を実現するのは不可能である。そこで、クライオソープションポンプを内蔵した多室構造の排気システムを開発した。図 2-7 はドーナツ状真空槽の片側の断面を示す。ビームダクト内を周回する電子から右方向に放射される光は複数のバッフルプレートのスリットを通過して外部に取り出されるか、真空槽内のビームダンプに吸収され大量のアウトガスを放出する。真空槽の上部にはクライオソープションパネルが設けられ、アウトガスは 90K シェブロンおよび 10K のパネルに吸着する。¹⁸ 図 2-8 は真空槽の内部の写真を示す（クライオソープションパネルは取り外されて見えない）。

(5) 入射用マイクロトロンの開発

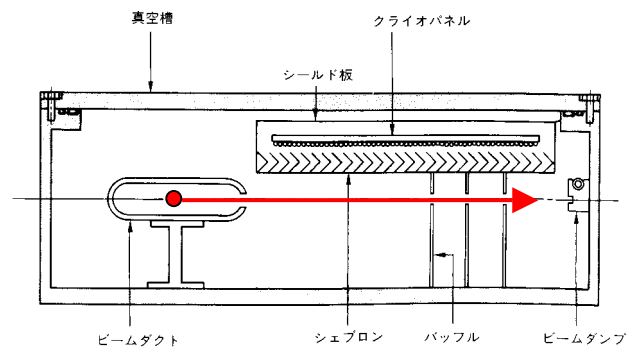


図 2-7 AURORA の真空槽断面

図 2-8 AURORA 真空槽内部

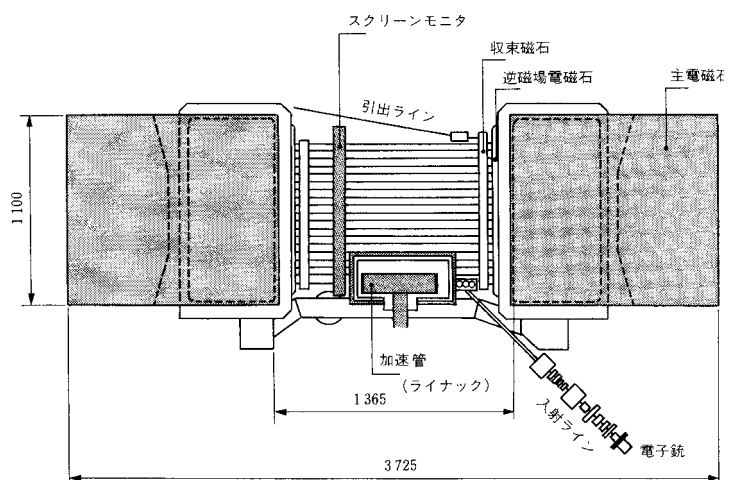


図 2-9 入射用レーストラック型マイクロトロン

シンクロトロンへの入射器として従来は主にライナックが用いられていた。AURORA に必要な入射エネルギーは 150 MeV であり、ライナックを用いると長さが十数mになるので小型化のためレーストラック型マイクロトロンを採用した(図 2-9)。このマイクロトロンは全長は 3.8 m である。¹³ 当時世界最大のマイクロトロンはエネルギーはウイスコンシン大学の 100 MeV であったので、今回開発した 150 MeV マイクロトロンは現在でも入射用マイクロトロンとしては世界最大である。加速は 6 MeV のライナックで 25 回加速することにより 150 MeV まで加速する。1 回目の加速で偏向電磁石から U ターンした電子は、エネルギーが低いのでライナックをかすめて通過することができない。そこで偏向電磁石の手前に逆転場電磁石を設け、電子を再び逆方向からライナックに戻し、逆方向にさらに 12 MeV まで加速することによりライナックをクリアする方法をとっている。(このマイクロトロンは当初、ウイスコンシン大学と共同開発する計画であったが、日米半導体摩擦の影響で白紙に戻り、結局筆者らが単独で開発することになった。ウイスコンシン大学とはこれが縁となり、その後の X 線リソグラフィの協力関係が築かれることになる。)

なお、AURORA は 1989 年に完成し、社内で実験に用いられた後、1994 年、立命館大学 SR センターに移設され放射光の利用研究に使用されている。

2-3-3 常伝導シンクロトロン AURORA-2 の開発

AURORA の開発は成功裏に終了し、光源の小型化、商品化の要求に応えることができた。1990 年代に入ると光源に対する要求は、より現実的なものになり、操業の稼働率、コストの低減が重要視されるようになった。AURORA に関しては、超伝導装置の保守性が新しい問題点として浮上してきた。超伝導コイルは断熱真空槽(クライオスタット)内に収納されているので、故障した場合はクライオスタットを切断してから取り出さなければならない。それらは液体ヘリウム温度(4.2°K)に保たれているので、修理前後の昇温、再冷却だけで最低数日を費やすことになる。また、大型ヘリウム液化機(輸入品)の保守性(コストを含め)にも問題があることがわかった。しかし、常伝導磁石の磁場強度は通常 1.3 テスラであり、小型化を図るのは困難であった。

そこで、常伝導磁石で超伝導に近い磁場の発生が可能な偏向電磁石の検討を行った。通常、鉄ヨーク材は 2 テスラで飽和するが、ヨーク形状を工夫することにより磁極間に過飽和状態をつくり出し、2.7 テスラの磁場強度が得られることが明らかになった。この値は

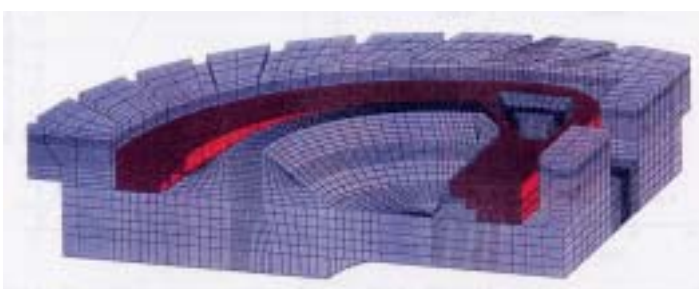


図 2-10 偏向電磁石(1/4 断面)の磁束密度

通常の常伝導シンクロトロンによる磁場強度の2倍に相当する。三次元磁場計算コード TOSCA により計算した磁束の状況を図 2-10 に示す。¹⁰ また、通常の磁場強度 1.35 テスラと AURORA-2 の 2.7 テスラの場合の発生光子数スペクトルを図 2-11 に比較する。¹⁰ 光子エネルギー 1 keV 以上でスペクトルに大きい差があることがわかる。小型化をはかるため電子エネルギーは低めの 700MeV におさえた。その結果、表 2-4 に示すように臨界波長 (1.4 nm) がやや大きいが、ビームラインを工夫することにより露光部で短波長化するめどをつけた。また、露光パワーを確保するため、蓄積電流を 500 mA に設定した。(試運転の結果、最大 1 A 蓄積できることを確認した。)

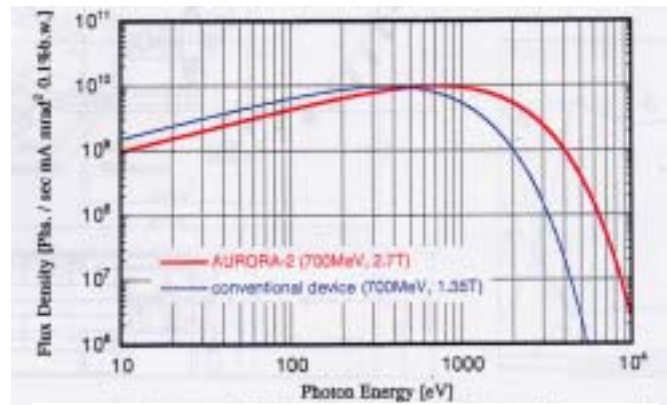


図 2-11 通常の磁石とのスペクトルの比較

表 2-4 AURORA-2 の主要仕様

項目	数値
エネルギー	700 MeV
ビーム電流	500 mA
臨界波長	1.4 nm
ビーム寿命	>24 h
磁場強度	2.7 T
曲率半径	0.87 m
入射エネルギー	150 MeV
RF 周波数	191.2 Hz
RF 電圧	220 kV
真空度	2×10^{-10} Torr
ビームサイズ	$1.2 \times 0.14 \text{ mm}^2$

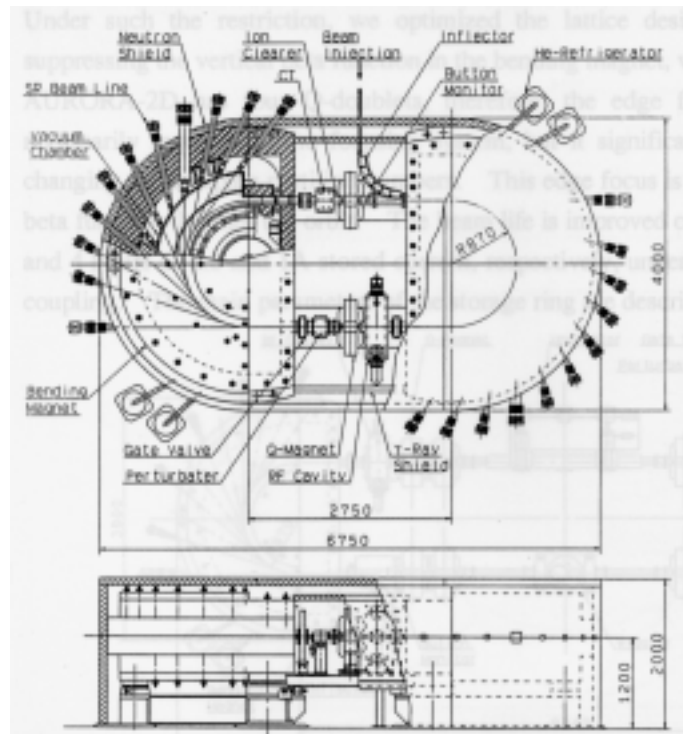


図 2-12 AURORA-2S 断面図

AURORA-2 では磁極間隔が 42mm と狭いので、RF 加速電極は磁極間に設置できない。RF 電極、インフレクタおよび収束用電磁石は 2 台の 180° 偏向電磁石をつなぐ直線部に設置される。入射方法は通常の方法であり AURORA のような新規性はない。入射器には AURORA で開発したマイクロトロンがそのまま使用されている。真空排気系についても AURORA で開発した大排気量クライオソープションパネルが使用されている。全体の断面を図 2-12 に示す。マグネットの形状は図のように外側は放射光の取り出し部とビームの出入り口以外はヨーク材で覆い、内部で発生するガンマ線に対しては自己遮蔽が可能な構造(特

許¹²⁾になっている。中性子線に対しては外側全体をポリエチレン板で遮蔽することにより完全な自己遮蔽を達成している。

図 2-12 では軌道の直線部を極力短くして、強収束用の一連 (singlet) Q 電磁石を配置している。直線部を長くして挿入光源 (ウイグラおよびアンジュレータ) を設置し放射光の多目的研究に利用することも可能である。

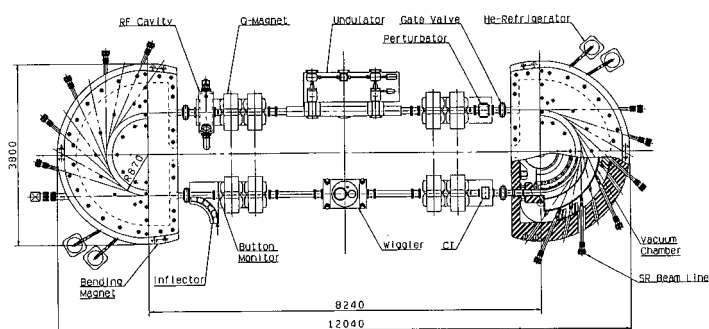


図 2-13 AURORA-2D レイアウト

図 2-13 のように二連(doublet)Q 電磁石と挿入光源を直線部に配置した AURORA-2D も同時に開発した。(前者は後者に対比して AURORA-2S と呼ぶ。)AURORA-2D は広島大学放射光科学センターに設置され、AURORA-2S は住友重機械 (西東京市) に設置され、露光実験に用いられている。

2-4 結言

X 線リソグラフィが有望視された 1980 年代当初は、X 線光源の開発が X 線リソグラフィ実現の鍵とされた。半導体業界からは従来の生産形態の継承が望まれ、点光源の開発が行われたが、光強度増強の問題が依然として解決せず、小型シンクロトロンを用いた放射光源の開発競争が始まった。著者は住友重機械の開発チームリーダーとして、小型シンクロトロンの究極の姿である真円型超伝導シンクロトロン AURORA と入射用マイクロトロンを同時に開発することに成功した。AURORA は現在でも世界最小の記録を保持している。しかしながら、これらの開発を通じて、超伝導シンクロトロンが生産工場に導入するには必ずしも最適の形態でないことが認識され、さらに検討の結果、常伝導磁石を用いて従来の 2 倍の高磁場 (2.7 テスラ) を発生する技術を開発した。この技術を用いて小型常伝導シンクロトロン AURORA-2 を開発し、X 線リソグラフィ用光源として十分実用可能であることを実証した。結論として、当初問題視されていたシンクロトロンの小型化、実用化の課題を世界に先駆けて解決した。

引用文献

1. E. Spiller, D. Eastman, R. Feder, W. Grobman, W. Gudat, and J. Topalian (1976) Application of synchrotron radiation to x-ray lithography, *J. Appl. Phys.* **47**, pp5450-5459
2. 鳳紘一郎 (1984) 半導体リソグラフィ技術、産業図書
3. T. Ueno and J. Sheats (1998) Microlithography Science and Technology, edited by J. Sheats and B. Smith, Marcel Dekker, Inc., pp416-417.
4. D. Fleming (2002) Advances in point source X-ray lithography system, *Proceedings of the 46th International Conference on Electron, Ion and Photon Beam Technology and Nanofabrication*, 28-31 May, Anaheim, USA.
5. 日本物理学会 (1986) シンクロトロン放射 培風館
6. 豊田英二郎、富増多喜夫 (1991) 超伝導 SR リングの開発と現状、日本原子力学会誌, **33**(8), pp 731-736.
7. N. Takahashi (1987) Compact Superconducting SR-Ring for X-Ray Lithography, *Nucl. Instr. and Meth.* **B 24/25**, pp425-428.
8. T. Takayama (1987) Resonance Injection Method for the Compact Superconducting SR-Ring, *Nucl. Instr. and Meth.* **B 24/25**, pp420-424.
9. 豊田英二郎 (1986) 放射光発生装置 特許 2047620 号
10. T. Hori and T. Takayama (1995) "AURORA-2" Compact Advanced SR Ring as an X-ray Source, *submitted to ICSRS-AFSR'95*, Pohang, Korea.
11. 山田忠利 (1993) 三菱電機の超伝導小型 SR リング、放射光. **6**(4), pp77-83.
12. 豊田英二郎 (1994) 電子蓄積リング 特許 2949654 号
13. M. Sugitani (1988) Racetrack Microtron – 150 MeV Injector for Compact SR Ring, *Proc. Of EPAC'88 Rome, Italy June 1988*, pp. 596-598
14. 豊田英二郎 (1994) 超伝導 SR リング「オーロラ」、精密工学会誌 **60**(6)
15. 豊田英二郎 (1992) シンクロトロン放射光等、「マイクロメカニカルシステム」第9章 pp.322-331、フジテクノシステム
16. 桜庭順二、水口忠良、山田俊治、坪井時雄 (1991) 小型シンクロトロン放射光源 “オーロラ” の超伝導磁石、住友重機械技報 39(116) pp. 19-23
17. 高橋令幸、山田広成(1991) 小型シンクロトロン放射光源 “オーロラ” の開発、住友重機械技報 39(116) pp. 2-10
18. 安光直樹、高橋誠 (1991) 小型シンクロトロン放射光源 “オーロラ” の真空系、住友重機械技報 39(116) pp. 29-32
19. 豊田英二郎 (1991) “オーロラ” 特集発行に当たって、住友重機械技報 39(116) pp.1

第3章 高強度ビームラインの開発

3-1 緒言

ビームラインは、シンクロトロンから発生した放射光を露光面上に効率よく伝播する装置である。単に伝播するだけでなく、幅広いスペクトルを持つ放射光から露光に適した波長成分を選別するフィルタの機能を持つ。また、入側でシンクロトロンと接続し、超高真空状態を保ちつつ、出側で露光面の大気圧雰囲気の間を遮断し、かつ放射光を外部に取り出す機能を有する。さらに、ビームの計測・診断および真空排気等の機能を備えている。3-2節でこれらの要求特性を整理し、3-3節で設計例、実施例を紹介する。3-4節以降で著者が開発したビームラインに関して報告する。

3-2 ビームラインの要求特性と構成

3-2-1 光の伝播

ビームラインの第一の目的は、光源からの光を露光面まで効率よく伝播することである。シンクロトロンから発生する放射光は、周回面上には 360° 方向に一様に放射される。伝播効率を上げるには、できるだけ広い角度の光を取り込むことが必要である。一方、垂直面内では放射光は、狭い角度範囲にしか放射されない。X線リソグラフィ用光源では、垂直方向のビームの有効な広がり角はほぼ 1 mrad になるのでビームラインの長さを 10 m とすると、露光面上でのビームの広がり角は 10 mm になる。一方必要とされる露光面積は 25 mm 角から 50 mm 角の範囲であり、このままでは垂直方向の露光幅が不足する。図3-1(a)のように露光面を垂直に上下させて露光領域をカバーする方法が初期に用いられたが、機械的振動のためマスクとウエハの正確な位置合わせが困難であり、現在は用いられていない。同図(b)のように反射ミラーを揺動させて露光面上をスキャンする方法、または同図(c)のように凸面ミラーを用いて光を垂直方向に拡散する方法が考えられている。それ以外に周回ビーム自体に上下振動を与えて照射野を広げる方法も考えられるが⁵ 実用化はされていない。

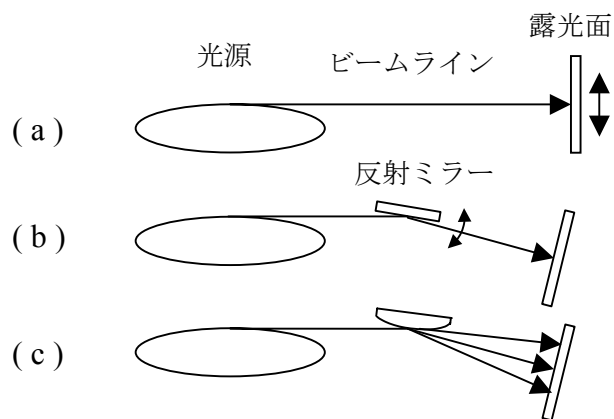


図3-1 露光範囲（垂直方向）の拡大法

電子周回面内では上述のように 360° 方向に放散される光をなるべく多く露光面

に取り込むことが望ましい。図 3-2(a)のように集光機能がない場合は、集光角 θ_a は W/L_a となる。角度 θ_a が大きいと、光路の外側では露光面に対し斜入射になり、マスクパターンが正確に転写されないランアウト効果が発生する。ランアウト効果はマスク形状を予め補正することにより対応できるが、露光中にマスクと露光面間の距離（近接ギャップ）が変動すると転写誤差が発生する。ランアウト角 $\theta_a/2$ は 5 mrad 程度は許容できるので θ_a は 10 mrad になる。図 3-2(b)では 1 枚の集光ミラー M_1 を用いることにより集光角を増加することができる。ミラーと光源点間の距離 L_b が小さいほど集光角度を大きくできる。ミラー M_1 は図 3-1(b)の揺動ミラーを兼ねる。ミラー M_1 を固定し M_1 と露光面との間にスキャン用平面ミラーを追加する場合もある。ミラー M_1 から露光面への光路はランアウト角の許容範囲で傾斜をつけることにより θ_b は 15 mrad 程度まで改善することができる。この場合、露光ビーム断面は湾曲した形状になるので、照射野全体をカバーするにはスキャンストロークを大きくとる必要があり、結果的に露光効率が低下する。図 3-2(c)では集光ミラー M_1 によりさらに広い角度（約 30 mrad）の光を取り込み、第二ミラー M_2 により並行に近いビームに変換する。ミラー M_2 は揺動ミラーを兼ねる。また、 M_2 により露光ビーム断面の湾曲度が和らげられるのでスキャンストロークを小さくすることができる。この方式では最も広い角度の光の取り込みが可能であるが二枚のミラーの反射効率を考慮すると必ずしも優れているとはいえない。ミラー M_2 を固定してビームを拡散する方法（図 3-1(c)参照）もある。

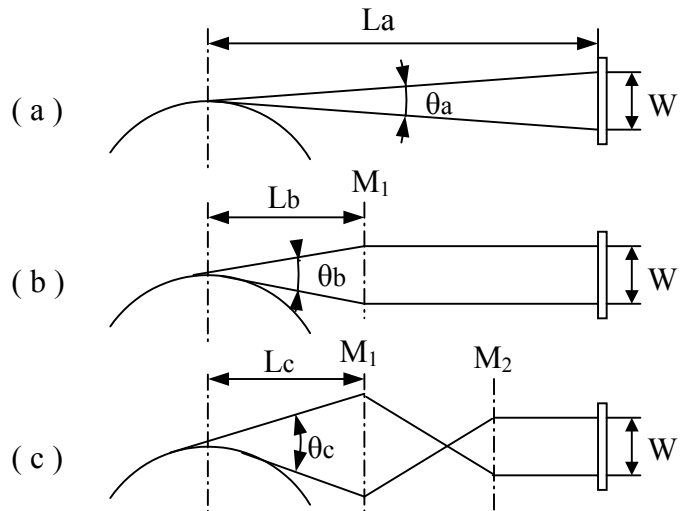


図 3-2 集光範囲の拡大

図 3-2(a)のように集光機能がない場合は、集光角 θ_a は W/L_a となる。角度 θ_a が大きいと、光路の外側では露光面に対し斜入射になり、マスクパターンが正確に転写されないランアウト効果が発生する。ランアウト効果はマスク形状を予め補正することにより対応できるが、露光中にマスクと露光面間の距離（近接ギャップ）が変動すると転写誤差が発生する。ランアウト角 $\theta_a/2$ は 5 mrad 程度は許容できるので θ_a は 10 mrad になる。図 3-2(b)では 1 枚の集光ミラー M_1 を用いることにより集光角を増加することができる。ミラーと光源点間の距離 L_b が小さいほど集光角度を大きくできる。ミラー M_1 は図 3-1(b)の揺動ミラーを兼ねる。ミラー M_1 を固定し M_1 と露光面との間にスキャン用平面ミラーを追加する場合もある。ミラー M_1 から露光面への光路はランアウト角の許容範囲で傾斜をつけることにより θ_b は 15 mrad 程度まで改善することができる。この場合、露光ビーム断面は湾曲した形状になるので、照射野全体をカバーするにはスキャンストロークを大きくとる必要があり、結果的に露光効率が低下する。図 3-2(c)では集光ミラー M_1 によりさらに広い角度（約 30 mrad）の光を取り込み、第二ミラー M_2 により並行に近いビームに変換する。ミラー M_2 は揺動ミラーを兼ねる。また、 M_2 により露光ビーム断面の湾曲度が和らげられるのでスキャンストロークを小さくすることができる。この方式では最も広い角度の光の取り込みが可能であるが二枚のミラーの反射効率を考慮すると必ずしも優れているとはいえない。ミラー M_2 を固定してビームを拡散する方法（図 3-1(c)参照）もある。

3-2-2 反射ミラー

ミラーの用途は前述のように光の収束・発散効果を利用して光を伝播することと、後述するように X 線リソグラフィに不適な短波長成分を吸収・除去することである。ビームラインに使用されるミラーの幾何学的形状は、平面ミラー、円筒ミラー、トロイダルミラー、楕円面ミラー、その他の非球面ミラー等に分類できる。平面ミラーは、図 3-2(b)においてミラー M_1 と露光面との間に揺動ミラーとして挿入されるケースまたはスペクトル変換等特別な用途以外には使用されない。トロイダルミラーは、図 3-3 のよ

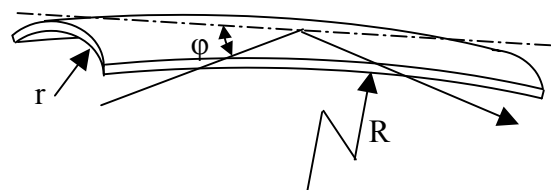


図 3-3 トロイダルミラー

うに円筒ミラーの中心軸をさらに湾曲させたものである。トロイダルミラーの特徴は、水平面内(周回軌道面)および垂直面内で収束・発散作用を持つことができることと、入手が比較的容易なことからビームラインには最も広く用いられている。図の小半径 r はサジタル半径、 R はメリディアン半径(子午面半径)と呼ばれる。楕円面ミラーも広く用いられるが、ビームラインに使用される場合はトロイダルミラーと実質的な差は殆どない。

ミラーの反射率の理論的詳細については巻末付録 1 に記載する。ミラー表面の材質としては Au, Pt, 等の重金属が一般に使用される。これらは Si 結晶、熔融水晶 (SiO_2)、銅合金のような熱伝導性と加工性に優れた母材の表面にコーティングされる。反射率は光子エネルギー(または波長)と入射角および表面粗さに大きく依存する。図 3-4 は Au ミラーのエネルギー、覗き角 (90° -入射角)と反射率の関係を示す。図のように、反射率は光子エネルギーが 2.2 keV (M_V 吸収端)で急に減少する。また覗き角の減少に対しても敏感である。図 3-5 に覗き角 1.2° の場合の光子エネルギーと反射率の関係を示す。このように反射ミラーは高エネルギーの光子(短波長 X 線)を吸収するフィルターの作用を行う。

3-2-3 ビーム取り出し窓

真空中から大気圧中に放射光を取り出す隔壁材料としてベリリウム箔が使用される。通称ベリリウム窓とも呼ばれている。ベリリウムは原子番号が小さいので X 線を透過しやすいばかりでなく、剛性率が 300 GPa と機械的強度に優れ、かつ熱伝導性が良好である。取り出し窓に使用されるベリリウム箔の厚さは通常 $10 \sim 40 \mu\text{m}$ である。図 3-6 は厚さ $20 \mu\text{m}$ のベリリウム箔の透過率を示すもので X 線を高エネルギー部で透過し低エネルギー部で吸収・遮断する。放射光スペクトルの中で 1 keV 以下の光は回折作用が大きく、解像性を低下させるので、ベリリウ

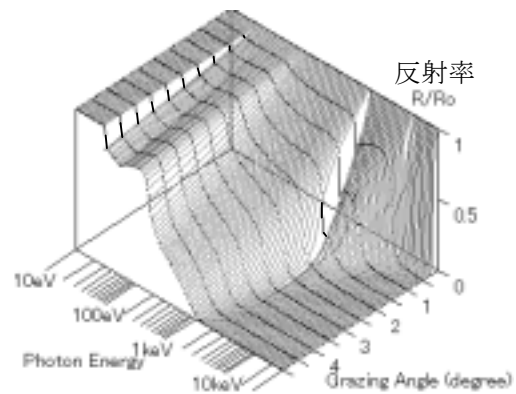


図 3-4 Au の反射率 (表面粗さ 0.5 nm)

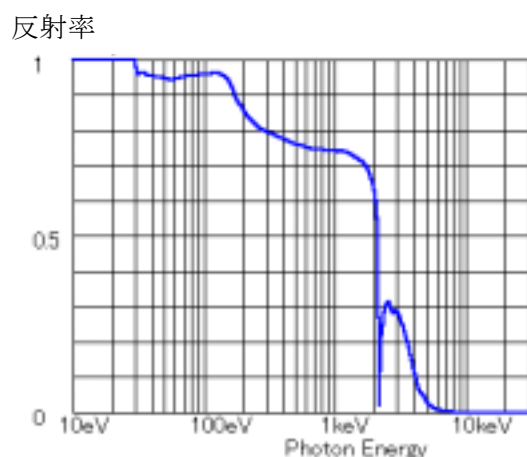


図 3-5 Au ミラーの反射率
覗き角: 1.2° , Pt ミラー (粗さ 0.5 nm)

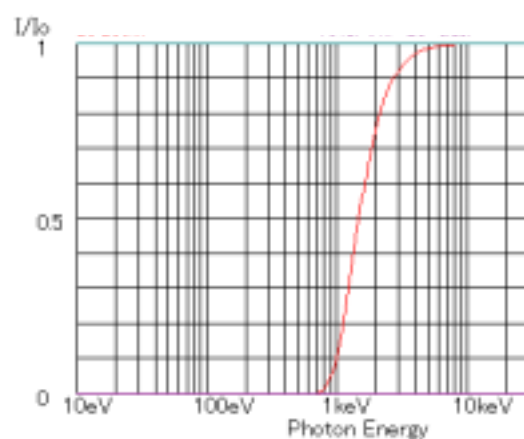


図 3-6 Be の透過率 (厚さ $20 \mu\text{m}$)

ム箔を用いて低エネルギー光子を除去する。

ベリリウム窓は大気との差圧に耐えられる設計でなければならない。ベリリウム箔の破断強度は 0.5 GPa (50 kg/mm²)であり、設計応力としてその半分 0.25 GPa (25 kg/mm²)の値が許容されることが実験的に知られている。² まずベリリウム箔を平板のまま使用する可能性について検討する。周縁を固定した薄板円板を想定すると最大曲げ応力 σ_{max} は次式で与えられる。³

$$\sigma_{max} = \frac{3}{4} \frac{pr^2}{t^2}. \quad (3-5)$$

ここで、 p は圧力差、 r は円板半径、 t は板厚である。上式に $p=1 \times 10^{-2}$ kg/mm² (1 気圧)、 $t=40$ μ m、 $\sigma_{max}=25$ kg/mm² を代入すると $r=2.3$ mm となり、平板のままでは使用できないことが分かる。ただし、圧力差のない構造では、もちろん使用可能である。通常的设计では、図 3-7 のように円筒状に湾曲させてベリリウム箔に発生する張力によって差圧に耐える構造にしている (円筒軸は水平方向)。この場合の引張り応力 σ_T は、

$$\sigma_T = \frac{pR}{t}, \quad (3-6)$$

として表される。上式で $p=1 \times 10^{-2}$ kg/mm²、 $t=20$ μ m、 $\sigma_{max}=25$ kg/mm² を代入すると $R=50$ mm となり十分実用可能なことがわかる。ビームが中心面から上下にそれると、ベリリウム箔を透過する厚さが変化するので露光強度が変化する。したがって、ビーム断面が直線状になる光学系が望まれるが、このことは光学設計に著しい制約をもたらしていた。後述するように、著者の設計では湾曲円筒軸を垂直方向に配置し、透過厚さの変化を強度の均一化に積極的に利用している。

ベリリウム箔は低エネルギー光子を吸収する結果、温度が上昇し、強度が低下する。実験によると 300°C を超えると剛性が急速に低下する。⁴ また、雰囲気ガスの電離イオンと結合して化学変化が発生するので、温度上昇を 200°C 以下に抑えるのが設計の目安である。

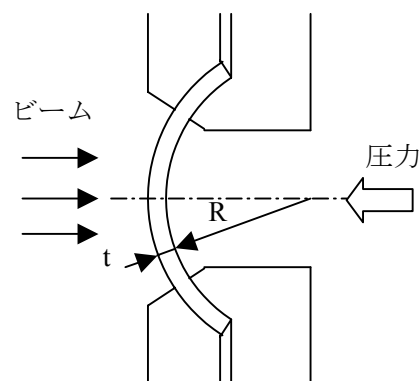


図 3-7 ベリリウム窓の構造

3-3 ビームラインの実施例

前章（光源）で述べたように、全世界に多くのシンクロトロンが建設され、それぞれに複数のビームラインが建設されている状況からみて、過去に建設されたビームラインは数十本になると推測される。これらの中で露光装置と接続し露光実験結果が報告されているビームラインを表 3-1 に掲げ、簡単に説明する。

表 3-1 X 線リソグラフィ用ビームラインの代表例

No.	設置者	全長 (m)	取込角 (mrad)	ミラー形態	Be 厚さ (μm)	露光強度 $\text{mW}/\text{cm}^2/100\text{mA}$
①	IBM, ALF	12	11.5	1 枚パラボロイドミラー	25	4
②	ウイスコンシ大	9	25	2 枚トロイダルミラー	13	
③	NTT	10	35	2 枚トロイダルミラー	25	5
④	富士通	8	11	1 枚トロイダルミラー	25	
⑤	三菱電機	10	35	2 枚回転楕円体ミラー	20	
⑥	CANON	11	25	2 枚非球面ミラー	20	
⑦	住重	5	30	1 枚トロイダルミラー	20	10

① IBMのビームライン⁶

光源 Helios を使用し実用性を早期に具体化したビームラインである。ミラーは固定されており、ステップがマスクとウエハを上下駆動してスキャンする。反射ビーム断面は湾曲形状になるので、半円筒状の Be 箔を透過させるためにはビーム断面形状に制約があり、収束力に制約がある。その後建設されたビームラインでは第 2 ミラーとして平面ミラーを設け、それを上下動させることにより光をスキャンしている。

② ウイスコンシン大のビームライン^{7,8}

ウイスコンシン大では、光源に Aladdin と呼ばれる中型常伝導シンクロトロン (1 GeV) を使用し、X 線リソグラフィ用の各種実験用に数本のビームラインを建設している。表記のものは ES-5 と呼ばれるもので 2 枚のトロイダルミラーを用いた標準的な設計である。

③ NTTのビームライン^{9,10}

NTT が自社に建設した超伝導シンクロトロン Super-Alis に接続されている。トロイダルミラーの水平、垂直焦点をずらして非点収差光学系を形成し、露光面でのビーム形状を鷗翼状にして Be 窓を透過しやすい形状にしているのが特徴である。また、水平方向の露光強度を均一にするため、Ta 膜上にネガレジストを塗布し、露光、エッチングすることにより Ta の厚さの変化による補正フィルターを作成し、均一性を大幅に改善したことが報告されている。⁹

④ 富士通のビームライン¹¹

NTT の常伝導シンクロトロン NAR に接続されている。1 枚トロイダルミラーを

用いてスキャンを行っている。Be 窓の設計詳細は不明であるが、トロイダルミラーのメリディアン半径の焦点を露光面の手前に置くことにより露光幅 40mm で 3%(3 σ)の露光強度均一性が得られている。しかし大きい取込角がとれないことが問題である。

⑤ 三菱電機のビームライン^{12,13}

三菱の超伝導シンクロトロンに接続されている。2枚の回転楕円体を使用することにより大きい取込角が得られている。2枚のミラーは固定されており、露光面上に若干湾曲した像を形成する。マスクとウエハを上下駆動することにより 25 x 25 mm²の露光領域を得ている。

⑥ CANONのビームライン¹⁴

上項同様、三菱の超伝導シンクロトロンに接続されている。このビームラインの特徴は、2枚の固定ミラーによる全面一括露光方式にある。一括露光方式の利点は、マスクの熱変形が小さいことである。問題点としては、非球面ミラーの製作と据付精度があげられる。実際に光源の位置が運転中に移動するので、光源位置をモニターしミラーの位置を補正する装置が設けられているようであるが詳細は不明である。

⑦ 住重のビームライン^{15, 16, 17}

住重の AURORA-2 に接続されたビームラインは、1枚のトロイダルミラーをスキャンミラーに用いている。全長が 5m と極端に短い、本来 7m の設計を建物スペースの都合でさらに圧縮したものである。実験結果では 26 x 26 mm²の照射野で露光強度 43 mW/cm² (電流値 500 mA) が得られている。露光強度分布も $\pm 2.8\%$ の均一性が得られており X 線リソグラフィに対する要求性能を満足している。この詳細については次節以下に述べる。

3-4 コンパクト大強度ビームラインの開発

3-4-1 水平面内の光学系の検討

前節の実例で示したように、ビームラインの設計は多様であるが、1枚ミラーと2枚ミラーの使用例に大別できる。2枚ミラーは1枚ミラーの欠点を補うために使用されるものである。1枚ミラーの欠点は光の取込角が大きくとれないことである。トロイダルコイルの水平面内の焦点距離 f_H は次式で与えられる。⁶

$$f_H = \frac{r}{2 \sin \varphi} \quad (3-1)$$

ここで r はサジタル半径 (saggital radius)、 φ は入射視き角である。取込角を大きく取るには焦点距離 f_H を小さくしなければならないのでサジタル半径を小さくする必要がある。入射視き角 φ は反射率を確保するためには 2°以内が必要で、スキャン角度の変動分も考慮しなければならない。図 3-8 はサジタル半径を 120, 140, 160mm とした場合の露光面上でのビーム形状を示すもので、半径を小さくするとミラー角度の変化によりビーム形状が大きく変化する結果、集光性能が制限されることを示すものである。

2枚ミラーを使用することによりビーム形状の湾曲は軽減され、取込角を大きくすることができる。しかし、ミラー1枚当たりの平均反射率は60~70%であり、取込角の増加分は反射率の低下で相殺され、結果的に露光パワーの増大にはつながらない。むしろ2枚ミラーにより、ベリリウム窓を通過可能な形状に整形する意味が大きい。ミラーを2枚用いると、ビームランを10m以下に短縮するのは困難となり、また、ミラーの据付・調整も難しくなる。さらにコストアップの問題も無視できない。

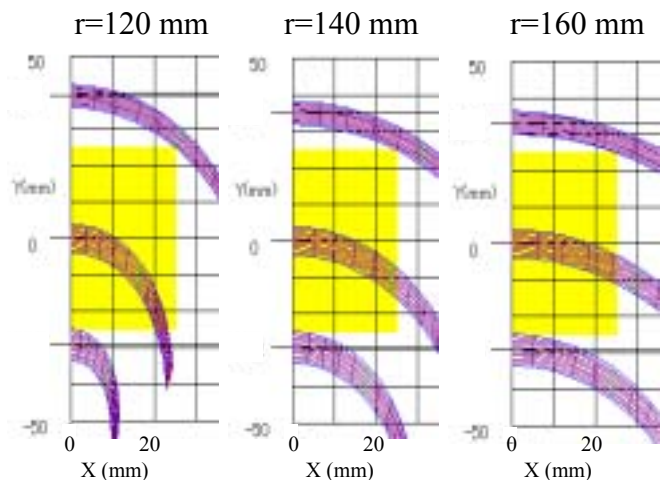


図 3-8 露光ビームの形状 (露光面積: 50x50mm²
光源-ミラー距離: 3m, ミラー-露光面距離: 4m)

著者は、1枚ミラーの問題点について再検討を行った。従来の設計では、1枚ミラーの揺動中心はミラーと光軸との交点を基準としている。この反射基準点は、ミラーを揺動させても変化しないので、ミラーの面積を小さくできる利点があった。ここでは図 3-9 に示すようにミラーの揺動中心を上流側に置くことを考える。図で反射基準点 P と光源点 S の距離は L_1 である。ミラーの揺動中心 M は点 P から上流側に距離 R の位置に置かれる。ここで距離 R を「揺動半径」と呼ぶことにする。ミラーが基準角度 φ から微小角度 $\Delta\varphi$ だけ回転すると、反射点は反射基準点 P から距離 x の点 P' に移動する。もしミラーで反射した光がミラーの角度に関わらず平行を保つなら、光源から反射点の距離は次式のように焦点距離に等しくなければならない。

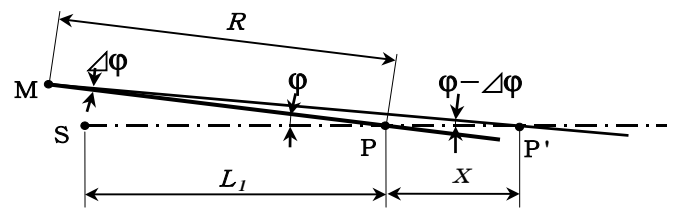


図 3-9 垂直面内の光学系

$$L_1 + x = \frac{r}{2 \sin(\varphi - \Delta\varphi)}. \quad (3-2)$$

計算を簡略化するため、ここではメリディアン半径 (子午面半径) を無限大と想定する。図 3-9 の幾何学的関係 (三角形 PMP' に余弦定理を適用) から式(3.2)中の $\Delta\varphi$ を消去すると次式が得られる。

$$r = \left(1 - \frac{1 - L_1/R}{1 - x/R} \right) \cdot 2R \sin \varphi. \quad (3-3)$$

$x/R \ll 1$ なので、上式は次のように近似できる。

$$r = \left\{ 1 - \left(1 - \frac{L_1}{R} \right) \cdot \left(1 + \frac{x}{R} \right) \right\} \cdot 2R \sin \varphi. \quad (3-4)$$

上式では半径 r は x の一次式であるのでミラー形状が円錐形であることを表している。ここで $R=L_f$ とすると r はコンスタント、即ちミラー形状は円筒形になる。図 3-10 は、図 3-9 と同条件で $R=L_f=3\text{m}$ としたとき、スキャン時のビーム形状がほぼ等しい形状になることを示している。これは $r=120\text{mm}$ の場合で、図 3-8 の場合と比較するとビーム形状が変化していないことがよくわかる。即ち、より小さい r (サジタル半径) を用いることにより集光能力を高めることができ、高強度の露光が可能になる (特許¹⁸)。

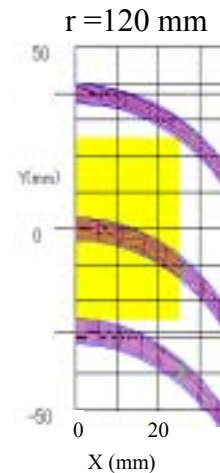


図 3-10 ビーム形状の改善

露光面上でのビーム形状が変化しないので、ベリリウム窓はビーム形状に合わせて最小の形にすることができる。このベリリウム窓の設計が露光強度の補正に役立つことは次節で説明するが、その前にビーム形状が湾曲することによる影響を検討する。

3-4-2 サグの再評価

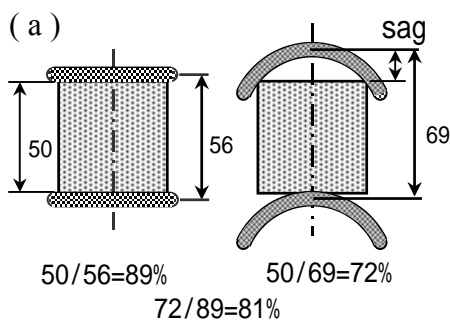
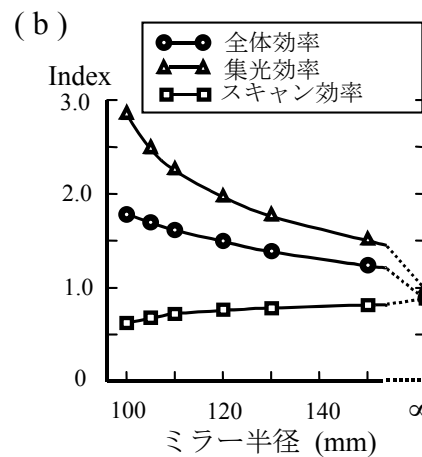


図 3-11 サグ(sag)による露光強度の影響



ビームが湾曲形状であることは、図 3-11(a)右に示すサグ(sag)と呼ばれる分、ミラーのスキャンストロークを増加させる。左図の例では照射野 $50 \times 50\text{mm}^2$ 、ビーム幅 6mm とするとスキャン効率は 89% になる。右の例では 13mm のサグが加わるのでスキャン効率は 72% に低下するので前者に対し 81% の値になる。したがって、従来サグを発生しない光学系が望ましいものとされていた。⁶ サグを発生しない非球面の 1 枚ミラーの設計法は報告されているが、製作は現実に困難で、実現していない。¹⁹ 図 3-11(b) に示すように、ミラー半径 (サジタル半径) が減少するとスキャン効率は低下するが、集光効率が增加するため、スキャン効率と集光効率の積である全体の効率は増加する。したがって、これまでの通説とは反対に、サグが大きいほうが露光強度が大きいことになる。しかしながら、ミラー半径を減少させるにつれてビーム形状の変形が大きくなり、露光強度の均一性を保つことが困難になるので、適当なところで妥協しなければ

ばならない。

3-4-3 垂直面内の光学系の検討

次に垂直面内での収束性について検討する。水平面内での収束性を検討した場合は円筒ミラーとしたが、今回はメリディアン半径 R_s を持つものとする。先の図 3-9 においてメリディアン半径の中心は線分 M-P に垂直で点 P を通る線上にある。垂直面上での焦点距離 f_v は次式で与えられる。⁶

$$f_v = \frac{R_s}{2} \sin \varphi, \quad (3-5)$$

ここで、 φ はミラーの入射視き角である。図 3-9 に示された幾何学的条件から次式が導かれる。

$$R_s = \frac{2}{\sin \varphi} \left\{ \frac{1}{R} x^2 + \left(1 + \frac{L_1}{R} \right) x + L_1 \right\}. \quad (3-6)$$

中カッコ内の第 1 項は無視できる。したがって上式は一次式 $R_s = ax + b$ の形で表される。微分方程式で表すと、

$$\frac{1}{R_s} = \frac{d^2 y}{dx^2} = \frac{1}{ax + b} \quad (3-7)$$

のようになり、その解は、

$$y = \frac{1}{a^2} (ax + b) \{ \ln(ax + b) - 1 \} - \frac{1}{a} \ln bx - \frac{b}{a^2} (\ln b - 1) \quad (3-8)$$

として与えられる。式(3-8)は垂直面内において反射光が常に平行ビームになるミラー形状を示すものである。ミラーの製作では、研磨と測定を繰り返すことによりこのミラー形状を形成することができる。ここではより簡単、経済的にミラー形状を形成する方法を提案する(特許¹⁸)。材料力学では曲げモーメントによる梁のたわみ曲線は次のように表される。

$$\frac{d^2 y}{dx^2} = \frac{M}{E \cdot I_z} \quad (3-9)$$

ここで、 M は曲げモーメント、 E はヤング率、 I_z は断面二次モーメントである。式(3-7)と式(3-9)より、

$$I_z = \frac{M}{E} (ax + b) \quad (3-10)$$

の関係が導かれる。図 3-12(a)に式(3-8)で表される曲線を実現する方法を示す。ミラーホルダーの幅を $ax + b$ と等価に変化させ、ミラーホルダー

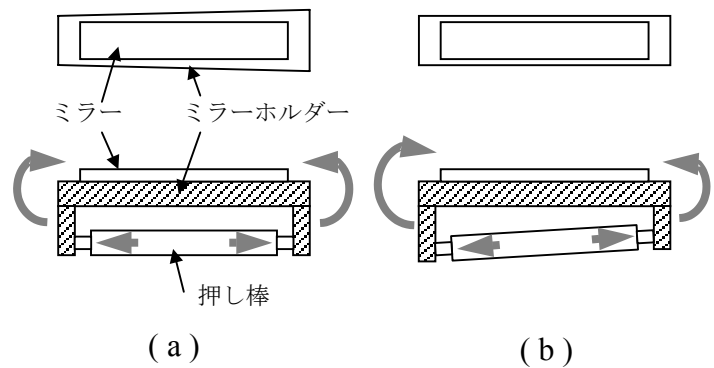


図 3-12 ミラーの製作法

の両端に等しい曲げモーメントを与えている。ax は b に対して小さいので式(3.10)は次のように近似することもできる。

$$M = EI_z \frac{(b - ax)}{b^2} \quad (3-11)$$

図 3-12(b)では均一の断面を持つミラーホルダーの両端に異なる長さのアームを取り付け、1本のロッドを介してホルダーの両端に異なるモーメントを加えることにより式(3-11)で表されるようなモーメント分布を作り出すことができる。

以上の何れの方法を用いても式(3-8)で表される曲線を形成することが可能である。

なお、実際の加工にあたっては、図 3-12 と逆方向にミラーホルダーを変形させ、ミラーを円筒ミラーに加工した後、ミラーホルダーから取り外すことにより、弾性により反転（スプリングバック）した形状を得る方法が量産に適している。

実際のサジタル半径は非常に大きい（例えば 286m）ので、短いビームラインでは図 3-8 の計算例のように単純な円弧でも実用上問題ない。しかし、ビームラインの長さが 10m を超えると図 3-13 に示すように単純な円弧では縦方向の収束性の変化を無視できなくなる。

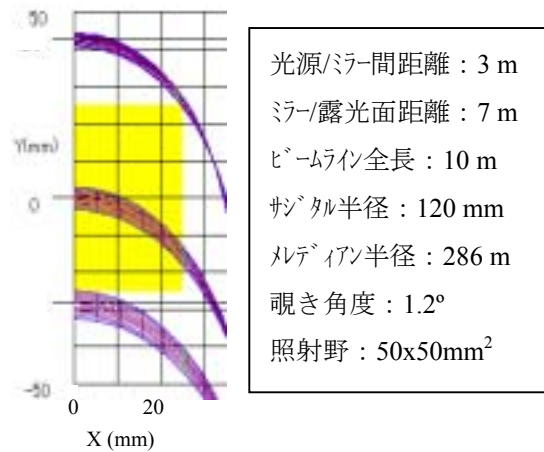


図 3-13 長いビームラインの露光形状

3-4-4 ランアウト角の改善

許容できるランアウト角の具体的な数値は必ずしも明確ではない。ランアウト角が 5 mrad で、近接ギャップが 10 μm とするとランアウト距離は 50 nm となる。この値は形成パターンの寸法に対して大きいと思われるが、マスクのパターンを補正できるので問題にはならない。しかしながら、図 3-14 に示すように近接ギャップが露光中に変動すると露光イメージはギャップの変動に応じて移動する。この移動量は予め補正することはできない。図で、 $\alpha=5 \text{ mrad}$, $G=10\mu\text{m}$, $dG=\pm 1 \mu\text{m}$ とするとイメージの移動量は $\pm 5 \mu\text{m}(=dS)$ となる。この値は 50 nm レベルのイメージ形成に対しては許容できる値と考えられる。

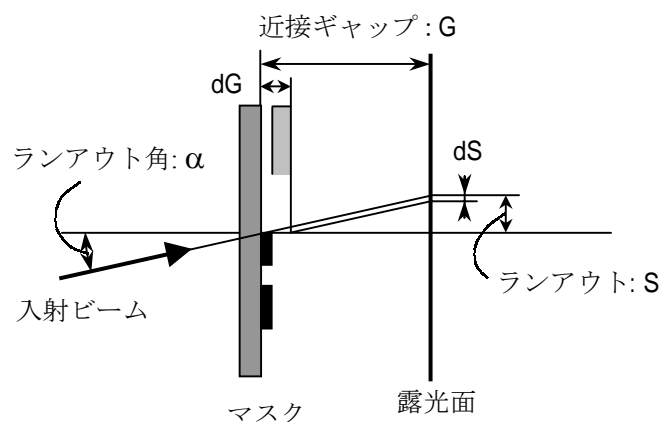


図 3-14 ランアウト角の転写精度に及ぼす影響

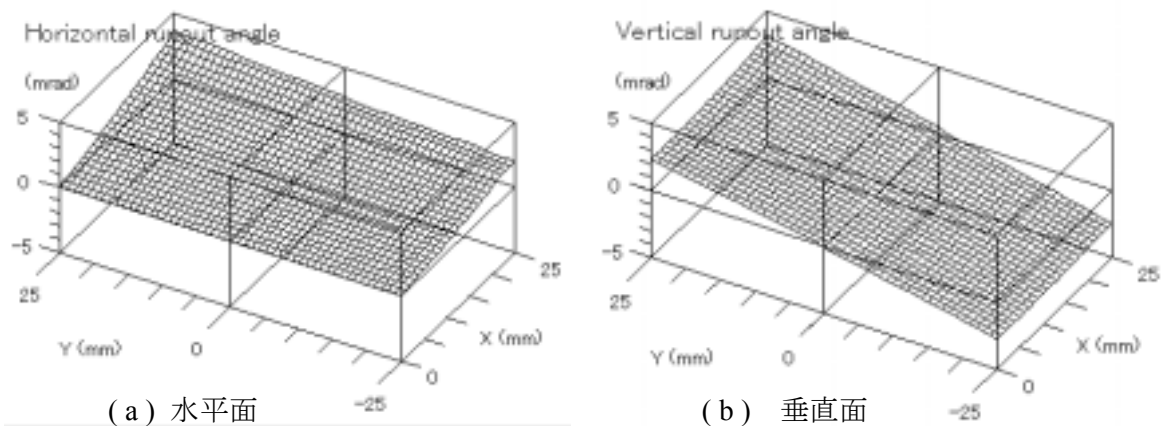


図 3-15 ランアウト角の計算例

光源/ミラー距離：3 m	サジタル半径：105 mm
ミラー/露光面距離：4 m	メディアン半径：286 m
ミラー揺動半径(R)：3 m	ミラー覗き角：1.2°

ランアウト角は水平ランアウト角と垂直ランアウト角からなる。図 3-15 は水平および垂直ランアウト角の計算例（露光面の右半分）である。水平ランアウト角はミラーの収束性から計算され、通常その値は垂直ランアウト角よりも小さい。垂直ランアウト角はミラーの揺動角度によって決まる。もしミラーの揺動中心がミラーの中心（反射点）にあれば最大垂直ランアウト角 α_v は、

$$\alpha_v = D/L, \quad (3-12)$$

として表される。ここに、 D は露光面中心から垂直方向の端面までの距離、 L はミラーと露光面間の距離である。図 3-15 の設計パラメータから $D=25 \text{ mm}$, $L=4 \text{ m}$ を用いると最大垂直ランアウト角は 6.25 mrad になる。これは前述の許容値 5 mrad よりも大きい。このことは、従来の設計では、ビームラインを長くしなくてはならなかった理由である。

もし、ミラーの揺動中心が先の図 3-9 のように、光源点に近い位置に置かれるなら最大垂直ランアウト角 α_v は、

$$\alpha_v = D/(L+R), \quad (3-13)$$

として示される。ここで R は揺動半径である。揺動半径を 3 m とすると最大垂直ランアウト角 α_v は 3.57 mrad になり、この値は先の許容値を満足する。したがって、揺動中心を上流側に移動することは垂直ランアウト角を減少させるのにも有効である。

3-5 均一な露光強度を得るベリリウム窓の設計

3-5-1 強度分布の解析

図 3-16 に示すように、光源点から放射された 1 本の X 線ビーム（水平角 θ_H 、垂直角 θ_V ）は光学コンポーネントを通過して露光面上の点 P に到達する。点 P の x, y 座標

位置は光学系の伝達関数 F_X および F_Y を用いて、

$$x = F_X(\theta_H, \theta_V, \varphi), \quad (3-14)$$

$$y = F_Y(\theta_H, \theta_V, \varphi), \quad (3-15)$$

と表される。ここで φ はミラーの入射視き角である。光強度 $P(x,y)$ は関数 F_p として

$$P(x,y) = F_p(\theta_H, \theta_V, \varphi), \quad (3-16)$$

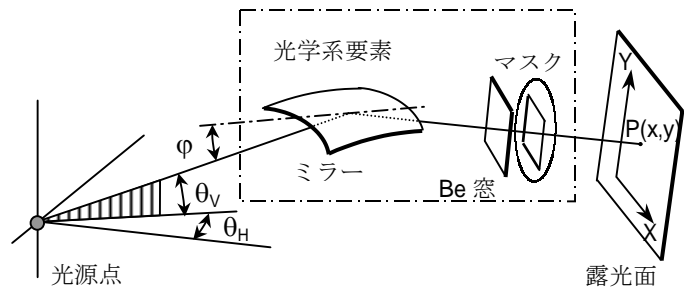


図 3-16 光伝播の座標系

のように表される。この光強度は図3-17のように垂直方向にガウス分布を形成する。以降の解析を容易にするため、垂直方向に分散したビーム強度を次式のように積分値で表す。

$$P_I = \int F_p(\theta_H, \theta_V, \varphi) d\theta_V \quad (3-17)$$

ビーム位置は分布の中心 ($\theta_V=0$) で代表させるものとする。

ビーム強度 P_I はミラー角度 φ により変化する。図 3-18(a) は右半分の露光面におけるビームの形状、強度を三次元的に示したものである。ビーム強度はミラー角度 φ と X 座標の関数として次のように表せる。

$$P_I = F_I(x, \varphi) \quad (3-18)$$

Y 軸に沿った ($x=0$) P_I の変動はミラーの揺動速度 (スキャン速度) を調整することにより均一化することができる。

スキャン速度の調整については

3-5-3 節で述べることにして、ここでは図 3-18(a) に示したそれぞれのミラー角度に対するビーム強度を Y 軸上の値 ($x=0$) で規格化する。即ち、

$$K_1 = \frac{F_I(x, \varphi)}{F_I(0, \varphi)} \quad (3-19)$$

係数 K_1 はミラーの光学的基本特性を表すので、基本係数と名づけることにする。そのグラフを図 3-18(b) に示す。

図 3-19(a) のように一定の幅と高さ

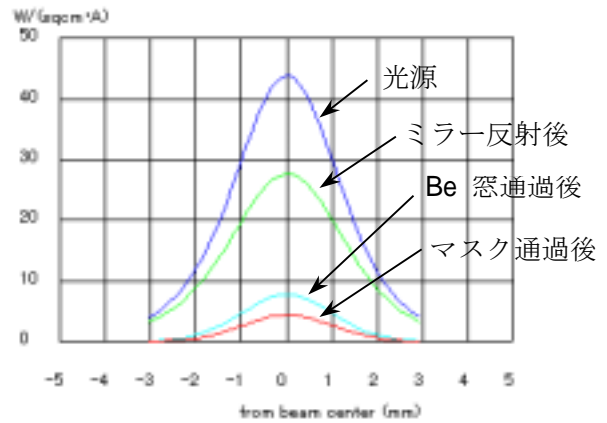


図 3-17 垂直面内のビーム強度

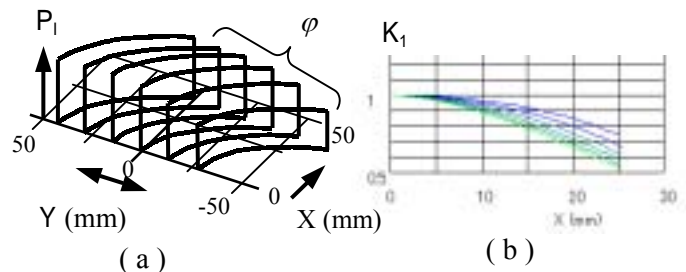


図 3-18 X-Y 面上のビーム強度

スキャン速度の調整については 3-5-3 節で述べることにして、ここでは図 3-18(a) に示したそれぞれのミラー角度に対するビーム強度を Y 軸上の値 ($x=0$) で規格化する。即ち、

$$K_1 = \frac{F_I(x, \varphi)}{F_I(0, \varphi)} \quad (3-19)$$

係数 K_1 はミラーの光学的基本特性を表すので、基本係数と名づけることにする。そのグラフを図 3-18(b) に示す。

図 3-19(a) のように一定の幅と高さ

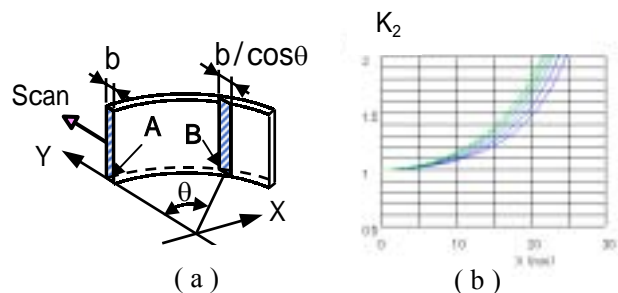


図 3-19 ビーム断面の傾斜の影響

(強度)を持つ円弧状のビームモデルを想定する。このビームが Y 軸に沿って移動すると点 B での露光時間は Y 軸上の点 A での露光時間より $1/\cos\theta$ の割合で長くなる。この関係は次式のように表すことができる。

$$K_2 = 1/\cos\alpha = \sqrt{1+(dy/dx)^2} \quad (3-20)$$

係数 K_2 はビーム形状の傾斜による影響を表すので、傾斜係数と名づけることにする。そのグラフを図 3-19(b) に示す。

ビーム形状はスキャン中に変化する。図 20(a) にビーム形状の変化のモデルを示す。Y 軸上でビームが点 P_0 から距離 L_0 の点 P_0' に移動するとき、Y 軸から外れた点 P_1 は距離 L_1 の点 P_1' に移動するとする。照射強度は移動速度に半比例するので L_0 と L_1 が異なる場合は L_1/L_0 の比で補正が必要である。この第 3 の係数は次式で与えられる。

$$K_3 = \frac{\frac{\partial}{\partial\varphi} F_Y(\theta_H, 0, \varphi)}{\frac{d}{d\varphi} F_Y(0, 0, \varphi)} \quad (3-21)$$

係数 K_3 はスキャン中のビーム形状の変形による影響を表すので、変形係数と名づけることにする。図 20(b) に計算結果を示すが、3-4-1 節で述べたように変形を抑えるような設計が適用されている限りは変形係数の値は小さい。

したがって、全体の補正係数 K_T を全体係数と名づけると、全体係数は上記 3 つの係数の積で表される。

$$K_T = K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \quad (3-22)$$

計算結果を図 3-21 に示す。図 3-18(b) の K_1 のグラフと図 3-19(b) の K_2 のグラフではそれぞれの曲線は離れているにもかかわらず、それらの積 (K_3 を含め) である図 3-21 の曲線は互いに非常に接近している。その理由は K_1 が小さいビームでは K_2 が大きく、 K_1 が大きいビームでは K_2 が小さいことによる。その結果、これらの積となる曲線は互いに近接することになる。

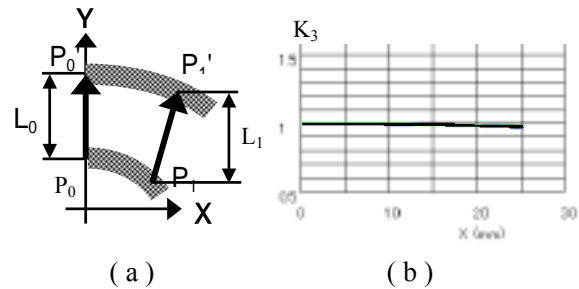


図 3-20 スキャン中のビーム形状の変化

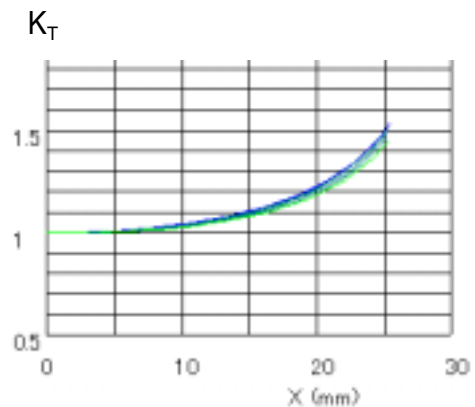


図 3-21 全体係数 K_T

3-5-2 ベリリウム窓形状の計算

均一強度分布を得るためのベリリウム窓として、図 3-22 に示すように 3 種類のベリリウム箔の形状を提案した。^{15,17} タイプ A は垂直軸方向に軸をもつ円筒形である。タイプ B は水平方向に軸をもつ円筒形である。タイプ C は光軸と平行方向に軸をもつ回転体である。これらのベリリウム箔は、ビームと相対位置を保つためミラーの揺動によりビームが上下に移動する動きに連動して駆動される。

まずタイプ A について解析する。タイプ A を適用するには、均一な強度分布を得るため、図 3-21 で示した全体係数の曲線群が近接していることが重要な前提条件である。全体係数の曲線を x の関数として、

$$K_T = G(x) \quad (3-23)$$

の形で表す。図 3-21 の曲線群に対し最小二乗法を用いて三次関数で表せば、実用上十分な近似が得られる。強度 P_0 のビームがベリリウム箔を通過した後のビーム強度 P を次式で表す。

$$P = P_0 \cdot H(t) \quad (3-24)$$

ここで、 $H(t)$ はベリリウム箔の厚さ t を変数とする透過効率である。

図 3-23(a) に示すようにベリリウム箔の厚さは t_0 である。中心軸から距離 x の位置の透過厚さを t とする。全体係数が箔の透過効率で補償されるためには次の関係が必要である。

$$G(x) = \frac{H(t_0)}{H(t)} \quad (3-25)$$

ベリリウム箔の形を $F(x)$ で表すと箔の透過厚さ t は次式で表される。

$$t = t_0 \sqrt{1 + \left(\frac{dF(x)}{dx} \right)^2} \quad (3-26)$$

式(3-25), (3-26) からベリリウム箔の形として次式が導かれる。

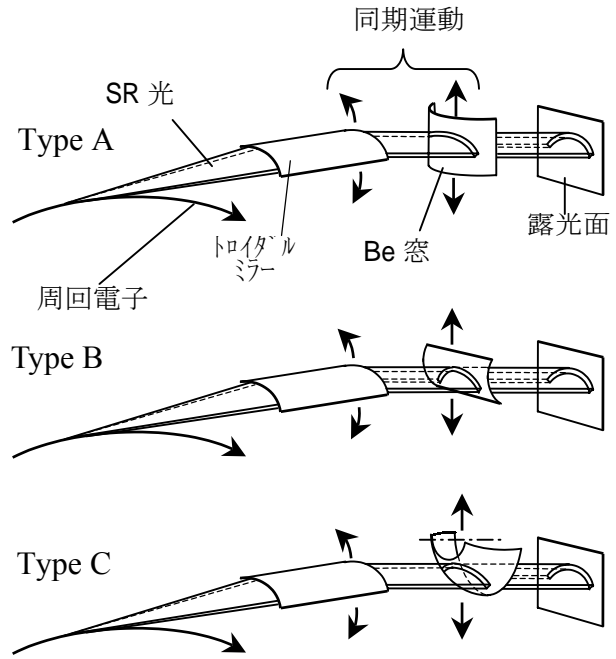


図 3-22 ベリリウム窓の形式

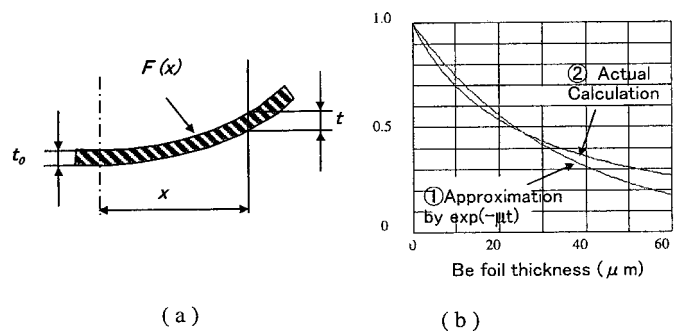


図 3-23 ベリリウム窓の形状

$$F(x) = \int \left[\left\{ \frac{1}{t_0} H^{-1} \left(\frac{H(t_0)}{G(x)} \right) \right\} - 1 \right]^2 dx \quad (3-27)$$

ここに $H^{-1}(\dots)$ は $H(\dots)$ の逆関数である。一般的に式(3-24)は、

$$P = P_0 \cdot \exp(-\mu t) \quad (3-28)$$

として表される。ここに、 μ はビームパワーの平均線透過係数である。式(3-28)の透過曲線を図 3-23(b)中に①で示す。また、実際のスペクトルに対応した透過曲線を②で示す。曲線②の逆関数を求めるのは困難なので、式(3-24)の代わりに式(3-28)を用いる。式(3-25)は次のように書き換えられる。

$$G(x) = \frac{\exp(-\mu t_0)}{\exp(-\mu t)} \quad (3-29)$$

したがって、ベリリウム箔の形は次式になる。

$$F(x) = \int \left[\left\{ 1 + \frac{1}{\mu_0 t_0} \ln(G(x)) \right\}^2 - 1 \right]^{1/2} dx \quad (3-30)$$

全体係数 $G(x)$ とベリリウム箔の形状 $F(x)$ の計算結果を図 3-24 に示す。

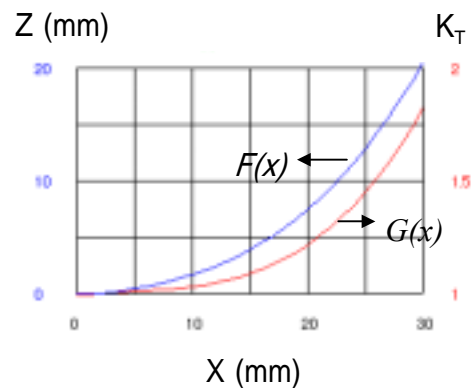


図 3-24 ベリリウム形状の計算結果

図 3-22 のタイプ B に関しては、上述の計算過程で変数 x を y に変換すれば、補償係数 $G(y)$ 、最終的にベリリウム箔形状 $F(y)$ が得られる。

タイプ C については、回転中心軸は Y 軸上のどの点と交差してもよいので交差点を $(0, R_0)$ とする。補償係数 $G(r)$ およびベリリウム箔形状 $F(r)$ は x および y を次式により変換して計算する。

$$r = \left[F_x(\theta_H, \theta_V, \varphi)^2 + \{ R_0 + F_Y(0, 0, \varphi) - F_Y(\theta_H, \theta_V, \varphi) \}^2 \right]^{1/2} \quad (3-31)$$

最終的に得られる光強度の均一性は全体係数のばらつきに依存する。全体係数のばらつきは次式の分散値 V_y を計算することにより評価できる。

$$V_y = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - y_a)^2 \quad (3-32)$$

ここで、 N はサンプル数、 y_i はサンプル値、 y_a は近似関数値である。

三つのタイプのベリリウム箔に対する分散値を図 3-25 に示す。分散値はタイプ B の値で規格化している。タイプ A の分散値はタイプ B のものより小さい。タイプ C の分散値は回転軸

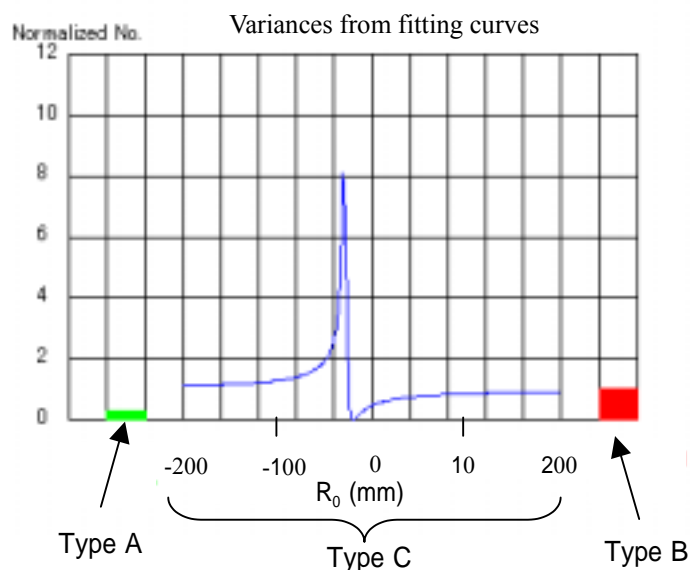


図 3-25 Be 窓形式による分散値の比較

の位置によって変化する。回転軸が円弧状のビーム形状の中心($R_0=-30\text{mm}$)で鋭いピークの極大値を持ち、 $R_0=-20\text{mm}$ で殆どゼロの極小点に達する。この極小値は三つのタイプの中で最も小さいが実用上の誤差と製作面を考えるとタイプCの採用はリスクが大きい。結局、タイプAの採用が妥当である。

3-5-3 スキャン速度の制御

露光面上でのビームの強度分布には二つの要素を考える必要がある。一つは図 3-26(a)に示すようにY軸に沿った強度の変化である。この係数はミラーが基準角度 φ_0 にセットされているときの強度で規格化される。これを強度係数 K_4 と名づける。式(4.4)からこの係数は次のように与えられる。

$$K_4(\varphi) = \frac{P_I(0, \varphi)}{P_I(0, \varphi_0)} \quad (3-33)$$

他の要素は、ミラー角度の変化に対する露光面上のスキャン距離（移動速度）の変化である（図 3-26(a)参照）。これをスキャン係数と名づけ、次式で表す。

$$K_5(\varphi) = \frac{dF_Y(0,0,\varphi)/d\varphi}{(dF_Y(0,0,\varphi)/d\varphi)_{\varphi=\varphi_0}} \quad (3-34)$$

スキャン速度は強度係数に比例し、スキャン係数に反比例しなければならない。したがって、その全体を速度係数 K_s と呼ぶと、

$$K_s(\varphi) = \frac{K_4(\varphi)}{K_5(\varphi)} \quad (3-35)$$

速度係数の変化は非常に緩やかなので露光面上のスキャン速度は図 3-26(b)のように二次関数で近似される。

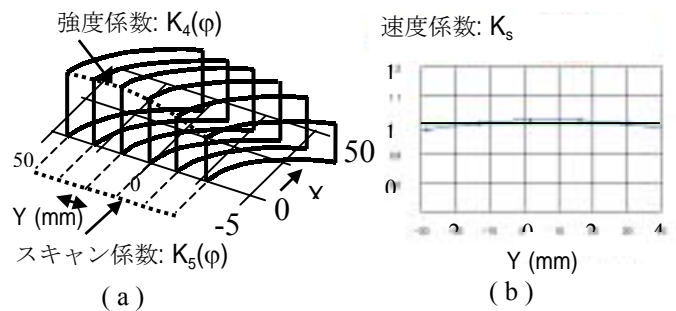


図 3-26 スキャン速度のコントロール

3-5-4 計算結果とその検討

全体の露光強度分布は、速度係数を加味してミラーの揺動角度を100分割した計101回の静止露光を重ね合わせて計算される。図 3-27(a)に示す露光強度の計算結果では $\pm 4\%$ のばらつきがあり、目標とされる $\pm 3\%$ より大きい。このばらつきは、式(3-17), (3-25)および(3-30)など計算過程での

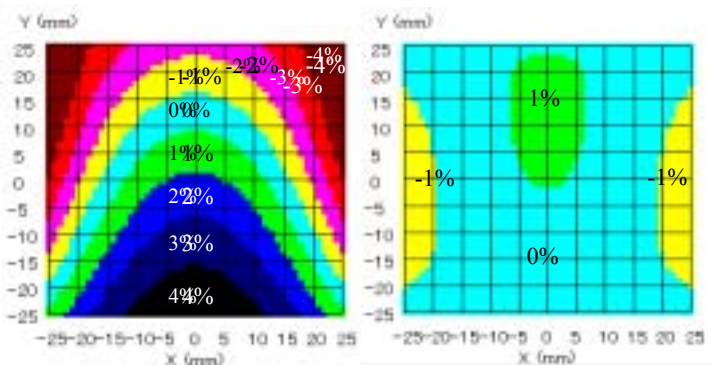


図 3-27 露光強度分布の計算結果

近似化による誤差の影響が含まれている。この計算結果を基にベリリウム箔の曲率およびスキャン速度をさらに微小修正し計算を追い込むことにより、図 3-27(b)に示すように均一性を±1%にまで改善することに成功した。この修正手順は BLOD のプログラムに組み込まれており、自動的に最適値を求めることができる。

上記修正作業を含む計算を長さ 5 m, 7 m, 10 m のビームラインについて行った。光源点からミラーまでの長さは 3 m, ミラーのサジタル半径は 286 m である。それぞれのビームラインに対してタイプ A, B, C について計算を行った。タイプ C については図 3-25 において分散が最小値を示す回転軸の位置で計算した。表 3-2 にまとめた計算結果に示すように、すべてのケースで目標値(±3%)を満足している。計算に用いたパラメータを表 3-3 にまとめた。

表 3-2 露光強度とユニフォーミティの計算結果

全長 (m)	5			7			10		
窓形式 (図 3-22)	A	B	C	A	B	C	A	B	C
露光強度 (mW/cm ²)	78	78	77	80	80	77	73	74	72
ユニフォーミティ (%)	±1	±2	±1	±1	±2	±1	±2	±2	±1
ランアウト角 (mrad)	H:2.75, V:3.37			H:2.58, V:2.81			H:1.42, V:2.01		
サジタル半径 (mm)	105			110			120		

表 3-3 計算に用いた設計パラメータ

ビームライン		光源	
光源/ミラー間距離	3 m	名称	AURORA-2
ミラー揺動半径	3 m	電子エネルギー	0.7 GeV
露光面積	50x50 mm ²	軌道半径	0.87 m
ミラー形式	トロイダル	磁場強度	2.7 T
ルテチウム半径	286 m	臨界波長	1.4 nm
材質、粗さ	Pt, 5A rms	蓄積電流	500 mA
Be 箔厚さ	20 μm	エミッタンス	100πnmrad
窓後のガス層	He, 600mm x 1 atm	ビームサイズ (縦)	0.64 mm
マスク	SiC, 2μm	ビーム傾斜 (縦)	0.156 mrad

表 3-2 で見られるように、3つのタイプの光学的性能には大きい差は認められない。しかしながら、タイプ B と C についてはミラーのスキャンとベリリウム窓の厳密な同期運動が必要である。もし同期運動に誤差が生じれば、ベリリウム箔の透過厚さの誤差が生じ照射強度の不均一性が増加する。特にタイプ C については、三つのタイプの中で最も小さい分散値を実現できるが、図 3-25 のようにその分散値は位置誤差に対し非常に敏感に変化する。一方、タイプ A の円筒軸はベリリウム窓の運動方向と平行であるので同期運動の誤差はベリリウム箔の透過厚さに影響を及ぼさない。した

がって、実用的にはタイプ A が最も望ましい。

タイプ A についてさらに考える。7 m のビームラインが最も露光強度が高いが、他との差はわずかである。5 m のビームラインではミラーの揺動範囲が増加するのでミラーを長くする必要がある。また揺動角度が大きくなる結果、最大覗き角が大きくなるので露光強度が減少する。10 m のビームラインではメリディアン半径を本計算では固定したために縦方向の収束性が変化し、その結果、露光強度が低下した。この不都合は第 3-4-3 節に述べたようにメリディアン半径を補正することで解消される。したがって、光学設計に関する限りビームラインの長さに対する決定的な制約はない。

実際の設計では、仕切り弁、ビームモニター、スリット等々の機器をビームラインに組み込むことを考えると、ビームラインの長さは最低 5 m は必要である。ビームラインの長さは、光源、ステッパを含む全体のレイアウト、特に保守性、経済性を考慮して最終的に決定される必要がある。

3-5-5 ベリリウム窓形状の簡素化

式(3-30)で表されるタイプ A のベリリウム箔を製作、検査することは容易ではない。計算結果によるとベリリウムの形状はほぼ円弧状であり、露光強度の不均一性は照射野の外縁に最も現れるので、外縁のベリリウム箔形状に合わせて単純な円弧で置き換えることができる。式(3-30)による照射野外縁の傾斜角 θ は次式で与えられる。

$$\tan \theta = \left[\left\{ \frac{1}{\mu t_0} \ln(G(x_1)) + 1 \right\}^2 - 1 \right]^{1/2} \quad (3-36)$$

ここで x_1 は露光面の中心から外縁までの距離である。これより円弧の半径 R_a は次のようになる。

$$R_a = x_1 \cdot \left[1 + \frac{1}{\left\{ \frac{1}{\mu t_0} \ln(G(x_1)) + 1 \right\}^2 - 1} \right]^{1/2} \quad (3-37)$$

7 m ビームラインに対して計算した結果、 $R_a=30.1\text{mm}$ となり、露光強度の均一性は図 3-27(b)のものと殆ど同じになる。

3-6 光取り出し窓の破損対策

3-6-1 新しい ADL の設計

ベリリウム箔の厚さは非常に薄く、常に圧力差と発熱の負荷を支えているので何らかの原因で破損することは十分考えられる。ベリリウム箔が破損すると、大気側ガスがシンクロトロン内部に流入し、超高真空系を汚染するのみならずビームラインのミラー表面を汚染し、使用が不可能になる危険がある。また、ベリリウムの微粒子は吸い込むと危険とされているので人体への安全面からもベリリウム窓の破損を防止する必要がある。ビームライン保護のため一般に音波遅延管 (ADL: Acoustic Delay Line) が設けられている。

これは後述のように、複数のバッフル板を設けてガスの侵入速度を遅らせ、その間に遮断弁を締め切るものである。しかし露光面積は集積回路の世代と共に増加する

傾向にあり、従来の ADL の設計手法を適用することは困難になりつつある。本節では新しい構想による ADL の設計について報告する。²⁰

ビームラインの一般的なレイアウトとして図 3-28 を想定する。以下に述べるシミュレーションにはこのレイアウトを用いている。図で高速遮断弁(FCV)はベリリウム窓(BW)から 3.4 m 上流に置かれている。ベリリウム窓が破損した場合、もし ADL がなければ大気側のヘリウムガスは 3 msec で FCV に到達する。FCV の作動時間は約 30 msec であるので ADL で 30 msec の遅延時間を稼ぐ必要がある。

図 3-29(a)に示した従来の ADL では、T 字形または直線形断面のバッファプレート中央に、放射光が通過できる長方形の開口部が設けられている。⁶ 新しい設計による ADL は図 3-29(b)に示すように、二重管構造になっている。²¹ 内筒はビームの断面形状に合わせた断面を有し、その一端はベリリウム窓につながっていてミラーの揺動と連動して反射

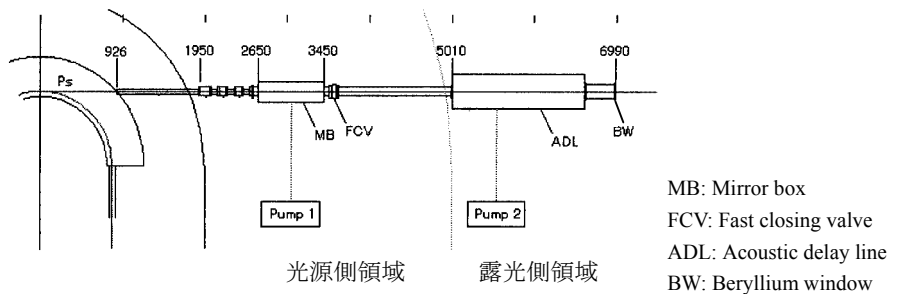


図 3-28 ビームラインのレイアウト

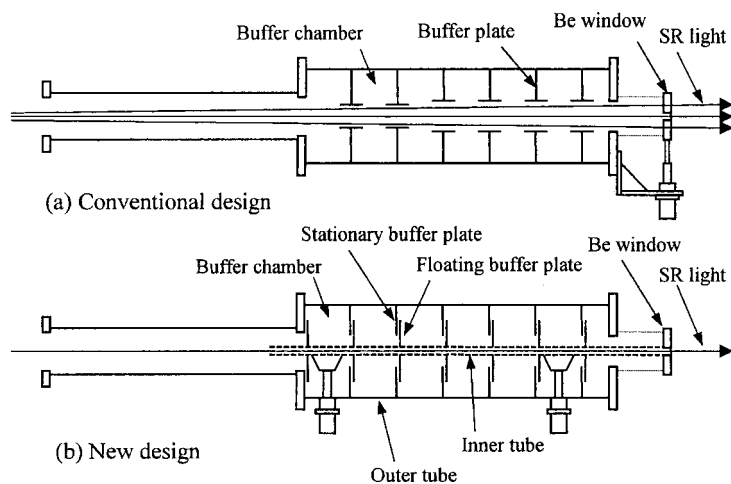


図 3-29 ADL の構造

光を内部に保ちながら運動する。外筒と内筒の空間は仕切板で区切られ、一連のバッファ室を形成している。それぞれの仕切板は外筒に固定した静止板と内筒に取り付けた可動板から成り立っている。一对の静止板と可動板の重なり合う部分は、狭い間隙を保ち、隣接するバッファ室との仕切を構成している。破損したベリリウム窓から侵入したガスの一部は、内筒表面の開口部（点線で示す）からバッファ室に入り込む。高速遮断弁に到達するガス流は減速され、弁の作動時間より遅れて到達することになる。

3-6-2 応答性シミュレーション

ビームラインの設計と ADL の動的応答性シミュレーションのために計算プログラム BLVAC を開発した。ベリリウム窓が破損する前のビームラインに沿った真空度の静的分布は、次の基本式からなる連立方程式を解くことによって求められる。

$$P_x - P_0 = \frac{1}{K} \left(Q_0 x + \frac{q}{2} x^2 \right) \quad (3-38)$$

ここで、 P_x は真空度 P_0 の基準点から距離 x の位置の真空度、 K は管の単位長さの抵抗係数（コンダクタンスの逆数）、 Q_0 は基準点の外からのガス流量、そして q は単位長さあたりのアウトガス量である。式(3-38)は、断面形状が同じセグメントを単位として隣接するセグメント端の圧力が等しいことから連立方程式を構成するものである。この圧力分布は動的応答を計算するときの初期条件を与えるものである。（巻末付録 1 に詳細を説明する。）

図 3-30 に BLVAC による圧力変動の計算例を示す。圧力分布の最も下の線(Base Pressure)が初期条件になる。シンクロトロン側とミラーボックスには大排気量ポンプが設置されており真空度は 10^{-10} Torr になっている。

ベリリウム箔が破損すると、破損した位置の圧力は大気圧まで上昇し、圧力上昇が時間と共に上流側に伝播する。図には 5 msec ごとの圧力分布を示す。破損したベリリウム箔から侵入したガスは、シンクロトロン内部の真空度を劣化させ、ミラー表面の汚染をひき起こす。この真空度の劣化は一時的なものなので短時間で回復できるが、一旦汚染されたミラーの表面は復旧できない。ミラーの汚染が回復しないとされる真空度は経験的に 10^{-7} Torr 以上であるので、ベリリウム窓が破損し、圧力が上昇する過程で図 3-30 に Marking point として示した点を圧力分布線図が超える時間を有効遅延時間として定義する。ミラーボックスの上流側の手動弁は、照射中は開いているが、計

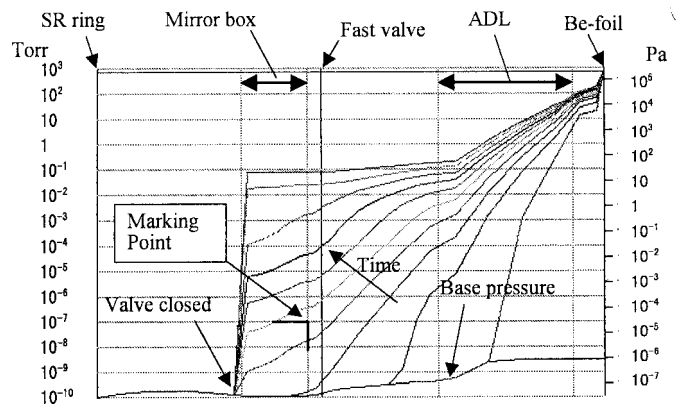


図 3-30 BLVAC によるシミュレーションの例

算

算に際してはミラーボックスにとって条件の悪い、上流側の手動弁が閉じている場合で計算を行った。(手動弁が開いているとミラーボックスは光源側にも排気能力があるので、上流側と下流側のコンダクタンスがバランスした圧力で落ち着く。弁が閉じていると、ミラーボックスの圧力は最終的に大気圧まで上昇する。)

ADL の動的特性の計算は、BLVAC により差分法を用いて行った。ビームラインの全長を数 cm の単位に分割し、それぞれの分割に対し 10 nsec の時間単位で計算した。ビームラインのそれぞれの点でのコンダクタンスは、1 Torr 以上では粘性流として、1 ~ 0.001 Torr は遷移流として、0.001 Torr 以下は分子流として計算した。粘性流の中でベリリウム箔からの流入には圧縮性流体力学を適用した。²² その流速 S は次式で与えられる。²²

$$S = \sqrt{\frac{2\gamma}{\gamma-1} \frac{P_1}{\rho_1} \left\{ 1 - \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right\}} \quad (3-39)$$

ここで P_1 と P_2 はオリフィス (ベリリウム箔の破損開口) の前後の圧力、 γ は比熱の比、そして ρ_1 は圧力 P_1 の密度である。臨界速度比は次式で与えられる。²²

$$\frac{P_2}{P_1} = \left(\frac{2}{\gamma+1} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \quad (3-40)$$

ヘリウムガスに関しては、臨界速度比は 0.487 である。もし P_2/P_1 がこの値以下ならガスの流速は音速になる。もし P_2/P_1 がこの値を超えるとガスの速度は亜音速として式(3-39)で表される。粘性流のコンダクタンス C_1 は次式による。²⁶

$$C_1 = \frac{\pi}{128\eta} \frac{p}{L} d^4 \quad (3-41)$$

ここで η は動粘性係数、 p は平均圧力、 L は管の長さ、そして d は管の直径である。分子流のコンダクタンス C_2 は次式による。²⁶

$$C_2 = \frac{\pi}{12} \frac{d^3}{L} v \quad (3-42)$$

ここで d は管の直径、 L は管の長さ、そして v は平均分子速度である。遷移流のコンダクタンスは、粘性流と分子流のコンダクタンスを圧力の対数比例として計算する。破損したベリリウム箔の開口部のように管路が急拡大する粘性流領域でのコンダクタンスは次式による。

$$C_3 = A \cdot S \quad (3-43)$$

ここで A はオリフィス面積、 S は式(3-39)によるガス速度である。分子流でのコンダクタンスは、²⁶

$$C_4 = \frac{A}{4} \cdot v \quad (3-44)$$

ここで A はオリフィス面積、 v は平均分子流速度である。

表 3-4 BLVAC の計算内容とパラメータ

作業内容	入力するパラメータ
レイアウト	各コンポーネントの寸法 (直径、長さ)
静的圧力分布	内部ガス種類、真空ポンプ (位置、排気速度)、アウトガス量
ADL の設計	内外筒寸法、分割室数
動的応答	破断面積、外部ガス種類、分割時間

コンダクタンス、ガス流量、各位置での圧力は表 3-4 にまとめた設計パラメータの値を変えながら BLVAC により計算した。図 3-31 にバッファ室の数と遅延時間の関係を示す。バッファ室は ADL 内で等分割されている。点線は従来型設計の隔壁が固定された ADL の場合である。ビームが上下しても通過を妨げないために開口寸法は $60 \times 60 \text{ mm}^2$ となっている。実線は新しい設計による ADL で、開口寸法は $60 \times 20 \text{ mm}^2$ である。これらの計算ではベリリウム箔の破断面積は 100 mm^2 とした。

ベリリウム箔が完全に破損すると開口面積は $1,000 \text{ mm}^2$ になる。破断面積と遅延時間との関係は図 3-32 のようになる。破断面積の増加に対する遅延時間の減少は比較的少ない。許容遅延時間を 30 msec とすると、従来型の ADL では条件を満足しない。

図 3-29(b) に示したように、新しい ADL のそれぞれの可動板は内筒に接続している。内筒はそれぞれのバッファ室に通じる開口部を持っている。圧力の緩衝効果は図 3-33(a) のモデルで説明できる。一つの単位区画にガス量 Q_{in} が流入し Q_{out} が流出する。内筒の開口部 (仮想境界を点線で示す) からガス量 Q_{ac} がバッファ室に流入する。開口比 W/L が増加すると開口部からバッファ室へのコンダク

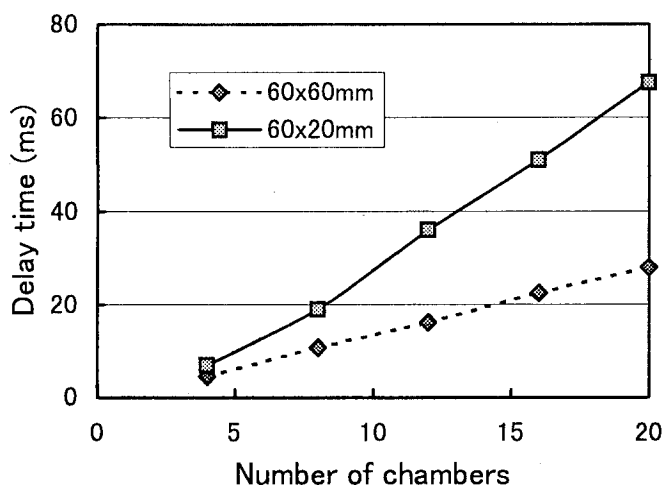


図 3-31 バッファ室数と遅延時間の関係

ADL 外径: 400 mm , 長さ: 1600 mm , 破断面積: 100 mm^2 ,
内筒寸法: 従来型: $60 \times 60 \text{ mm}^2$, 新設計: $60 \times 20 \text{ mm}^2$

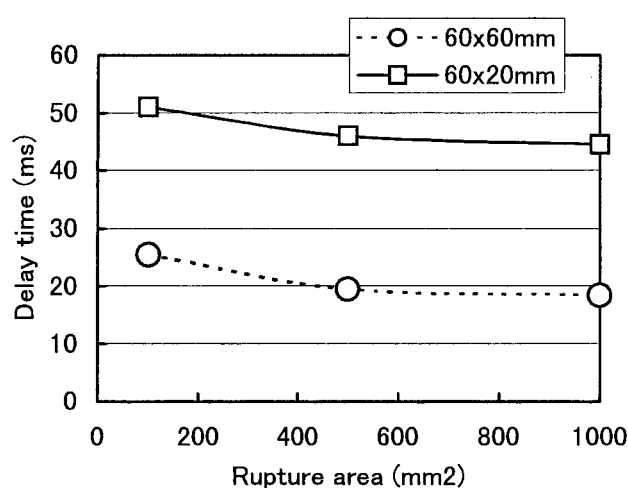


図 3-32 破断面積と遅延時間の関係

ADL 外径: 400 mm , 長さ: 1600 mm , バッファ室数: 16

タンスが増加する。一方、次の区画へ通じるコンダクタンスも変化する。開口比の変化に対する遅延時間の関係は図 3-33(b)のようになる。開口比が 100%の場合は単純なオリフィスのモデルとして別に計算し、同図にマークで示した。単純モデルではオリフィスから流入したガスはバッファー室内で直ちに均一に拡散されると想定しているため、一方のより詳細な計算と差が生じている。実際の設計では開口比を大きくするには構造上の制約があるので、開口比を 50%に設定した。図 3-34 は破損面積 10cm^2 の場合、ADL の外形を 300, 400, 500mm とした場合のバッファ-

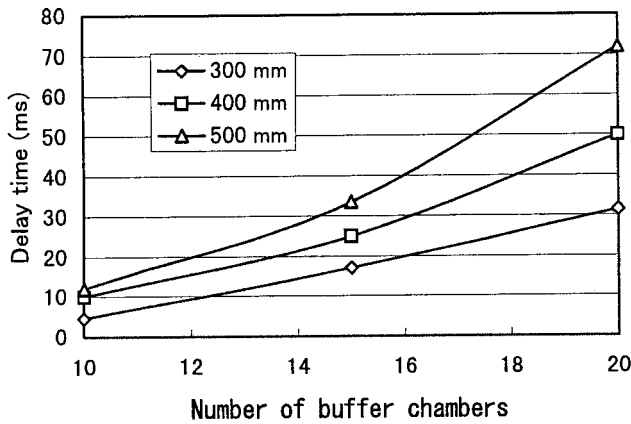
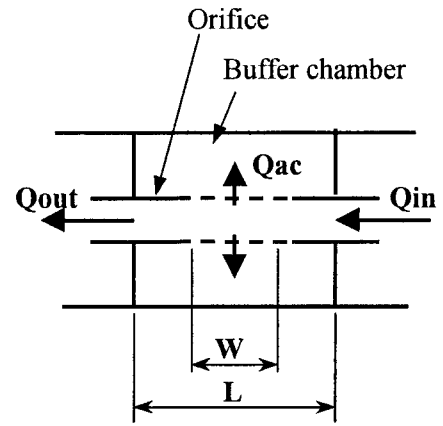
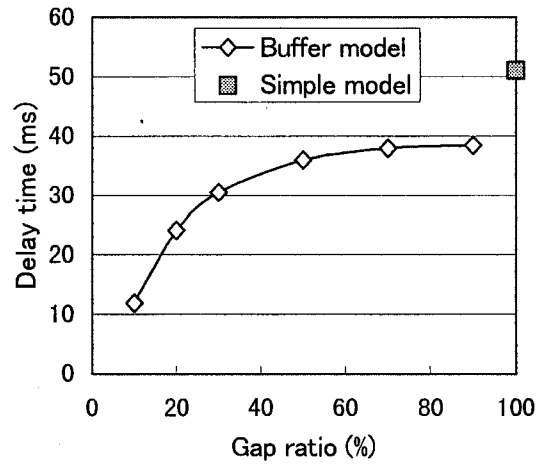


図 3-34 ADL 外径、バッファー室数と遅延時間の関係 (破断面積: 10cm^2)



(a)



(b)

図 3-33 バッファー室の圧力緩衝効果

ADL 外径: 400 mm, 長さ: 1600 mm, バッファー室数: 16

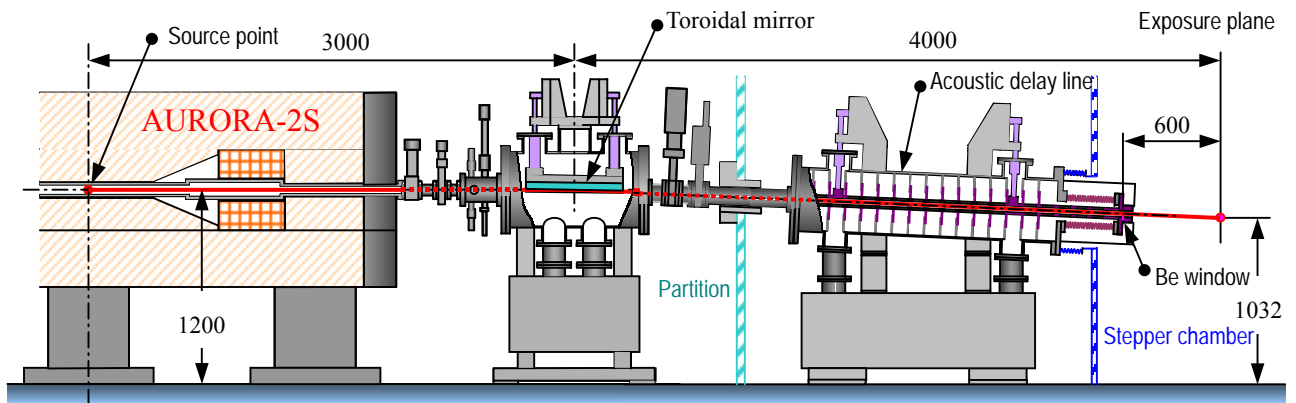


図 3-35 ビームラインの設計例

数と遅延時間との関係である。この計算ではバッファー室の長さを 100mm に固定しているためバッファー室の数が増加する分、ADL の長さが上流側に伸びる。

しかし、ビームラインの全長は変わらない。この図から遅延時間を想定した場合の ADL の設計条件が求められる。高速遮断弁の作動時間を 30 msec とし、ベリリウム窓全体が破損した場合（面積 10cm²）でも新設計の ADL は十分対応可能であることを示している。図 3-35 は表 3-2 中の 7 m ビームライン（タイプ A）の構成を示したものである。実際には全長 5 m のラインを建設し ADL を装着し駆動試験を行った。ADL の性能試験（遅延効果）は行っていないが、ADL の実験データについては Guyon 他が ACO のシンクロトロン施設で行った結果が報告されている。²³ 試験条件が必ずしも明確でないので一部の条件を想定して比較すると、今回のシミュレーション結果とかなりよく合致する。

3-7 大面積露光に対するレジストパターンの均一化

X 線リソグラフィの照射野内では、ビームパワーの分布が一様の場合でもスペクトルは全照射野にわたって必ずしも一様ではない。この傾向は照射野が大きくなるほど顕著になる。このスペクトルの変化は、現像後のレジストパターン寸法(Critical Dimension: CD)に変化を及ぼし、パターンの分解能を劣化させる。ここでは、線幅 100 nm のパターンを 50 x 50 mm² の照射野に形成する場合、スペクトルの変化が CD（ここでは 100 nm の線幅を指す）に及ぼす影響について評価する。²⁴ 光源点から照射野の中心に向かうビーム経路と、照射野の他の部分に向かうビーム経路は異なるので、照射野のそれぞれの点でスペクトルにも差異が生じる。これはレジストの最終パターン寸法(CD)に何らかの影響を与えらると思われる。本研究は住友重機械(SHI)とウィスコンシン大学ナノテクノロジーセンター (CNTech) と共同で行った。SHI の AURORA-2 とビームライン（図 3-35 参照）が本研究に用いられた。CNTech はスペクトルの変化による CD の変化を自身で開発した計算プログラム ToolSet²⁵ を用いて計算した。CD の変化は 50 x 50 mm² の照射野の 9 箇所で行った。図 3-36 に示すようにスペクトルは照射野 50 x 50 mm² の 9 箇所の点に対して計算した。（図中の記号は CNTech の計算プログラム Shadow によるも

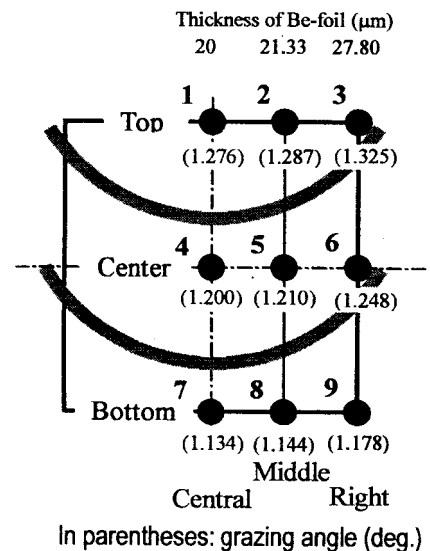


図 3-36 照射位置の記号

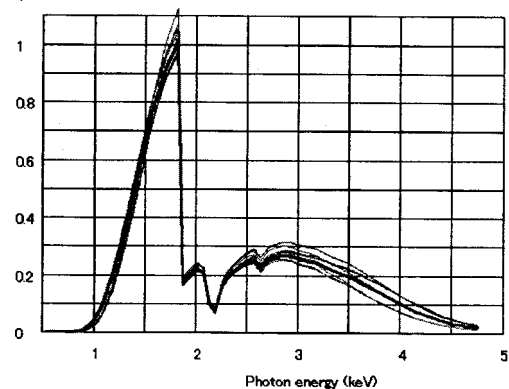


図 3-37 照射野内のスペクトル

ので上向き反射の座標系に対応している。設計では下向き反射である。) それぞれの照射位置はミラー上で異なった反射点を持ち、ベリリウム窓の異なる点を通過しているのでスペクトルも異なるはずである。パワースペクトルを図 3-37 に示す。ここでスペクトルは照射野の中央の点 (center/central) のスペクトルの最大値で規格化している。この点 (center/central) と他の点とのスペクトルの差を図 3-38 に示す。

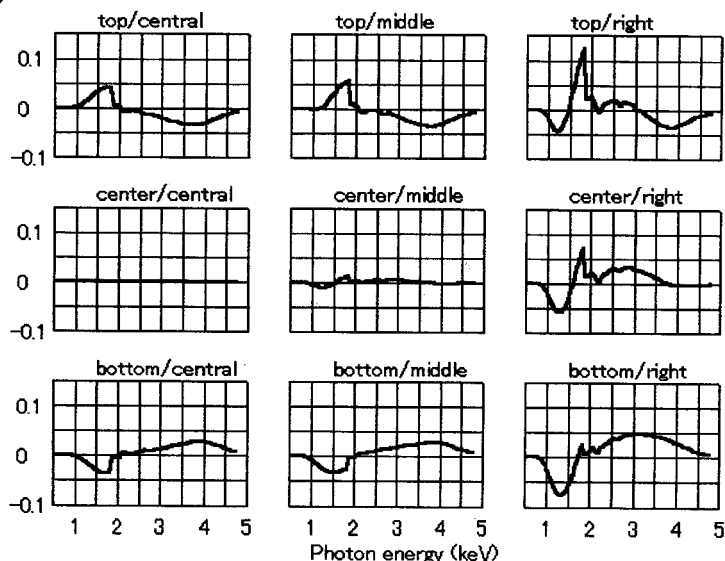


図 3-38 光軸中心に対するスペクトル変化

9箇所での CD 変化は CNTech のシミュレーションコード Toolset を用いて計算を行った。照射パラメータは、光源の臨界波長 1.42 nm、視き角 20 mrad(1.2°)の白金コーティングされたミラー、厚さ 20 μm のベリリウム箔 (曲率半径 30.1 mm) から成り立っている。シミュレーションに用いたマスクは、厚さ 2 μm の SiC 基盤と厚さ 400 nm のタンタル吸収体からなり、CD100 nm のレンガ状 (千鳥状) パターンである。近接ギャップは 10 μm で、レジストは厚さ 400 nm のポジ型レジスト (Shipley UV-2) である。CD の変化は露光強度を ±10% に変化させて計算した。その結果を図 3-39 に示す。3 本の棒グラフは左から -10%, 0%, +10% の露光強度に対応している。CD の変化に関するパラメータとして、ここでは次の 4 つ—(1) 露光面のビーム強度, (2) レジストの吸収線量, (3) 光子エネルギーの平均値, (4) 露光量のレベル—をパラメータとしてとりあげる。CD 変化とそれぞれの要素を一次式で次のように表す。

$$V_{ap}(i) = K_1 P_{res}(i) + K_2 E_m(i) + K_3 D + K_4 \quad (3-45)$$

ここで、変化量の単位は%、 $V_{ap}(i)$ は照射野番号 $i(i=1\sim 9)$ における CD、 $P_{res}(i)$ は同じ入力パワーによるレジストの吸収パワー、 $E_m(i)$ は光子

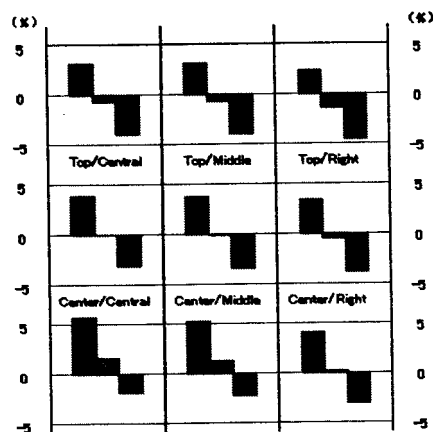


図 3-39 CD の変化量

(左から -10, 0, +10% dose 量変化に対応)

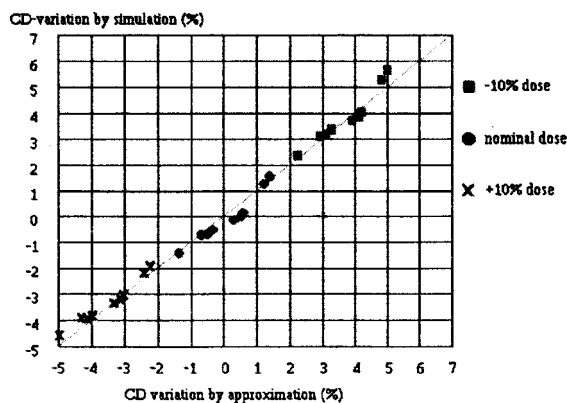


図 3-40 CD 変化の近似式との比較

スペクトルの平均エネルギー、 D は露光量のレベル(-10%~+10%)、 $K_1 \sim K_4$ は一次係数である。

$P_{res}(i)$ と $E_m(i)$ は露光面中心 center/central($i=4$)の値で規格化されている。最小二乗法によりシミュレーション結果と式(3-45)が最も合致する係数 $K_1 \sim K_4$ を計算すると： $K_1=0.072, K_2=0.60, K_3=-0.36, K_4=0.50$ となる。この近似式は図 3-40 に示すように高い相関性を表している。標準偏差 1σ に対応する値は 0.27% である。

ビームラインの設計パラメータを調整することにより露光強度の分布を変えることができるので、意図的に露光強度を不均一にすることにより CD の変化を打ち消すことができる。露光強度の補正值を D_c とすると式(3-45)は次のように書き換えられる。

$$K_1 P_{res}(i) + K_2 E_m(i) + K_3 (D - D_c) + K_4 = 0 \quad (3-46)$$

ここで標準露光モードでは $D=0$ であるので上式は、

$$D_c = \frac{K_1 P_{res}(i) + K_2 E_m(i) + K_4}{K_3} \quad (3-47)$$

となる。均一な露光強度分布から修正された露光強度分布は図 3-41 のようになる。露光強度分布は二次元であるので、この修正はミラーの揺動速度とベリリウム窓の形（曲率半径）を修正することにより達成される。CD 変動の許容値から強度分布の許容誤差が計算できる。計算によると $\pm 1\%$ に CD 変化を抑えるためには修正された強度分布に対し $\pm 3\%$ の誤差が許容される。

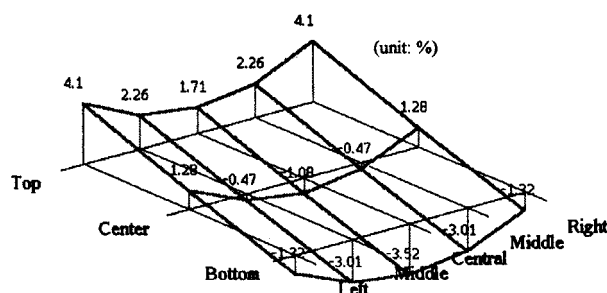


図 3-41 強度分布の調整による CD 変化の改善

3-8 試作ビームラインによる性能実証

本章でこれまで検討した結果をもとに、AURORA-2 に接続するビームラインを建設した。¹⁶ 設計仕様は表 3-3 に示したものと同一である。光源からベリリウム窓までの距離は設置スペースの都合で 5 m になっている。ベリリウム窓から露光面までの距離は 600 mm で、光は 1 気圧のヘリウムガス中を通過する。図 3-42

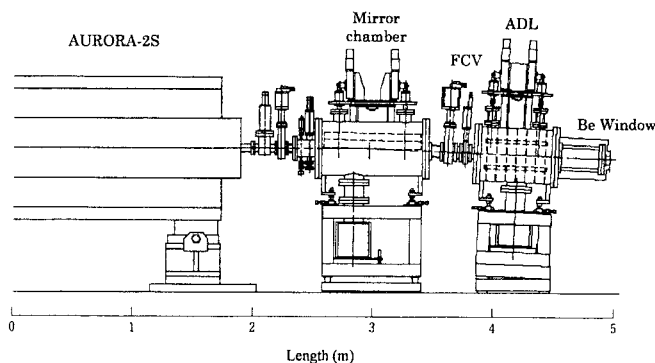


図 3-42 ビームライン全体図

はその全体図で、光源点からの距離を付記している。露光強度の均一性については、露光面積 $30 \times 30 \text{ mm}^2$ で $\pm 3.9\%$ 、露光面積 $26 \times 25 \text{ mm}^2$ で $\pm 2.8\%$ の実測値を得ている。使用したベリリウム箔は $20 \mu\text{m} \pm 3\%$ の精度であるので、精度の向上とベリリウム箔の半径をさらに最適化できる可能性を考えると、 $30 \times 30 \text{ mm}^2$ で $\pm 3\%$ の均一性を得ることはさほど困難でない。露光強度についてはネガレジスト TDUR-N908 を用いた露光結果から計算した値は、露光面積 $50 \times 50 \text{ mm}^2$ 、電流値 500 mA に対し 43 mW/cm^2 であった。これは設計値の 50 mW/cm^2 に近い値であり、設計目的をほぼ達成したといえる。なおこの露光強度は、これまで世界で報告されている実験値の中で最も高い値である。ピッチ 200 nm および 160 nm の line and space パターンの露光結果を図 3-43 に示す。

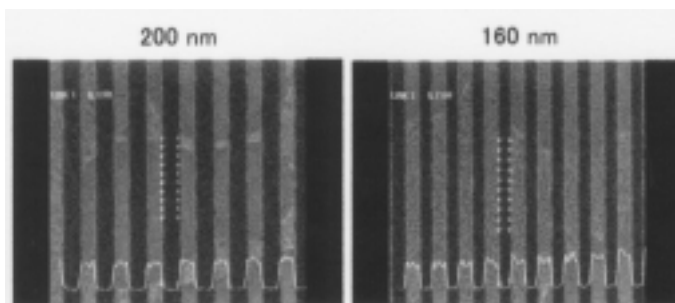


図 3-43 露光実験結果 (ピッチ : 200 nm , 160 nm)

3-9 結言

従来のビームラインの光学系をその水平面、垂直面の収束方法について分類・検討を行った。X線に対するミラーの反射特性とビーム取出し窓の透過特性をまとめた。また、ベリリウム箔の強度と形状について記述した。これまで建設されたビームラインの代表的な実例を説明した。

これまで1枚ミラーを使用したビームラインは集光、収束性能に限界があるとされていたが、今回ミラーの揺動中心を光源点付近に置く方法を提案し、露光ビーム形状が変化しないことを見出した。その結果、大きい取込角で集光することが可能になった。また、円弧状ビームは、サグの影響により露光強度が低下すると言われていたが、集光効率がスキャン効率を上回ることにより露光強度が増強できることを計算で確認した。垂直方向の収束性について、トロイダルミラーのメリディアン断面を修正することにより収束性が改善できることを解析した。また、修正形状ミラーの製作方法についても具体的な方法を提案した。ランアウト角の評価を行い、新方式によりランアウト角が減少できることを示した。

次に新方式によるビームラインの強度分布を均一化する方法として、湾曲形断面を持つビームを湾曲面からなるベリリウム窓と組み合わせることにより、ビーム強度を均一化する方法を提案し、計算によりその効果を確認した。ベリリウム窓として、3種類の形式を提案し、シミュレーションにより効果を確認した。さらに総合評価の結果、1種類に絞り込んだ。また、湾曲面を単純な円筒面で代表させる計算式を提示した。

ベリリウム箔の破損に対応するため用いられている Acoustic delay line (ADL)に

ついて検討を行った。従来の構造では露光範囲の増大傾向に対応困難になっている。ADL を内筒、外筒の二重構造にして、光を通す内筒をミラーと同期運動させる構造を提案した。これによりベリリウム窓寸法を最小化することができるので、ベリリウム箔に加わる差圧、温度上昇に対し有利な設計が可能になる。ベリリウム箔破損時のビームライン内の動的圧力上昇を計算するシミュレーションコード BLVAC を開発し計算を行った。その結果、高速遮断弁の閉鎖時間に 30 msec 以上の余裕を持たせる設計が可能となった。

露光面積の増大につれて、露光中心部と周縁部のスペクトルの差がレジストの成形基本寸法(CD)に影響を及ぼす。ウィスコンシン大学と共同研究を行い露光強度に意図的な不均一分布を与えることにより CD 変化を抑えることができることを見出した。

最後にこれまでの研究成果を織り込んだビームラインを設計・建設し設計仕様を満足する実験結果を得た。得られた露光強度はこれまで世界で報告された性能の中で最高のものである。

引用文献

1. 日本物理学会編 (1986) シンクロトロン放射、培風館.
2. K. Hara and T. Itoh (1992) Study of large-field beryllium window for SR lithography, *SPIE* **1671**, pp391-400.
3. S. Timoshenko (1951) 材料力学、コロナ社.
4. K. Kuroda, T. Kaneko, and S. Itabashi (1995) Efficient extraction window for high-throughput x-ray lithography beamlines, *Rev. Sci. Instrum.* **66**(2), pp2151-2153.
5. Y. Maejima and N. Awaji (1993), Improvement of Dose Uniformity in Large Exposure Field for Synchrotron Radiation Lithography, *Jpn. J. Appl. Phys.* **32**, pp 5801-5804.
6. J. Silverman, R. Ripstein, and J. Oberschmidt (1993) X-ray lithography beamlines in the IBM Advanced Lithography Facility, *IBM J. Res. Develop.*, **37** (3), pp.395-410.
7. G. Chen, K. Yamazaki, W. Waldo, J. Welnak, G. Wells, and F. Cerrina, (1994) Synchrotron radiation x-ray lithography beamline optics alignment using the Hartman method, *J. Vac. Sci. Technol.* **B12**(6), pp 4013-4017.
8. R. Cole, P. Anderson, G. Wells, E. Brodsky, K. Yamazaki, and F. Cerrina, (1992) Performances of the CXrL X-ray Beamlines, *SPIE*, **1671**, pp.461-470.
9. T. Kaneko, Y. Saitoh, S. Itabashi, and H. Yoshihara (1991) High efficiency beamline for synchrotron radiation lithography, *J. Vac. Sci. Technol.* **B9**(6), pp3214-3217.
10. K. Kuroda and T. Kaneko (1995) Mirror Design and Alignment for X-Ray Lithography Beamlines, *Jpn. J. Appl. Phys.* **34**, pp. 6764-6769.
11. S. Goto, T. Taguchi, T. Osada, S. Okumura, and T. Hisatsugu (1993) Synchrotron radiation beamline for x-ray lithography, *J. Vac. Sci. Technol.* **B11**(2), pp286-295.
12. 島野裕樹、糸賀賢二、丸本健二 (1995) SR リソグラフィームラインの新しい光軸調整法、*光学* Vol. 24 No. 12, pp731-738.
13. 島野裕樹、一二三敬、糸賀賢二、尾崎禎彦 (1994) SR 転写用ビームラインシステム、*真空* Vol. 37, No. 11, pp.935-940.
14. Y. Watanabe, S. Hara, N. Mizusawa, Y. Fukuda, and S. Uzawa, (1997) Novel illumination system of synchrotron radiation stepper with full field exposure method, *J. Vac. Sci. Technol.* **B15**(6), pp2503-2508.
15. E. Toyota (1998) Design study of compact beam lines for x-ray lithography, *J. Vac. Sci. Technol.* **B16**(6), pp3462-3465.
16. S. Hirose, T. Miyatake, X. Li, E. Toyota, and M. Hirose (2000) Performance of a compact beamline with high brightness for x-ray lithography, *J. Vac. Sci. Technol.* **B18**(6), pp2986-2989.
17. E. Toyota (1999) Optical Design of High-Performance Beam Lines for X-Ray Lithography, *Jpn. J. Appl. Phys.* **38**, pp. 3513-3521.

18. 豊田英二郎 (1997) シンクロトロン放射光伝搬装置 特許 3118205 号
19. J. Xiano, F. Cerrina, and R. Rippstein (1994) Novel single mirror condenser for x-ray lithography beam lines, *J. Vac. Sci. Technol.* **B12**(6), pp4018-4023.
20. E. Toyota (1998) Dynamic Response of Acoustic Delay Line for Beam Lines of Synchrotron Radiation Lithography System, *Jpn. J. Appl. Phys.* **37**, pp.6851-6854.
21. 豊田英二郎 (1997) X線リソグラフィー用ビームラインの音波衝撃遅延回路 特許 3190596 号
22. 松尾一泰 (1994) 圧縮性流体力学 第3章、理工学社
23. P. Guyon, C. Depautex, and G. Morel, (1976) Design of a synchrotron radiation facility for Orsay's ACO storage ring: LURE, *Rev. Sci. Instrum.* **47**(11), pp.1347-1356
24. M. Khan, F. Cerrina, and E. Toyota, (1999) Pattern resolution of an x-ray beamline with a wide exposure field, *J. Vac. Sci. Technol.* **B17**(6), pp. 3433-3438.
25. S. Bollepalli, M. Khan, and F. Cerrina (1997) Optimization of exposure parameters for 0.13 μ m lithography, *Digest papers of International Workshop on X-Ray and EUV Lithography*, Yokohama, P2-4.
26. 熊谷寛夫、富永五郎 (1975) 真空の物理と応用 第7章、裳華房

第4章 X線マスクの熱変形が転写性能に及ぼす影響

4-1 緒言

X線マスクはX線リソグラフィの開発の中で常にクリティカルな技術として位置付けられてきた。X線リソグラフィは等倍露光が基本であり、マスクの誤差が直接に転写パターン誤差につながるためである。本論文では、X線による縮小露光を提案し(第6章)拡大マスクを用いることにより、この問題点を解消しようとするものであるが、本章では現在用いられている等倍マスクに対して、最初に(4-2節および4-3節)X線マスクの一般的な説明を行い、次に(4-4節)マスクの熱変形が転写性能に及ぼす影響について検討結果を報告する。

4-2 マスクの要求特性と構成

X線マスクはX線を透過する薄い基膜(メンブレン)基膜上にパターン形成された吸収体およびこれらを保持するフレームからなっている。マスク基膜として初期には有機膜(ポリイミド)が使用されたが、化学的、熱的に不安定なことから1980年代にはSiNが用いられるようになった。しかし、SiNは放射線耐性に問題があり1990年代には剛性面でも優れたSiCが用いられるようになった。最近はさらに剛性の高いダイヤモンド薄膜が使用されはじめた。基膜の厚さは通常1~3 μm である。平坦性を保ち、変形を少なくするため、基膜は200MPa程度の引張り応力を持つように形成される。¹ 吸収体にはX線を透過しにくい材料として、原子番号が大きい重金属が用いられる。米国ではAuが主流であったが半導体製造工程での汚染除去が問題になり、現在ではW, Taが主に使用されている。基膜面に蒸着する際およびエッチング時の残留応力を少なくするため、他金属との合金(Ta₄B, TaSi, TaGe, TaReGe, W-Ti等)も用いられている。厚さはほぼ0.3~0.5 μm である。これらの材料の物理特性を表4-1に示す。²

表4-1 X線マスク基膜および吸収体材料の特性

材料	密度	T	T	Y	UTS	α	k	
	g/cm^3	1 μm	2 μm	d/cm^2	d/cm^2	$\text{ppm}/^\circ\text{K}$	$\text{W/cm}^\circ\text{K}$	
基膜	SiN	2.75	0.56	0.39	1.7	0.05	2.1	0.2
	SiC	3.2	0.57	0.41	4.6	0.2	4.6	0.41
	Diam.	3.52	0.58	0.47	10.5	0.02	3.5	6.55
吸収体	Au	19.3	0.14	0.05	0.8		14.2	3.18
	W	19.3	0.14	0.05	3.9		4.5	1.74
	Ta	16.6	0.20	0.07	1.9		6.5	0.57

上表で T は厚さ 1 μ m, 2 μ m の場合の放射光 (平均波長: ~1 nm) の透過率、Y はヤング率、UTS は極限強さ、 α は線膨張率、k は熱伝達係数である。

フレームはシリコンウエハをエッチングして製作する。当初、マスクの形状はステッパメーカー、ユーザーによってまちまちであったが、現在では米国が提唱した標準形状にほぼ統一されている。図 4-1 にその形状を示す。図中の直径 82mm または対角 52mm 角の内側がマスク部分になる。このフレームは取り扱いを容易にするためさらにパイレックスガラスまたはセラミックスのフレームに接着される。

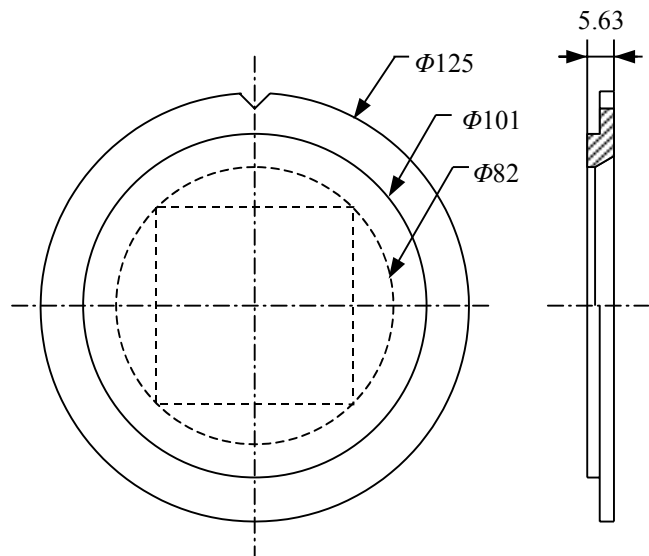


図 4-1 X 線マスクの標準フレーム (NIST フォーマット)

4-3 マスクの製法

マスクの製作にはマスクメーカーの製作ノウハウが絡んでいるので詳細は必ずしも明らかではないが、その基本工程を図 4-2 に示す。まず、Si ウエハ表面に基膜 (SiC、ダイヤモンド等)、裏面に SiN 膜を形成する。マスク基膜上に吸収体膜 (W, Ta 等) さらに SiO₂ 膜を形成する。次に Si ウエハ裏面からバックエッチしてマスク基膜を露出させる。次に表面にレジストを塗布し、EB (電子ビーム) 描画を行い、現像してレジストパターンを形成する。このレジストパターンをマスクとして SiO₂ をエッチングする。次に SiO₂ パターンをマスクとして吸収体に対しリアクティブ・イオンエッチングを行う。最後にフレームを接着する (この工程を EB 描画の前に行う場合もある)。

当初は、パターン形成が容易なように、吸収体パターンを形成した後、Si ウエハの背面エッチングを行っていた (パターン形成先行プロセス)。しかしウエハの残留応

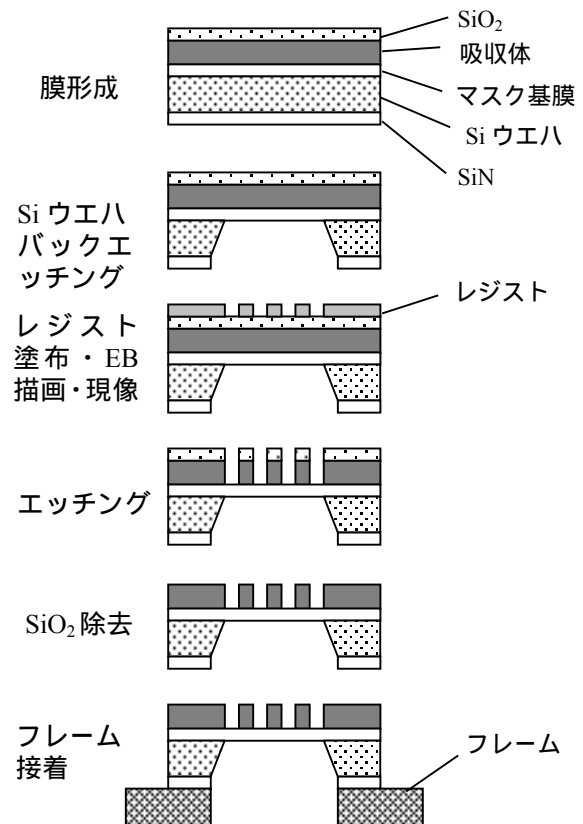


図 4-2 X 線マスクの製作プロセス

力の開放による変形が問題になり、Si ウエハのバックエッチングを最初に行うバックエッチ先行プロセスが日米間で標準プロセスとして選定された。³ それぞれの工程で発生する夫々の材料の残留応力を少なくすることがマスク製作で最も重要で、マスクメーカーはさまざまな工夫を施している。例えば、NTT では吸収体とマスク基膜の間に Ru 中間層を形成し、吸収体がドライエッチングの過程で発生する応力を緩和する等の対策を講じている。¹ また、図 4-2 には省略しているが、露光時の位置合わせ精度を向上するため反射防止膜が付加されることもある。マスクの精度向上の要素技術は表 4-2 のように集約される。³

表 4-2 マスク精度向上の要素

ひずみ発生プロセス	対応
ウエハのバックエッチ	メンブレン（基膜）の剛性 レジストの均一塗布
吸収体	低応力吸収体（合金） 合金の安定化 アニーリング方法 スパッタリング方法、速度
吸収体エッチング	エッチング条件の最適化 He での背面冷却 エッチストップ膜(ITO)
ガラスフレーム	接着方法 セラミックの使用（熱膨張）
電子線描画	近接効果の補正 高加速電圧

X 線マスクは、線幅 100 nm レベルでは商業ベースでの入手が可能であり（例えば ATT-AT 社）、開発ベースでは 35 nm またはそれ以下の実績が報告されている。¹⁷ X 線マスクの製作後の検査・修復工程はまだ確立された段階にはない。パターン欠陥の検査および収束イオンビームを用いた修復についてはまだ開発段階である。また、マスクのクリーニング方法についてもまだ確立されてはいない。

4-4 マスクの熱変形の転写性能への影響

照射中のマスクの熱変形が転写精度に及ぼす影響について検討を行った。スキャンミラーを使用しているビームラインではスキャン中にマスクが熱変形し、イメージ形成を損ねるという理由で全面一括照射方式のビームラインを提案しているところもある（3-2-1 節参照）。^{4,5} ここでは 3-5 節で提案したビームラインを用いた場合の熱変形について検討する。マスクの熱変形については、これまで多くの検討がなされている。⁶⁻¹⁴ しかし、熱変形が最終的に転写精度にどのように影響するかについて

はあまり論じられていない。特にマスクの二次元の熱変形に対しては検討されていない。最初にマスクの温度上昇と熱変形に関する計算を行った。¹⁵ 次に熱変形が転写精度に及ぼす影響について検討した。¹⁶

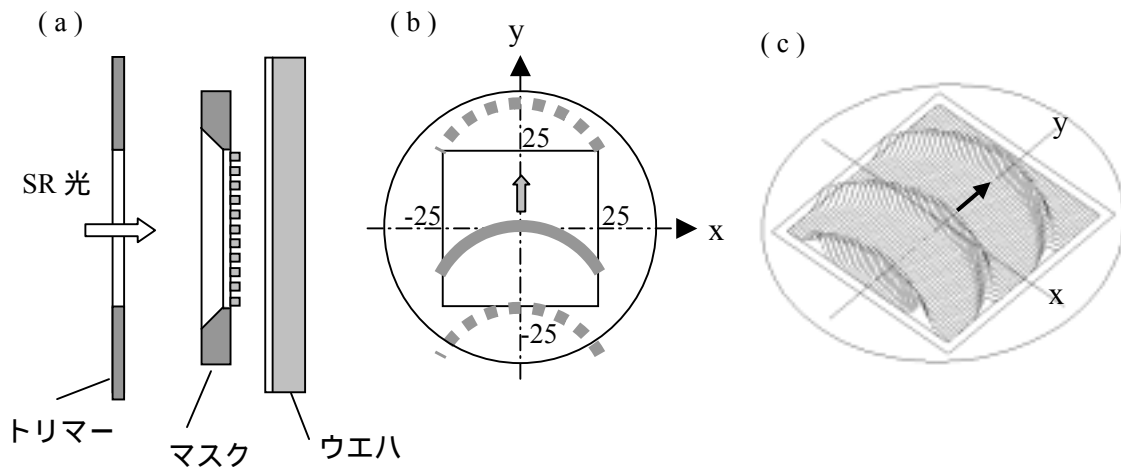


図 4-3 露光概念を示す断面(a)、マスク上面(b)およびビームパワーの分布形状(c)

図 4-3(a)に露光機構の断面を示す。マスクは図 4-1 の NIST フォーマットで、基膜の外径は 82 mm、パターン領域は 55 x 55 mm²、SR 光はトリミング枠(トリマー)を通して 50 x 50 mm² の範囲に照射される。ビーム形状は円弧状で、図 4-3(b)の下側の点線の位置から上の点線の位置まで 1 sec でスキャンする。スキャン開始から 0.4 sec 後に図示のようにビーム中心がマスク中心を通過する。マスク基膜は厚さ 2 μm の SiC、吸収体は厚さ 0.5 μm の Ta、厚さ 775 μm の Si ウエハ表面には厚さ 0.5 μm のレジスト (PMMA) が塗布されている。マスクとウエハ(レジスト表面)とのギャップは 10 μm である。ギャップ空間とマスクの上流側は He ガス(1 atm)雰囲気である。円弧状のビームの強度はビーム中心が座標中心にあるとき、次式で表される(第 3 章参照)。

$$P = P_0 \left[1 - \left(\frac{x}{R} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \exp \left[-\frac{y^2}{2\sigma^2} \left\{ 1 - \frac{x^2}{R^2} \left(\frac{1}{y} - \frac{1}{R} \right) \right\} \right] \quad (4-1)$$

ここで、 P_0 は X 線の最大パワー、 R は湾曲半径、 σ は $x=0$ での y 方向の標準偏差である。AURORA-2 の電子エネルギー 0.7 GeV、蓄積電流値 500 mA として、3-5 節で設計したビームラインを適用すると $P_0=3.9 \text{ W/cm}^2$, $R=31 \text{ mm}$, $\sigma=1 \text{ mm}$ となる。図 4-3(c) にビームの強度分布の様子を三次元的に示す。図 4-4 は $x=0$ のときマスク、レジストおよびウエハ表面での式(4-1)によるビームパワーの分布を示す。マスク、レジストおよびウエハに吸収されるパワーを表 4-3 に示す。ここで吸収体は面積比で 0, 50, 100% の場合について計算した。

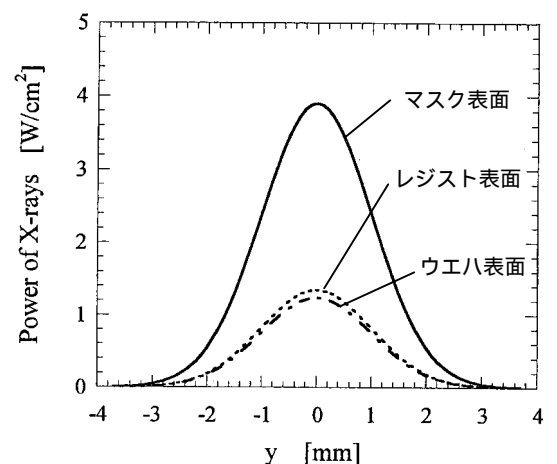


図 4-4 ビームパワーの分布($x=0$)

表 4-3 各層での吸収パワー (単位: w / cm^2)

吸収体 (%)	0	50	100
マスクメンブレン	1.6707	1.6707	1.6707
マスク吸収体	0	0.8854	1.7708
レジスト (MPPA)	0.1806	0.1065	0.0324
ウエハ第1層 (1 μm)	0.3813	0.2199	0.0584
ウエハ第2層 (1 μm)	0.2797	0.1633	0.0468
ウエハ第3層 (1 μm)	0.2131	0.1263	0.0394
ウエハ第4層 (1 μm)	0.1677	0.1006	0.0335
ウエハ第5層 (1 μm)	0.1351	0.0818	0.0284

上表で、ウエハの吸収パワーは、上層より 1 μm 刻みに第 5 層まで個別に計算し、第 6 層 (厚さ 770 μm) の吸収パワーは 0 とした。

露光部の伝熱プロセスを図 4-5 に示す。非定常伝熱の一般式は次のように表される。

$$c_1 \rho_1 D_1 \frac{\partial T_1}{\partial t} = K_1 \left(\frac{\partial^2 T_1}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_1}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T_1}{\partial z^2} \right) + q_1 - h_0(T_1 - T_0) - h_1(T_1 - T_2) \quad (4-2)$$

ここで c は比熱、 ρ は比重、 D は厚さ、 K は熱伝導率、 T は温度、 q は吸収パワー、 h は熱伝達率である。添数字は z 方向の上流側 ($i-1$)、対象物 (i)、下流側 ($i+1$) を表す。マスクの物性値はマスク基膜と吸収体を一体として計算する。輻射、対流については温度差が数 $^{\circ}\text{C}$ のレベルでは無視できる。したがって式(4-2)で、 $h_0=0$ 、 $h_1=k_1/D_1$ と簡略化できる。また z 方向の温度変化は無視できるので、

$$\frac{\partial^2 T_1}{\partial z^2} = 0 \quad (4-3)$$

とすることができる。式(4-2)を図 4-5 の各層に適用して市販の計算コード MSC/NASTRAN を用いて計算を行った。図 4-6 は、マスク中心($x=0$, $y=0$)での照射パワーと温度上昇の時間変化を示すもので、ビーム中心が通過する 0.4 sec の時点での温度上昇は 1 $^{\circ}\text{C}$ (雰囲気温度 22 $^{\circ}\text{C}$) である。

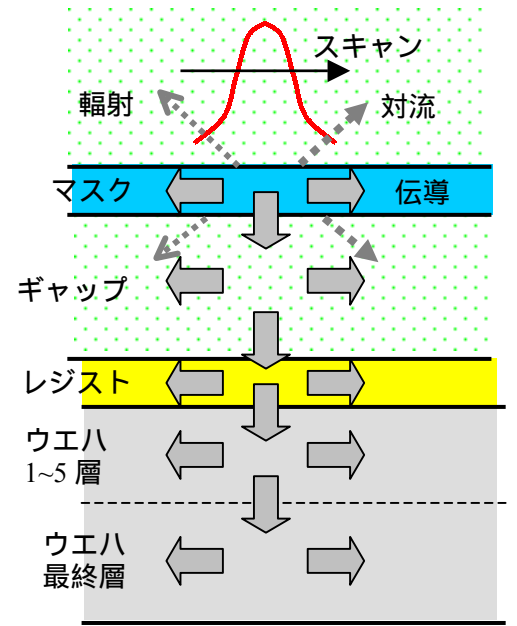


図 4-5 露光部の伝熱プロセス

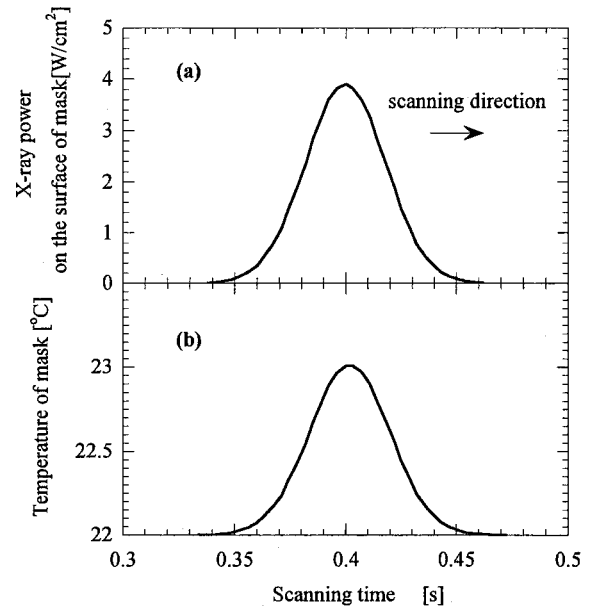


図 4-6 マスクの照射パワー(a)と温度(b) (位置: $x=0$, $y=0$)

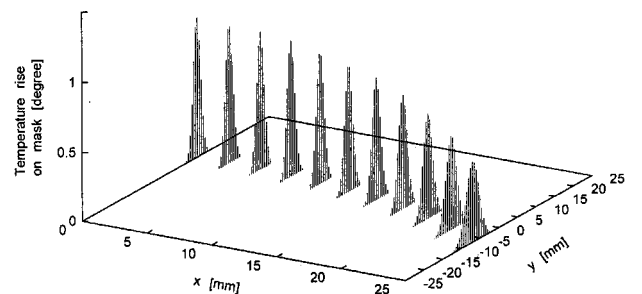


図 4-7 マスクの温度上昇(time: 0.4 sec)

温度上昇はビームの移動と殆ど同時に発生し、時間遅れはみられない。図 4-7 は同時期の温度上昇を二次元平面で示したものである。中心から離れるほど (x が大きくなるほど) 温度上昇は小さくなるが、温度上昇の幅は広がる。これは照射野の線量分布が均一になるようなビームラインの設計を反映するものである。この計算は吸収体が 100% の場合である。

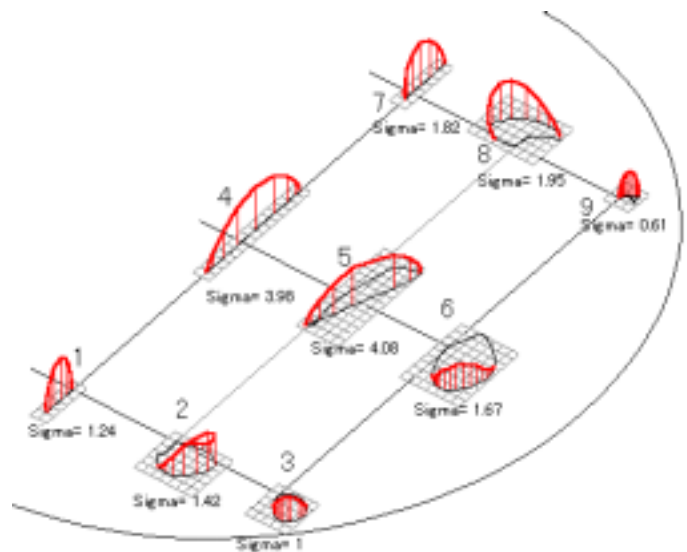


図 4-8 マスクの熱変形と照射パワー

温度上昇の計算については、別途作成した差分法による二次元プログラムを使用しても 0.9°C の計算結果を得ている。この場合、ギャップ中の He ガスの最大温度上昇は約 0.5°C 、ウエハの温度上昇は殆ど 0 であった。したがって、温度そのものがシステムに及ぼす影響はないと考えられる。

マスクの熱変形は温度上昇のデータを再び MSC/NASTRAN にインプットして計算を行った。計算の結果、 x 方向の最大変位は 5.7 nm 、 y 方向のそれは 12.7 nm ($-4.5\sim 8.2\text{ nm}$) であった。従来この変位が転写誤差であるように考えられていたが、ここでは熱変形と転写誤差の関係についてさらに検討を行った。図 4-8 はマスク上の 9 点 ($x=0, 12.5, 25\text{ mm}$, $y=-25, 0, 25\text{ mm}$) のスキャン時の変位の軌跡を示したものである。ビームは点 1 から点 7 の方向にスキャンされる。各点の変位は 1 目盛り 1 nm のグラフ上に黒線で示される。 y 軸上 ($x=0$) では、対称性のため軌跡は直線になるが、他の位置では右回りの軌跡を描く。ビームが各点を通過する際の温度上昇を軌跡上に高さ (z 軸) で示し、軌跡と垂線をつないでいる (赤線)。垂線は 5 msec 刻みに表示しているのでビームが通過する前後の熱変形が極めて急速であることがわかる。図 4-9 はマスク中心 (点 4) での変位の時間的経過を示したものである。ビームがマスク中心

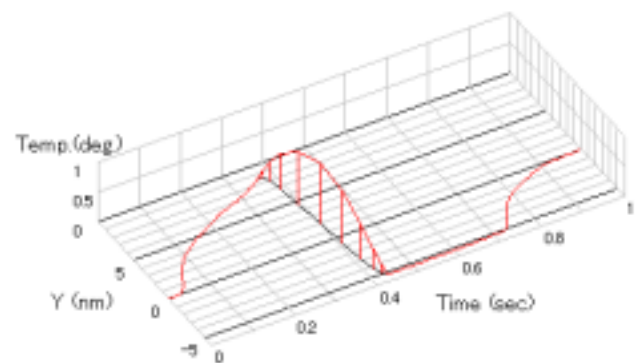


図 4-9 マスク中心での熱変形 (点 4)

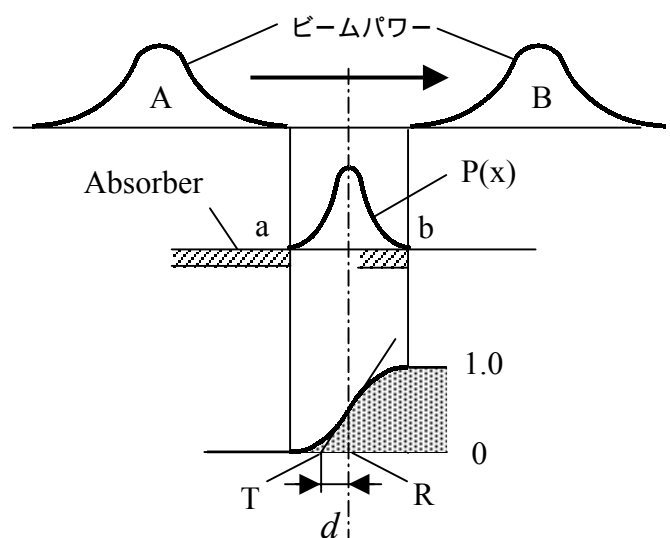


図 4-10 熱歪による半影効果

に近づくとつれてマスクは y 方向のビームの反対側に 9 nm 移動し、ビームが通過する約 50 msec の間に逆方向に 14 nm 変位する。ビームが遠のくとつれて元の 0 位置に復帰する。

図 4-10 はマスクの変形による半影の影響を模式的に示したものである。ビームが A から B に移動するときにマスクが a から b に変位するとする。マスクが a から b に変位する間の微小範囲 a-b のビームパワーは $P(x)$ のようになる。このマスクの変位とビームパワー（マスク温度上昇に比例）の変化は、図 4-8, 4-9 に示したように計算される。取り扱いを容易にするためビームパワー分布を次のように正規分布で表す。

$$P(x) = P_0 \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma_1^2}\right) \quad (4-4)$$

ここで、 P_0 は最大パワー、 σ_1 は標準偏差である。吸収体のエッジ部分に着目すると、吸収体が移動することにより吸収体の下での a-b 間の露光強度 $Q(x)$ は式(4-4)の積分値として次のように示される。

$$Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_1} \int_a^b \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma_1^2}\right) dx, \quad (4-5)$$

ここに $Q(x)$ は 1 で規格化している。半影を表す指標として点 T-R 間の距離 d を考える。点 T は基準点 R での $Q(x)$ の接線とベースラインの交点である。 d は次式で表される。

$$d = \sqrt{\pi/2}\sigma_1 \quad (4-6)$$

図 4-8 には σ_1 を最小二乗法により計算した値を併記している。マスク中心部での値は約 4 nm で、 d は 5 nm になる。半影の絶対値としては $2d$ で評価する方が妥当で、 $2d$ は 10 nm になる。現像の余裕度を最大 $\pm 20\%$ とすると、 ± 2 nm が線幅 (CD) のばらつきに相当する。この値は単独では殆ど問題にならない。計算に用いたビーム幅 (実質 4 mm) を 2 倍に広げるとさらに半分に下げることができる。また、マスク基膜を SiC に代えてダイヤモンド膜を使用すると熱変形を 76% に抑制でき、膜厚を 2 μm からさらに厚くすることができるので、これらのパラメータを調整することにより熱変形が問題にならない設計は十分可能である。半影ボケの問題は 6-7 節で総合的に検討する。従来の議論ではマスクの最大歪量 (今回の計算では 14 nm) が問題とされていたが、今回の検討では CD 変化に反映されるのはその約 1/3 (4/14) であることが明らかになった。なお、ビームが通過する瞬間のマスクの変形位置が計算できるので、マスク製作時にパターンを修正することが可能である。

4-5 結言

本章では 4-2 節で X 線マスクの基本事項について概説し、4-3 節で現在の X 線マスクの製作方法と問題点について報告した。マスク基膜は現在の SiC からさらにダイ

ヤモンド膜に移行しつつある。吸収体については多くの選択肢があり、現在集約の方向にはないが、技術的には安定化している。線幅 35 nm レベルの製作例が報告されており、技術的な問題は一応解決されている。ただし、マスクの検査及び修復方法については量産レベルに対応できる技術は未開発である。

4-4 節で著者が研究したマスクの熱歪とイメージ形成に及ぼす影響について報告した。湾曲断面ビームがマスクをスキャンする際のマスクの二次元熱変形の厳密な計算は今回が初めてである。1 枚ミラーを用いたビームラインではマスクの熱変形が大きく実用困難という見方が一部にあったので、有限要素法を用いて具体的な計算・評価をおこなった。計算の結果、マスクの温度上昇は約 1 °C で、マスクの最大変位量は 14 nm であった。従来、〔マスクの変形量〕 = 〔転写誤差〕と見られていたが、転写誤差に及ぼす影響はその約 1/3 であり、熱変形量はマスクおよびビームラインの設計パラメータを調整することによって大幅に抑制できることが明らかになった。

引用文献

1. 小田政利、嶋田勝、土沢泰、内山真吾 (2001) 高精度 X 線マスクの開発、*NTT R&D* **50**(6) pp.414-423.
2. F. Cerrina (1996) X-ray Lithography, *to be published in SPIE Handbook on Lithography, Chapter 3.*
3. 光量子科学技術推進会議編 (1997) 実用シンクロトロン放射光、5.5 半導体リソグラフィ (北山豊樹) 日刊工業新聞社、pp.235.
4. Y. Watanabe, S. Hara, N. Mizusawa, Y. Fukuda, and S. Uzawa, (1997) Novel illumination system of synchrotron radiation stepper with full field exposure method, *J. Vac. Sci. Technol.* **B15**(6), pp2503-2508.
5. 原真一、雨宮光陽、渡辺豊、水沢伸俊 (1997) SR リソグラフィにおけるマスク熱歪の FEM による解析、応用物理学会春季連合講演会前刷 30p-X-9.
6. K. Heinrich, H. Betz, and A. Heuberger (1983) Heating and temperature-induced distortions of silicon x-ray masks, *J. Vac. Sci. Technol.* **B1** (4), pp1352-1357.
7. A. Ballantyne, H. Hyman, C. Dym, and R. Southworth (1985) Response of lithographic mask structure of intense repetitively pulsed x rays: Thermal stress analysis, *J. Appl. Phys.* **58**(12), pp.4717-4725.
8. C. Dym and A. Ballantyne (1985) Response of lithographic mask structure of intense repetitively pulsed x rays: Dynamic response analysis, *J. Appl. Phys.* **58**(12), pp.4726-4729.
9. Y. Vladimirovsky, J. Maldonado, R. Fair, R. Acosta, O. Vladimirovsky, R. Viswanathan, H. Veelker, F. Cerrina, G. Wells, M. Hansen, and R. Nachman, (1989) Thermal effect in x-ray masks during synchrotron storage ring irradiation, *J. Vac. Sci. Technol.* **B7** (6), pp1657-1661.
10. 金子隆司 (1990) X 線露光における熱的問題、熱物性 4(23) pp. 120-123.
11. A. Chiba and K. Okada (1990) Dynamic Thermal Distortion in an X-ray Mask Membrane During Pulsed X-ray Exposure, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **29**(11), pp. 2610-2615.
12. E. Haytcher, R. Engelstad, and N. Schnurr, (1992) Finite element analysis of dynamic thermal distortions of an x-ray mask for synchrotron radiation lithography, *SPIE*, **1671**, pp. 347-356.
13. K. Yamazaki, F. Satoh, K. Fujii, Y. Tanaka, and T. Yoshihara, (1994) Evaluation of temperature rise and thermal distortions of x-ray mask for synchrotron radiation lithography, *J. Vac. Sci. Technol.* **B12** (6), pp4028-4032.
14. I. Shareef, J. Maldonado, and D. Katcoff, (1998) Thermal and mechanical model of x-ray lithography masks under short pulse irradiation, *J. Vac. Sci. Technol.* **B7** (6), pp1575-1582.
15. J. Yang, E. Toyota, and S. Kawachi, (1998) Thermal Distortion of an X-Ray Mask for Synchrotron Radiation Lithography, *Jpn. J. Appl. Phys.* **37**, pp. 6804-6807.
16. M. Khan, F. Cerrina, and E. Toyota (1999) Pattern resolution of x-ray beamline with a

wide exposure field, *J. Vac. Sci. Technol.* B17 (6), pp3433-3438.

17. H. Yabe, K. Marumoto, S. Aya, K. Kise, S. Ami, and K. Sasaki, (2002) Fabrication of high resolution x-ray masks using diamond membrane for second generation x-ray lithography, pp. *Abstracts of The 46th International Conference on Electron, Ion and Photon Beam Technology and Nanofabrication*, Anaheim CA, pp. 347-348

18. 五明由夫編 (1995) X線マスク日米ワークショップ、放射光の半導体への応用
技術研究委員会 第20回定例研究会資料2 (非公開)

第5章 従来の露光法によるパターン形成限界の検討

5-1 緒言

X線リソグラフィは1998年には線幅100nmレベルのパターン形成を実現し、70nmの可能性も出てきた。一方で、同年末に開催されたSEMATECHのワークショップ(1998 Sematech Next Generation Lithography Workshop)では次世代リソグラフィ技術を絞り込む会議が開催された。この会議は米国半導体産業の方向付けの基になる重要なものである。会議の結果はX線リソグラフィにとっては苛酷なもので、50nmのパターン形成が実証される見通しが無いという理由で次世代技術候補から外された。この会議自体はメーカー間の主導権争いが裏面にあり、そのときに最有力技術と推奨された電子線露光開発計画(SCALPEL)が2年後に挫折したように、純粋な技術評価とは云えないものであったが、X線リソグラフィにとっては大きい打撃であった。2001年にX線リソグラフィはSEMATECHのロードマップに再び取り上げられることになったが、その間、米国のX線リソグラフィ開発の中心であったIBMが開発を中止したのをはじめ、全世界各地で縮小・撤退が相次いだ。著者が提唱する新しい露光法については次章で報告するが、本章ではその前段として、現在の露光法で少なくとも50nmの形成が可能であることを検証し、X線リソグラフィに対する批判に応えようとするものである。

5-2 分解能向上の検討

X線リソグラフィの分解能を解析するため一次元ライン&スペース(L/S)パターンについて検討を行った。ピッチ100nm、線幅50nmのL/Sパターンの空間線量分布とレジスト(PMMA)吸収線量分布について、コントラストを指標として評価を行った。コントラスト C は図5-1に示すようにスペース部(吸収体がない部分)の中央での線量 H_s と吸収体中央での線量 H_a に対し次式で定義する。

$$C = \frac{H_s - H_a}{H_s + H_a}, \quad (5-1)$$

図5-2の左欄は空間線量分布をギャップの変化に対して計算したもので、白い部分は強度が強いことを示す。ギャップ10 μm でパターンが反転するTalbot効果が現れる。図の中央には空間線量(青)と吸

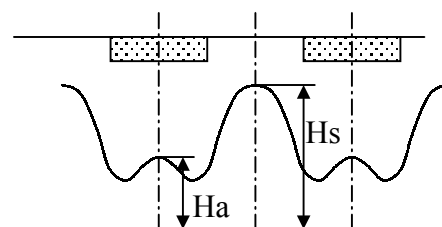


図5-1 コントラストの定義

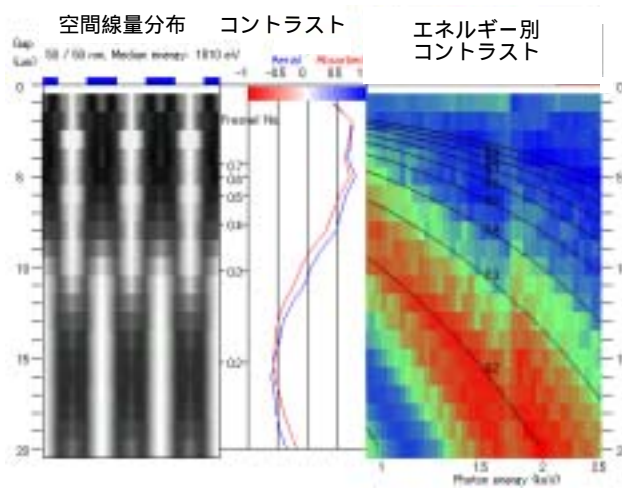


図5-2 L/Sパターンの線量分布とコントラスト

収線量（赤）のコントラスト（以下コントラスト線図と呼ぶ）図の右は吸収線量のコントラストを光子エネルギー別に示している（以下コントラストマップと呼ぶ）。コントラストマップの色はコントラスト線図の目盛りの色に対応している。即ち、青がコントラスト 1、緑が 0、赤が -1 に対応している。計算に用いた露光条件を表 5-1 にまとめた。コントラストマップの曲線と添付数は $P^2/(\lambda g)$ で与えられるフレネル数である。

光源	AURORA-2
ミラー	Pt, 1.2°
Be 窓	20 μm
マスク基膜	SiC, 2 μm
マスク吸収体	Ta, 0.35 μm
平均エネルギー	1.51 keV (0.82 nm)
レジスト	PMMA, 0.35 μm

L/S パターンでは Talbot 効果の生じる大きいギャップ（10 μm 以上）でもパターン形成が可能であるが、二次元パターンの場合には適用できないのでコントラストが負になるケースの検討は行わない。コントラストマップに見られるように、コントラストはフレネル数に大きく依存している。また 1.7 keV 付近で段差が生じているのは吸収体 Ta の M 吸収端(1.743 keV)によるものである（図 5-3）。なお、吸収端より高いエネルギーでコントラストが悪化しているのは、吸収体を透過した光の減衰が大きく、位相シフト効果によるコントラストの改善が阻害されていることを示している。

レジストパターンの形成は吸収線量分布がベースになるので、以降の検討は吸収線量を基準に行う。吸収線量の計算には PMMA を用いている。実際には化学増幅型レジストが使用されるが、計算上は PMMA の方がやや低いコントラストを示すので安全を見て PMMA を計算に用いた。パターン形成の評価基準はコントラストの最大化でなく許容ギャップの拡大にある。吸収線量分布のコントラストが 0.25 となるギャップの値を許容ギャップの目安とする。

図 5-2 のコントラストマップには線量スペクトルによる重み付けがされていないので、スペクトル全体のコントラスト（コントラスト線図）との関連が見えにくい。図 5-4(a)において、コントラストマップの上部に空間および吸収線量スペクトルを規格化して示している。下のコントラストマップは単独のコントラストに吸収線量スペ

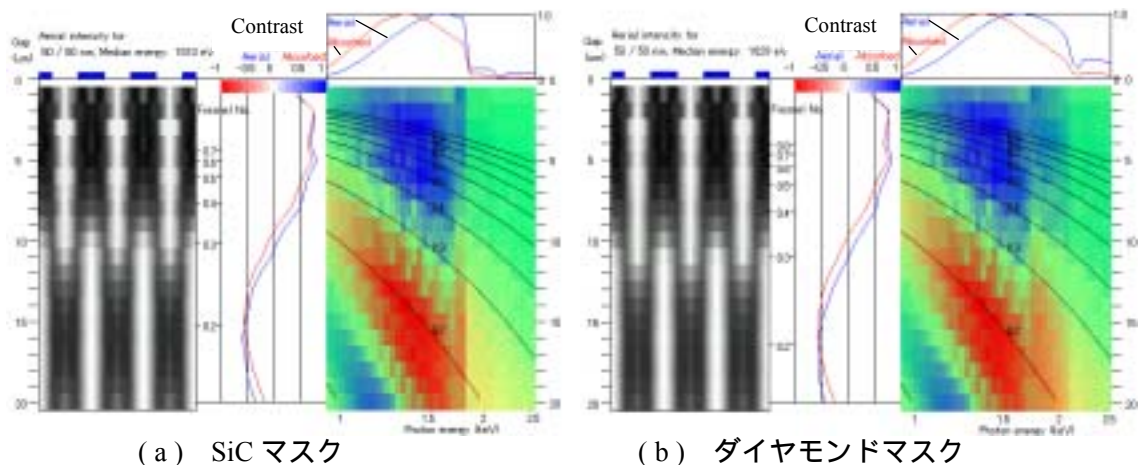


図 5-4 線量分布とコントラストマップ

クトルの値を乗じたものである。マスク基膜 SiC の Si 吸収端(1.836 keV)以上のエネルギーではスペクトル線量は大幅に減衰するので、1.8 keV 以上でのコントラストは 0 に近い値になる。コントラスト値 0.25 に相当するギャップは 8.3 μm である。図 5-4(b) はマスク基膜にダイヤモンド(2 μm)を使用した場合である。C 原子は関心エネルギー領域では吸収端を持たないのでスペクトルはミラー (Pt) の M 吸収端 2.1 keV まで減衰しない。しかし、レジストの X 線吸収は高エネルギー領域では低下するので、コントラストマップに反映される効果は少ない。コントラスト値 0.25 に相当するギャップは 8.5 μm で、SiC マスクとの差は僅かである。

ギャップ 8 ~ 10 μm 付近でのコントラストを改善するには、コントラストマップの赤い部分、即ち低エネルギー X 線を除去することが有効である。図 5-5 は Be 窓の厚さ 100 μm の場合である (SiC マスク使用)。図 5-4(a) の Be 厚さ 20 μm の場合と比較すると明らかに改善が見られる。コントラスト 0.25 に相当するギャップは 10 μm に増加する。Be 厚さが 20 μm の場合と 100 μm の場合のスペクトル変化を図 5-6 に対比して示す。

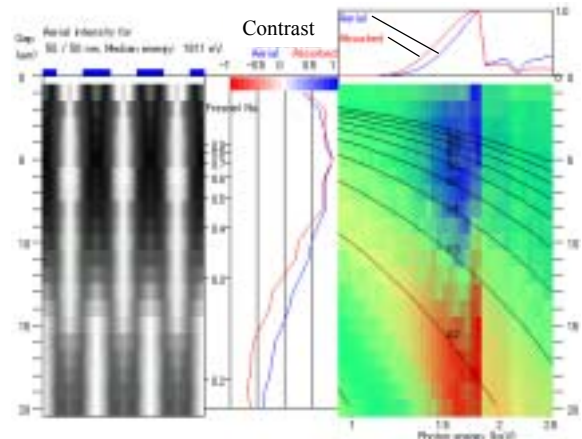


図 5-5 線量分布とコントラストマップ

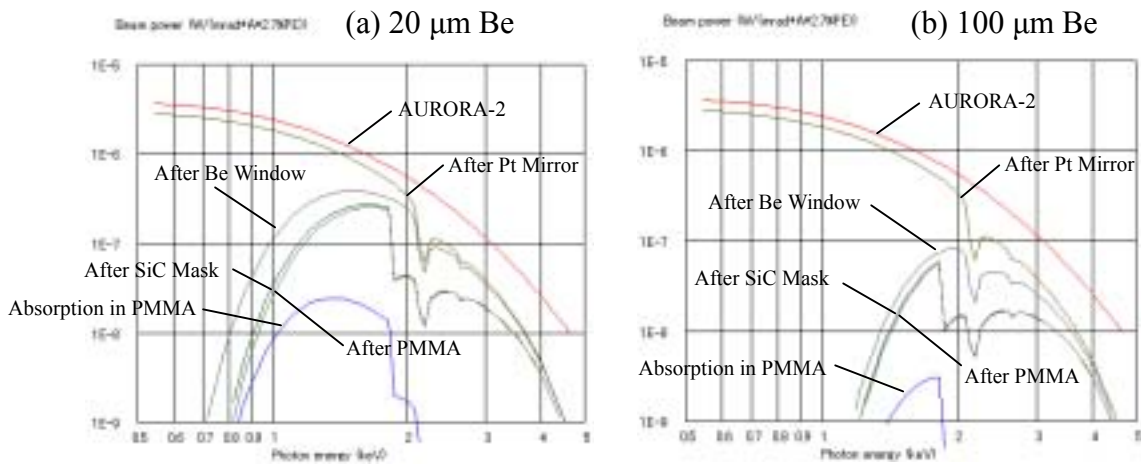


図 5-6 Be 窓厚さとスペクトル変化

図中で SiC マスク透過後と PMMA 透過後のスペクトルは近接している。両スペクトルの差が PMMA に吸収される線量で、スペクトル線図の最下部に青線で示している。

Be 窓を厚くすることにより許容ギャップは改善されるが、レジスト吸収線量が減少するので露光時間が長くなるのが問題になる。Be 厚さと露光線量

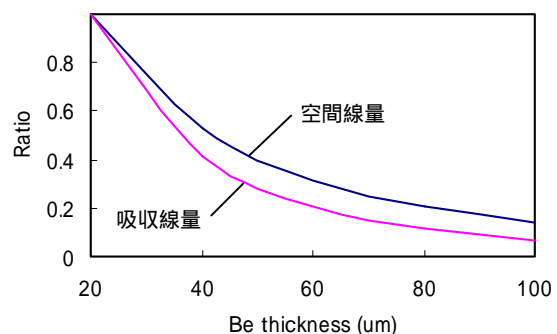


図 5-7 Be 厚さと空間、吸収線量の関係

(露光時間に反比例)の関係を図 5-7 に示す。図の空間線量、吸収線量は Be 厚さ 20 μm の値で規格化している。

Be 厚さの増加によるコントラストの改善と露光時間の増加はトレードオフの関係にあるので、露光性能を大幅に向上させることは期待できない。ベリリウム以外の材料として除去すべき低エネルギー領域に吸収端を有する材料をフィルターとして使用する可能性を検討した。候補材料としては Ni, Cu, Na, Mg, Al 等

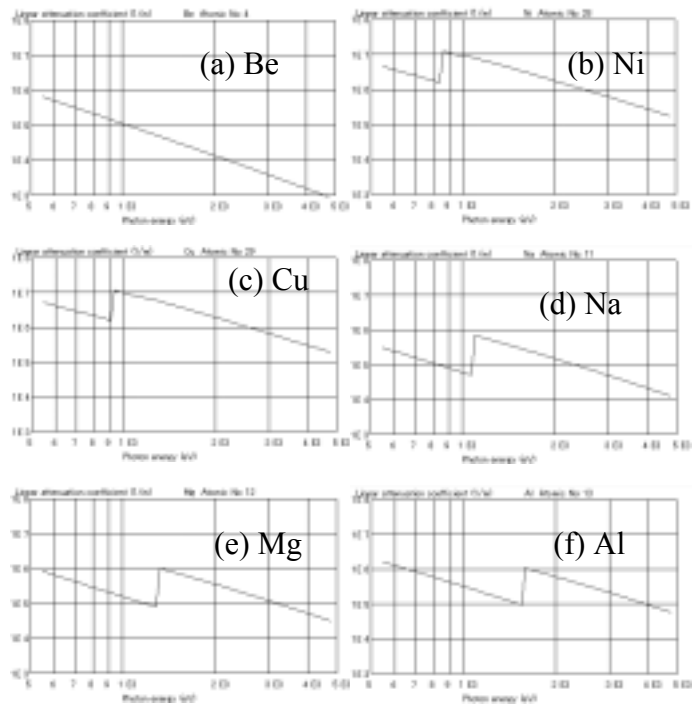


図 5-8 各種材料の減衰係数 (1/m)

があげられる。これらの X 線に対する減衰係数を図 5-8 に Be のそれと合わせて示す。Ni をフィルターとして使用した例を図 5-9 に示す。この例では図 5-4(a)の条件に厚さ 1.0 μm の Ni 箔を追加している。図 5-9 で 1.8 keV 以上のコントラストが改善されているのは低エネルギー側の線量が Ni フィルタにより減少したため、右上の高エネルギー側のスペクトルが相対的に上昇した結果である。コントラスト値 0.25 に対応するギャップは 10 μm に改善されており、厚さ 100 μm の Be 窓と同等の効果をもっている。ギャップが 10 μm の場合の Be と Ni の各厚さに対する吸収線量を計算し、Be 厚さ 20 μm の場合の露光時間を 1 sec として他の露光時間を計算すると図 5-10 のようになり、Ni フィルタよりも Be 単体を用いる方が露光時間の点で有利になる。他のフィルタ材料でも同様の結果が得られた。

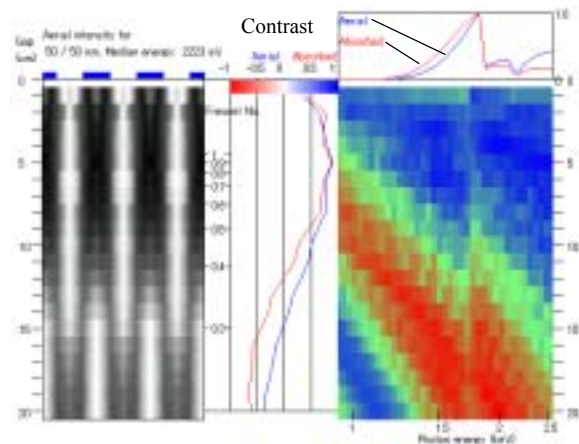


図 5-9 Ni フィルター(1 μm)を設けた場合

以上の検討結果から今後の検討課題をまとめると次のようになる。

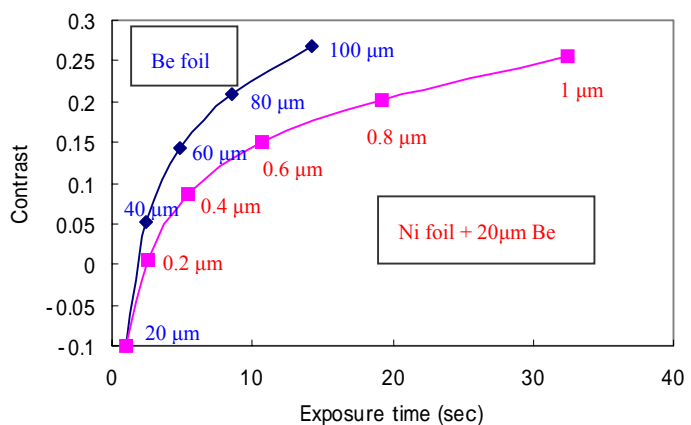


図 5-10 Be 及び Ni フィルタ使用時の露光時間

- A) 光子エネルギーの高い（短波長の）光源が望ましい。
 - B) 低エネルギー光子を除去することが必要で、Be 箔を厚くする方が他材料をフィルタとして用いるよりも効果的である。
 - C) ミラー材料およびマスク基膜材料には 1~3 keV の領域での吸収が少ない材料を使用することが望ましい。
 - D) 高エネルギー部で高い吸収特性を持つレジストを使用することが望ましい。
- 次節以降では以上の指針を基に X 線リソグラフィシステムの各要素について検討する。

5-3 シンクロトロンの短波長化対応

AURORA-2 の設計はコンパクトな光源を目指すものであったが、50 nm パターン形成では高エネルギー側のパワー（光子数）に限界があることが明らかになった。シンクロトロン内を電子が一周するときの放射損失 U_0 は、

$$U_0 = 26.6E^3T \text{ [keV / turn]} \quad (5-2)$$

として表される。⁵ ここに E は電子エネルギー(GeV)、 T は磁場強度(Tesla)である。したがって、磁場強度を一定とすると、光の発生パワーは電子エネルギーの三乗に比例する。常伝導電磁石を用いて発生させる磁場は AURORA-2 の 2.7 Tesla が実用的な限界と見られるので、磁場強度をそのままに、電子エネルギーを 0.7 GeV から 1.0 GeV に変更する。これにより放射光のパワーは 3 倍に増加する。新しいシンクロトロンを AURORA-3 と名づける。AURORA-2 との基本仕様表とレイアウトの比較を図 5-11 に示す。

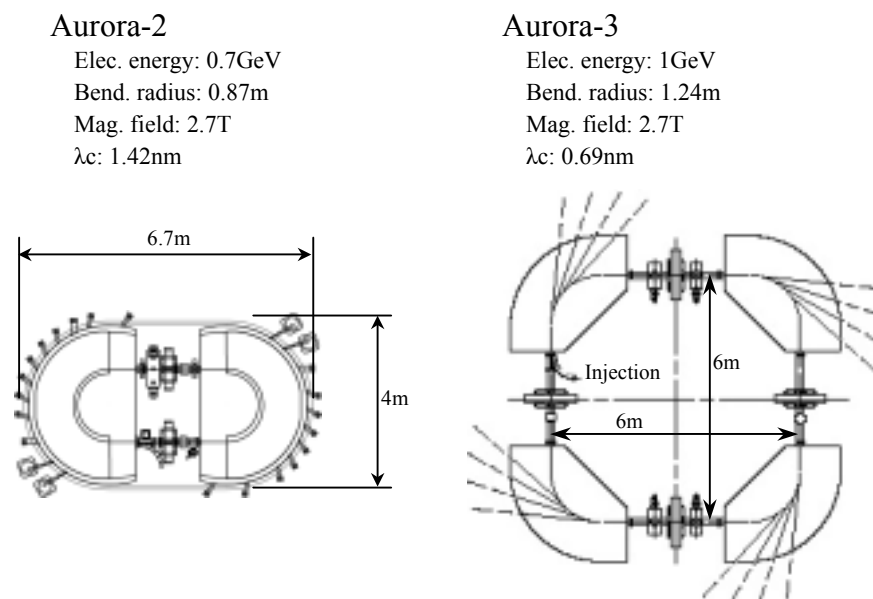


図 5-11 AURORA-2 と AURORA-3 の比較

AURORA-2 には 180°偏向電磁石を用いたが、AURORA-3 では単位重量を減らすため 90°偏向電磁石に変更した。自己遮蔽方式はそのまま引き継がれている。高周波加速空洞を2台に分割し、片肺運転も可能にするなど特に保守性に配慮がなされているが、詳細は省略する。

5-4 ビームラインの短波長化対応

高エネルギー光子を発生するため光源を高エネルギー化する必要性は、最近認識され始めているが、¹ ビームラインの光伝播系の高エネルギー化への対応についてはさほど議論されていない。ビームラインはこれまで提唱したように、高エネルギー光子ビームの伝播効率を上げる観点から 1 枚ミラーによるスキャン方式を採用する。露光面積は一応 35mm 角とした。理由は X 線リソグラフィが実用化された場合、従来技術も含めた混在露光方式 (mix and match exposure) になることが予想され、50 mm 角の露光面積にはならないと想定した。ビームラインの長さは 10m、光源 ミラー間は 3m とした。ミラーの覗き角は 1°、ミラー長さは約 300mm、トロイダルミラーのサジタル半径は 105mm、メリディアン半径は 350m である。ミラー表面の材質が Pt, Ni および Rh、覗き角が 0.8°、1.0° および 1.2°、表面粗さ 5 Å の場合の反射率を図 5-12 に示す。Pt の場合は 2.1keV 以上の反射率が低下するので好ましくない。Ni と Rh については、それほど差はないが、Rh の反射率が 1 ~ 3keV で僅かに高いので Rh を選択した。覗き角は小さい方が望ましいが、0.8°では幾何学的にミラー揺動角の変化をカバーできない(ビームラインをさらに長くする必要があるので 1.0°を選定した。

ビーム取り出し窓に用いられる Be フォイルの厚さについては 5-6 節に詳細を述べるが、厚さを 100 μm とした。これにより Be 窓破損のリスクは大幅に軽減されることになる。

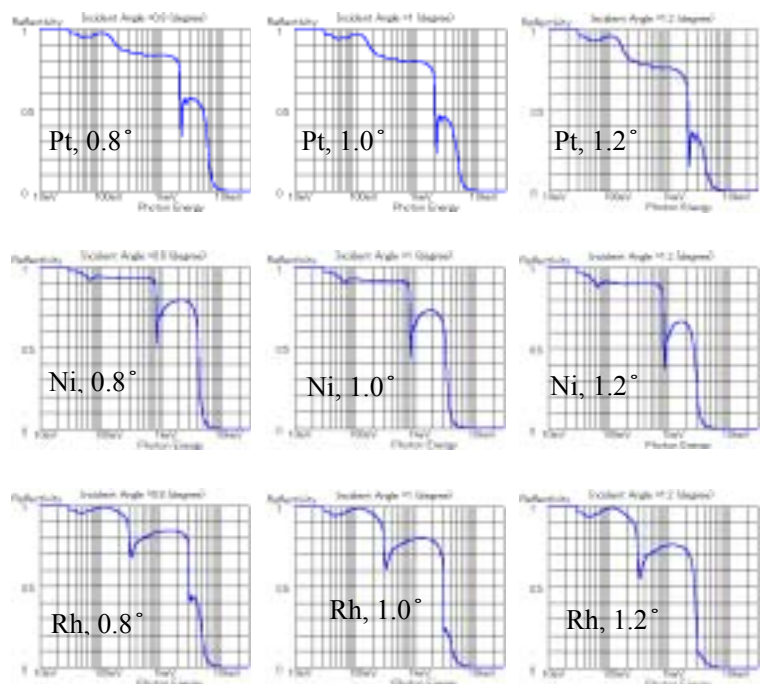


図 5-12 ミラー材料の反射率

5-5 レジストの短波長化対応

市販のレジストについては PMMA 以外の化学的組成は必ずしも明らかにされて

いない。しかし現在 X 線リソグラフィに用いられているレジストの原子構成は PMMA とさほどかけ離れていないと見られるので、X 線に対する吸収特性は PMMA と基本的に変わらない。高エネルギー領域の吸収特性を改善するには Si, Br 等の元素を含んだレジストが望ましい。図 5-13 は PMMA と Si 20%を含むレジスト(FHSP3CL:富士フィルムオーリン(株)⁴の厚さ 1 μm 当たりの吸収率である。Si の吸収端(約 1.8 keV)が吸収性能の改善に寄与している。最近では Si より低いエネルギー部(1.4 keV)で吸収端を有する Br 含有レジストによるパターン形成効果も報告されている。³

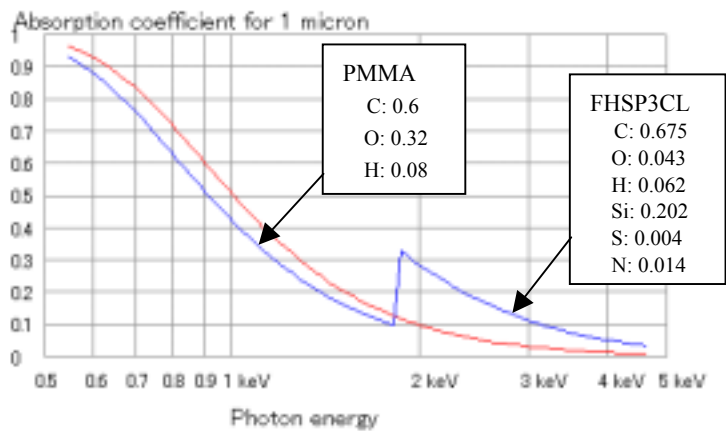


図 5-13 レジストの吸収特性

5-6 システムの総合性能

AURORA-2 を光源とした場合と AURORA-3 を光源とした場合のマスクを透過した光のパワースペクトル図 5-14 に示す。左のスペクトル(赤)は従来の装置(AURORA-2)のもので、平均エネルギーは 1510 eV (0.82 nm) である。覗き角 1.2° の Pt ミラー、厚さ 20 μm の Be 窓、厚さ 2 μm の SiC マスクを用いている。右の三つ(青色系)は AURORA-3 によるもので、ミラー材質 Rh, Ni, Pt に対するものである。ミラーの覗き角 1.0°、厚さ 100 μm の Be 窓、厚さ 2 μm のダイヤモンドマスクを用いている。AURORA-2 の全パワーを 1 とすると、Rh, Ni, Pt のシステムのパワーは夫々 1.14, 1.15, 0.98 になる。また、平均エネルギーはそれぞれ 2307 eV(0.53 nm), 2373 eV(0.52 nm), 2427 eV(0.51 nm) で顕著な差はない。AURORA-3 では電子エネルギーを 1.0 GeV にすることにより光源では約 3 倍のパワーアップになったが、厚い Be 窓を使用し低エネルギー側の光子をカットした結果、最終的に AURORA-2 と同等の露光強度になっている。パターン形成に有効と見られる 1~3 keV のエネルギー範囲では Rh の使用が有効なのでここでは Rh ミラーを用いることにした。

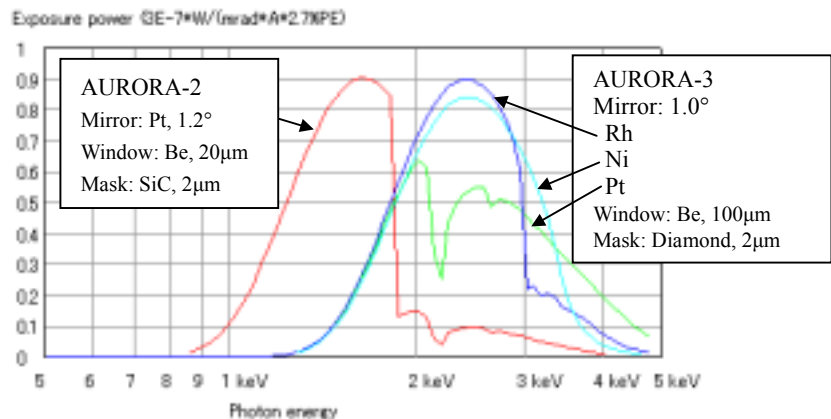


図 5-14 パワースペクトルの比較

図 5-15 に AURORA-2 と Rh ミラーを用いた AURORA-3 のスペクトル変化を示す。² スペクトル変化の下側には PMMA と Si を 20%含んだレジスト(FHSP3CL)

の吸収パワーを示している。AURORA-2 では二つのレジストの吸収パワーに殆ど差はないが、AURORA-3ではPMMAの吸収パワーはAURORA-2の37%であり、20%Siの場合は殆ど同等である。また、20%Siの場合の平均エネルギーが高い側に移動している。したがって、高エネルギー側で吸収率の高いレジストの使用はパターン微細化にとって極めて有効である。

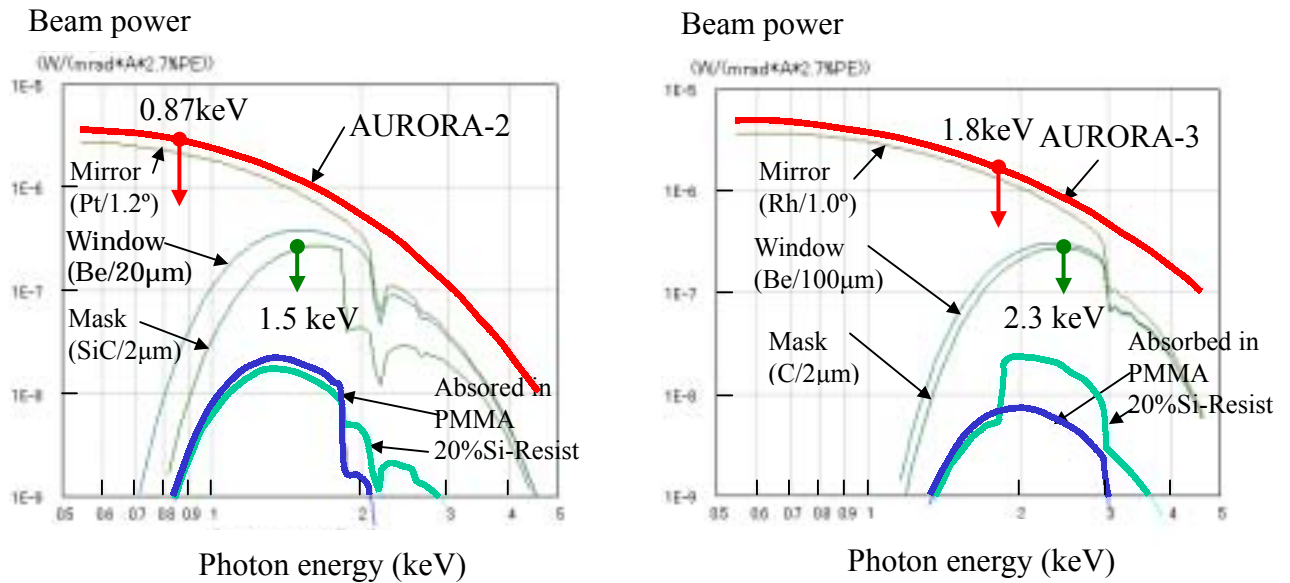


図 5-15 スペクトル変化の比較

Be 箔の厚さとダイヤモンド膜の厚さの組み合わせに対するビームパワーと平均エネルギーの関係を図 5-16 に示す。AURORA-3 の計算では Be の厚さを 100 μm 、ダイヤモンド膜の厚さを 2 μm として計算したが、Be を 80 μm 、ダイヤモンド 5 μm としても計算結果は殆ど変わらない。

AURORA-2 と AURORA-3 のパターン成形性を 70, 60, 50 nmL/S パターン、ギャップ 8 μm の場合について比較する。図 5-17 に示すように 50-50 nm L/S パターンの場合、AURORA-2 ではイメージ形成が困難であるが AURORA-3 では可能である。なお、50 nm の世代では許容ギャップは 7 μm と予測されている(6.2 節参照)ので 8 μm は問題ない。3本の線はレジスト (PMMA) 表面、中間、最低層での吸収線量を

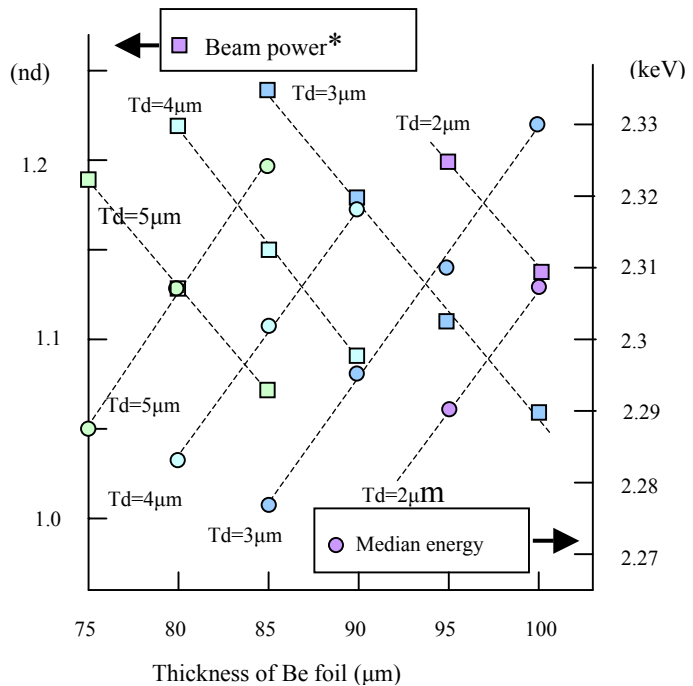


図 5-16 Be 箔厚さとダイヤモンド膜厚(Td)の関係 (*Beam powerは AURORA-2 の power で規格化)

表し、AURORA-2 では吸収量が大いので深部では線量が減衰することを示しているが、AURORA-3 では吸収が少ないので3本の線の差は見えない。20%Si レジストでは吸収パワーの差が見られるが分布形状は PMMA のものと変わらない。

最後に図 5-18 に、AURORA-2 による当初の設計と AURORA-3 を用いた新設計（図 5-15 参照）とのコントラストの比較を示す。

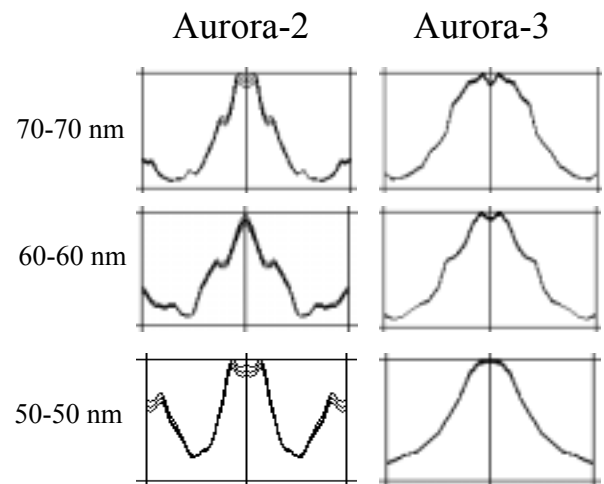


図 5-17 吸収線量分布の比較 (Gap: 8 μ m)

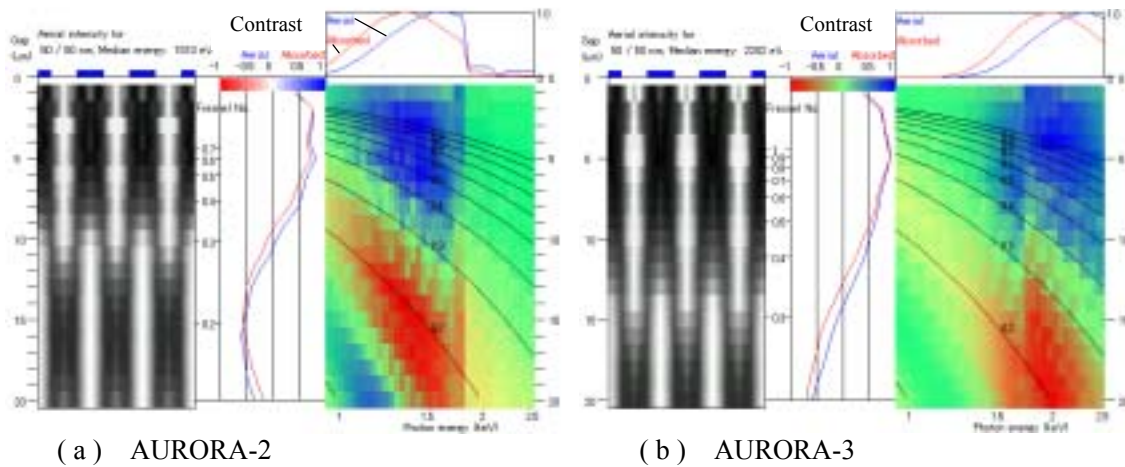


図 5-18 AURORA-2 による当初の設計と AURORA-3 を用いた新設計の比較

5-7 結言

パターンの微細化に対応する方法について、L/S パターンの形成に対し検討を行った。コントラストを放射光スペクトルの光子エネルギー別に解析した結果、低エネルギー光子を除去し高エネルギー光子を増強することが有効であることを見出した。低エネルギーを除去する方法として Be 窓を厚くする方法と別材料のフィルタを挿入する方法を検討し、Be 窓を厚くする方が効果的であることを計算により証明した。高エネルギー光子を増強する方法として、まずシンクロトロン電子エネルギーを 0.7 GeV から 1.0 GeV に増強したシンクロトロン AURORA-3 を設計した。これにより光源の出力は 3 倍に増強された。ミラー材料としては、従来の Pt, Au ミラーに対し、1~3 keV 領域で反射率が高い Rh, Ni 材料を使用することを提案した。また、覗き角を少なくするためビームラインの長さを若干長くし(7m から 10m に) λ 1.2° から 1.0° に変更した。Be 窓厚さについては従来の概念である 20 μm 近辺の厚さを 100 μm に大幅に厚くした。マスク基膜については Si 吸収端の影響を避けるためダイヤモンド基膜の使用を提案した。これらの対策を講じることにより、露光ビームの平均エネルギーを 1.5 keV から 2.3 keV に増強し、AURORA-2 と同等の露光パワーを得ることができた。高エネルギー化に伴い、レジストの吸収が減少するが、例えば Si 含有レジストを使用することにより AURORA-2 の場合と同等の露光時間が維持できることを計算で示した。

これらの対策を講じることにより、ギャップ 8 μm で 50 nm レベルのパターン形成が従来のシステム構成と露光法で可能であることを示した。

引用文献

1. M. Khan, G. Han, S. Bollepalli, F. Cwerrina, J. Maldonado, (1999) Extension of x-ray lithography to 50 nm with a harder spectrum, *J. Vac. Sci. Technol. B* **17**(6), pp. 3426-3432.
2. E. Toyota, T. Hori, M. Khan, and F. Cerrina, (2001) Technique for 25 nm x-ray nanolithography, *J. Vac. Sci. Technol. B* **19**(6), pp. 2428-2433.
3. H. Watanabe and K. Itoga, (2001) Narrowband spectrum effect on resolution enhancement for 50-nm pattern printing by proximity x-ray lithography, *Digest paper of International Microprocess and Nanotechnology Conference*, Matsue-shi, pp. 266-267.
4. 北山豊樹、糸賀賢二 (1998) *private communication*.
5. 日本物理学会 (1986) シンクロトロン放射 培風館

第6章 新しい露光法によるパターン形成限界の拡張

6-1 緒言

本章では従来の等倍露光の概念を超えた新しい露光法について検討する。図 6-1 に示すように X 線リソグラフィは三つの要素により制約を受ける。即ち、ステッパが達成可能なギャップ、イメージ形成が可能なギャップおよび半影ボケによる制約である。最初にステッパによる限界を予測し、次に半影ボケによる限界について検討し、最後に最も重要であるイメージ形成のギャップ限界の拡張について、多重露光法と新しいマスクの採用について詳述する。パターン形状については、前章では一次元パターンに対して評価を行ってきたが、実際に用いられるパターンは二次元パターンであるので、ここでは主に二次元パターンの形成性能を検討する。多重露光の究極の方法である連続描画法についても検討し、最後に X 線リソグラフィの最終限界を検証する。

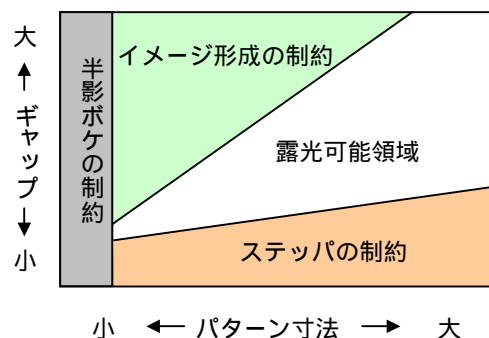


図 6-1 X 線リソグラフィの限界

6-2 ステッパによるギャップの限界

ステッパの露光可能ギャップの限界は工学的な問題であり理論的に追求するのは困難であるが、過去の実験データをプロットすると図 6-2 のようになる。この傾向およびステッパメーカーの意見⁸を総合して、工場生産時の最小ギャップ(μm)は、線幅 (nm: ピッチの 1/2) の平方根に比例するとして図の実線のように予測した。線幅と露光可能ギャップとは直接の物理的關係はなく、線幅が縮小される時間の経過と共にステッパの技術が進歩することを示している。X 線リソグラフィの限界は、この予測のブレにより若干変わる可能性があるが、ステッパに革新的な技術が導入されない限り、予測が大きく変わることはないと考えられる。

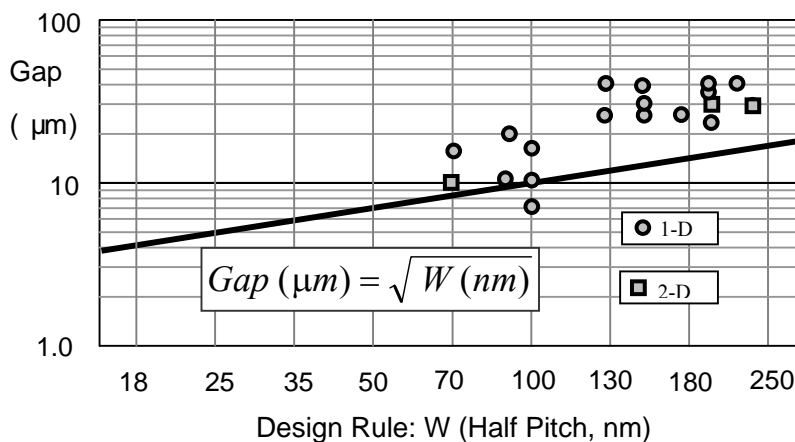


図 6-2 ステッパの近接ギャップの実績と予測

6-3 半影ボケによる限界

パターン形成に及ぼす半影ボケの要因としては、1)光源点の広がり、2)マスクの熱変形、3)マスクの機械振動、4)レジスト内の二次電子の散乱、5)化学増幅レジスト内の酸の拡散などが挙げられる。この中で 5) 化学増幅レジスト内の酸拡散の影響はまだ十分に解明されていないのでここでは議論しない。少なくとも 4)レジスト内の電子の散乱効果を下回るものと見られている。点光源の広がりによる影響については図 6-3 のように説明される。図において、光源点の x 方向のビームの広がり $P(x)$ はガウス分布として次のように表される。

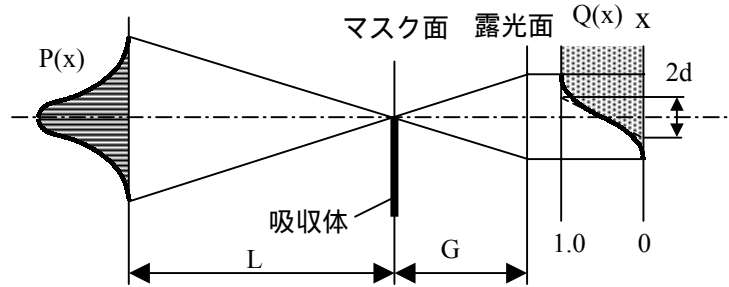


図 6-3 光源による半影ボケの影響

$$P(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma^2}\right) \quad (6-1)$$

ここで、全体パワーは 1 として規格化している。 σ は標準偏差値である。光源から距離 L 離れたマスクの吸収体エッジ部を通過する光は、ギャップ G へだてた露光面上では強度分布 $Q(x)$ として次式のように表される。

$$Q(x) = \frac{G}{L} \cdot \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \int_{-\infty}^x \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma^2}\right) dx \quad (6-2)$$

吸収体直下($x=0$)での式(6-2)の接線と強度=0 および 1.0 との交点の x 方向の幅を $2d$ とすると、

$$2d = \frac{G}{L} \cdot \sqrt{2\pi}\sigma \quad (6-3)$$

として表される。 $\sigma = 1 \text{ mm}$, $L = 10 \text{ m}$, $G = 10 \text{ }\mu\text{m}$ とすると $2d = 2.5 \text{ nm}$ となる。現像の余裕度を $\pm 20\%$ とすると線幅の変動に及ぼす影響は $\pm 0.5 \text{ nm}$ となる。光源の設計で $< 1 \text{ mm}$ とするのは容易なので、光源点の広がりによる半影ボケの影響は無視できる。

マスクの熱変形による半影ボケは、ビームラインが一括露光方式の場合は発生しない。スキャン露光の場合は 4-4 節で試算した条件では $2d = 10 \text{ nm}$ の半影ボケが生じる。これは σ 値に換算すると 4 nm に相当し、後述するレジスト内の電子散乱効果に匹敵する。しかし、レジスト基膜材料の変更 (SiC からダイヤモンド)、ビーム幅の変更 (4 mm から 8 mm) だけで $2d = 3.8 \text{ nm}$ ($\sigma = 1.5 \text{ nm}$) に改善できるので実用上問題ない。

露光中のマスクの機械振動はステッパのアライメント精度に対応する。ステッパに要求される精度は 3σ で線幅の $1/5 \sim 1/3$ であるので、 σ 値は線幅の $1/15 \sim 1/9$ となる。

次にレジスト内部での二次電子の影響について検討する。当初は物質中の電子の飛程を表す Grun range が分解能の目安とされた。¹⁵ Grun range $R_g(\mu\text{m})$ は次式で表され

る。¹⁵

$$R_g = \frac{0.046}{\rho} E^{1.75} \quad (6-4)$$

ここに、 ρ は密度(g/cm^3)、 E は電子の運動エネルギー(keV)である。例えば $\rho=1.2$ (PMMA)、 $E=1.5$ keV とすると R_g は 78 nm になる。しかし、これと同条件の実験では、線幅 30 nm のパターンが形成されることが確認されており、⁵ 現在では Grun range の式に適切な係数を乗じた値が大まかな傾向を議論するとき用いられる程度である。厳密な検討を行うには後述する Monte Carlo 法によるシミュレーションが必要であるが、ここでは定性的な検討から始める。

X 線リソグラフィの関心領域である 1~3 keV のエネルギーの光子はレジスト材料との相互作用により主に光電子とオージェ (Auger) 電子を発生する。図 6-4 に示すように、入射した X 線は最初にレジスト構成原子の K 殻電子を叩き出し、光電子を発生させる。光電子の運動エネルギー E_p は、

$$E_p = E_x - E_K \quad (6-5)$$

のように X 線のエネルギー E_x から K 殻電子の結合エネルギー E_K を差し引いたものになる。K 殻の電子を失った空孔に外側の殻 (L 殻) の電子が遷移する。重い原子では遷移の際にエネルギー差 $E_K - E_L$ を蛍光 X 線として放出するが、C、O 等の軽い原子では X 線を放出せずその付近の別の電子がクーロン相互作用を通じて Auger 電子として放出される。このエネルギー E_A は $E_K - E_L$ から自身の結合エネルギー E_L を差し引いたものとして、

$$E_A = E_K - 2E_L \quad (6-6)$$

となり、X 線の入射エネルギーとは無関係の一定のエネルギー値になる。上記の説明は簡略化したもので、実際には電子のエネルギー準位は結合状態により異なり一定ではない。通常 Auger 電子は 1 個の光電子に対し複数個が放出される。図 6-5 は PMMA の構成原子である C と O に対して X 線の入射エネルギーと放出される光電子および Auger 電子のエネルギーの関係を示したものである。これらの電子のレジスト中での挙動と二次的化学反应への寄与については Monte Carlo 法によるシミュレーション結果が報告されている。¹⁶⁻¹⁸

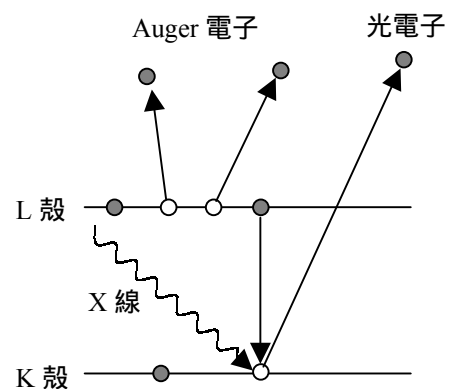


図 6-4 光電子と Auger 電子の生成過程

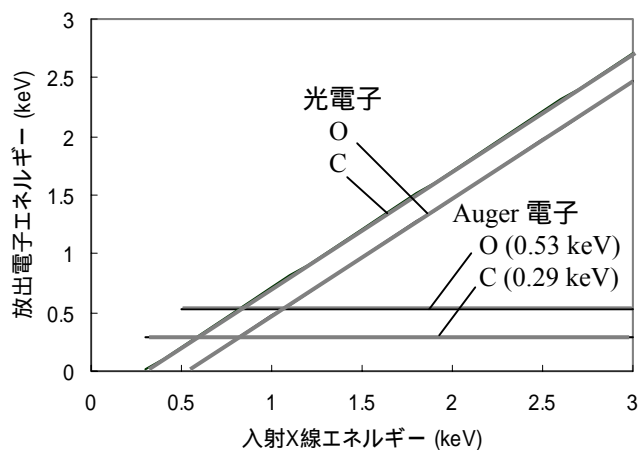


図 6-5 光電子と Auger 電子の放出エネルギー

図 6-6 は X 線の入射エネルギー 1, 2, 3 keV に対する PMMA 中の C_{1s}, O_{1s} Auger 電子および C_{1s} 光電子の Monte Carlo シミュレーション結果のガウス近似である。これは著者の依頼によりウイスコンシン大学が最新の計算コードを用いて計算したものの一部である。¹⁹ ここでは O_{1s} 光電子の影響は無視できる。放射光の全スペクトルに対応して Monte Carlo シミュレーションを行うのは膨大な計算になる。ここでは各入射 X 線エネルギーに対し上記 C_{1s}, O_{1s} Auger 電子および C_{1s} 光電子のガウス近似をさらに 1 つのガウス分布で代表させ、これをスペクトルの平均エネルギーに対応させて代表的な σ 値を計算し評価する。代表的な σ 値は三次元の分布を考慮して次式により計算する。

$$\sigma = \sqrt[3]{\sigma_1^3 + \frac{I_2}{I_1} \sigma_2^3 + \frac{I_3}{I_1} \sigma_3^3} \quad (6-7)$$

添付数 1, 2, 3 は C_{1s}, O_{1s}-Auger および C_{1s} 光電子に対応している。図 6-7 はその計算結果である。AURORA-3 による PMMA の平均吸収エネルギーは約 2.1 keV であるので代表 σ 値は 3.6 nm になる。次にこの値がパターン形成に及ぼす影響について検討する。

図 6-8 に示すように一次元 L/S パターン形成に対し 2 組の吸収線量分布を考える。分布形状 A はコントラストが 0.5 であり、パターン形成は容易である。分布形状 B はコントラストが 0.3 で、パターン形成の限界に近い。どちらの分布形状も中央部の半ピッチの範囲ではガウス分布曲線からなり、A' および B' はその裾部を示している。外側の半ピッチは中央部のガウス分布曲線を反転接続したものである。コントラストと 0.5 に相当する分布曲線 A の標準偏差 σ_A は 0.28P であり、コントラスト 0.3 に相当する分布曲線 B の標準偏差 σ_B は 0.35P であ

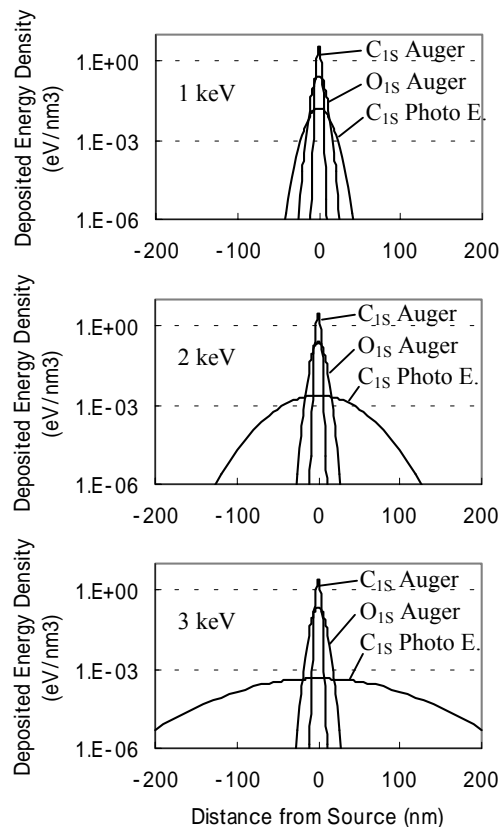


図 6-6 PMMA 中の二次電子のガウス分布

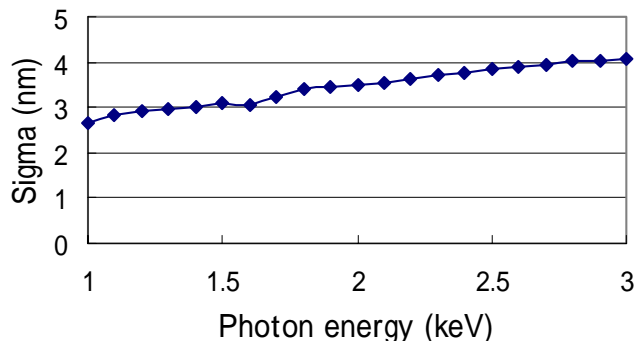


図 6-7 入射 X 線エネルギーに対する代表 σ 値

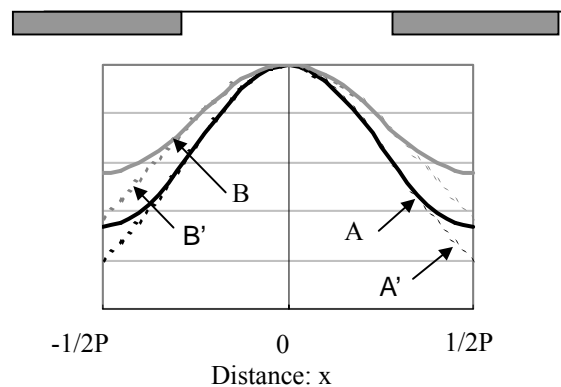


図 6-8 吸収線量分布のモデル

る。ただし、P はピッチを指す。分布形状 A が半影ボケの影響により B に変化したとすると、半影ボケの標準偏差 σ_C は二次元分布では、

$$\sigma_C = \sqrt{\sigma_B^2 - \sigma_A^2} = 0.21P \quad (6-8)$$

として計算できる。光源、マスク歪、機械振動および二次電子による σ 値をこれまでの例から、それぞれ 1 nm, 4 nm, 2 nm および 3.6 nm とすると、合成された σ 値は 5.8 nm になる。式(6-8)からピッチを逆算すると $P=28$ nm となり、線幅 14 nm まで成形可能となる。ただし、この想定はマスクパターンの誤差がないこと、およびレジストの溶解性が分子レベルサイズで均一であること、酸拡散の影響無視が前提である。

6-4 Rayleigh の基準の検証

X 線リソグラフィの限界については開発当初から多くの研究者によって検討がなされてきた。¹⁻⁴ また、限界を探るための実験も行われている。⁵ 縮小光学系の分解能 δ は Rayleigh の基準により $\delta=k_l\lambda/NA$ として表される。⁶ ここに λ は波長、 NA は開口数 (§1-5 参照) である。近接 X 線露光では一般的に次式で表される。⁷

$$\delta = k_l\sqrt{\lambda g} \quad (6-9)$$

ここで g はマスク・ウエハ間のギャップ (近接ギャップ) である。 k_l は一般には Rayleigh の基準⁶ により $k_l=1.22$ とされていたが、実験結果では 0.6 近辺でも可能であることが確認されている。⁷ X 線露光における Rayleigh の解像限界は図 6-9 のように解釈される。即ち、マスク上の 1 点 A からの光が直下の露光面上の点 B と、B から距離 δ の点 C に到達するとき AB, AC の光路差 s は図 6-9 の幾何学的条件から近似式として、

$$s = \frac{\delta^2}{2g}, \quad (6-10)$$

となる。これより δ は、

$$\delta = \sqrt{\frac{2s}{\lambda}} \cdot \sqrt{\lambda g} = k_l\sqrt{\lambda g}, \quad (6-11)$$

として表される。 $k_l=1.22$ に相当する s/λ は 0.74 となり、そのときの位相差は 270° となる。また、 $k_l=0.6$ に相当する s/λ は 0.18 となり、そのときの位相差は 65° となる。前章で行った 50 nmL/S パターンの成形性の検討ではギャップ 8 μm で平均エネルギー 2.3 keV ($\lambda=0.54$ nm) では成形可能であり、1.5 keV ($\lambda=0.83$ nm) では成形困難であった。 $\delta=50$ nm として k_l 値を逆算すると 0.76 および 0.61 となる。したがって L/S パターンでは k_l 値は 0.6~0.7 近辺が現実的な限界値と見られる。この k_l 値はスペルトルの形状、吸収体による位相シフト効果、パターン形状によって変動するが、解像限界が式(6-9)に依存していることは図 6-9 の関係から理解できる。

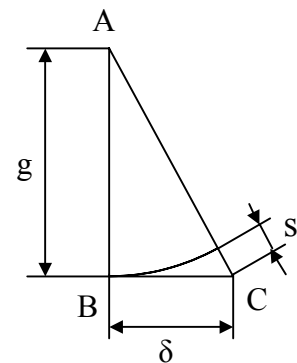


図 6-9 分解能の根拠

解像限界 を線幅 W で置き換えると式(6-9)は次のようになる。

$$g = \frac{1}{\lambda} \left(\frac{W}{k_1} \right)^2 \quad (6-12)$$

$\alpha = 1/k_1^2$ とすると式(6-12)は、

$$g = \alpha \frac{W^2}{\lambda} \quad (6-13)$$

となる。以降の検討では α の値をベースに評価を行う。上式で吸収体のバイアス（幅の変化）と吸収体の厚さの影響は α 値に含まれる。図 6-10 は L/S パターンにおいてコントラストが最大になる吸収体バイアス（1/2 ピッチを基準）と吸収体厚さを求めるプログラムの計算結果の 1 例である。式(6-14)で表すコントラスト C の計算には図 6-11 のようにピッチの 10%幅の平均値を用いて数値の急激な変動を緩和している。

$$C = \frac{D_H - D_L}{D_H + D_L} \quad (6-14)$$

図 6-10 で、ギャップが $18 \mu\text{m}$ 以上で線量分布（左図）がフラット化しているのは、コントラストが負になった場合にもコントラストの最大化にプログラムが対応しているので現実には意味はない。ここで、コントラストが 0.3 になるギャップを許容ギャップとして、ピッチの 1/2 を基準線幅として各基準線幅に対する許容ギャップの関係を求めると図 6-12 にプロットした点のようになる。同図で $\lambda = 0.92$ は AURORA-2 システムの PMMA の平均吸収波長である。また $\lambda = 0.51$ は AURORA-4（後述）システムの同様の波長である。この関係は、

$$g = 2.96 \frac{W^2}{\lambda} \quad (6-15)$$

として表すことができる。即

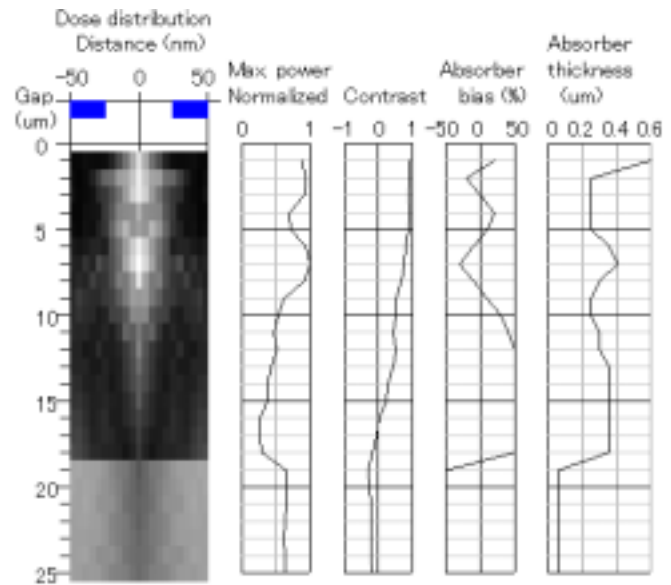


図 6-10 L/S パターンの最適化

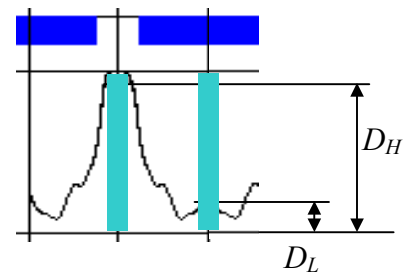


図 6-11 コントラストの定義

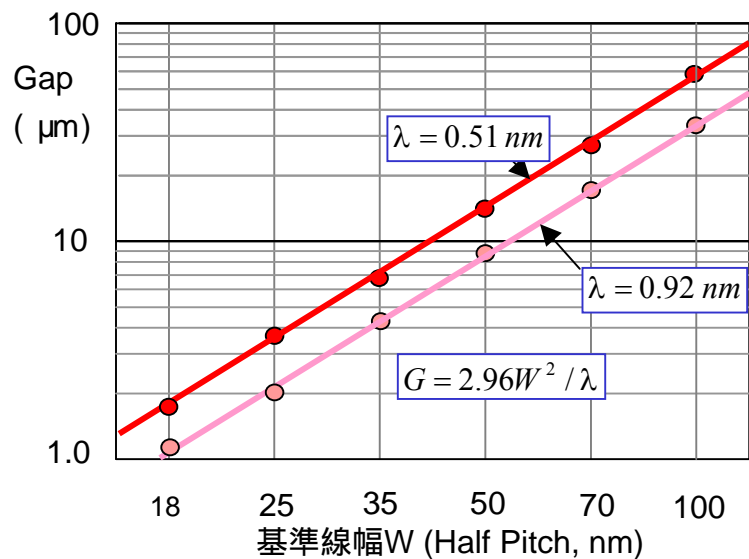


図 6-12 Contrast=0.3 の場合の基準線幅と許容ギャップ

ち、吸収体のバイアス及び厚さの最適化は 値を最大化する効果として作用し、基本的には許容ギャップは基準線幅と波長によって支配される。

6-5 多重露光による許容ギャップの拡大

図 6-10 では、吸収体バイアスの効果が注目される。図 6-13 は 3 通りの吸収体バイアスに対する線量分布の変化をギャップの変化と共に示したものである。ギャップを大きくすると吸収体バイアスが大きい方が Talbot 効果は現れにくく、シャープなイメージが得られるが、イメージの線幅は基準線幅に対し小さくなる。

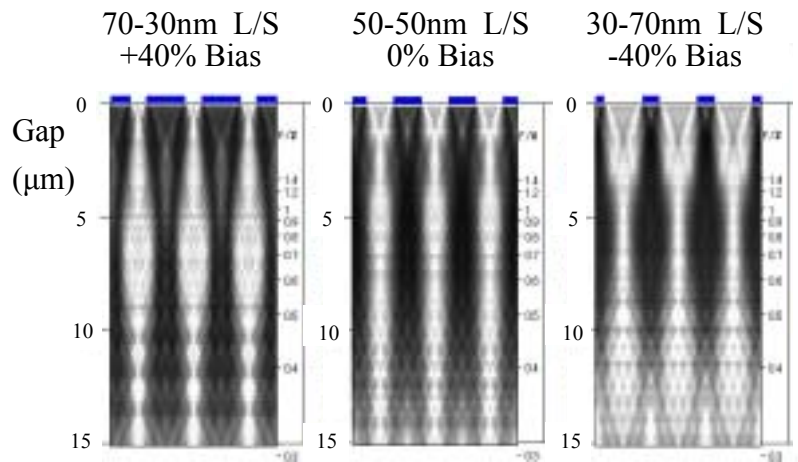


図 6-13 L/S パターンにおける吸収体のバイアス効果

図 6-14 はギャップ 12 μm でマスクバイアスが+40, 0, -40%の場合の吸収線量分布を示すもので、許容限界ギャップで露光すると線幅が小さくなることから分かる。許容限界ギャップで基準線幅を形成するにはマスクとウエハを幅方向に相対移動させて二重露光を行えばよい。図 6-15 はその原理を模式的に示したものである。最初の露光による線量分布 A に対し、マスクを幅方向に距離 S 移動して二回目の露光 B を行うことにより全体の線量分布は C のようになり、線幅を拡大することができる。

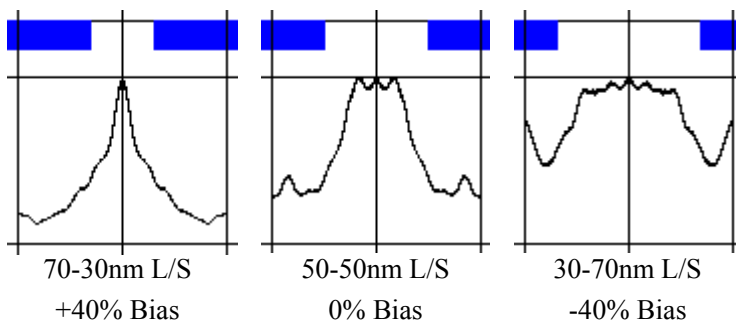


図 6-14 吸収体バイアスと吸収線量分布 (gap: 12 μm)

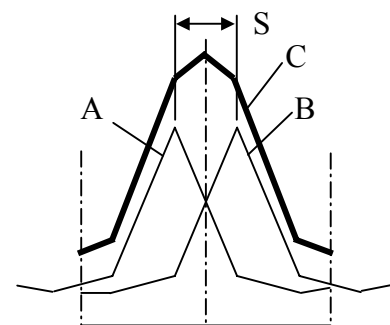


図 6-15 二重露光の原理

次に、二次元パターンの場合について検討する。図 6-16 は T 字形を千鳥状に配置した二次元パターンに対し、AURORA-3 システムを用いて露光した場合の空間線量分布である。図の配列で、線幅は縦方向に 100 nm から 35 nm までほぼ $1/\sqrt{2}$ の倍率で減少し、ギャップは横方向に 8 μm から 1 μm まで 1/2 の倍率で減少している。式(6-12)で λ と k_1 が一定とすると、

$$\frac{g}{W^2} = Const. \quad (6-16)$$

の関係が成り立つ。図 6-16 で、斜め右下方方向に同じ形状の線量分布が連なることから、式(6-12)は二次元形状にも当てはまるのが分かる。線幅 100 nm の場合、許容ギャップは 4 μm と 8 μm の間に存在する。この k_1 値は 2.15 から 1.52 の間に相当する。一次元の k_1 値が 0.6~0.7 だったことを考えると、二次元パターンでは（形状にもよるが）3 倍程度は解像性が悪化するとみられる。即ち二次元パターンでは 100 nm のパターン成形が限界と見られる。

図 6-17 は設計線幅 35 nm の二次元パターンを同一マスクでギャップを変えて露光した場合のレジストパターンの計算結果である。マスクに忠実なイメージを得るには、平行型、交叉型パターン共に、ギャップを

0.4 μm 以下にする必要がある。並行型パターンではギャップを 7 μm に拡大してもイメージを維持できるが線幅と長さが縮小される。線幅を補正するためマスクを幅方向に 10 nm、長手方向に 20 nm 移動し、合計 4 回露光する。交叉型パターンの場合はギャップ 1.5 μm で辛うじてパターン形状を維持できるが線幅が細くなる。マスクを幅方向、長手方向に各 20 nm 移動し、4 回露光を行うことにより原形に近いレジストパターンを得ることができる。このように従来の等倍露光でも多重露光を用いることにより許容ギャップを拡大することが可能になる。

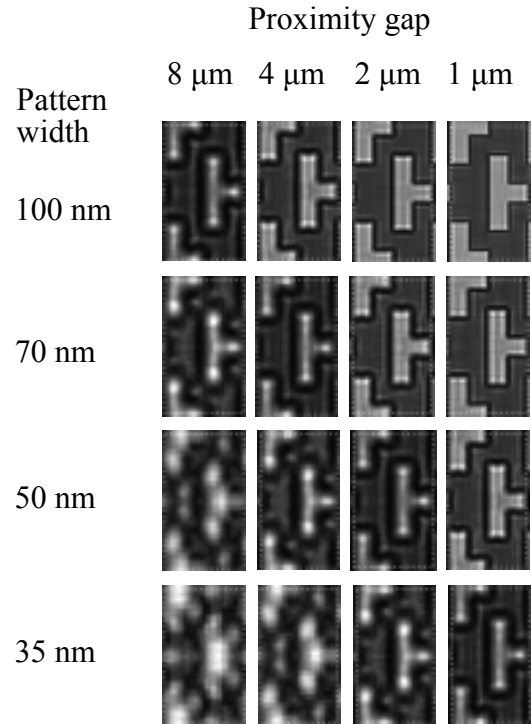


図 6-16 T 字形パターンの空間線量分布

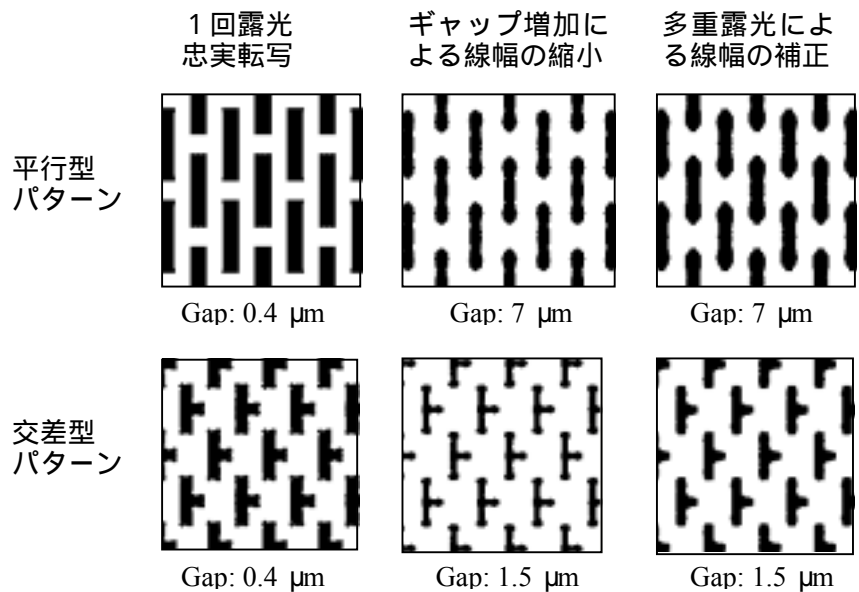


図 6-17 等倍露光による忠実転写と多重露光によるギャップの拡大

6-6 拡大パターンマスク

拡大パターンマスク(Enlarged pattern mask)はX線による縮小露光に対応するマスクとして新しく提案するものである。¹¹ 最初にX線露光の縮小効果を検討する際のマスクとレジストの組合せを考える。図6-18はマスクのタイプとレジストのタイプの組合せに対する現像後のレジスト形状を示す。マスクパターンの灰色部分が吸収体の部分である。レジスト形状の黒い部分が残留レジストを示す。最も縮小効果が顕著なケースは、右下のネガ相マスクとネガ型レジストの組合せであるので、以降の検討ではこの組合せを使用する。

まず、X線露光における縮小効果について検討する。図6-19は一次元の単一スリットを用いた場合の空間線量分布をスリット通過光、吸収体透過光および両者を合成した全体光に分けて示したものである。図6-19(a)のようにスリット内の吸収体エッジ付近を通過した光は、回折作用によりスリットの内側にピークを形成する。吸収体を透過した光は、線量は低いですが位相シフト効果により吸収体エッジ直下の線量を引き下げ、スリット内部のピークを引き上げる作用をする。レジスト現像後の線幅は、(a)のようにスリット幅が広い場合は減少の影響は少ないが、(b)のようにスリット幅が小さい場合は顕著に減少する。縮小効果の原因が回折作用にあることは報告されているが、¹⁰ 位相シフト作用がさらに効果を助長している。過去の露光実験では、レジスト幅がマスクパターンよりも狭く形

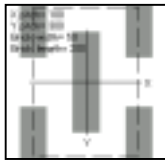
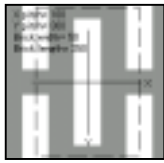



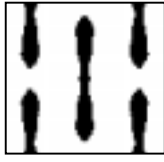
Mask			
X-pitch: 100 nm Y-pitch: 300 nm Width: 50 nm Length: 200 nm		Positive-phase	Negative-phase
Resist section	Positive-tone UV2HS		
	Negative-tone SAI 606		

図6-18 マスクタイプとレジストタイプの組合せによる現像後のレジスト形状 (Gap: 8 μ m)

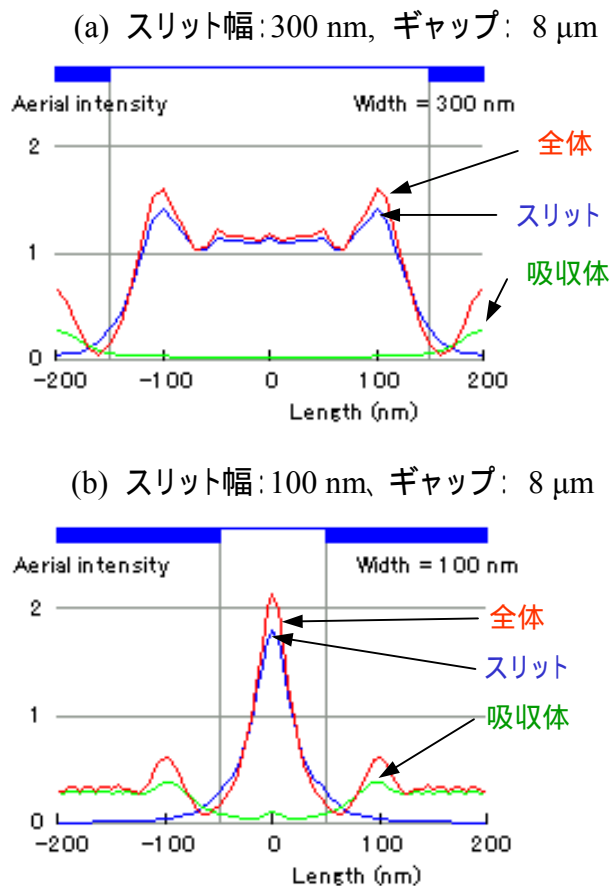


図6-19 パターン微細化に伴う縮小効果の顕在化

成できる現象は line-narrowing effect (二次元パターンでは line end shortening effect)として知られている。³ 実験ではピッチ 360 nm の L/S パターンで 61 nm(ピッチの 17%), 46 nm(13%), 43 nm(12%)のレジストパターンを形成した例が報告されている。¹⁰ 縮小効果は次のように考えると理解しやすい。図 6-20 において線量分布 A は理想的な形状である。パターンの微細化につれて回折効果、位相シフト効果により線量分布の形はくずれ、B または C のようになる。C の分布は現像に不都合なのでパターンが形成がされる線量分布は B のようになり、現像後の線幅が小さくなる現象を示す。

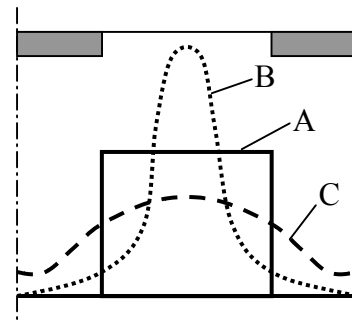


図 6-20 線量分布と線幅

議論を拡大パターンマスクに戻す。拡大パターンマスクを用いたプロセスでは、ある周期的繰り返しパターンを形成する際、繰り返し周期(ピッチ)の整数倍のピッチを有するマスクパターンを用いて多重露光を行うことによりパターン形成を行う。倍数は理論的には 3 倍、4 倍も可能であるが実用性からみて 2 倍ピッチに絞って検討を行う。

一次元 L/S パターンの例を図 6-21 に示す。マスクとしてピッチ 200 nm, 吸収体幅 140 nm, 吸収体厚さ 600 nm Ta を使用する。図 6-21(a) は 1 回露光の吸収線量分布である。この形状はコントラストが -0.26 で露光には不都合である。図 6-21(b) はマスクを半ピッチ(100nm)移動してさらに露光を行った場合で、100 nm ピッチの吸収線量分布を形成し、かつコントラストは 0.72 という高い値が得られる。前節の等倍露光では同じパターンを得る最大許容ギャップは 12 μm (図 6-14 参照)であったのに対し、今回のように 2 倍ピッチのマスクを使用した場合のギャップは 300 μm でも可能で、25 倍の改善を示している。

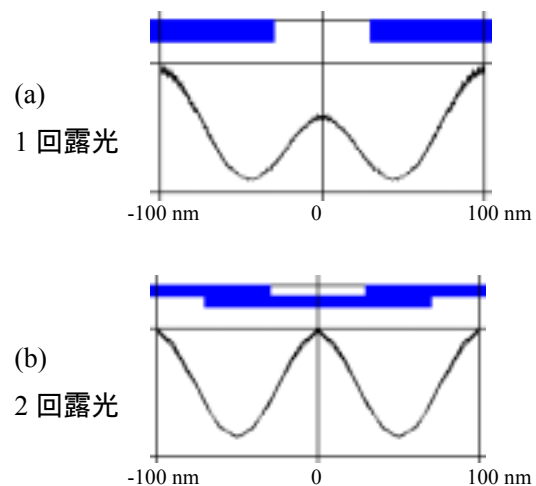


図 6-21 2倍ピッチマスクによる露光
(ギャップ: 300 μm , 吸収体: 600 nm Ta)

このように大幅な改善が可能になる理由は、図 6-21(a)のように吸収体直下に線量分布のピークが現れることが二重露光の場合にとって問題にならないからである。次に二次元パターンの場合を考える。二次元パターンではパターン形成に關与するパラメータは、マスク開口部の形状寸法(縦横)と吸収体の厚さである。最適化の条件は、パターン部とバックグラウンドとの強度コントラストだけでなく、目的とするパターン形状と現像後のレジスト形状の誤差を考える必要がある。比較的単純な格子状パターンに対して最適化プログラムを作成し検討を行った。

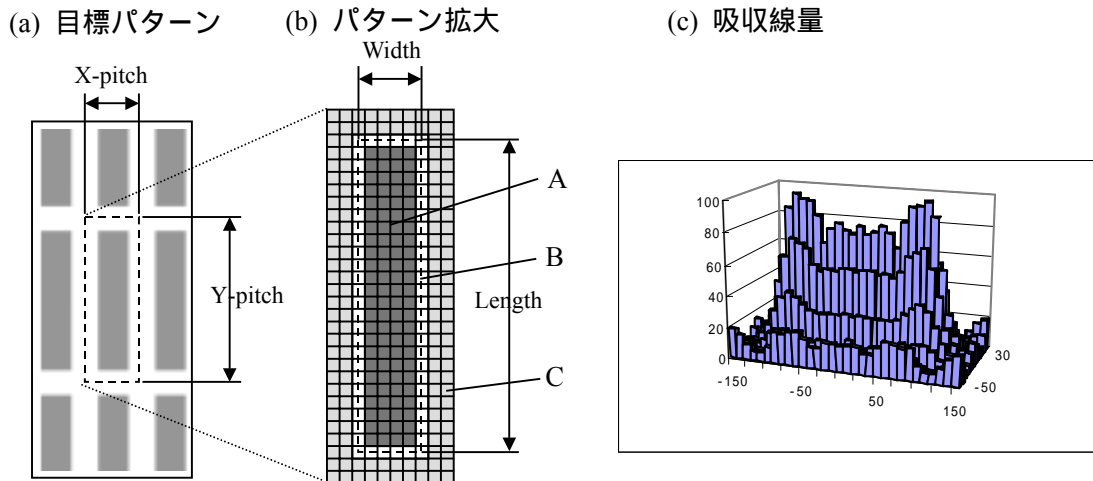


図 6-22 二次元パターンの最適化手法

図 6-22 において(a)は形成目標とするレジストの二次元パターンで、(b)は単位パターンの拡大図である。目標とする現像後のレジスト寸法は図の ‘Width’ x ‘Length’ である。最適化のためのパラメータは、マスク開口部の幅、長さおよび吸収体厚さである。図 6-22(b)のようにメッシュを切り、各メッシュに対し図 6-22(c)のように吸収線量を計算し、図(b)の A 部と C 部の平均値からコントラストを求める。境界の B 部は誤差許容ゾーンとして計算から除外する。形状誤差については、A 部では線量不足、B 部では線量過剰のメッシュを抽出し、線量に応じて重み付け・積算を行い形状誤差指数として数値化する。現像後のレジストの形状を現像シミュレーションにより

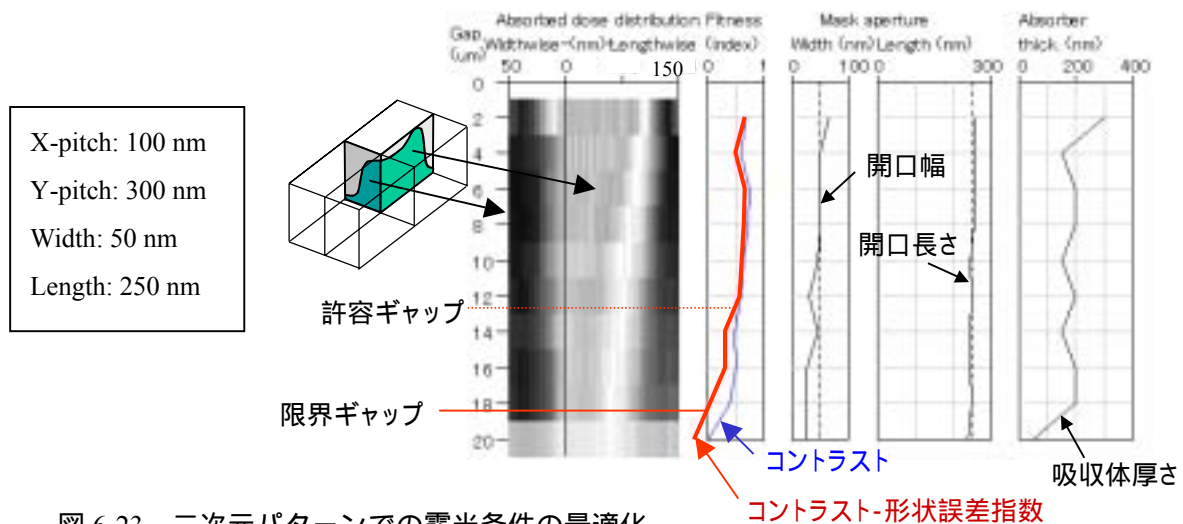


図 6-23 二次元パターンでの露光条件の最適化

計算するのは時間的に困難なので、ここでは吸収線量分布をベースに評価を行う。

図 6-23 に最適化シミュレーションの計算結果の 1 例を示す。図は $100 \times 300 \text{ nm}^2$ ピッチの配列に $50 \times 250 \text{ nm}^2$ のレジストパターンを形成するものである。同図では各ギャップに対しコントラストから形状誤差指数を差し引いた値(フィットネスと呼ぶことにする)を最大にするようマスク開口幅、開口長さおよび吸収体厚さが計算される。フィットネスが 0 になるときのギャップを限界ギャップとし、その 70%の値をと

りあえず許容ギャップと定義する。設計目標とするレジスト幅を横ピッチの 20% (20 nm)から 90% (90 nm)まで変化させ夫々の許容ギャップを計算すると図 6-24 のように許容ギャップは設計目標幅 30% (30 nm)付近で最大値を示す。

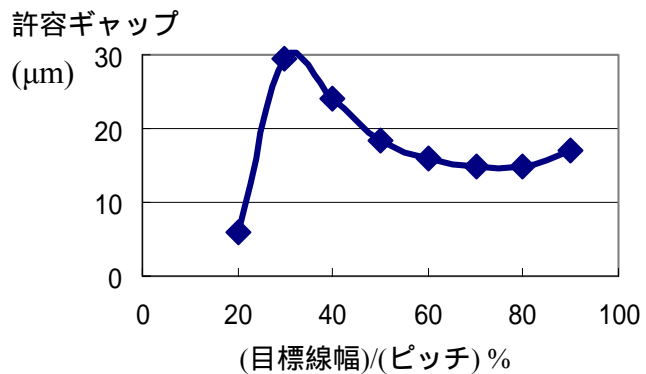


図 6-24 目標線幅と許容ギャップの関係 (ピッチ : 100 nm)

各許容ギャップに対して現像シミュレーションを実施した結果を図 6-25 に示す。現像パターン of 最大幅と最小幅を目標線幅と対比したグラフを示す。本図によると、線量分布を基に設定した目標線幅と現像シミュレーション結果から得られた線幅とは一致しない。この理由は、縮小効果によりピッチの 50%以上の現像線幅を形成することが本来困難であることに起因している。

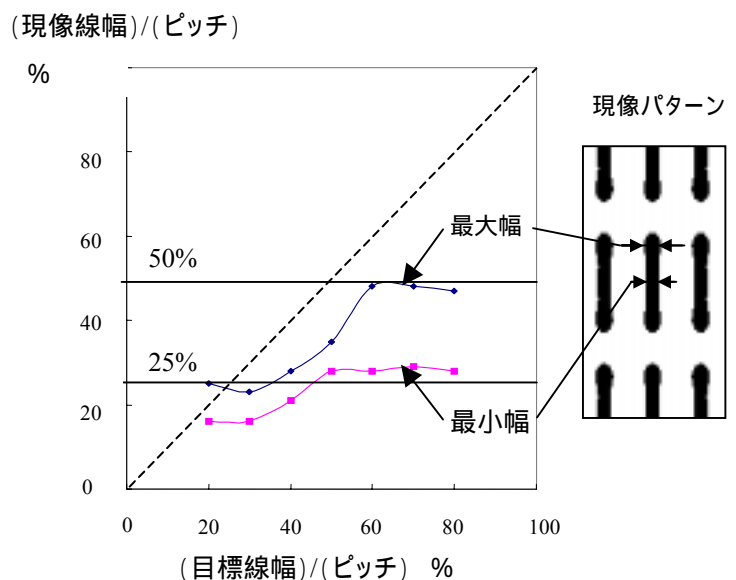


図 6-25 目標線幅と現像後の線幅

ここで注目すべき現象は、同図で目標線幅がピッチの 40%辺りで線幅の変化が少なく、かつ現像後の線幅がピッチの 25%になっていることである。即ち、ピッチの 1/4 の線幅でパターン形成ができることは、マスクを 1/2 ピッチ移動して再び露光することにより 1/2 ピッチで 1/4 ピッチの線幅のパターンが形成できることになる。しかも許容ギャップを大きくとることができる利点がある。

図 6-26 は 100 nm ピッチのマスクを用いて線幅 25 nm の千鳥状配列パターンを 4 回露光により形成するシミュレーション結果である。マスクの吸収体には 250 nm 厚さの Ta を用いている。ギャップは 10 μm である。もし 1 回目の露光の後現像すると、レジストの幅は図のように約 25 nm に縮小されるが、長さも同時に縮小される。長さを補正するためマスクを長手方向に 55 nm 移動して 2 回目の露光を行うことにより図のように所望の長さが得られる。さらにマスクを幅方向

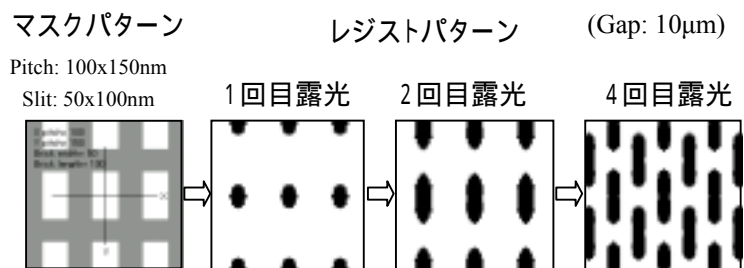


図 6-26 4 回露光による千鳥状平行パターンの形成

と長さ方向に半ピッチ移動し2回(計4回)の露光工程を繰り返すことにより最終図のようなパターンが得られる。

T字形や十字形のように、横方向と縦方向の線が混在する交叉形パターンでは回折作用が複雑になり、平行パターンのような効果は期待できない。この場合は水平方向だけのパターンと垂直方向だけのパターンにマスクを分離して露光する。図6-27はその1例として

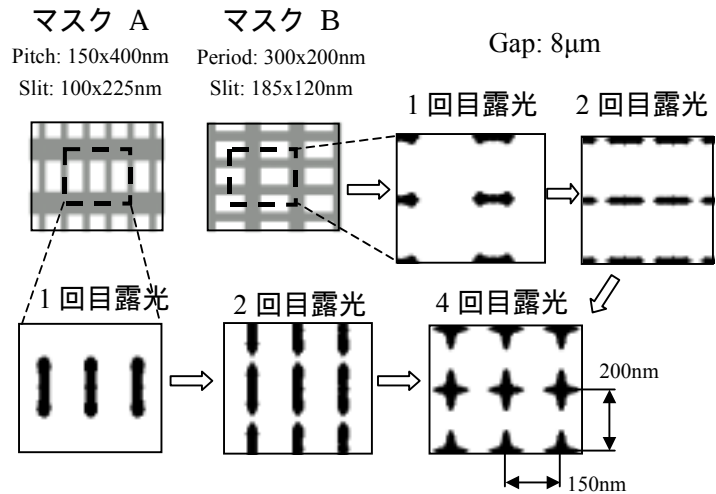


図6-27 2枚マスクによる交叉型パターンの形成

十字形パターンを形成するものである。ここでは各マスクで2回、全体で4回露光して十字形パターンを形成している。十字形パターンの対角中心にさらに十字形を設けるとすると全体で8回の露光が必要になるが、バックグラウンドの線量は露光を重ねるにつれて増加するので実際には8回露光は困難とみられる。図6-27では2枚のマスクを用いるとして説明したが、1枚のマスク上に2種類のパターンを分けて形成する方がマスク交換の時間が節約できる点で望ましい。

拡大パターンマスクによって形成されるイメージはマスクの形状に必ずしも忠実でなく、特に線幅の均一性に問題が残されている。ここでは矩形の開口部に対して計算しているが、さらに望ましいイメージを形成する方法として、イメージ形状をマスク形状にフィードバックして開口部の矩形パターンを変形修正することが考えられる。計算を高速化し、パターン分割を微細化することによりシミュレーションをさらに改良発展させることは可能である。

6-7 干渉スリットマスク

前節の拡大パターンマスクと併せて新しく提案するものである。最初に干渉スリットマスクの原理を説明する。図6-28は単一スリットの空間線量分布で、(a)は20nm、(b)は80nmのスリット幅を持つ。ギャップは8µmである。(a)の場合はスリットを通過した光は、線量分布(Slit)に示すように回折によ

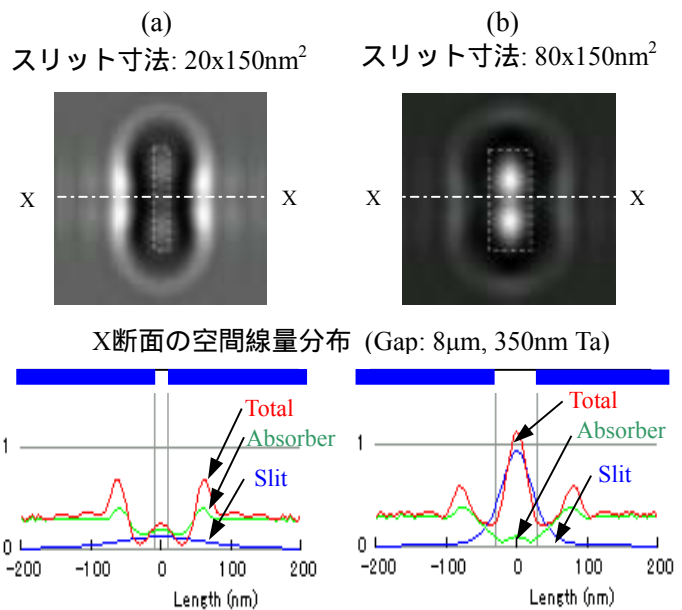


図6-28 干渉スリットマスクの原理 (1)

り広く分散する。吸収体を透過した光(Absorber)は(Slit)光と干渉し、全体の線量(Total)はスリットから少し離れてピークを形成する。この線量のピークはスリットの周りに小判形のリング(上図)を形成する。スリットの幅が広い場合(b)は、スリットを通過する光の大部分は回折することなく入射するので、スリット直下にピークを形成する。一方、スリットを取り囲む小判形の部分の強度は微弱になる。スリット(a)の場合について、図 6-29 のように二組のスリットを小判形のリングの片側が夫々重なり合うよう配置すると、対象性の原理により重なり合った部分の線量強度が倍増する。一方、重なり合わない部分は、夫々の光が干渉により減殺され線量強度が低下する。

スリット間隔: 120 nm
 スリット寸法: 20x150nm²
 ギャップ: 8 μm
 吸収体: 350 nm Ta

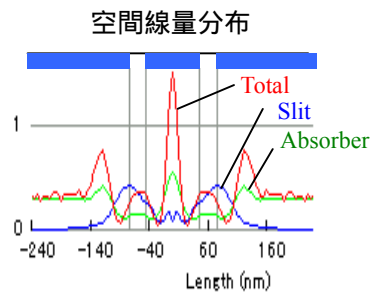
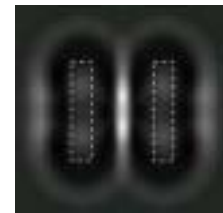


図 6-29 干渉スリットマスクの原理 (2)

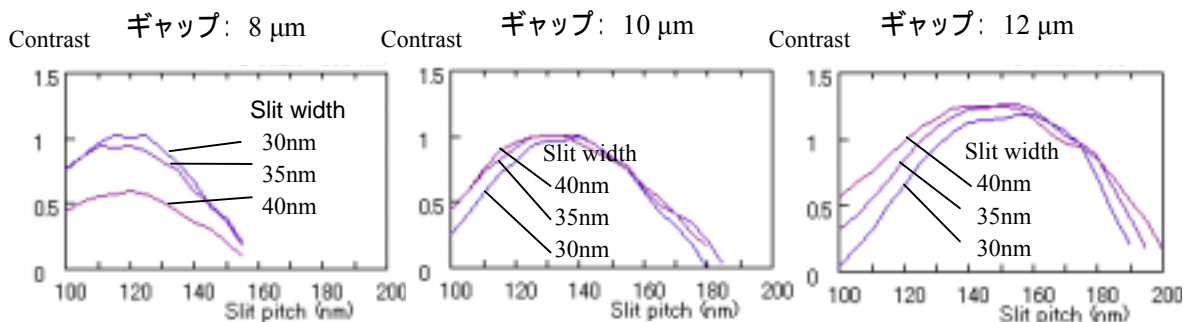


図 6-30 干渉スリットマスクのコントラストに対する間隔とスリット幅の関係

干渉スリットの最適条件は、ギャップ、スリット間隔、スリット幅、光源の平均波長および吸収体の厚さがパラメータとして関与する。図 6-30 は光源 AURORA-3、吸収体 350 nm Ta、ギャップ 8, 10, 12 μm に関し、スリット間隔とスリット幅の変化に対するコントラストの変化を計算したものである。コントラストの計算には中心部の空間線量とバックグラウンド部の最大線量を用いている。

図 6-31 は上記の最適条件をグレーチングパターンに適用した計算結果である。

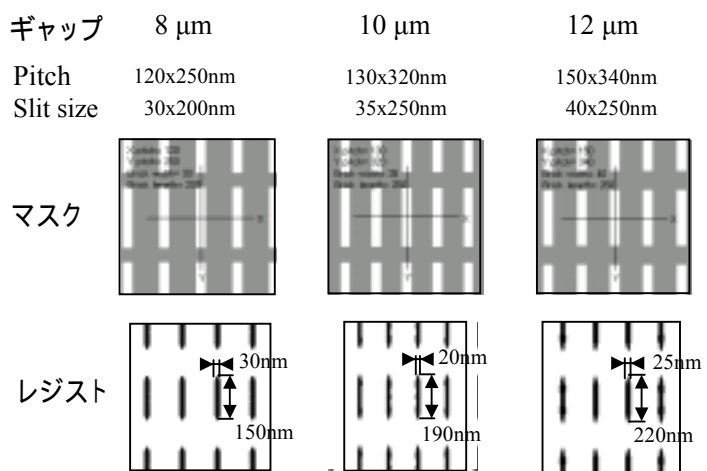


図 6-31 干渉スリットマスクによるパターン形成の計算

等倍露光および拡大パターンマスクと異なるのは、イメージがマスク開口部の直下ではなく吸収体の下に逆相イメージとして形成されることである。また、細くて均等のイメージが得られることが特徴である。拡大パターンマスク同様、2倍ピッチマスクと多重露光による1/2縮小露光が可能である。干渉スリットマスクの応用例として図6-32のように1枚のマスクに2組のスリットを設け、4回露光することにより十字形パターンを形成することができる。図6-20と比較すると干渉スリットマスクの方がシャープなイメージが形成できる。

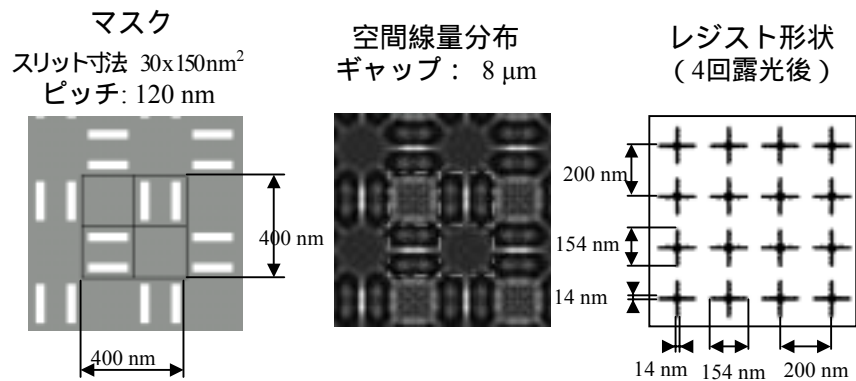


図 6-32 干渉スリットマスクによる十字形パターンの形成

干渉スリットマスクの特長は図6-33のように4本のスリットを正方形に組み合わせたときに顕著に現れる。対称性の原理により中心部にシャープなスポットイメージが形成される。X線を収束させる機構としてはフレネルゾーンプレートがよく知られている。フレネルゾーンプレートは同心円状に配列した複数のスリットを用いて特定の波長を中心点で同期させるものであり、単色光にしか適用できない。図6-33の干渉スリットマスクは対称性により光を増幅しているので多色光に適用でき、対称性が保たれるなら円環状である必要はない。

上記スポットイメージを二次元に配列する場合のマスク形状について検討する。図6-34はスポットイメージを縦横100 nmピッチで

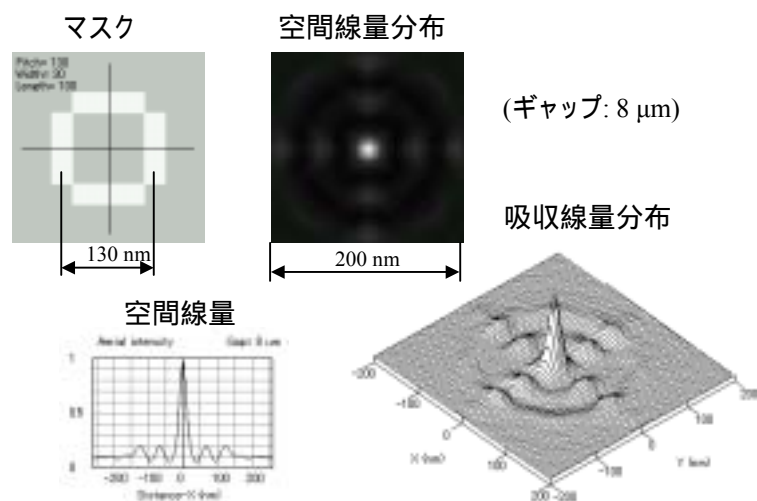


図 6-33 4本のスリットによるスポットイメージの形成

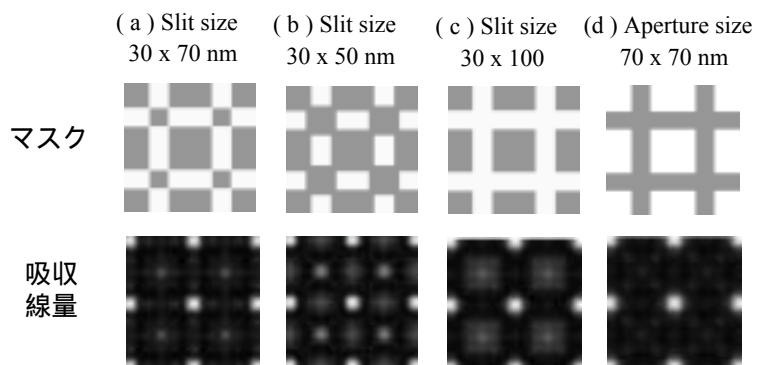


図 6-34 連続パターンにおけるスリットの形状

配列する場合である。形状 (a) に対し (b) のようにスリット長を短くすると中心部以外にも対称部分が生じ、スポットイメージが生じる。スリットを (c) のように連結しても (a) の場合と変わらないので、マスク製作上は (c) の方が有利である。マスクの相を (d) のように逆転しても同じようなイメージが得られる。この場合は拡大パターンマスクのイメージになる。スポットイメージの利用は、6-9 節で述べる連続描画法と関連するので、そこで更に説明する。

6-8 X 線収束マスク

X 線収束マスク(Focusing x-ray mask)は米国で提案されたもので、縮小露光用マスクの一つである。¹² ここでは簡単な紹介と著者が行った検討について述べる。X 線領域では物質の屈折率は 1 より僅かに小さくなるので、凹レンズを用いると図 6-35 のように収束作用を示す。マスクの吸収体をレンズ形状にすることにより縮小露光を実現できる可能性がある。Feldman 他は二次元パターンではマスクの製作が困難として、一次元 L/S スペースの吸収体のエッジ部を放物線状に加工することにより境界部での線量分布がギザギザになる現象(ringing)を緩和し、成形性が改善できると

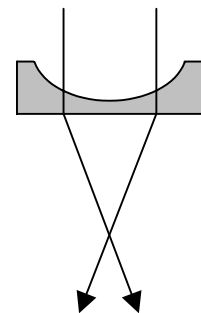


図 6-35 X 線収束マスクの原理

報告している。¹² 著者は X 線収束マスクを前節と同様、スポットイメージの形成に適用する可能性について検討した。マスクの概念を図 6-36 に示す。吸収体の厚さは通常 200 nm 以上になりピッチ 100 x 200 nm² の場合、ピッチ 100 nm の方向にレンズ面を形成するのはスペース的に困難であるので、図のように長手方向(ピッチ 200 nm)の方向にのみ放物線状のレンズ面を設けた形状について検討した。

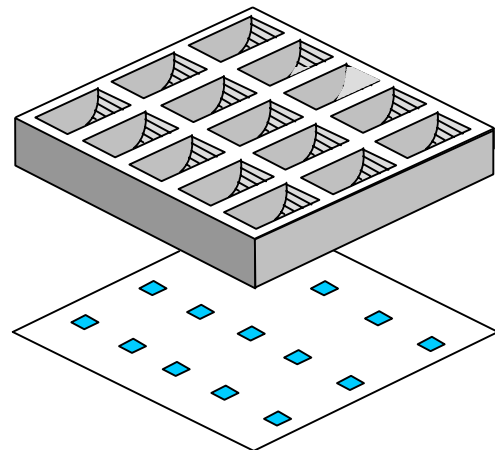


図 6-36 二次元パターン用収束 X 線マスク

図 6-37 に各マスク形状に対し吸収線量分布を計算した結果を示す。幅方向(ピッチ 100 nm)に対し吸収体は幅 60 nm の垂直断面の開口部を持つ。長手方向(ピッチ 200 nm)に対しては吸収体底面の中心から放物線状に変化する円筒状レンズ面を形成している。図 6-37(a)-(c)はレンズ面上部の幅を 60, 100, 140 nm とした場合で、幅(X)方向の線量分布はギャップ 2 ~ 12 μm の範囲で殆ど一定であるが、長手(Y)方向の線量分布は焦点距離により変化することがわかる。これらの入射光は多色光(AURORA-3)による幅広い波長を含んでいる。(c)のケースに対し波長 0.6 nm の単波長を適用すると、図 6-37(d)のように吸収線量分布が乱れる。これは吸収体の厚さが幅方向に変動することにより横方向に干渉が生じる結果である。図 6-37(e)のように一次元形状にして計算すると横方

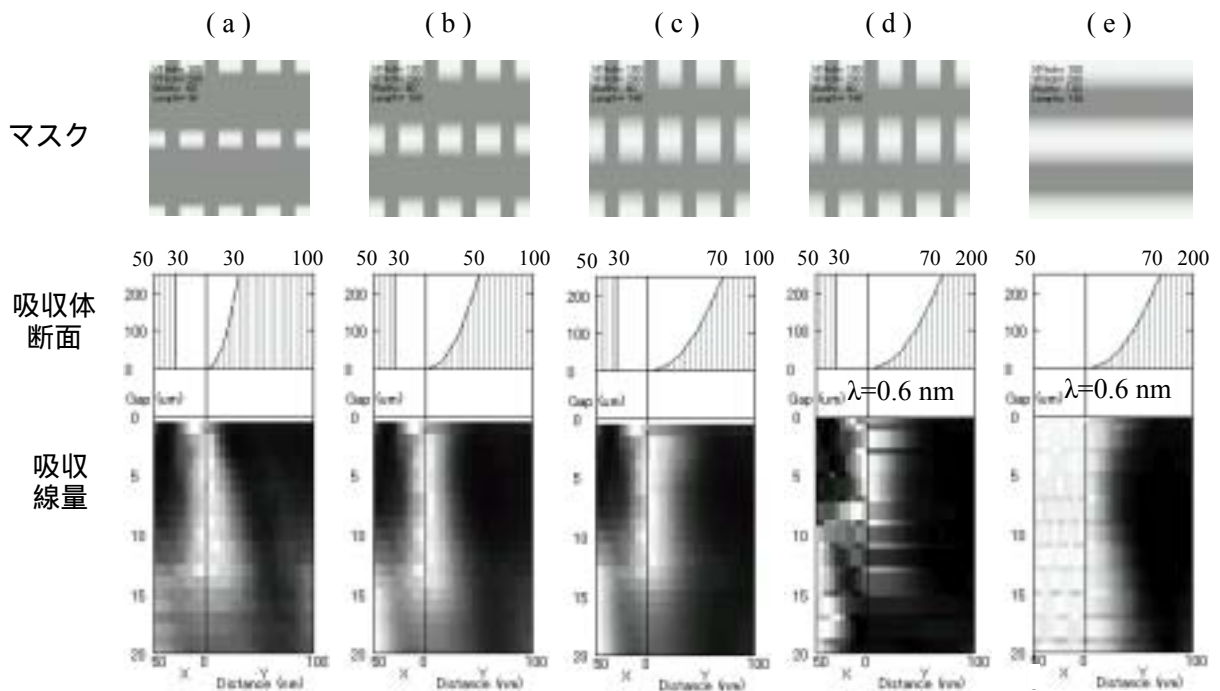


図 6-37 収束 X 線マスクの形状とギャップに対する吸収線量分布

向の干渉効果は除去され、レンズによる収束効果が現れる。図(c)のケースと比較すると多色光の場合の方がギャップの広い範囲にわたってビームが絞られることが分かる。上記計算では(c)のケースが最も有効であったが、長手方向のピッチをさらに大きくしても(c)のレンズ形状が最も適していることを確認した。幅方向にはこのレンズ形状は適用できないが、垂直面を用いることで特に問題はない。収束 X 線マスクでは拡大パターンマスクよりも長手方向に広い開口部がとれるが、これによる露光強度の比較については 6-9-2 節で説明する。

6-9 連続描画法

6-9-1 各種マスクの適用性

これまでパターンの微細化の方法として拡大パターンマスク、干渉スリットマスクおよび収束 X 線マスクを使用することを検討した。二次元パターンに適用する共通の問題点として、均一の線幅を得る条件が限られることがある。図 6-38 は、ピッチ $100 \times 200 \text{ nm}^2$ のグレーチングパターン

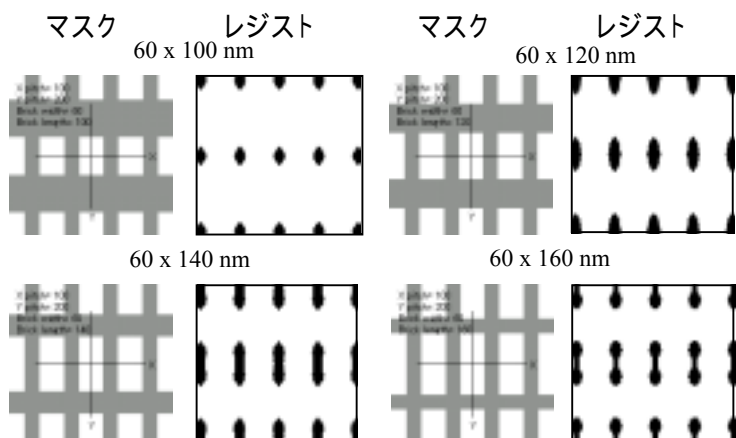


図 6-38 拡大パターンマスクによる線幅の不均一性

について、マスク開口部の長さでレジスト形状の関係を示したものである。開口部長さ 140 nm では線幅はほぼ均等であるが、それより短い場合は中央部が太くなり、それより長い場合は両端部が太くなる。この問題は、開口部の形状を矩形に限定しないことで改善することは可能であるが、設計パラメータが増加するので最適化は容易ではない。干渉スリットマスクの場合は図 6-31 に示したようにイメージの両端部が細くなる傾向がある。もう一つの問題点は、交叉型パターンの形成には 2 種類のマスクパターンが必要になり、生産性が低下することである。

しかしながら、これらのマスクはスポットイメージの形成には非常に有効である。そこで、露光中にマスクとウエハを相対的に移動し、電子線による直接描画のように連続描画を行う方法について検討する。電子線の直接描画は通常一筆書きであるが、この方法では多くのスポットビームを用いて同時に描画するので、生産性が落ちることはない。Smith はフレネルゾーンプレートを多数組配置して連続描画を行う方法を提案しているが、¹³ 前述のように、フレネルゾーンプレートは単色光を使用するので実用的なビームパワーが得られない。今回の提案は放射光スペクトルを用いる点で十分実用的である。なお、ここで云う連続描画とは、T 字形描画のように途中で描画を一時的に休止する断続描画と呼ばれるものも含めた総称として用いる。

最初に拡大パターンマスクを用いる例について検討する。スポットビームを等速度で描画すると均等な線が形成できるが、描画の開始点と終了点の速度については検討が必要である。

図 6-39(a) はピッチ 100 x 100 nm²、開口寸法 60 x 60 nm² のマスクで、(b) は静止露光した場合の現像後のレジスト形状である。レジスト形状は直径 27 nm の円形になる。露光と同時にマスクを縦方向に定速度で 60 nm 移動した場合のレジスト形状は、(c) のように移動ストローク + 27 nm よりも短い線長になり、

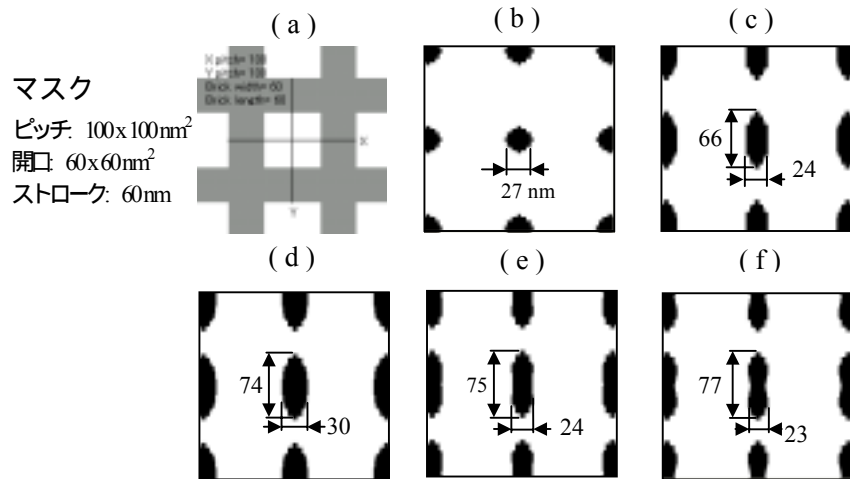


図 6-39 連続描画における始点、終点での描画速度変化

り、線幅も(b)の 27 nm より小さくなる。移動ストロークの最初と最後の 5 nm の部分の移動速度を 1/2, 1/3, 1/4 に減速した場合、即ち照射線量倍率を 2 倍、3 倍、4 倍にした場合を夫々(d), (e), (f) に示す。始点、終点での移動速度が減少し、照射線量が増加するにつれて、線長はわずかに増加する。一方、両端の線量倍率が 1 倍、2 倍の場合は(c), (d) のように線幅が中央部で大きくなるが、両端の線量倍率が(f)のように 4 倍になると中央部がくびれた形になる。したがって、線幅を均一にするには (e) のように適当な線量倍率 (この場合 3 倍) を設定する必要がある。

連続描画では描画方向の制約を受けないので縦方向、横方向、或いは斜めの線を含む交叉型パターンを1枚のマスクで形成することができる。交叉型パターンの形成では交差点での線量の重複を避けるための配慮が必要である。図6-40はピッチ $100 \times 100 \text{ nm}^2$ の平面にT字形パターンを形成するケースについて、

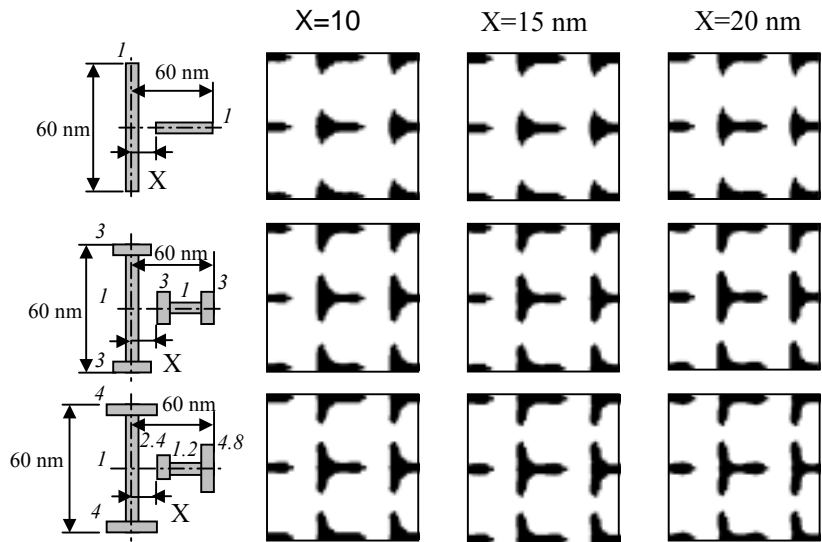


図6-40 T字形パターンの描画速度とセットバックの関係

終点・始点での描画速度と交差点でのセットバック距離を変化させた場合のレジスト形状を示すものである。図の左欄は描画の条件を示すもので、棒線の幅は照射線量の強度を表している（倍率をイタリック体で付記）。これらのシミュレーションでは描画速度を単純に2段階に切り替えているが、さらに細分化または連続的に変化させることによりレジスト形状を改善させる余地が残されている。

次に二次元の縦横のピッチが異なる配列について検討する。単位パターンの区画をユニットセルと呼ぶことにする。図6-41はユニットセル寸法が $100 \times 150 \text{ nm}^2$ の場合である。開口寸法は $70 \times 80 \text{ nm}^2$ である。ユニットセルが矩形の場合、開口寸法は正方形よりも僅かに矩形の方が良好なスポットイメージが得られる。図6-41(a)は吸収体に250 nm厚さのTaを用いた場合である。開口部付近の吸収体は位相シフト効果に寄与するが、開口部から離れた部分の吸収体は開口部のイメージ形成に関与しないばかりでなく、線量分布のバックグラウンドを押し上げ、コントラストを劣化させる。

図(b)のように、開口部から離れた部分の吸収体の厚さを2倍(500 nm)にすると線量分布に明らかな改善が見られる。図(a), (b)の右欄はT字形を描画した場合の吸収線量分布で、(a)のケースではコントラストは0.21であるが(b)のケースでは0.38となる。位相シフトに関与する吸収体(第1層)の縦方向の幅は、横方向の吸収体幅の1/2(この場合15 nm)近辺が最も良い結果を示す。第1

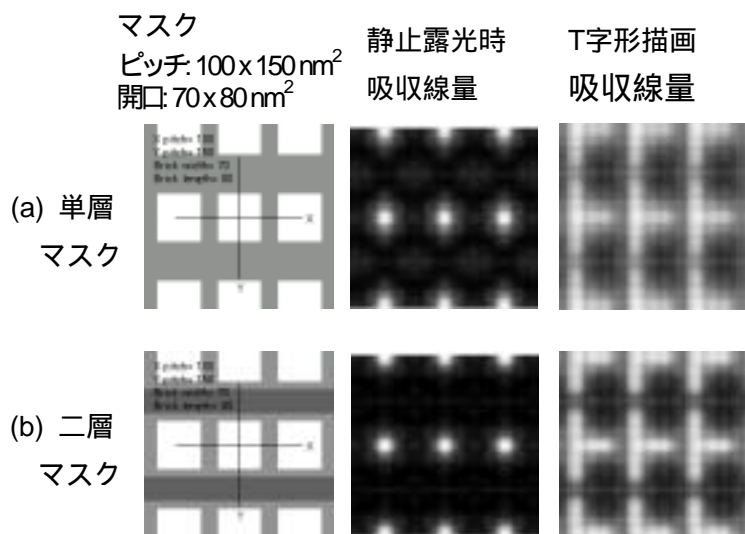


図6-41 二層吸収体マスクによるイメージ形成の改善

層と第2層の吸収体は同じ材料でもよいが、第2層はX線を遮蔽するだけが目的なのでマスクの製作に好都合な別の材料を使用しても差し支えない。¹⁴

次に干渉スリットマスクを用いた連続描画について検討する。図6-42はユニットセル寸法 $100 \times 150 \text{ nm}^2$ の場合の拡大パターンマスクと干渉スリットマスクの連続描画性能を比較したものである。拡大

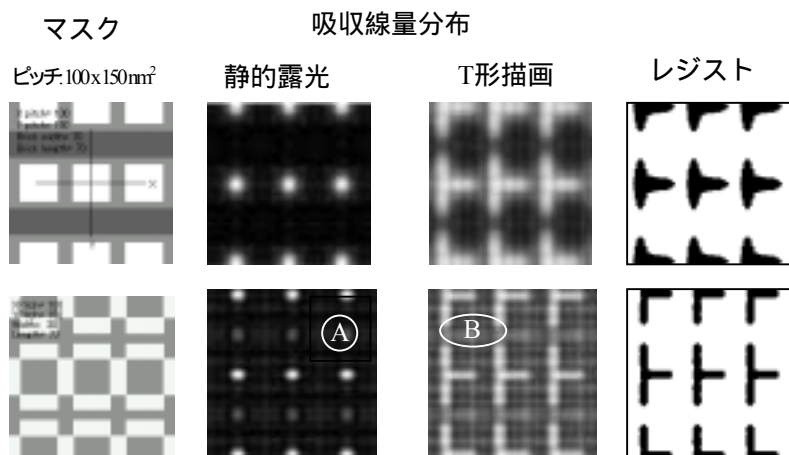


図 6-42 拡大パターンマスクと干渉スリットマスクの連続描画性能の比較

パターンマスクには二層吸収体を用いている。干渉スリットマスクのスリット間隔は横ピッチ(100 nm)に合わせている。干渉スリットマスクでは正方形の配列が必要なので縦方向に隣り合うスリットが50 nmのピッチで配置される。また、スリットを先に示した図6-34(c)のように連続させるのは不都合なので図6-34(a)のような配列になる。計算では干渉スリットマスクの方が拡大パターンマスクよりもシャープなイメージが得られる。図6-42でも干渉スリットマスクの方が良好なレジスト形状が得られている。しかしながら図のAおよびB点では吸収線量の増加が認められ、コントラストの悪化を招いている。この現象は縦方向に隣り合

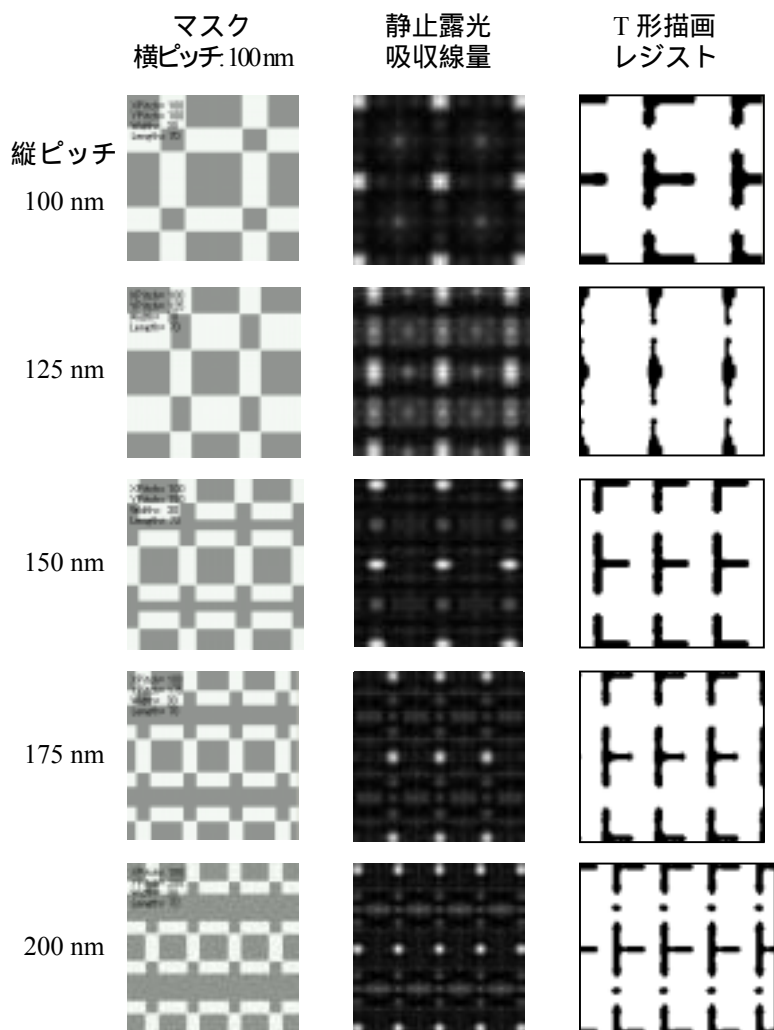


図 6-43 パターン縦横比と干渉スリットマスクのイメージ形成性

うスリットの間隔に関係している。

図 6-43 は横ピッチ 100 nm に対し縦ピッチを 100 nm から 200 nm まで 25 nm 刻みで変化させた場合の静止露光時の吸収線量分布と T 字形パターンを描いた場合のレジスト形状を示すものである。スリットの幅は 30 nm であるので縦ピッチが 125 nm の場合は上下のユニットセルのスリットは重なり合い、その幅が 55 nm になる。この結果、図に示すようにイメージ形成は困難になる。縦ピッチ 150 nm では上下のスリットは分離し、イメージ形成が可能になる。しかし、縦ピッチ 200 nm では上下ユニットセル間のスリット間隔がスリットの基本間隔 200 nm と等しくなるので、その中間部で線量が増加し、望ましくないイメージが形成される。このように干渉スリットマスクでは一般に良好なパターンが得られるが、隣接するスリットが重複しあうか、スリットの間隔が基本スリット間隔に等しくなる場合にはイメージ形成が困難になる。ユニットセルの縦横比が大きい場合、拡大パターンマスクでは二層吸収体を使用することによりパターン形成が改善された。しかし、干渉スリットマスクでは本来位相シフトの効果は期待されず、厚い吸収体(例えば 350~500 nm)を使用する方がイメージ形成に有利なので、二層吸収体を使用するメリットはない。収束 X 線マスクによる連続描画の検討結果の詳細は省略するが、拡大パターンマスクの場合と大差ない結果が得られている。

6-9-2 連続描画法の生産性

最初に従来の静的(多重)露光と連続描画との生産性の差について検討する。図 6-44 はユニットセル $100 \times 150 \text{ nm}^2$ の千鳥状平行パターンを(a)静的(多重)露光および(b)連続描画により形成した場合で、ほぼ同じレジスト形状が得られている。静的露光では4回の位置合わせと露光、連続描画では2回の位置合わせと露光を必要とする。正味露光時間はレジスト上のビームパワー(より正確にはレジストへの吸収パワー)に反比例する。レジストの感度が 50 mJ/cm^2 、ビームパワーが 50 mW/cm^2 とすると、正味露光時間は 1 sec となる。これらの数値は実用可能であるので(a)の場合の正味露光時間を 1 sec と想定することは特に問題ない。ビームパワーはマスクの開口面積に比例するので(b)の正味露光時間は 1.4 sec になる。1回の位置合わせ時間を 0.1 sec と仮定すると(a)、(b)の場合の露光に要する時間はそれぞれ 1.4 sec および 1.6 sec になる。こ

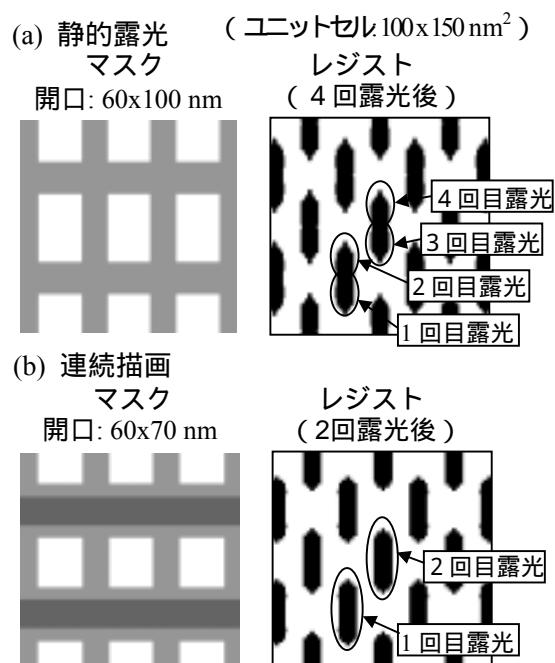


図 6-44 静的露光と連続描画の比較

ニットセル $100 \times 200 \text{ nm}^2$ について同様の計算をすると(a), (b)の場合はそれぞれ 1.33 sec および 1.96 sec になる。この粗い計算では連続描画は静的露光の 70%から 90%の生産性になる。しかしながら交叉型パターンでは静的露光の場合、必要によっては図 6-27 に示したようにマスク交換を行う必要がある。40ヶ所の照射野を持つ 8 インチウエハに対してマスク交換に 20 sec 費やすとすると一つの照射野に対し 0.5 sec の時間が必要になる。2枚のマスクを用いる代わりに、1枚のマスクに2種類のパターンを形成したマスクを用いてもマスクの移動に同等(0.5 sec)の時間が必要と思われるので、この場合は連続描画の生産性は静的露光の 100~120%の生産性になる。結局、両者の生産性には決定的な差はないといえることができる。

拡大パターンマスク(EPM)、干渉スリットマスク(ISM)および収束 X 線マスク(FXM)を用いて連続描画を行った場合の正味露光時間の比較を図 6-45 に示す。縦軸は

ユニットセル $100 \times 100 \text{ nm}^2$ に対する拡大パターンマスクの露光時間で規格化している。横軸はユニットセルの縦横比(L/W)で、L/W が大きくなるにつれて露光時間は増加する。干渉スリットマスクは比較的一定の値を示すが、前節で述べたように L/W=1.25 および L/W=2 付近ではパターン形成が困難である。収束 X 線マスクはレンズ形状の工夫によっては改善の余地はあるが、レンズを通過することによるビームパワーの減衰は避けられないので拡大パターンマスクの露光時間を短縮することは期待できない。

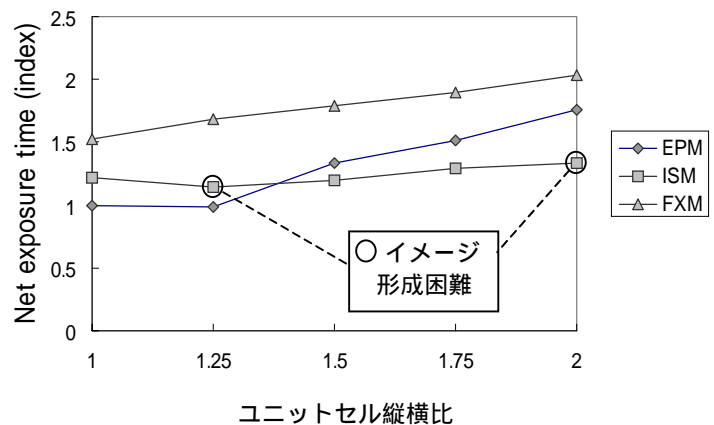


図 6-45 連続描画における正味露光時間の比較

露光時間の問題とは別に、連続露光の大きい利点は、マスクの種類が少なく済むことである。縦横ピッチが同じであればいかなるパターン形状にも同じマスクが適用できる。これはマスク生産の標準化にとって非常に大きいメリットである。

6-9-3 連続描画用ビームライン

連続描画には図 6-46(a)のような一括露光システムが理想的である。ここでは第 1 ミラーで放射光を集光し、第 2 ミラーで照射野全体に拡散照射する。連続描画の場合、マスクの移動につれてイメージは露光面上を連続的に移動する。しかしながら一括露光システムは 2 枚ミラーによる光の移送効率低下の問題、非球面ミラーの生産コストおよび据付時の芯合わせの困難等、実用上の問題が多い。図 6-46(b)のスキャン露光システム(3-4 節参照)は実用性に優れているが、1回の露光に 1 回スキャンする方式では連続描画に対応できないので、ミラーを高速でスキャンさせる必要がある。この場合、露光面上のイメージは連続線でなく点線のように断続的に描かれることになる。

しかし、点線の間隔が短く実用上連続線とみなしても差し支えなければ問題ないはずである。ここで、スキャン露光システムが採用できる可能性を検討する。

ビームラインのレイアウトを図 6-47 のように想定する。露光面積を $35 \times 35 \text{ mm}^2$ とするとミラーの寸法は、幅 120 mm、長さ 180 mm、サジタル半径 95 mm、メリディアン半径 343 m となり、その露光面でのビーム形状は図 6-48(a) に示される。スキャンの有効ストロークは図

6-48(b) の S_1 に示すように 53.3 mm ($32.4 + 20.9 \text{ mm}$) であるが、余裕ストローク S_2 および折り返しストローク S_4 を合わせると全体ストローク S_0 は 110.7 mm になる。照射野の中心では照射の周期はミラーの揺動周期 T_0 の 1/2

であるが、照射野の上下端では周期は最も長い T_1 と最も短い T_2 になる。最も長い周期の T_1 においてスポットイメージの間隔が 5 nm 以下であれば連続線を構成すると考えられる。描画速度を 200 nm/sec と

想定すると間隔 5 nm に相当する時間は 25 msec となり、これから求められるミラーの揺動周波数は 14.3 Hz になる。しかし、往復スキャンを行うとマスクの熱変形が往復方向に発生し、パターンの位置ずれ誤差を誘起することが考えられる。この影響が無

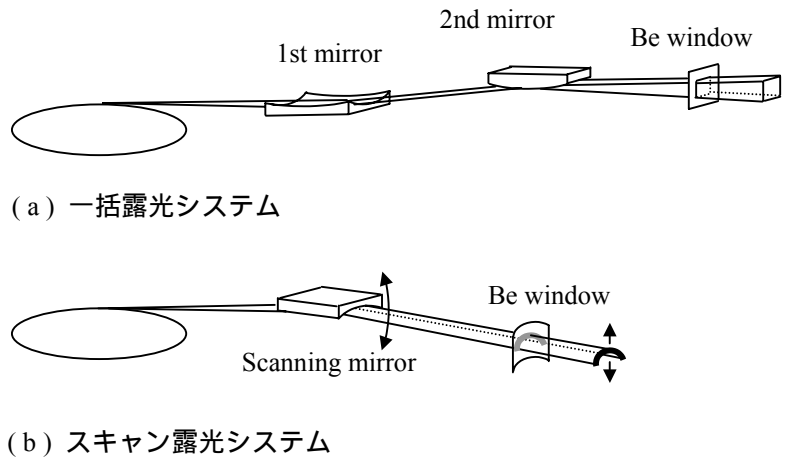


図 6-46 ビームラインの露光システム

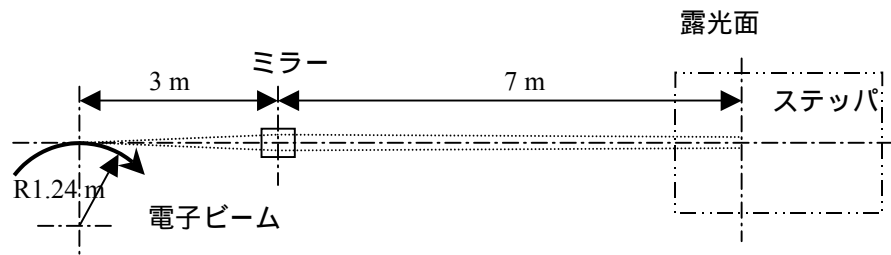


図 6-47 連続描画用のビームラインレイアウト

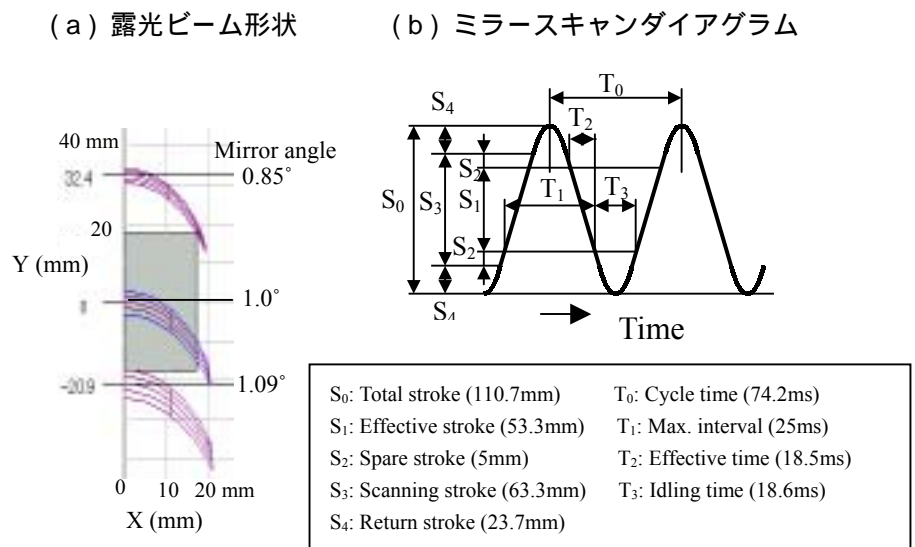


図 6-48 露光面におけるスキャンダイアグラム

視できない場合は、同一方向のスキンの時だけ露光し逆方向の場合はシャッターでビームをブロックする方法が考えられる。この場合の露光周期はミラーの揺動周期 T_0 に等しく、上記の条件では $T_0=25$ msec 即ち周波数は 40 Hz になる。このような設計は機械的に可能なのでスキャン露光システムを用いて連続描画を行うことは問題ないといえる。

6-10 X線リソグラフィの限界

本節ではこれまでに検討した微細化技術を用いると X 線リソグラフィによる微細化がどこまで可能かについて検討する。光源システムについては、これまで AURORA-3 を用いて検討を進めてきたが (5-6 節参照) X 線リソグラフィの限界に迫るため、ここでは、さらにエネルギーを増強した AURORA-4 を設計した。AURORA-4 は AURORA-3 のエネルギーを 1 GeV から 1.4 GeV に増加したもので放射光のパワーは 2.7 倍にアップする。⁹

図 6-49(a)に全体レイアウト、同図(b)にスペクトルの変化を示す。臨界エネルギーは 1.8 keV から 3.5 keV に増加する。ミラー材質を Rh から Ni に変更したのは実用性の問題からで、性能面では大差ない。ベリリウム箔の厚さを 100 μm から 200 μm に増加し 2 keV 以下の光を大幅にカットした。最終的にマスクを通過した光の平均エネルギーは 2.4 keV から 2.7 keV に約 10%増加するだけであるが、シンクロトロンのエネルギー増強が最終パワーの減少を防いでいる。同図には PMMA 以外に 20%Si 含有レジストおよび 50%Br 含有レジスト²⁰の吸収パワーも示した。これらの平均吸収エネルギーは殆ど変わらないのでパターン形成性能は基本的に変わらないが、吸収パワーの増加により露光時間を短縮することができる。PMMA の平均吸収エネルギーは 2.4 keV ($\lambda=0.51$ nm)である。

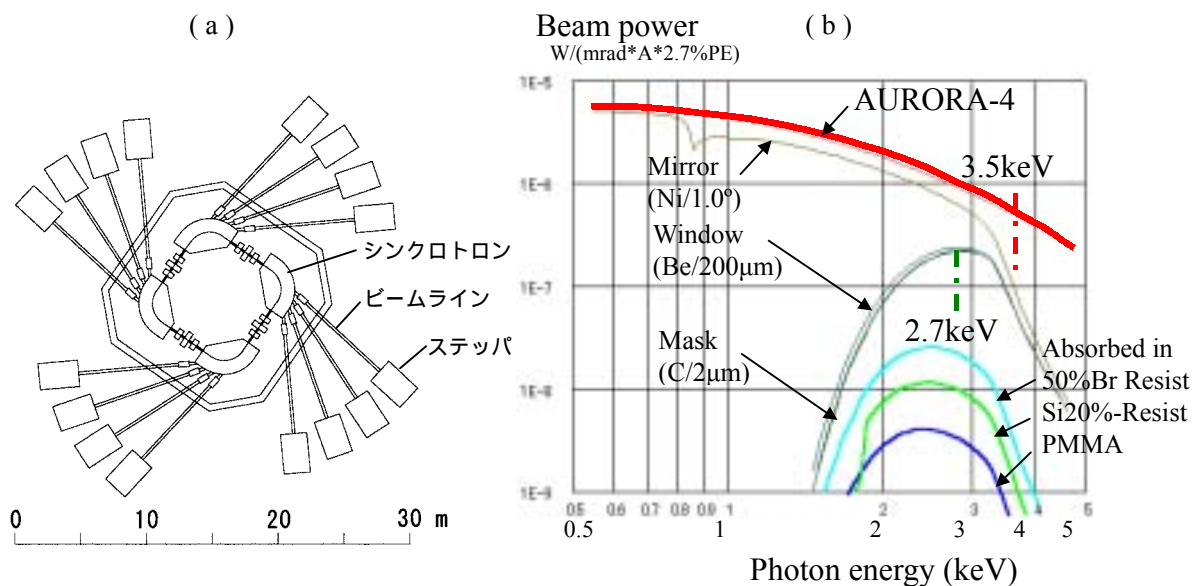


図 6-49 AURORA-4 システムのレイアウトとスペクトル

パターン形成性能の判定には二次元パターンを用いた。図 6-50 に計算に用いた二次元パターンを示す。(a)は平行パターンで、(b)は交叉型パターンとして T 字形を用いた。レジストにはネガ型レジストである SAL601 (Shipley)を用い、現像シミュレーションを用いてレジスト高さ 1/2 における現像後の断面形状を表示した。線幅 W は 100 nm から 18 nm まで、レジスト厚さは 350 nm から 150 nm まで線幅に応じて適宜変更している。

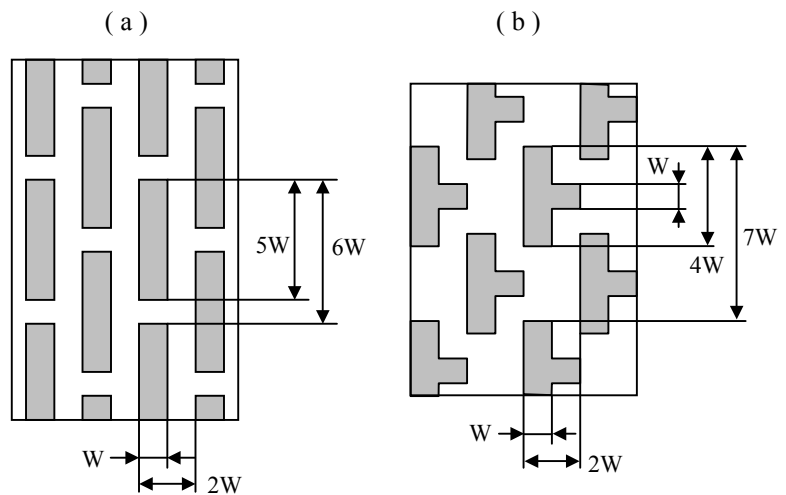


図 6-50 計算に用いた二次元パターン

二次元パターンの計算の前に、一次元パターン (L/S パターン) について計算した結果を図 6-51 に示す。但し、この場合の光源は AURORA-3 で、PMMA の平均吸収波長は 0.54 nm(2.3 keV)である。等倍露光の場合の式(6-13)の係数は 2.8 であるが、2 倍ピッチマスクによる二重露光の値は 59.6 であり 21 倍の向上が見られるばかりでなく線量分布の形状も改善されている。これは 6-6 節で述べたように、等倍露光では吸収体の直下にピークが現れる線量分布は、パターン形成に悪影響を与えるのに対し、二重

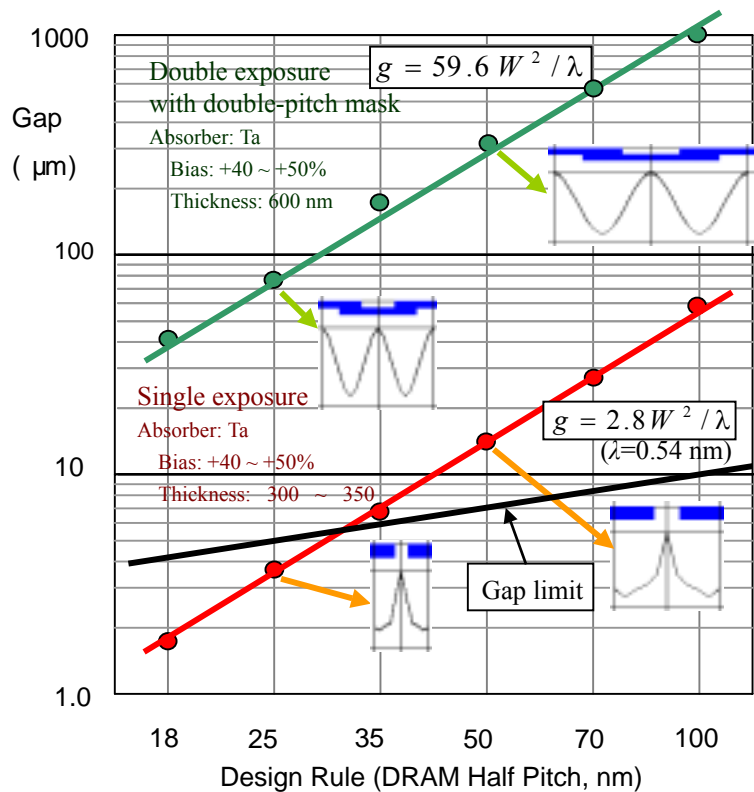


図 6-51 一次元 L/S パターンのギャップ限界

露光では問題にならないからである。図中のギャップリミットの線図は図 6-2 に示したものである。本図によると等倍露光では線幅 35 nm が限界であるが二重露光では線幅 18 nm の場合でも 40 nm のギャップで露光することができることを示している。なお、図 6-12 で示した等倍露光の α 値は 2.96 であり今回の 2.8 と若干異なるが、前回は最適化シミュレーションにより吸収線量分布のコントラストが 0.3 になる条件から計算したものであり、今回は個別に現像シミュレーションを行って確認したものである。したがって、吸収線量分布だけでパターン形成性能を評価しても問題ないことが分かる。一次元 L/S パターンについて実際に露光試験を行った結果、ギャップ 160 μm

で 100 nm の線幅の形成を確認している。

次に二次元パターンの等倍露光のケースについて計算した結果を図 6-52 に示す。

光源には AURORA-4 を用いている。マスクパターンを忠実に転写する場合の値は 0.166 になり、線幅 100 nm でもギャップ 3 μm が必要であり実用は不可能である。平行パターンの場合には二重露光により線幅を補正することにより値が 2.91 になり 17.5 倍の改善が得られ、線幅 35 nm までの形成が可能になる。交叉型パターンの場合にはギャップの増加に対するイメージの劣化の度合いが大きい。また、線幅を縦横の二方向に補正するため計 4 回の露光が必要になり値は 0.62、即ち 3.8 倍しか改善されず、線幅 100 nm までしか転写できない。しかし、マスクパターンを縦方向と横方向に分離して夫々 2 回露光、計 4 回露光を行うと値は 1.66、即ち忠実転写の 10 倍に改善され、線幅 50 nm までの転写が可能になる。

拡大パターンマスクを用いたギャップ限界を図 6-53 に示す。この場合、平行パターンでは 4 回露光により値 10.2 が得られ、線幅 18 nm まで形成可能である。交叉型パターンでは縦横 2 組の平行パターンマスクにより計 4 回の露光を行い値 5.1 が得られ、線幅 25 nm まで形成可能である。パターンの形状によっては露光回数を半減することができ、この場合はギャップ限界をさらに大きくすることができる。干渉スリットマスクを用いても同様の効果が期待されるが、収束 X 線マスクはマスクの設計が困難で特定の形状を除き適用は困難である。

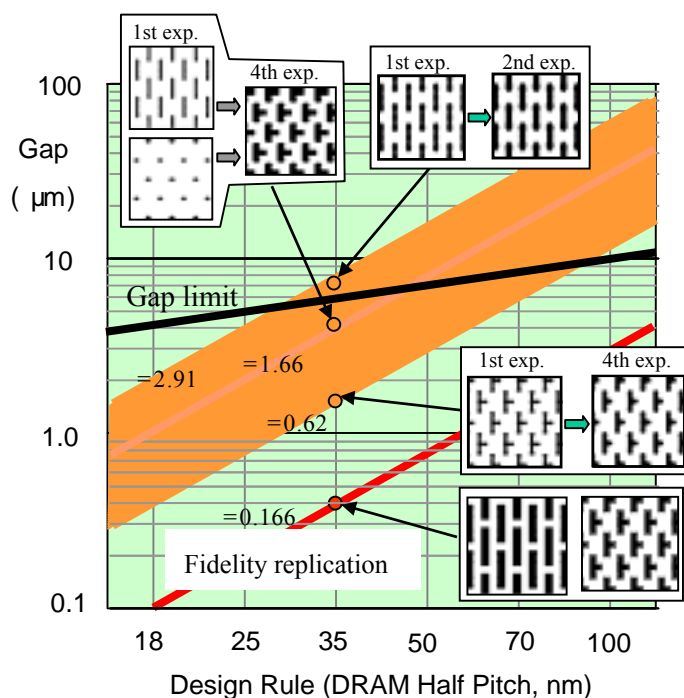


図 6-52 二次元等倍露光のギャップ限界

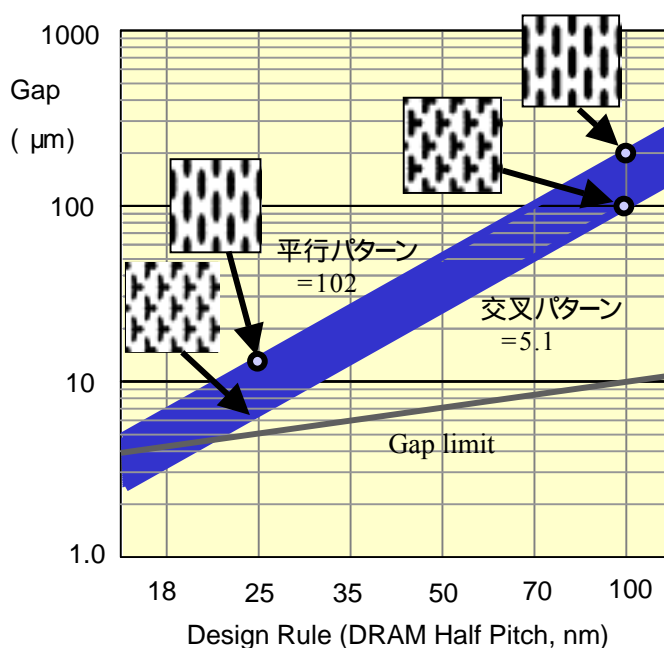


図 6-53 拡大パターンマスクのギャップ限界

拡大パターンマスクを用いた連続描画法によるギャップ限界を図 6-54 に示す。平行パターンの値は 11.7、交叉型パターンの値は 8.1 で、共に線幅 18 nm の形成が可能である。連続描画の場合、平行パターンと交叉パターンの描画には本質的な差はなく、描画の総線長が長くなるほど露光時間が長くなり、バックグラウンドが上昇することが描画性能を決定する。収束 X 線マスクは拡大パターンマスクと同等の性能を示す。干渉スリットマスクは 1/2 ピッチよりも狭い線幅の形成が可能であるので特殊なパターン形成には有用である。ここでは線幅 1/2 ピッチを対象にしたので干渉スリットマスクの評価は行っていない。

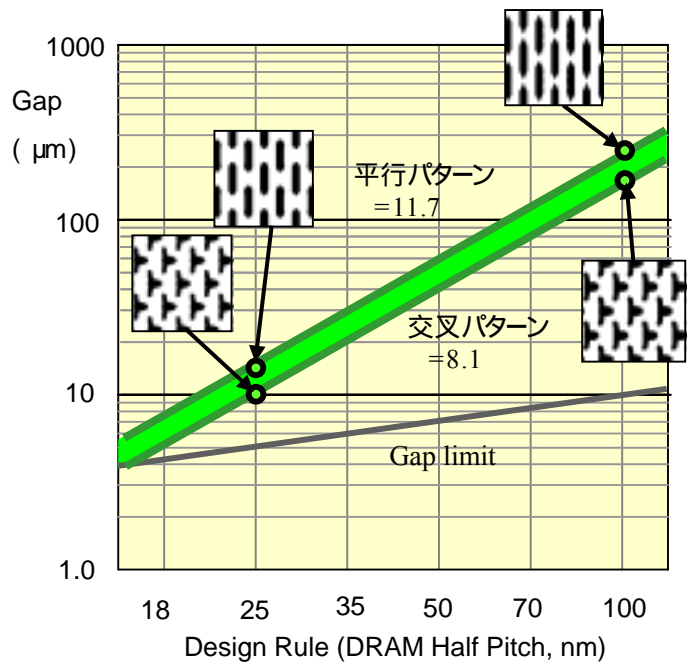


図 6-54 連続描画法のギャップ限界

これまで検討した等倍マスク、2倍マスク(拡大パターンマスクと他の形式を含め総称する)および連続描画をまとめると図 6-55 のようになる。ギャップの限界に合わせて露光法を切り替えることができる。等倍マスクも 2倍マスクも多重露光を併用することが必須になるので、マスク製作の容易さを考えるとギャップの限界よりも早期に 2倍マスクに切り替える方が好ましい。連続描画への切り替えにはそれに対応するビームラインとステップの開発が必要である。ビームラインについては 6-9-3 節に述べたようにスキャン方式でも対応可能である。

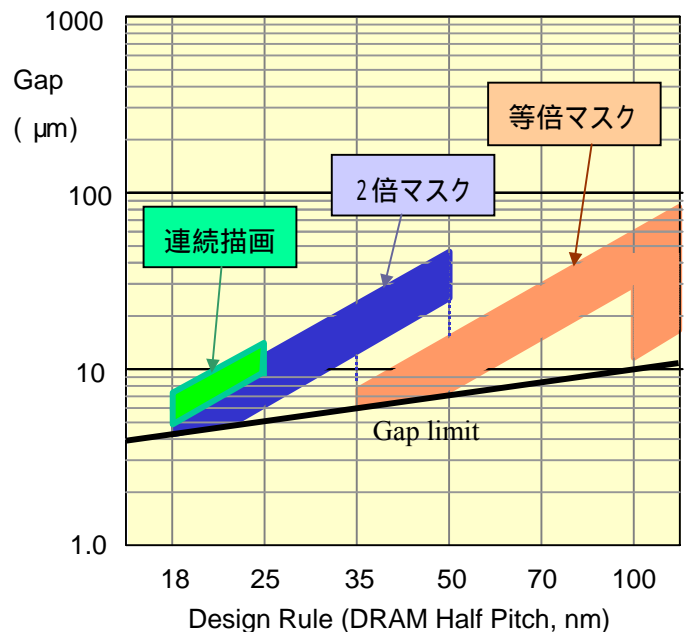


図 6-55 X 線リソグラフィの限界

リソグラフィの限界の前提条件はステップによる許容ギャップである。これまでの検討では基準線幅の平方根に比例するとして検討を行ったが、この前提が異なると結論も当然異なるが、物理的な限界が特でない以上、この前提条件が大幅に変わることは考えにくい。連続描画に対するステップの対応に関しては静的な多重露光の位置

合わせ精度よりも厳しい精度が要求される。即ち、静的露光では露光時のマスク位置変動の積分値が線量分布として表れるが、連続描画では露光位置は一過性であるので位置誤差は線量分布誤差に直接反映される。したがってステッパの位置精度は静的露光の場合の 1/2 程度に向上させる必要がある。

二次電子等による半影ボケの影響については 6-3 節に述べたように線幅 18 nm レベルでは問題ないとみられる。ただしこのレベルでは、レジストの粒子性が現像に及ぼす影響および高アスペクト比のマスク吸収体壁面粗さの影響等、現在まだ十分解明されていない問題が顕在化してくると思われる。

6-11 結言

X 線リソグラフィの制約要素として、ステッパの使用可能ギャップ、半影ボケの影響、および露光方法による解像限界について検討を行った。最初にステッパの限界について予測を行った。

次にシミュレーションプログラムに含まれていない半影ボケの影響について、光源サイズ、マスクの熱歪、マスクの機械振動およびレジスト中の二次電子散乱効果に対する定量的な評価を行った。特に二次電子散乱についてはウイスコンシン大学に Monte Carlo シミュレーションを依頼した結果を用いた。最終的に全体の半影ボケの影響は、値で 5.8 nm であり、線幅 18 nm レベルのパターン形成には影響しないことが明らかにした。

露光法による限界については従来から Rayleigh の基準 ($=k_1(\lambda/g)^{1/2}$) が適用されるとされていたが、 k_1 値を確定する理論的根拠が不明確で、実験結果から算定されているに過ぎなかった。著者は一次元および二次元パターンについてパターン形成の最適化プログラムを作成し、計算した結果、Rayleigh の基準が X 線リソグラフィ全般に適用できることを確認し、 k_1 値は露光方式によって大きく変わることを見出した。X 線リソグラフィの実用限界は、マスク・ウエハ間のギャップ g に大きく依存しているので、許容ギャップの関係を $g = W^2/\lambda$ として各露光法に対する値 ($=1/k_1^2$) の値を確定し、パターン線幅 W の形成限界を求める方法をとった。

従来の等倍露光でマスクパターンを忠実に転写するのは、線幅 100 nm 以下ではギャップの制約により不可能である。ギャップを増加させるとイメージの線幅が小さくなるので、マスクを幅方向に移動し、さらに露光する多重露光方式を導入することにより線幅を補正する方法を計算により検証した。交叉型パターンについては、マスクを平行だけのパターンに再構成することにより許容ギャップが増大できることを示した。

新しい露光方法として、拡大パターンマスクおよび干渉スリットマスクを用いて縮小露光を行う方法を提案した。また、米国で提案されている収束 X 線マスクについても評価検討を行った。これらのマスクは基本的に 2 倍ピッチのマスクを用いてパターンを形成するもので、パターン密度を補うため多重露光を併用するものである。拡

大パターンマスクについては、シミュレーションによりマスクピッチの 1/4 の線幅形成が許容ギャップを極大化できることを示した。特に一次元 L/S パターンに関しては許容ギャップが等倍マスクの場合の許容ギャップに対し 20 倍以上の改善効果があることを示した。干渉スリットマスクについては、その原理とフレネルゾーンプレートに対する優位性を説明した。また、シミュレーションにより非常にシャープなイメージが形成できることを検証した。米国で提案された収束 X 線マスクについてもシミュレーションによりその収束特性を確認した。

これら 3 種類のマスクを連続描画法に応用するための検討を実施した。描画の始点、終点における照射線量の重み付けの必要性、また、交叉型パターンにおける交差点での描画のセットバックについて検討を行った。拡大パターンマスクについては二層吸収体の使用を提案した。干渉スリットマスクについては、望ましくない干渉が発生する条件を検討した。連続描画法の生産性については等倍露光とほぼ同等であることを試算した。また、3 種類のマスクを用いた生産性についても検討を行った。連続描画用ビームラインについて、一括露光方式以外にスキャン方式でもスキャン周波数を上げれば対応可能であることを設計例で示した。

X 線リソグラフィの限界を確認するため、光源としてさらにエネルギーを増強した AURORA-4 (1.4 GeV) とビームラインを設計した。この光源システムを用いて等倍露光による多重露光、拡大パターンマスクを用いた多重露光、および拡大パターンマスクを用いた連続描画の三つの方法に対し許容ギャップのシミュレーションを行った。その結果、等倍マスクでは 50~35 nm、拡大パターンマスクでは 25~18 nm、連続描画では 18 nm までパターン形成が可能であることが判明した。最後に各露光法に対して確定した λ 値と k_1 値を表 6-1 にまとめる。

表 6-1 各露光方法の λ 値と k_1 値

露光法	パターン	λ 値	k_1 値
等倍露光	平行	2.91	0.59
	交叉	1.66	0.78
2 倍マスク露光	平行	10.2	0.31
	交叉	5.1	0.44
2 倍マスク連続描画	平行	11.7	0.29
	交叉	8.1	0.35

引用文献

1. S. Hector, V. Wong, H. Smith, M. McCord, and K. Rhee, (1994) Printability of sub-150 nm features in x-ray lithography: Theory and experiments, *J. Vac. Sci. Technol.* **B12**(6), pp.3965-3969.
2. K. Deguchi, K. Miyoshi, M. Oda, T. Matsuda, A. Ozawa, and H. Yoshihara, (1996) Extendibility of synchrotron radiation lithography to the sub-100 nm region, *J. Vac. Sci. Technol.* **B14**(6), pp.4294-4297.
3. S. Hector, W. Chu, M. Thompson, V. Pol, B. Dauksher, K. Cunning, D. Resnik, S. Pendharker, J. Maldonado, M. McCord, A. Krasnoperova, L. Liebmann, J. Silverman, J. Guo, M. Khan, S. Bollepalli, L. Capodiecici, and F. Cerrina, (1996) Extendibility of x-ray lithography to ≤ 130 nm ground rule in complex integrated circuit patterns, *J. Vac. Sci. Technol.* **B14**(6), pp.4288-4293
4. M. Khan, G. Han, S. Bollepalli, F. Cwerrina, J. Maldonado, (1999) Extension of x-ray lithography to 50 nm with a harder spectrum, *J. Vac. Sci. Technol.* **B 17**(6), pp. 3426-3432.
5. K. Early, M. Schattenburg, and H. Smith, (1990) Absence of resolution degradation in x-ray lithography for λ from 4.5 nm to 0.83 nm, *Microelectronic Engineering* **11**, pp. 317-321.
6. 左貝潤一 (1997) 光学の基礎、コロナ社、P. 217
7. F. Cerrina (1996) X-ray Lithography, to be published in *SPIE Handbook on Lithography*, Chapter 3.
8. 宇田幸一(Canon), (2001) *Private communication*.
9. E. Toyota and M. Washio (2002) Extendibility of proximity x-ray lithography to 25 nm and below, *Abstracts of The 45th International Conference Electron, Ion and Photon Beam Technology and Nanofabrication*, Anaheim CA, pp. 345-346.
10. Y. Vladimirsky, A. Bourdillon, O. Vladimirsky, W. Jiang, and Q. Leonard (1999) Demagnification in proximity x-ray lithography and extensibility to 25 nm by optimizing Fresnel diffraction, *J. Phys. D* **32**, ppL1-5.
11. E. Toyota, T. Hori, M. Khan, and F. Cerrina, (2001) Technique for 25 nm x-ray nanolithography, *J. Vac. Sci. Technol.* **B19**(6), pp. 2428-2433.
12. M. Feldman, M. Khan, and F. Cerrina, (2001) Focusing x-ray masks for printing very narrow features, *J. Vac. Sci. Technol.* **B19**(6), pp. 2434-2438.
13. H. Smith (1996) A proposal for maskless, zone-plate-array nanolithography, *J. Vac. Sci. Technol.* **B14**(6), pp. 4318-4322.
14. 豊田英二郎、鷲尾方一 (2001) パターン描画方法、マスクおよびマスク製作方法、早稲田大学 特願 2001-318563.
15. T. Ogawa, S. Murayama, K. Mochiji, and E. Takeda (1993) Resolution limit of x-ray proximity lithography -secondary electron and waveguide effects-, *SPIE* **1924**, pp.273-281.
16. K. Murata (1985) Theoretical studied of the electron scattering effect on developed

pattern profiles in x-ray lithography, *J. Appl. Phys.* **57**(2), pp.575-580.

17. L. Ocola and F. Cerrina (1993) Parametric modeling of photoelectron effects in x-ray lithography, *J. Vac. Sci. Technol.* **B11**(6), pp. 2839-2844.

18. M. Khan, G. Han, G. Tsvit, T. Kitayama, J. Maldonado, and F. Cerrina (2001) Can proximity x-ray lithography print 35 nm features? Yes, *J. Vac. Sci. Technol.* **B19**(6), pp. 2423-2427.

19. G. Ham and F. Cerrina (2002) *Private communication*.

20. H. Watanabe and K. Itoga (2001) Narrow band spectrum effect on resolution enhancement for 50-nm pattern printing by proximity x-ray lithography, *Digest of papers for International Microprocess and Nanotechnology Conference*, Matsue-shi, pp. 266-267.

結 論

本研究は、シンクロトロン放射光を用いた X 線リソグラフィの放射光源から露光面に至るシステム機器全般にわたる検討と露光プロセスの研究に関するものである。X 線リソグラフィのパターン形成限界についてはこれまでも多くの報告がなされているが、本研究では各ハード機器の設計仕様にさかのぼり詳細な検討を行い、シミュレーションによりパターン形成性能を検証した。さらに従来 of 等倍露光法に対し、縮小露光の概念を導入することにより X 線リソグラフィの限界が大幅に拡張可能であることを具体的に提示した。以下に本論文の各章で得られた結論を要約する。

(第 2 章 小型放射光源の開発)

X 線リソグラフィが着目された当初は放射光発生装置であるシンクロトロンの小型化が急務とされた。著者は住友重機械の開発チームリーダーとして、世界最小の超伝導シンクロトロン AURORA の開発に成功した。¹ さらに、経済性、安定性を重視した小型常伝導シンクロトロン AURORA-2 の開発にも成功し、X 線リソグラフィの光源に関する諸課題を解決することにより工場へ導入可能な小型光源の提供を可能にした。²

(第 3 章 高強度ビームラインの開発)

光源からの光を露光装置に導くビームラインは、伝播効率の高い一枚ミラー方式が望ましいものとされたが、スキャン時に像が変形することが問題視され、複数ミラーを用いた複雑な構成が一般に使用されていた。著者はミラーの駆動方法を工夫することによりスキャン時の像が変形する問題を解決し、簡素な構造で高強度のビームラインの開発に成功した。³ ビームラインを試作し、AURORA-2 と組み合わせ露光試験を行った結果、世界最高の露光強度および均一性を実現した。⁴ また、ビームラインの弱点であるベリリウム窓の破損対策として新しい ADL (Acoustic Delay Line) を提案し動的解析により破損時の安全性を確認した。⁵ さらに、大面積露光において、均一なレジストパターンを形成するため意図的に露光強度分布に傾斜を与える方法を開発した。

(第 4 章 X 線マスクの熱変形が転写精度に及ぼす影響)

スキャンミラー方式のビームラインでは、X 線マスクに生じる熱変形が転写精度に悪影響を与えると考えられていた。著者は有限要素法を用いて厳密な動的解析を行い、転写性に及ぼす影響が実用上問題ないことを理論的に示した。⁶

(第 5 章 従来の露光法によるパターン形成限界の検討)

従来の等倍露光法のパターン形成限界の検討を行い、50 nm の一次元パターンに適

用可能であることを検証した。微細化への適応性の指標として、X線スペクトルの各波長に対応するコントラストの解析から放射光スペクトルを短波長側にシフトする方向付けを行い、対応するシステム機器全体の検討を行った。微細化に対応した光源 AURORA-3 およびビームラインの具体的設計を行った。⁷

(第6章 新しい露光法による微細化限界の拡張)

従来の等倍露光の限界について解析した。この限界を克服する方法として拡大パターンマスクおよび干渉スリットマスクを用いた新しい露光法を提案した。この方法はX線で縮小露光を行うもので、多重露光法を併用することにより微細かつ高密度の二次元パターンの形成を可能にするものである。⁷ さらに、これらの新しいマスクを用いた連続描画法を提案した。⁸ 各露光法について許容ギャップをシミュレーションにより計算した。シミュレーションに含まれない半影ボケの影響についても評価を行った。X線リソグラフィの極限に対応する新しい露光システム AURORA-4 を設計し、各種の露光法についてシミュレーションを行った結果、等倍露光方式では多重露光法と組み合わせることにより 50~35 nm、拡大パターンマスクによる多重露光では 25~18 nm、拡大パターンマスクによる連続描画では 18 nm をクリアする領域までパターン形成が可能であることを計算により確認した。⁹

次世代リソグラフィの競合技術として極紫外光(EUV)露光および電子線露光についても 70~50nm レベルの開発が進められている。本論文による X 線リソグラフィで 18 nm レベルの二次元パターン形成を可能とする結論は、この開発競争に大きいインパクトを与えるものである。X 線リソグラフィの限界性を実際の露光試験により評価・実証することが次のステップとして望まれる。また、これらの技術が半導体分野以外にナノテクノロジー技術の分野でもさらに発展することを期待する。

引用文献

1. N. Takahashi (1987) Compact Superconducting SR-Ring for X-Ray Lithography, *Nucl. Instr. and Meth. B* **24/25**, pp425-428.
2. T. Hori and T. Takayama (1995) "AURORA-2" Compact Advanced SR Ring as an X-ray Source, *submitted to ICSRS-AFSR'95*, Pohang, Korea.
3. E. Toyota (1999) Optical Design of High-Performance Beam Lines for X-Ray Lithography, *Jpn. J. Appl. Phys.* **38**, pp. 3513-3521.
4. S. Hirose, T. Miyatake, X. Li, E. Toyota, and M. Hirose (2000) Performance of a compact beamline with high brightness for x-ray lithography, *J. Vac. Sci. Technol. B* **18**(6), pp2986-2989.
5. E. Toyota (1998) Dynamic Response of Acoustic Delay Line for Beam Lines of Synchrotron Radiation Lithography System, *Jpn. J. Appl. Phys.* **37**, pp.6851-6854.
6. J. Yang, E. Toyota, and S. Kawachi, (1998) Thermal Distortion of an X-Ray Mask for Synchrotron Radiation Lithography, *Jpn. J. Appl. Phys.* **37**, pp. 6804-6807.
7. E. Toyota, T. Hori, M. Khan, and F. Cerrina, (2001) Technique for 25 nm x-ray nanolithography, *J. Vac. Sci. Technol. B* **19**(6), pp. 2428-2433.
8. E. Toyota and M. Washio (2002) Image Formation by Dynamic Exposure with Multispot Beam in X-Ray Nanolithography, *Jpn. J. Appl. Phys.* **41**, pp. 4404-4409.
9. E. Toyota and M. Washio (2002) Extendibility of proximity x-ray lithography to 25 nm and below, *Abstracts of The 45th International Conference Electron, Ion and Photon Beam Technology and Nanofabrication*, Anaheim CA, pp. 345-346.

付録-1 シミュレーションプログラムの開発

1. 緒言

本論文中の計算に使用したシミュレーションプログラムについて記述する。X線光学系のプログラムにはウイスコンシン大学が開発した Shadow¹ のように世界的に広く使用されているものがあるが、これら汎用プログラムを著者の新しい光学系の設計に適用する場合、計算精度が不十分か、計算自体が困難であるケースに遭遇した。そこで、納得できる計算結果を得るため必要の都度プログラムを自作した。プログラムは大きく三つに分けられる。最初にビームラインの光学系を設計する目的で光伝播系設計プログラム (BLOD: Beam Line Optical Design) を作成した。次にビームラインのベリリウム窓が破損した際の真空系の動的応答を計算するための真空系設計プログラム (BLVAC: Beam Line Vacuum) を作成した。さらに露光・現像によるレジストパターンを計算する露光シミュレーションプログラム (BLEX: Beam Line and Exposure) である。

言語には Micro Soft 社の Visual Basic (VB) を用いた。VB は高級言語なので当初は計算速度に問題があったが、VB のバージョンアップと近年のパソコンの進歩につれて急速に解消された。VB はグラフィックデザインが自由にできるので計算結果の自己チェックに有用であった。BLEX の開発には計算のアルゴリズムおよび計算結果を検証するためウイスコンシン大学に短期留学した。

2. ビームライン光学系設計プログラム BLOD

2-1 光源

シンクロトロン of 偏向電磁石から放射される SR 光は、光子密度をビーム電流 1mA あたり、立体角 1mrad² あたり、波長幅 $\Delta\lambda=10^{-3}\lambda$ に毎秒得られる光子数と定義し、観測方向と軌道面の傾きを θ とすると、

$$\left(\frac{d^3 N}{dt d\lambda d\Omega} \right)_{\Delta\lambda=10^{-3}\lambda} = 3.46 \times 10^3 \gamma^2 \{ F_1(\lambda_c / \lambda, \gamma\psi) + F_2(\lambda_c / \lambda, \gamma\psi) \} \quad (2-1)$$

ここで、 F_1, F_2 は、

$$F_1(u, v) = u^2 (1 + v^2)^2 \left[K_{2/3} \left\{ \frac{u}{2} (1 + v^2)^{3/2} \right\} \right]^2 \quad (2-2)$$

$$F_2(u, v) = u^2 v^2 (1 + v^2) \left[K_{1/3} \left\{ \frac{u}{2} (1 + v^2)^{3/2} \right\} \right]^2 \quad (2-3)$$

F_1, F_2 はそれぞれ軌道面に平行, あるいは垂直な偏向成分に対応する。² $K_{2/3}, K_{1/3}$ は変形ベッセル関数である。SR リソグラフィでは軌道面に平行($v=0$)に近い光のみ利用するので、 F_2 は考慮しなくてよい。したがって式(2-1)の代わりに次の式(2-4)を用いて計算する。

$$\left(\frac{d^3 N}{dt d\lambda d\Omega} \right)_{\Delta\lambda=10^{-3}\lambda} = 3.46 \times 10^3 \gamma^2 u^2 \{ K_{2/3}(u/2) \}^2 \quad (2-4)$$

ただし、

$$u = \lambda_c / \lambda, \quad \gamma = \frac{E}{mc^2} = 1957 E_{GeV}$$

$$\lambda_c = 0.559 \frac{\rho_m}{E_{GeV}^3} = 1.86 \frac{1}{E_{GeV}^2 B_T} \quad [\text{nm}]$$

変形ベッセル関数 $K_\nu(x)$ は次の Kostroun の近似式を用いて計算する。

$$K_\nu(x) = h \left[\frac{1}{2} e^{-x} + \sum_{r=1}^{\infty} e^{-x \cosh(rh)} \cosh(vrh) \right] \quad (2-5)$$

式(2-4)では $v=0$ 、したがって $v=0$ としたが、垂直方向の広がりを実用的に次式で表される。

$$\sigma_{SR} \cong 0.565 (\lambda / \lambda_c)^{0.425} \gamma^{-1} \quad (2-6)$$

電子ビームは周回中、垂直方向に振動するので、電子ビームの垂直方向への広がりも考慮する必要がある。電子の広がり $\sigma_{y'}$ は、縦方向のエミッタンス ϵ_y と縦方向のビームサイズ σ_y から、

$$\sigma_{y'} = \frac{\epsilon_y}{\sigma_y} \quad (2-7)$$

したがって、電子の振動を加味した光の縦方向の広がり

$$\sigma_{total} = \sqrt{\sigma_{SR}^2 + \sigma_{y'}^2} \quad (2-8)$$

ここで注意しなければならないのは、電子の振動で光が広がった分、光子の発生量を補正する必要がある。すなわち式(2-4)に対し $\sigma_{SR} / \sigma_{Total}$ の補正を行う。したがって光源の実効的な輝度は次式のようなになる。

$$[\text{光源の実効的な輝度}] = \frac{1}{\sqrt{1 + (\sigma_{y'} / \sigma_{SR})^2}} \times \left(\frac{d^3 N}{dt d\lambda d\Omega} \right) \quad (2-9)$$

2-2 X線の吸収と反射に関する物理³

2-2-1 X線の吸収

X線が真空中から物質中に入射したとき，X線に対する物質の屈折率 n は、

$$n = 1 - \delta + i\beta \quad (3.1)$$

と表せば、

$$\delta = \frac{\lambda^2 r_e}{2\pi v_c} \sum_j (Z_j + f_j') \quad (3.2)$$

$$\beta = \frac{\lambda^2 r_e}{2\pi v_c} \sum_j (-f_j'') \quad (3.3)$$

ここで、 v_c は結晶の単位格子の体積、 Z_j は単位格子中の j 番目の原子の電子数、 f_j' 、 f_j'' は原子散乱因子の異常分散項、 r_e は古典電子半径(=2.81794.92E-15m)である。

$$v_c = \frac{M}{N_A \rho} \quad (3.4)$$

N_A はアボガドロ常数(=6.0220E23/mol)、 Z は原子番号、 M は原子量、 ρ は密度である。

$\sum_j (Z_j + f_j')$ 、 $\sum_j (-f_j'')$ の値は通常 F1, F2 として光子エネルギーが 10eV から 30000eV

についてデータ集に記載されている。(本プログラムでは Henke の数表をベータベース化して組み込んでいる。)

の式を線吸収係数 μ を用いて表すと、

$$\mu = 2\lambda r_e \frac{N_A \rho}{M} \sum_j (-f_j'') \quad (3.5)$$

2-2-2 X線の反射

物質表面となす全反射の臨界角 θ_c は、吸収を無視すると($\beta=0$)、スネルの法則によって

$$\sin\left(\frac{\pi}{2} - \theta_c\right) / \sin\frac{\pi}{2} = 1 - \delta \quad (3.6) \quad \text{から}$$

$$\theta_c = \sqrt{2\delta} \quad (3.7)$$

である。具体的には

$$\theta_c [\text{mrad}] = 2.99 \times 10^{-14} \sqrt{N [\text{m}^{-3}]} \lambda [\text{nm}] \quad (3.8)$$

あるいは、 $Z/M \approx 1/2$ であることから、

$$\theta_c [\text{mrad}] \approx 0.51 \sqrt{\rho [\text{kg}/\text{m}^3]} \lambda [\text{nm}] \quad (3.9)$$

反射率 R は θ_c で規格化して次のようになる。

$$R = \left| \frac{E_m}{E_0} \right|^2 = \frac{h - \frac{\theta_0}{\theta_c} \sqrt{2(h-1)^2}}{h + \frac{\theta_0}{\theta_c} \sqrt{2(h-1)^2}} \quad (3.10)$$

ここで

$$h = \left(\frac{\theta_0}{\theta_c} \right)^2 + \left[\left\{ \left(\frac{\theta_0}{\theta_c} \right)^2 - 1 \right\}^2 + \left(\frac{\beta}{\delta} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3.11)$$

反射率はさらにミラー表面の粗さの影響を受ける。
粗さによる減衰率は次式で表される。

$$\eta = \exp \left\{ - (4\pi R \sin \theta / \lambda)^2 \right\} \quad (3.12)$$

ここで R は表面粗さ(RMS)、 θ はのぞき角、 λ は波長である。

2-3 レイトレース

図 2-1 は光源から露光面に至る光学系機器の構成を示す。光学系は 1 枚スキャンミラーからなる。光源からの光は水平方向に 0.5 mrad 刻みで 0~20 mrad、垂直方向に 0.05 mrad 刻みで ±1 mrad、合計 41 x 41=1681 本のビームに分解してレイトレースに用いる。夫々のビームに対して露光面の到達位置を幾何光学的に計算する。

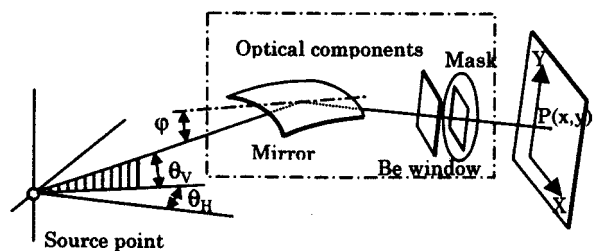


図 2-1 光学系の要素機器

ミラーは平面ミラー、円筒ミラー、トロイダルミラーをプログラムに組み込んでいる。レイトレースで通常用いられる方法は、光源の密度関数に比例した確率でビームを（通常数万本）発生させ、露光面での到達スポットの分布から収束性を判断するものである。しかし、この方法では収束状態を目視的に捉えられるだけで露光面上の強度分布を正確に計算することは困難である。BL0D では次のようにして露光面上での強度分布を計算している。まず露光面上の X-Y 座標系で光源からの光の到達点と光の強度を計算する。光源からのビームは分割数により水平方向に i 番目、垂直方向に j 番目の光を添付数(i,j)で表すと(i,j)から(i+1,j+1)の 4 点と夫々の強度 $P_{i,j}$ が求められる。座標系の x,y を mm 単位の整数とすると露光強度 $Q(x,y)$ は点(x,y)を囲む四辺形の四隅の値から計算できる。ここでは最初に $Q(x,y)$ の値を四隅の平均値として計

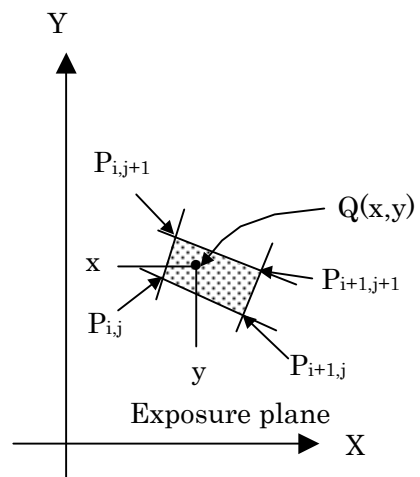


図 2-2 露光面上の強度分布

算し、次に全体の分布を最小二乗法を用いて平滑化修正する。スキャンビームによる露光強度を計算する場合はミラーの揺動角度を 100 等分し、夫々の露光強度分布を重畳する。

3. ビームライン真空系設計プログラム BLVAC

ビームラインの真空系としては、使用時の平衡状態にある圧力分布と、ベリリウム窓が破損した時の圧力変動の二つが重要である。動的応答性については第 3 章に詳細に説明したので、ここでは平衡状態の圧力分布の計算について説明する。⁵ 第 3 章では下記の式(3-38)の連立方程式を解くとのみ述べたので具体例を示すことにする。

$$P_x - P_0 = \frac{1}{K} \left(Q_0 x + \frac{q}{2} x^2 \right) \quad (3-38)$$

図 3-1 において、シンクロトロン¹の圧力 P_0 は一定、ミラーボックス内では圧力勾配はないと想定する。各管路の放出ガスは単位長さあたり $q_1 \sim q_5$ 、ミラーボックスでは Q_m とする。また、単位長さあたりの管路抵抗（コンダクタンスの逆数）を $k_1 \sim k_5$ とするとそれぞれの管路に対し次の方程式が成り立つ。

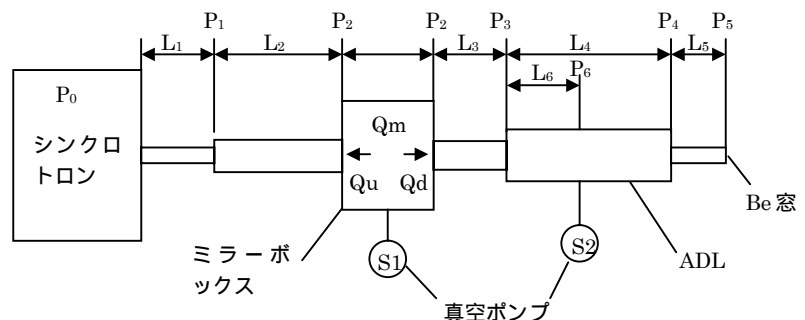


図 3-1 ビームラインの真空系

$$\begin{aligned}
 P_1 - P_0 &= \frac{1}{k_1} \left[(Q_u + q_2 L_2) L_1 + \frac{q_1}{2} L_1^2 \right] \\
 P_2 - P_1 &= \frac{1}{k_2} \left(Q_u L_2 + \frac{q_2}{2} L_2^2 \right) \\
 P_2 &= (Q_m - Q_u - Q_d) / S_1 \\
 P_2 - P_3 &= \frac{1}{k_3} \left(Q_d L_3 + \frac{q_3}{2} L_3^2 \right) \\
 P_3 - P_6 &= \frac{1}{k_4} \left[(Q_d + q_3 L_3) L_6 + \frac{q_4}{2} L_6^2 \right] \\
 P_6 &= (Q_d + q_3 L_3 + q_4 L_4 + q_5 L_5) / S_2 \\
 P_4 - P_6 &= \frac{1}{k_4} \left[q_5 L_5 + \frac{q_4}{2} (L_4 - L_6)^2 \right] \\
 P_5 - P_4 &= \frac{1}{k_5} \frac{q_5}{2} L_5^2
 \end{aligned} \quad (3-1)$$

ここで、 Q_u 、 Q_d はミラーボックスから上流側および下流側に流入するガス量である。上記連立方程式(3-1)から $P_1 \sim P_2$ および Q_u 、 Q_d が求められるので式(3-38)より各点の圧力が計算できる。BLVAC ではこれらのパラメータ（ガス種を含め）をインプットすることにより圧力分布が直ちに計算できるのでシステムの最適化に有用である。

4. 露光シミュレーションプログラム BLEX

4-1 回折効果計算の基本式

X線近接露光の計算ではマスクと露光面の間隔が短いので Fraunhofer 回折として取り扱うのは不十分で、光の光路差をより精密に計算する Fresnel 回折として取り扱う必要がある。

図 4-1 の座標系で、矩形スリットの回折について考える。露光面での複素振幅は次のように表される。⁶

$$E_p = i(u_0/2)u(p)u(q). \quad (4-1)$$

ただし、

$$u(p) = \int_{p_1}^{p_2} e^{-i\pi p^2/2} dp = \left(\int_0^{p_2} - \int_0^{p_1} \right) e^{-i\pi p^2/2} dp. \quad (4-2)$$

$$u(q) = \int_{q_1}^{q_2} e^{-i\pi q^2/2} dq = \left(\int_0^{q_2} - \int_0^{q_1} \right) e^{-i\pi q^2/2} dq. \quad (4-3)$$

また、

$$p_1 = \sqrt{\frac{2}{\lambda \left(\frac{1}{L} + \frac{1}{G} \right)}} \left(\frac{x_1 - x_s}{L} + \frac{x_1 - x}{G} \right). \quad (4-4)$$

p_2 、 q_1 、 q_2 についても式(4-4)と同様に表されるが、 $L \gg G$ and $(x_1 - x_s) \ll L$ の関係から次のように簡素化される。

$$p_1 = \sqrt{\frac{2}{\lambda G}}(x_1 - x) \quad (4-5)$$

$$p_2 = \sqrt{\frac{2}{\lambda G}}(x_2 - x) \quad (4-6)$$

$$q_1 = \sqrt{\frac{2}{\lambda G}}(y_1 - y) \quad (4-7)$$

$$q_2 = \sqrt{\frac{2}{\lambda G}}(y_2 - y) \quad (4-8)$$

ここで次のような関数を想定すると

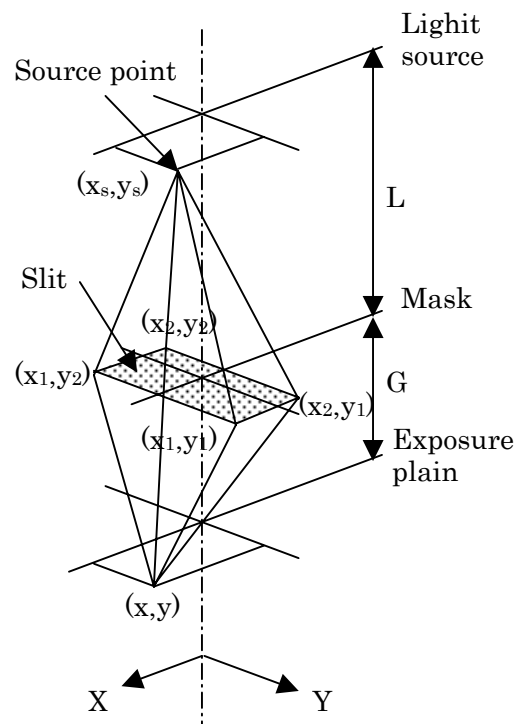


図 4-1 Fresnel 回折計算の座標系

$$\phi(p_2) = \int_0^{p_2} \cos \frac{\pi}{2} p^2 dp, \quad \phi(p_1) = \int_0^{p_1} \cos \frac{\pi}{2} p^2 dp, \quad (4-9)$$

$$\varphi(p_2) = \int_0^{p_2} \sin \frac{\pi}{2} p^2 dp, \quad \varphi(p_1) = \int_0^{p_1} \sin \frac{\pi}{2} p^2 dp. \quad (4-10)$$

式(4-2), (4-3)は次のように表される。

$$\begin{aligned} u(p) &= \left(\int_0^{p_2} - \int_0^{p_1} \right) \left(\cos \frac{\pi}{2} p^2 - i \sin \frac{\pi}{2} p^2 \right) dp \\ &= \phi(p_2) - \phi(p_1) - i(\varphi(p_2) - \varphi(p_1)) \equiv \phi(p) - i\varphi(p) \end{aligned} \quad (4-11)$$

$$u(q) = \phi(q_2) - \phi(q_1) - i(\varphi(q_2) - \varphi(q_1)) \equiv \phi(q) - i\varphi(q) \quad (4-12)$$

これより光強度は次のように表される。

$$I_p = |E_p|^2 = (u_0 \cdot u_0^* / 4) (u(p) \cdot u(p)^*) (u(q) \cdot u(q)^*) \quad (4-13)$$

$\phi(p)$ および $\varphi(p)$ のフレネル積分はプログラム内で積分表を作成して使用する。

一次元スリットに対しては、スリットはy方向に無限大であるので、

$$u(q) = \left(\frac{1}{2} - \left(-\frac{1}{2} \right) \right) - i \left(\frac{1}{2} - \left(-\frac{1}{2} \right) \right) = 1 - i, \quad u(q)^* = 1 + i$$

したがって、

$$u(q) \cdot u(q)^* = 2,$$

光強度 I_p は次のようになる。

$$I_p = (u_0 \cdot u_0^* / 2) (u(p) \cdot u(p)^*) \quad (4-14)$$

二次元スリットに対しては、

$$u(p) = \phi(p) - i\varphi(p), \quad u(p)^* = \phi(p) + i\varphi(p) \quad (4-15)$$

$$u(q) = \phi(q) - i\varphi(q), \quad u(q)^* = \phi(q) + i\varphi(q) \quad (4-16)$$

$$u(r) = u(p) \cdot u(q) = (\phi(p) \cdot \phi(q) - \varphi(p) \cdot \varphi(q)) - i(\phi(p) \cdot \varphi(q) + \varphi(p) \cdot \phi(q)) \quad (4-17)$$

$$u(r)^* = u(p)^* \cdot u(q)^* = (\phi(p) \cdot \phi(q) - \varphi(p) \cdot \varphi(q)) + i(\phi(p) \cdot \varphi(q) + \varphi(p) \cdot \phi(q)) \quad (4-18)$$

吸収体の部分については、透過効率 K および位相遅れ角 θ_s , により $\Phi(p)$, $\varphi(p)$, $\Phi(q)$ および $\varphi(q)$ は、 $\Phi(p)'$, $\varphi(p)'$, $\Phi(q)'$ および $\varphi(q)'$ として次のように変換される。

$$\phi(p)' = l_p \cos(\theta_p - \theta_s), \quad \varphi(p)' = l_p \sin(\theta_p - \theta_s) \quad (4-19)$$

$$\phi(q)' = l_q \cos(\theta_q - \theta_s), \quad \varphi(q)' = l_q \sin(\theta_q - \theta_s)$$

ここで、

$$l_p = \sqrt{K(\phi(p)^2 + \varphi(p)^2)}, \quad l_q = \sqrt{K(\phi(q)^2 + \varphi(q)^2)},$$

$$\text{もし } \phi(p) < 0 \text{ なら, } \theta_p = \text{Tan}^{-1}(\varphi(p)/\phi(p)) + \pi, \quad \theta_q = \text{Tan}^{-1}(\varphi(q)/\phi(q)) + \pi \quad (4-20)$$

$$\phi(p) \geq 0 \text{ なら, } \theta_p = \text{Tan}^{-1}(\varphi(p)/\phi(p)), \quad \theta_q = \text{Tan}^{-1}(\varphi(q)/\phi(q)).$$

強度 I_p は次のようになる。

$$I_p = |E_p|^2 = (u_0 \cdot u_0^* / 4) (u(r) \cdot u(r)^*)$$

$$= (u_0 \cdot u_0^* / 4) \left[\left\{ \sum (\phi(p)\phi(q) - \varphi(p)\varphi(q)) \right\}^2 + \left\{ \sum (\phi(p)\varphi(q) + \varphi(p)\phi(p)) \right\}^2 \right] \quad (4-21)$$

自作プログラムの正当性を評価するには他のプログラムと同条件で計算比較するのが望ましい。図 4-2 は BLEX による計算結果とウイスコンシン大学が開発した Toolset による計算結果の比較である。スリット寸法は 100 x 200 nm², ギャップ 10 μm, 光源 AUROTA-2 の場合である。図のように殆ど同じ計算結果が得られている(目盛りが異なるので要注意、計算条件の細部は若干異なる)。Toolset は言語に C++ を用い、回折の計算には高速フーリエ変換法を用いている。BLEX は言語に Visual Basic を用い、回折の計算にはフレネル積分を用いている。このように異なる計算法により同一の結果が得られたことは両者のプログラムの正当性を証明している。

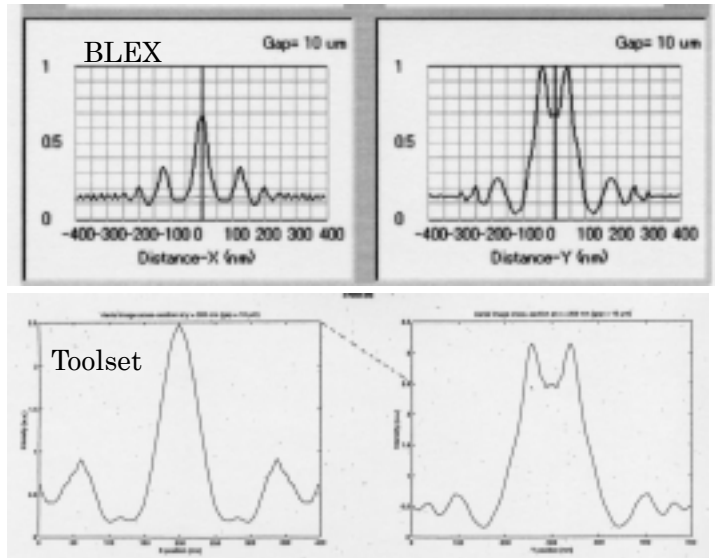


図 4-2 BLEX と Toolset との計算結果の比較
(スリット寸法 : 100 x 200 nm², ギャップ : 10 μm)

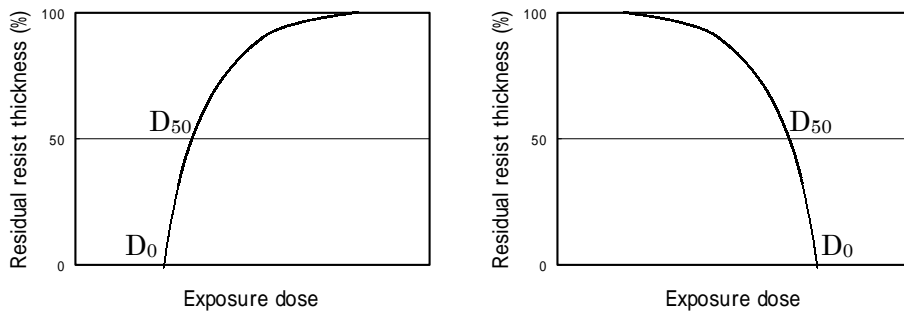
4-2 現像シミュレーション

4-2-1 レジストの感度

レジストの特性は図 4-3 に示すように感度曲線で表される。感度曲線は二つの値 D_{50} と D_0 で代表される。これらはレジストの厚さが最初の 50% および 0% になる露光線量である。感度曲線の傾斜を代表する値として次式で表される γ が用いられる。

$$\gamma = \frac{1}{2 \cdot \log(D_0 / D_{50})} \quad (4-22) \quad \text{ネガ型レジスト,}$$

$$\gamma = \frac{1}{2 \cdot \log(D_{50} / D_0)} \quad (4-23) \quad \text{ポジ型レジスト}$$



(a) ネガ型レジスト

(b) ポジ型レジスト

図 4-3 レジストの感度曲線

(1) ネガ型レジスト

表 4-1 は SAL601 and SAL606 (Shipley) の実験グラフから計算した特性値である。⁷

表 4-1

	D ₀ (mJ/cm ²)	D ₅₀ (mJ/cm ²)	Experimental condition	
SAL601	134	154	8.3	Soft bake: 125°C 60s
SAL606	171	187	12.9	PEB: 113°C 80s
Initial thickness: 0.35μm, DEV: AD10, 0.36N, 240s				

感度曲線は次式のように近似できる。

$$y = 1 - \{a(D_{100} - D)\}^n, \quad (D > D_{100}) \quad (4-24)$$

ここで、y はレジストの残厚さの規格化値、D は露光線量そして D₁₀₀ は溶解の閾値である。D₁₀₀ を次式で表す。

$$D_{100} = K \cdot D_{50}, \quad (4-25)$$

ここでとりあえず K=10 とする。

他の定数 a および n は次のように決定される。

$$a = \frac{1}{D_{100} - D_0}, \quad (4-26)$$

$$n = \frac{\log 2}{\log \left(\frac{D_{100} - D_{50}}{D_{100} - D_0} \right)} \quad (4-27)$$

SAL601 と SAL606 の計算結果を表 4-2 と図 4-4 に示す。レジストの溶解速度 V_d は次式で表される。

表 4-2 ネガレジストの定数

Name	D ₁₀₀	a	n
SAL606	1540	5.88E-4	73.26
SAL601	1870	7.11E-4	48.38

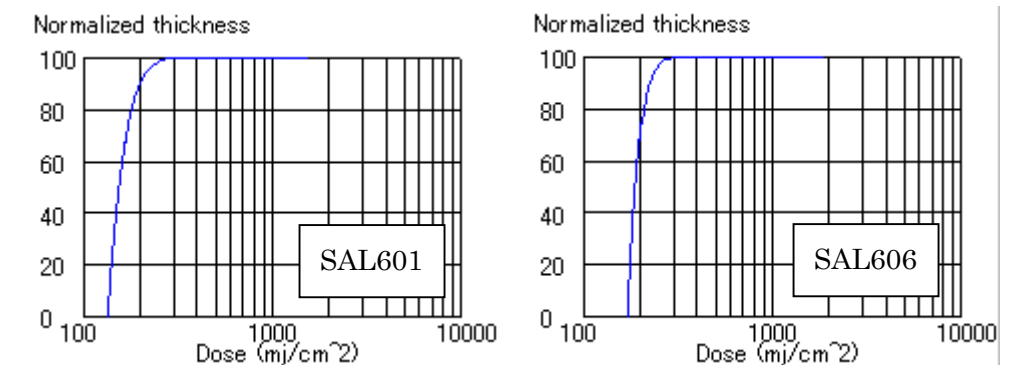


図 4-4 ネガレジストの近似感度曲線

$$V_d = (a(D_{100} - D))^n \cdot \frac{R_t}{T_d} \quad (4-28)$$

感度曲線を実際の露光線量と対応させるのはさほど容易ではない。最大露光線量 D_{max} をとりあえず次のように設定する。

$$D_{max} = 2D_{50} \quad (4-29)$$

溶解速度は低線量で急速に増加するのでシミュレーションの時間分割が小さくなり計算時間が増大する。したがって溶解速度は適当な値に制約しなければならない。そこで最大溶解速度を D_{max} の 80% の溶解速度の 10^3 から 10^4 に制約すると規格化された露光線量と溶解速度の関係は図 4-5 のようになる。

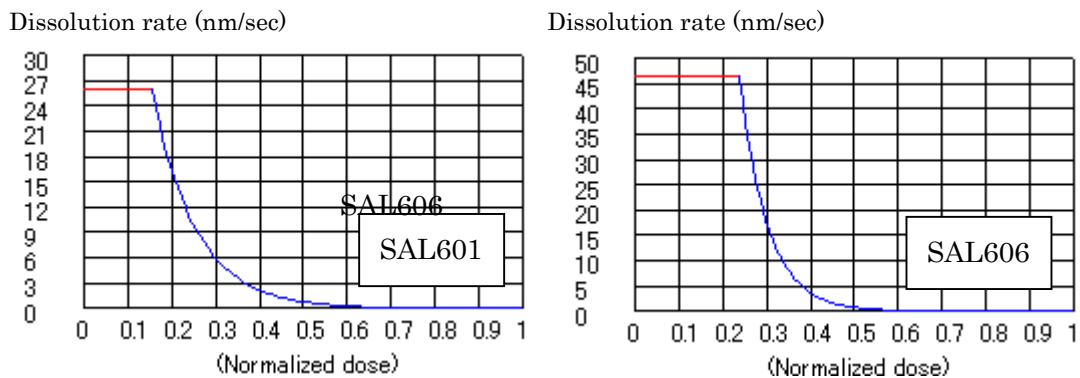


Fig. 4-5 露光線量と溶解速度の関係

(2) ポジ型レジスト

ポジ型レジストとして UV2HS (Shipley) の実験データを表 4-3 に示す。⁸

表 4-3

PEB (°C)	D_0 (mA·s)	D_{50} (mA·s)	Experimental condition	
110	7100	6250	9.0	Prebake: 125°C. 120s
130	2567	2767	15.3	PBE: 90s
Initial thickness: 0.5μm, DEV: 70s?				

感度曲線は次のように近似される。

$$y = 1 - \{a(D - D_{100})\}^n, \quad (D > D_{100}) \quad (4-30)$$

ここで、 y は規格化されたレジスト残厚、 D は露光線量、そして D_{100} は溶解閾値である。 D_{100} は次のように表される。

$$D_{100} = D_{50} / K, \quad (4-31)$$

ここで、とりあえず $K=10$ とする。

他の定数 a と n は次のように決定される。

$$a = \frac{1}{D_0 - D_{100}}, \quad (4-31)$$

$$n = -\frac{\log 2}{\log \left(\frac{D_{50} - D_{100}}{D_0 - D_{100}} \right)}. \quad (4-32)$$

表 4-4

PEB	D ₁₀₀	a	n
110°C	625	1.54E-4	4.93
130°C	276.7	3.98E-4	8.35

UV2HS に対する計算結果を表 4-4 および図 4-5 に示す。

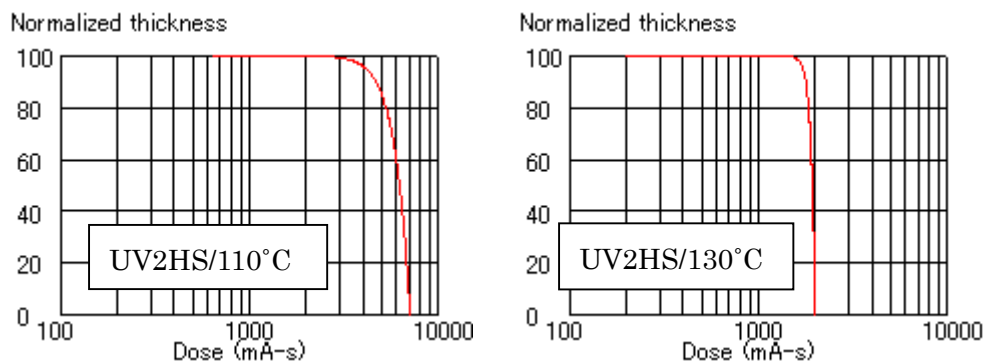


図 4-6 ポジ型レジストの感度特性

レジストの溶解速度 V_d は次式で表される。

$$V_d = (a(D - D_{100}))^n \cdot \frac{R_t}{T_d} \quad (4-33)$$

感度曲線と露光時の最大線量 D_{max} の対応を次式のように想定する。

$$D_{max} = 3D_{50} \quad (4-34)$$

計算の都合上、最大溶解速度 D_{max} の 20% の値の 10^5 倍に固定すると、溶解速度と露光線量の関係は図 4-7 のように表される。

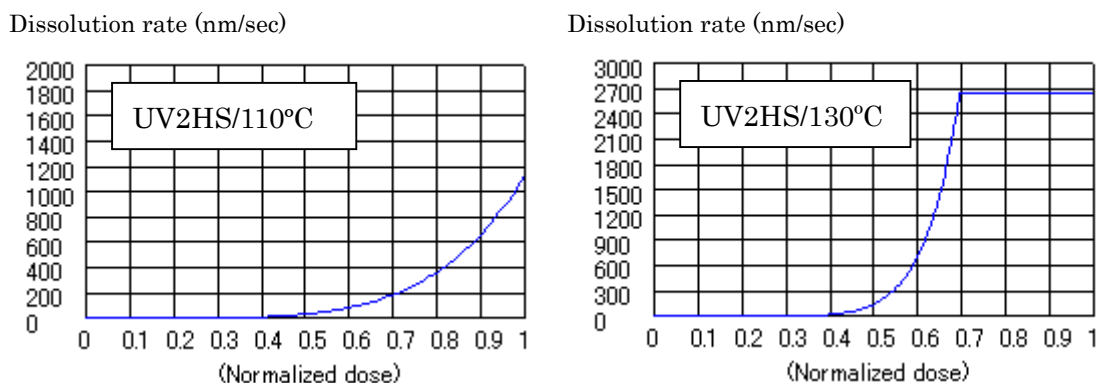


図 4-7 ポジ型レジストの溶解速度

(3) 溶解速度特性の修正

図 4-5 および図 4-7 のように最大溶解速度を制限すると、計算速度は短縮できるが現像過程でのレジスト形状が図 4-8(a) のようになり予想される図 4-8(b) の形状と乖離する。溶解速度がある程度以上になると溶解速度は溶媒中のレジストの拡散速度によって制約されることになる。また、溶解がある程度進行すると最大溶解速度に対応

する吸収線量をもつレジストは溶解してしまうので、レジストの最終形状に及ぼす影響は少ないはずである。しかしながら、現像途中の不自然さを解消するため、図4-9のように最大溶解速度を閾値の2倍まで直線的に変化させる。

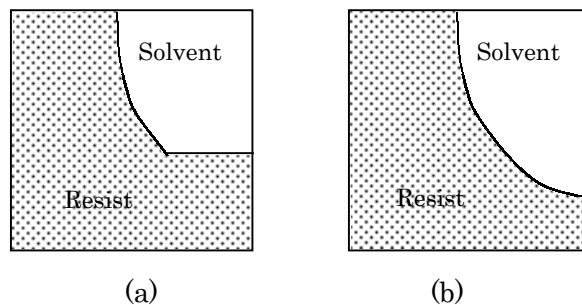


図 4-8 最大溶解速度の制約による現像過程でのレジスト形状への影響。

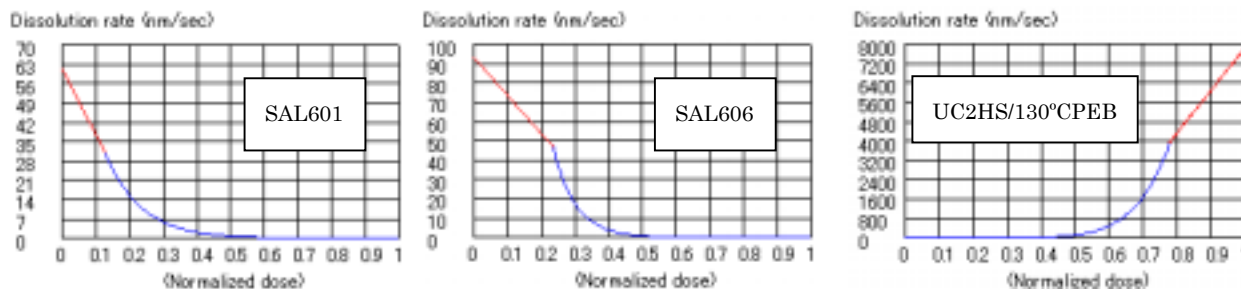


図 4-9 最大溶解速度の修正

実際の溶解曲線を観察すると近似式では溶解しない線量領域でも僅かな溶解(またはレジストの収縮)がみられる。この傾向を反映させるため上述の近似式をさらに修正する。表4-5 修正した近似式をまとめて示す。計算に用いた定数を表4-6にまとめた。

表 4-5 修正した近似式

Negative tone resist	Positive tone resist
$y = 1 - \{a(D_{100} - D)\}^n - b(D_{100} - D)$	$y = 1 - \{a(D - D_{100})\}^n - b(D - D_{100})$
$a = \frac{(1 - b(D_{100} - D_0))^{1/n}}{D_{100} - D_0}$	$a = \frac{(1 - b(D_0 - D_{100}))^{1/n}}{D_0 - D_{100}}$
$n = -\frac{\log\left(\frac{1 - b(D_{100} - D_0)}{1/2 - b(D_{100} - D_{50})}\right)}{\log\left(\frac{D_{100} - D_{50}}{D_{100} - D_0}\right)}$	$n = -\frac{\log\left(\frac{1 - b(D_0 - D_{100})}{1/2 - b(D_{50} - D_{100})}\right)}{\log\left(\frac{D_{50} - D_{100}}{D_0 - D_{100}}\right)}$
$V_d = \left[(a(D_{100} - D))^n + b(D_{100} - D) \right] \cdot \frac{R_t}{T_d}$	$V_d = \left[(a(D - D_{100}))^n + b(D - D_{100}) \right] \cdot \frac{R_t}{T_d}$

表 4-6 近似式に用いられる定数

	a	b	n	NRT*	Dose
SAL601	7.116×10^{-4}	1.904×10^{-5}	46.63	92%	200 mJ/cm ²
SAL606	5.885×10^{-4}	3.466×10^{-7}	73.19	97%	250 mJ/cm ²
UV2HS/110°C	1.524×10^{-4}	8.405×10^{-6}	4.347	96.5%	3000 mA·s
UV2HS/130°C	3.964×10^{-4}	1.432×10^{-5}	7.698	92%	2000 mA·s

*NRT: normalized resist thickness

4-2-2 現像シミュレーションコード

(1) シミュレーションの範囲

最初に一次元の繰り返しパターン(L/Sパターン)について取り扱う。図4-10のようにレジスト形状は二次元の取り扱いになる。対称性により範囲は半ピッチ($W=P/2$)になる。高さ方向にはレジスト底面からレジスト表面までの H_r およびレジスト表面から溶媒の有効層厚さ H_s の範囲である。溶媒層の厚さ H_s のとりかたは難しいが、とりあえずレジスト厚さの1.5倍とする。

シミュレーション範囲を小さいセグメント($U_h \times U_v$)に分割する。計算時間を短縮するため図4-10(b)のように溶媒層厚さ H_b の上層は、濃度変化が定常状態に入った後は横方向には分割しない。溶解に関与していないレジスト内のセグメントは自動的に計算範囲から除外される。ピッチ 100 nm の L/S パターンの計算に用いたパラメータを表4-7に示す。

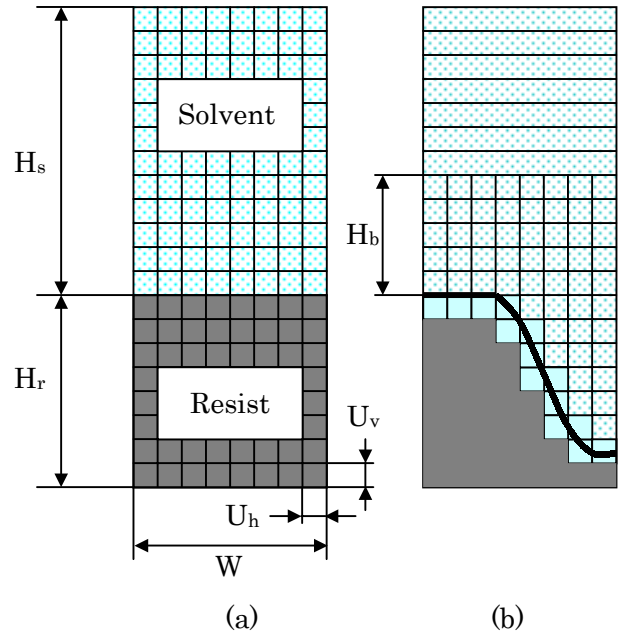


図4-10 シミュレーションの範囲

表4-7 計算パラメータ (unit: nm)

W	H _r	H _s	H _b	U _h	U _v
50	400	600	50	5	20

(2) 計算アルゴリズム

夫々のセグメントは次のような手順で現像シミュレーションに關与する。

- 1) レジストの各セグメントの溶解速度は夫々の吸収線量から計算する。溶解速度はそれと比例する飽和濃度に変換される。
- 2) レジストの固体セグメント(飽和濃度 C_s)から隣接する溶媒(レジスト濃度 C_1)に $C_s > C_1$ の場合レジストを溶出する。時間 dt の溶出量 dQ は次式で表される。

$$dQ = K_d(C_s - C_1)dt, \quad (4-35)$$

ここで、 K_d は拡散係数である。

- 3) 隣接する液体セグメント 1, 2 間ではレジスト濃度の差に応じてレジスト成分を授

$$\text{受する。 } dQ = K_d(C_1 - C_2)dt. \quad (16)$$

- 4) 液体最上層でのレジスト濃度は0とする。

5) 固体セグメントのレジスト成分が溶出により0になると、そのセグメントは液体セグメントに変わる。その濃度は最初の飽和濃度から出発する。

- 6) 拡散係数は実験データから試行錯誤的に決定する。

(3) 計算結果

図4-11はシミュレーションに用いた厚さ400 nmのPMMAの吸収線量分布である。図4-12(a)はネガレジストSAL601の60secまでの現像過程を示す。セグメント

分割が粗いと断面は粗くなる。分割を細かくすると計算時間が増加するので図4-12(b)では断面形状の平滑化処理を行っている。図4-13はレジスト底面まで現像が進んだ場合の各レジストの断面を示したものである。

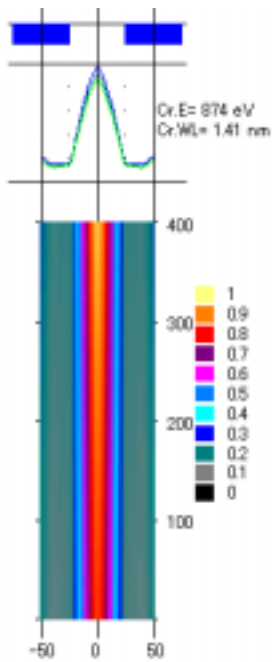


図 4-11 PMMA への吸収線量分布

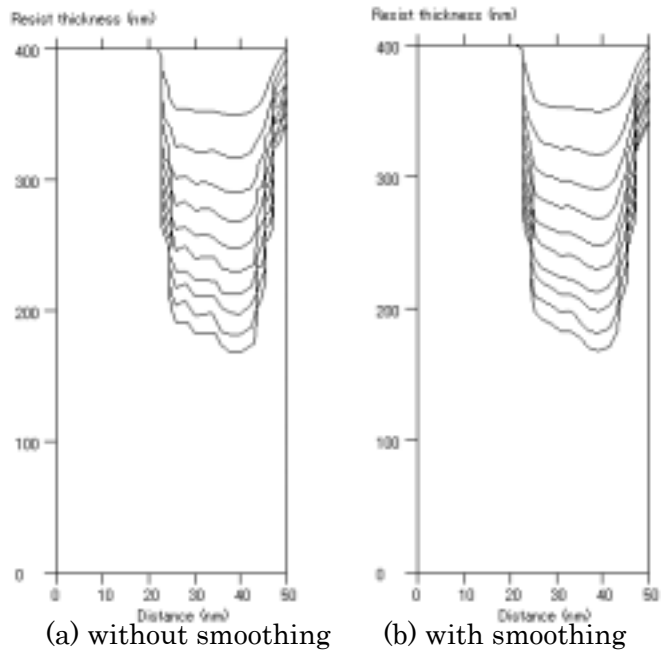


図 4-12 SAL601 のレジスト形状
(現像時間 : 60sec)

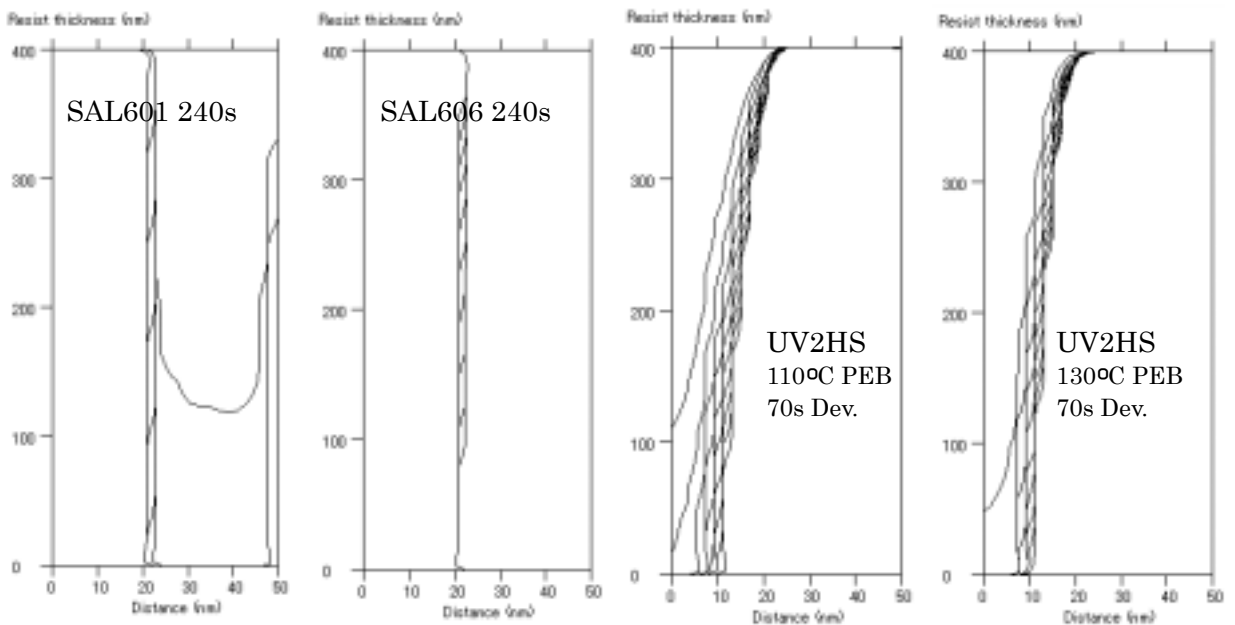


図 4-13 現像中のレジスト断面

図 4-14 は住友重機械で実施した 80 nm L/S パターンの露光実験結果である。図 4-15 は同条件によるシミュレーション結果である。シミュレーションでは吸収体下部のレジストが残されるが、これは吸収線量分布が実際にはもっとなだらかになっているためと見られる。その理由は、主に露光時のマスク・ウエハ位置の変動の影響と推測される

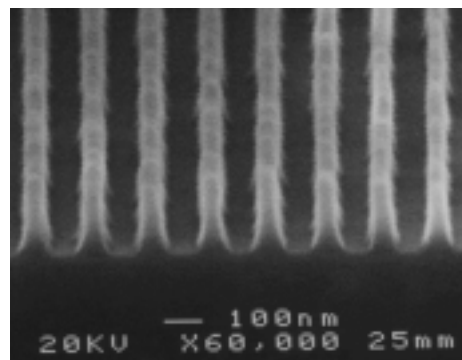


図 4-14 80-80 nm L/S パターンのレジスト SEM 写真

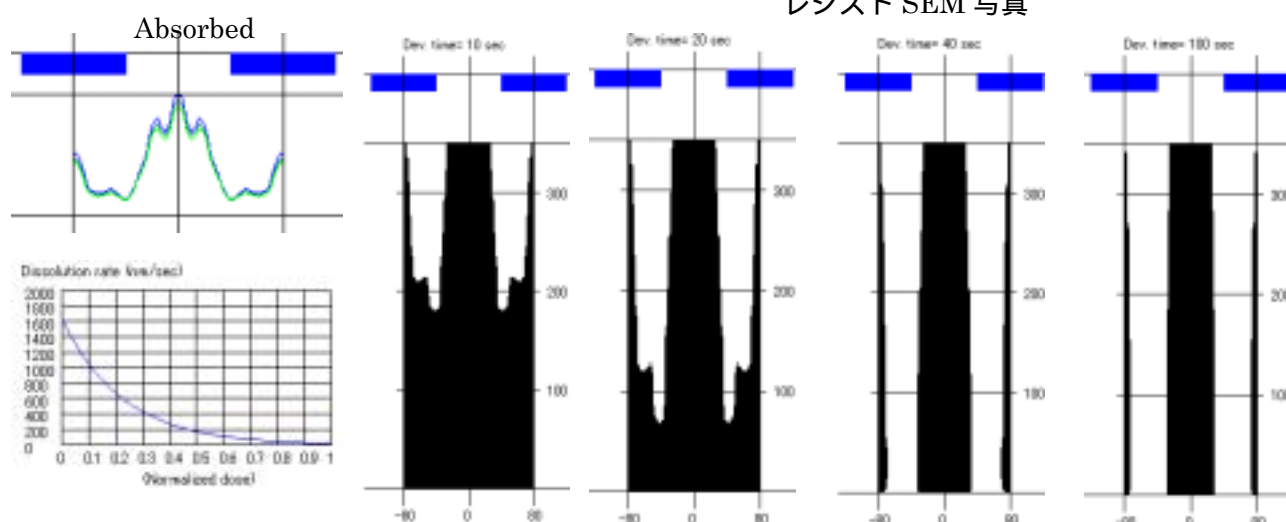


図 4-15 80-80 nm L/S パターンの現像シミュレーション 光源：AURORA-2, ギャップ：15 μm
レジスト：SAL606 350 nm, セグメント：2 x 10 nm^2

(4) 二次元パターンへの対応

基本的に一次元パターンと同じ方法が二次元パターンに適用できる。表 4-7 と同じパラメータを二次元に拡大するとセグメント数は 10 倍になる。隣接するセグメント数は 4 から 6 になるので 15 倍の計算が必要である。計算時間を短縮するため溶媒の拡散係数を無限大として溶媒の部分の計算を省略する。溶媒の影響は現像初期では無視できないが、現像が進み溶解速度が減少すると溶媒中の拡散速度は相対的に速くなるので、最終的には無視しても実用上問題ない。また、メッシュ寸法を大きくとり（例えば 10 x 10 x 40 nm^3 ）固体と液体が混在するセグメントをセグメント内で分離する補間処理を行うことによりセグメント寸法より小さい精度で計算することが可能となっている。

5 . 結言

本研究のアイデアを検証するための計算プログラムを開発した。1枚ミラー方式のビームラインの性能を計算するため、ビームラインの設計プログラム BLOD を開発した。BLOD を用いて、新しいミラーの駆動方式および新しい湾曲型ベリリウム窓を用いたビームラインの露光強度と強度分布を計算することが可能になった。実際に BLOD を用いてビームラインの設計・製作を行い実機により性能が計算と一致することを確認した。

ビームラインの真空系設計のためのプログラム BLVAC を開発した。BLVAC によりベリリウム窓が破損した際の真空系の安全性について新しい Acoustic delay line (ADL) の設計の正当性を確認した。

新しい露光法の検証のためマスクからの露光イメージおよび露光後のレジストパターンを計算するプログラム BLEX を開発した。露光イメージの計算にはウイスコンシン大学が開発した Toolset とクロスチェックを行い双方の計算の信頼性を確認した。BLEX は BLOD のプログラムを引き継ぎ、ビームラインから露光工程、現像工程まで拡張したもので、X 線リソグラフィを光源からレジスト現像まで一貫してシミュレーションを行うものである。その結果システム全体の最適化設計が可能になった。

引用文献

1. B. Lai and F. Cerrina (1986) Shadow: A synchrotron radiation ray tracing program, Nucl. Instrm. Meth. Phys., A246, pp. 337-341.
2. 日本物理学会編 (1986) シンクロトロン放射, 培風館, pp. 23-24
3. 菊田惺志 (1992) X 線回折・散乱技術 (上), 東京大学出版局, p38-41
4. 岩切晴二 (1979) 代数学・幾何学精説 第 5、6 章, 培風館
5. 熊谷寛夫 富永五郎 (1975) 真空の物理と応用 第 2 章, 裳華房
6. 工藤恵栄 上原富美哉 (1995) 基礎光学 <光線光学・電磁光学> 第 8 章, 現代工学社
7. 菊地幸子 (1996) X 線露光用レジストプロセス技術とパターン形成特性、放射光の半導体への応用技術研究委員会 第 25 回定例研究会資料、日本工業技術振興協会
8. 中西和也 (1996) 化学増幅系レジスト UV HS の SR 露光特性、放射光の半導体への応用技術研究委員会 第 25 回定例研究会資料、日本工業技術振興協会

付録2 露光コストの比較

1. 緒言

露光方法の選択に際してコストの検討は不可欠である。一方、生産コストは半導体メーカーおよび装置メーカーの機密事項であり、明らかにされていない部分が多い。ここでは過去に試みられたコスト分析の資料¹⁻⁴を参考に、現在用いられている光縮小投影露光および次世代リソグラフィ（NGL）技術の候補に挙げられている電子線露光、極紫外光露光、X線露光について筆者の推測を加えてコストを試算し、比較評価をおこなった。露光方法と半導体世代との対応を表1-1に示す。

表 1-1 世代に対応する露光法

量産年代	2001	2004	2007	2010	2013	2016	2019
DRAM 容量	4G	16G	64G	256G	1T	4T	16T
設計ルール(nm)	130	100	70	50	35	25	18
ウエハサイズ(mm)	300	300	300	300	460	460	460
光縮小露光(KrF)							
光縮小露光(ArF)							
光縮小露光(F2)							
電子線縮小露光(EPL)							
電子線近接露光(PEL)							
極紫外光(EUV)露光							
X線近接露光(PXL)							

表中の 印に対してコスト計算を実施した。コストはウエハ1枚、1層露光あたりのリソグラフィ工程のコストを計算した。DRAM容量が35nm世代からウエハサイズが12インチから18インチに切り替わるとコストが約2倍に増加し、比較が困難になるので、ここでは全て12インチ(300mm)として計算した。EUVおよびPXLの実用化はこれより遅れる可能性が高いが、コスト比較のためあえて100nm世代から計算した。また、電子ビーム直接描画法は、将来の世代にも対応可能な技術であるが、用途が少量生産用に特化する傾向があるので比較から除外している。

2. 露光コストの計算法

リソグラフィの総コスト C_{tot} は次式で表される。

$$C_{tot} = \frac{C_{lph}}{T_{net}} + C_{res} + \frac{C_{msk}}{N_w} \quad (2-1)$$

ここで、 C_{lph} (¥/Hr) はシステムコスト、 T_{net} は正味スループット、 C_{res} はレジストと関連工程のコスト、 C_{msk} はマスクコスト、 N_w は1枚のマスクで露光できるウエハの数である。 C_{lph} は次のように表される。

$$C_{lph} = \left(\sum \frac{C_{sysi}}{Y_i} + \beta \sum C_{sysi} + C_f A_{cr} + C_{lb} \right) / T_y \quad (2-2)$$

ここで、 C_{sysi} は装置 i のコスト、 Y_i はその償却年数、 T_y は年間稼働時間、 β は装置の運転と保守の装置コストに対する係数、 C_f はクリーンルームの年間コスト (¥/m²)、 C_{lb} は年間労務費である。

露光装置のコスト算定に一貫性をもたせるため、露光装置コストを表 2-1 のように算定した。

表 2-1 各設計ルールでの露光装置コスト (単位：億円)

	光縮小投影露光		電子線露光		極紫外	X線	
	KrF	ArF	F2	EPL	PEL	(EUVL)	(PXL)
光源	2	4	6	2	1	8	
光学系	2	3	5	3	1	5	
機械系	2	2	3	3	2	3	2
精密駆動系	4	4	4	4	3	4	2
雰囲気制御			2	1	1	2	1
製造コスト計	10	13	20	13	8	22	5
130nm のコスト	13	17					
100nm のコスト		20	30	20	12	33	8
70 nm のコスト			36	24	14	40	9
50 nm のコスト				29	17	48	11
35 nm のコスト						58	13
25 nm のコスト							19
18 nm のコスト							22

上表は設計ルール 100 nm の製造コストを算定し、その 1.5 倍を装置コスト (販売価格) として、世代ごとに 1.2 倍増加するとしたものである。X 線の光源 (シンクロトロン) および光学系 (ビームライン) のコストは別途計算する (第 6 節参照)。露光装置の償却年数は一律の 5 年とする。

3. 光縮小投影露光のコスト計算

表 3-1 に光縮小投影露光のコスト計算結果を示す。フロアコストはクリーンルームの年間コストで、過去の資料²から 48 万円/m² として計算した。マスクコストは 4G(130nm)レベルの 400 万円から世代ごとに 1.5 倍、F₂ については製造技術に問題点が残されているので、さらに 1.2 倍を掛けた。

表 3-1 光縮小投影露光のコスト

			130 nm	130 nm	100 nm	100 nm	70 nm
			KrF	ArF	ArF	F ₂	F ₂
a	ステッパ	億円	13	17	20	30	36
b	償却期間	年	5	5	5	5	5
c=a/b		億円/年	2.6	3.4	4	6	7.2
d	占有面積	m ²	24	24	24	24	24
e=d*0.0048	フロアコスト	億円/年	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12
f	保守・運転係数 %		6	6	6	8	8
g=a*f	保守・運転費	億円/年	0.78	1.02	1.20	2.40	2.88
h	保守・運転員	人	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50
l=h*0.5	人件費	億円/年	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25
j=c+e+g+l	年間費用	億円/年	3.75	4.79	5.57	8.77	10.45
k	稼働率	%	85	85	85	85	85
l=350*k*24	年間稼働時間	時間	7140	7140	7140	7140	7140
m=j/l	時間費用	円/時間	52454	67020	77944	122762	146291
n=j/m	スループット	枚/時間	40	40	40	40	40
o=m/n	システムコスト	円/枚・層	1311	1675	1949	3069	3657
p	レジストコスト	円/層	800	1200	1200	1800	1800
q	マスク単価	百万円	4	4	6	8	12
r	マスク寿命	ウエハ数	7000	7000	6000	5000	4000
s=q/r	マスクコスト	円/枚・層	571	571	1000	1600	3000
t=o+p+s	総コスト	円/枚・層	2683	3447	4149	6469	8457

スループットはメーカー発表値よりも低めの 40 枚/時間に統一して計算した。マスク寿命は過去のデータに対し短波長化の影響を配慮した。

4. 電子線露光のコスト計算

表 4-1 に電子線露光のコスト計算を示す。EPL は Electron Projection Lithography で縮小露光、PEL は Proximity Electron Lithography で低エネルギー近接等倍露光である。PEL の方が構造が簡素なのでシステムコストは安価である。マスクコストの算定は困難で、EPL は拡大マスクであるが構造が複雑、PEL マスクは、構造は簡素であるが等倍マスクで精度が厳しい等の理由でどちらも同じとした。X 線マスクに比べるとステンシル(穴あき)の困難があるので X 線マスクのほぼ 2 倍とした。マスク寿命も予測が困難でとりあえず 1000 枚とした。EPL では電子線による損傷が大きいのもっと短いかもしれない。レジストコストは、PEL の場合は二層レジストになるので EPL の 2 倍とした。

表 4-1 電子線露光のコスト

			100 nm	100 nm	70 nm	70 nm	50 nm	50 nm
			EPL	PEL	EPL	PEL	EPL	PEL
a	ステップ	億円	20	12	24	14	29	17
b	償却期間	年	5	5	5	5	5	5
c=a/b		億円/年	4	2.4	4.8	2.8	5.8	3.4
d	占有面積	m ²	16	16	16	16	16	16
e=d*0.0048	フロアコスト	億円/年	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08
f	保守・運転係数 %		6	4	6	4	6	4
g=a*f	保守・運転費	億円/年	1.20	0.48	1.44	0.56	1.74	0.68
h	保守・運転員	人	0.50	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
l=h*0.5	人件費	億円/年	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25
j=c+e+g+l	年間費用	億円/年	5.53	3.21	6.57	3.69	7.87	4.41
k	稼働率	%	90	90	90	90	90	90
l=350*k*24	年間稼働時間	時間	7560	7560	7560	7560	7560	7560
m=j/l	時間費用	円/時間	73106	42418	86862	48767	104058	58291
n=j/m	スループット	枚/時間	40	40	40	40	40	40
o=m/n	システムコスト	円/枚・層	1828	1060	2172	1219	2601	1457
p	レジストコスト	円/層	800	1600	800	1600	800	1600
q	マスク単価	百万円	8	8	10	10	12	12
r	マスク寿命	ウエハ数	1000	1000	1000	1000	1000	1000
s=q/r	マスクコスト	円/枚・層	8000	8000	10000	10000	12000	12000
t=o+p+s	総コスト	円/枚・層	10628	10660	12972	12819	15401	15057

5. 極紫外光露光 (EUV) のコスト計算

表 5-1 に極紫外光露光のコスト計算を示す。スループットは光、電子と同じ 40 に統一した。構造が複雑なので保守・運転係数は 7% と若干大きくした。多層膜ミラーの寿命と保守が影響すると見られる。マスクコストは電子線の場合と同じである。マスク寿命は不明であるが当面 1000 枚とした。

表 5-1 極紫外光露光のコスト

			100 nm	70 nm	50 nm	35 nm
a	ステップ	億円	33	40	48	58
b	償却期間	年	5	5	5	5
c=a/b		億円/年	6.6	8	9.6	11.6
d	占有面積	m ²	27	27	27	27
e=d*0.0048	フロアコスト	億円/年	0.13	0.13	0.13	0.13
f	保守・運転係数	%	7	7	7	7
g=a*f	保守・運転費	億円/年	2.31	2.8	3.36	4.06
h	保守・運転員	人	0.50	0.5	0.5	0.5
l=h*0.5	人件費	億円/年	0.25	0.25	0.25	0.25
j=c+e+g+l	年間費用	億円/年	9.29	11.18	13.34	16.04
k	稼働率	%	85	85	85	85
l=350*k*24	年間稼働時間	時間	7140	7140	7140	7140
m=j/l	時間費用	円/時間	130106	156577	186829	224644
n=j/m	スループット	枚/時間	40	40	40	40
o=m/n	システムコスト	円/枚・層	3253	3914	4671	5616
p	レジストコスト	円/層	800	800	800	800
q	マスク単価	百万円	8	10	12	14
r	マスク寿命	ウエハ数	1000	1000	1000	1000
s=q/r	マスクコスト	円/枚・層	8000	10000	12000	14000
t=o+p+s	総コスト	円/枚・層	12053	14714	17471	20416

6. X線露光のコスト計算

表 6-1 X線露光のコスト

			100 nm	70 nm	50 nm	35 nm	25 nm	18 nm
a1	ステッパ	億円	9	11	13	16	19	22
b1	償却期間	年	5	5	5	5	5	5
c1=a1/b1	年間費用	億円/年	1.8	2.2	2.6	3.2	3.8	4.4
a2	ビームライン	億円	2	2	2	2	4	4
b2	償却期間	年	10	10	10	10	5	5
c2=a2/b2	年間費用	億円/年	0.2	0.2	0.2	0.2	0.8	0.8
	シンクロトロン	億円	40	40	40	40	40	40
	ポート数	本	14	14	14	14	14	14
a3	光源コスト	億円	2.86	2.86	2.86	2.86	2.86	2.86
b3	償却期間	年	15	15	15	15	15	15
c3=a3/b3	年間費用	億円/年	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19
a4	シールドルーム	億円	10	10	10	10	10	10
b4	償却期間	年	15	15	15	15	15	15
c4=a4/b4/14	年間費用	億円/年	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
c=c1++c4	設備費計	億円/年	2.24	2.64	3.04	3.64	4.84	5.44
d	占有面積	m ²	65	65	65	65	65	65
e=d*0.0048	フロアコスト	億円/年	0.31	0.31	0.31	0.31	0.31	0.31
f	保守・運転係数 %	%	5	5	5	5	5	5
g=a*f	保守・運転費	億円/年	0.69	0.79	0.89	1.04	1.29	1.44
h	保守・運転員	人	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
l=h*0.5	人件費	億円/年	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4
j=c+e+g+l	年間費用	億円/年	3.64	4.14	4.64	5.39	6.84	7.59
k	稼働率	%	85	85	85	85	85	85
l=350*k*24	年間稼働時間	時間	7140	7140	7140	7140	7140	7140
m=j/l	時間費用	円/時間	51022	58025	65027	75532	95840	106344
n=j/m	スループット	枚/時間	30	30	30	30	30	30
o=m/n	システムコスト	円/枚・層	1701	1934	2168	2518	3195	3545
p	レジストコスト	円/層	800	880	970	1060	1170	1300
q	マスク単価	百万円	4	5	6	7	9	11
r	マスク寿命	ウエハ数	2000	2000	2000	2000	2000	2000
s=q/r	マスクコスト	円/枚・層	2000	2500	3000	3500	4500	5500
t=o+p+s	総コスト	円/枚・層	4501	5314	6138	7078	8865	10345

表 6-1 に X 線露光のコスト計算結果を示す。露光装置（ステッパ）の償却期間は 5 年であるが、ビームラインは 35 nm レベルまでは 10 年、25 nm 以下では連続描画用として 5 年更新とした。光源のシンクロトロンは X 線リソグラフィの寿命を通して更新不要である。ここでは償却期間を 15 年とした。ビームラインは 16 本設置可能であるが、2 本をモニタおよび R&D 用として 14 本を生産に供するものとした。マスクの寿命はダイヤモンド膜を厚くすると 2000 枚の 2 倍も可能と思われるが、マスクコストもアップするので一応 2000 枚で計算した。

7. 結言

これまで計算したコストを図 7-1 にまとめて示す。100 nm 世代では実際には ArF レーザしか生産に間に合わない。実質的に 70 nm 世代から始まる NGL の競争で、X 線リソグラフィは最も低コストであることが分かる。70 nm では X 線以外は F₂ レーザが有利であるが 50 nm 以降の対応が困難である。電子線、EUV ではマスクコストを低減が鍵である。マスク寿命を 1000 枚として計算したが、寿命が 2000~3000 枚になれば X 線以外は全体コストは互いに拮抗する。したがって、不確定要素は多いが、X 線リソグラフィのコストを下回るのは困難であり、さらに X 線リソグラフィだけが 18 nm 世代までの可能性を持っているとすると、X 線リソグラフィの実用化を一層真剣に検討すべきである。

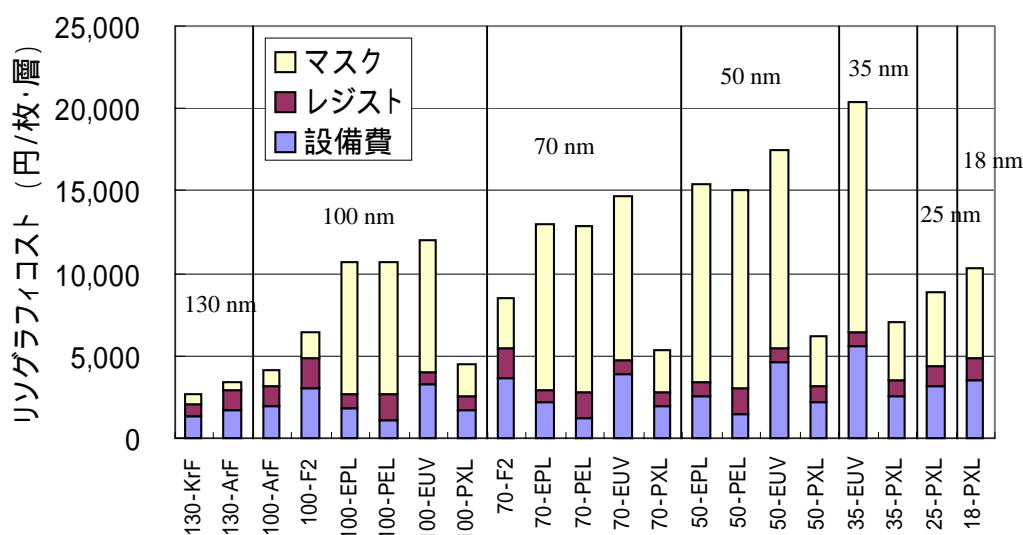


図 7-1 露光システムのコスト比較

引用文献

1. G. Escher (1994) Cost of Ownership Considerations for Advanced Lithography, *presented at International Workshop on High Throughput Charged Particle Lithography*
2. S. Ishihara, N. Atoda, M. Hirose, Y. Gomei, H. Nagata, K. Suzuki, H. Matsuzaka, M. Yamabe, S. Ohki, and M. Suzuki (1995) Evaluation of Lithography Cost of Ownership, *Working Group of Cost of Ownership, Research Group of the Application of Synchrotron Radiation to Semiconductor, Japan Technology Transfer Association.*
3. Y. Gomei and M. Suzuki (1998) A Cost-of-Ownership Study on Lithography Systems, *Semiconductor International*, July.
4. Y. Gomei (2001) A Cost-of-Ownership Study on NGL Techniques, *Semiconductor Manufacturing Industry*, February.

謝 辞

本論文を作成するにあたり、懇切なるご指導を頂きました早稲田大学理工学総合研究センター 鷲尾方一教授に心からお礼申し上げます。また、有益なご助言を頂きました早稲田大学理工学部総合研究センター所長 濱義昌教授、早稲田大学理工学部電子情報工学科 大木義路教授、早稲田大学理工学部応用物理学科 中島啓幾教授に対し厚くお礼申し上げます。

本研究は、著者が住友重機械工業株式会社に在職時に開始した超小型シンクロトロン AURORA の開発に始まり現在に至る 20 年間の成果をまとめたものです。その間にご支援いただいた方々は数知れずといっても過言ではありません。AURORA の開発を決断された当時の合田茂社長をはじめとする経営陣の熱意はその後も歴代の経営陣に引き継がれ、激励と支援を頂いてきました。特に内藤篤特別顧問（現在）には終始愛情をもって研究開発を見守って頂いたことに改めて御礼申し上げます。AURORA の開発には「Quantum Jump」を合言葉に 30 人以上メンバーの献身的な努力がありました。本論文に記載した成果はメンバー全員の成果であり、メンバーの一人一人に感謝を申し上げたい気持です。

多くの方々のご期待にどこまで応え得たか自問して慙愧に耐えませんが 1996 年に定年を迎えることになりました。その後も住友重機械嘱託として研究を継続させていただくことになりました。研究の継続には谷口博保殿、高橋直樹殿、川端隆司殿にご配慮をいただき、技術面では広瀬正起殿、堀利匡殿（現広島大）、高山猛殿（故人）、宮武勤殿には特にお世話になりました。また、著者をウイスコンシン大学に受け入れて頂いたナノテクノロジー研究センターFranco Cerrina 教授および同大学でプログラムの開発に協力頂いた Mumit Khan 研究員にも感謝いたします。国内では「放射線の半導体への応用技術研究委員会」及び学会を通じて多くの方々から有益な助言を得ることができました。NEC の鈴木克美殿、NTT の出口公吉殿、三菱電機の北山豊樹殿からは特に貴重な知見を得ることができました。また、住友重機械の嘱託期間満了後も早稲田大学の客員研究員として著者が研究を継続できるよう配慮いただいた鷲尾教授のご厚情に改めて感謝いたします。

最後に、これまで著者を心身共に支え、尽くしてくれた妻和子に感謝します。

略語表

ADL: Acoustic delay line

ASET: the Association for Super-Advance Electron Technologies.

CD: Critical dimension

DOF: Depth of focus

DRAM: Dynamic Random Access Memory

EUV: Extreme ultra violet.

EUVLLC: Extreme Ultra Violet Limited Liability Co.

ITRS: International Technology Roadmap for Semiconductors

LEEPL: Low energy electron beam proximity projection lithography.

LSI: Large Scaled Integrate circuit

NA: Numerical number

PMMA: polymethyl methacrylate ポリメチルメタアクリレート

PREVAIL: Projection reduction exposure with variable axis immersion lenses.

SCALPEL: Scattering with angular limitation projection electron-beam lithography

SEMATEC: SEMiconductor Manufacturing TECHnology:米国の国防省と民間半導体メーカー14社が共同出資した半導体製造装置に関する研究開発のためのコンソーシアム

SHI: Sumitomo Heavy Industries Co. 住友重機：住友重機械工業(株)

SR: Synchrotron Radiation

研究業績目録

論文

- (1) Extendibility of Proximity X-Ray Lithography to 25 nm and Below
J. Vac. Sci. Technol. **B20**(6), 2979-2983 (2002)
E. Toyota and M. Washio.
- (2) Image Formation by Dynamic Exposure with Multispot Beam in X-Ray Nanolithography
Jpn. J. Appl. Phys. **41**, 4404-4409 (2002)
E. Toyota and M. Washio.
- (3) A New Technique for 25 nm X-Ray Nanolithography
J. Vac. Sci. Technol. **B 19**(6), 2428-2433 (2001)
E. Toyota, T. Hori, M. Khan, and F. Cerrina.
- (4) Performance of a Compact Beamline with High Brightness for X-Ray Lithography
J. Vac. Sci. Technol., **B18**, 2986-2989 (2000)
S. Hirose, T. Miyatake, X. Li, **E. Toyota**, and M. Hirose.
- (5) Pattern Resolution of an X-Ray Beamline with a Wide Exposure Field
J. Vac. Sci. & Technol., **B17**(6), 3433-3438 (1999)
M. Khan, F. Cerrina, and **E. Toyota**.
- (6) Optical Design of High-Performance Beam Lines for X-Ray Lithography
Jpn. J. Appl. Phys. **38**, 3513-3521 (1999)
E. Toyota.
- (7) Design study of compact beam lines for x-ray lithography
J. Vac. Sci. Technol. **B 16**(6), 3462-3465 (1998)
E. Toyota.
- (8) Dynamic Response of Acoustic Delay Line for Beam Lines of Synchrotron Radiation System
Jpn. J. Appl. Phys. **37**, 6851-6854 (1998)
E. Toyota
- (9) Thermal Distortion of an X-Ray Mask for Synchrotron Radiation Lithography
Jpn. J. Appl. Phys. **37** (1998)
J. Yang, **E. Toyota**, and S. Kawachi

総説

- (1) 住友重機械における SR 関連技術の開発
SR 科学技術情報、Vol. 4, No. 4 (1994)
豊田英二郎
- (2) 超小型 SOR リング「オーロラ」

精密工学会誌 Vol. 60, No. 6 (1994)

豊田英二郎

(3) 超伝導 SR リングの開発と現状

日本原子力学会誌、Vol. 33, No.8 (1991)

豊田英二郎、富增多喜夫

(4) 光および X 線リソグラフィの技術動向

電気学会超微細加工光応用技術調査委員会技術報告第 369 号 (1991)

豊田英二郎他

(5) 小型 SOR/次世代の半導体リソグラフィを支える

Japan Science and Technology, Vol. 30, No.254 (1989)

豊田英二郎

講演

(1) 近接露光による X 線リソグラフィの拡張性

第 49 回応用物理学会連合講演会、東海大 (2002 年 3 月)

豊田英二郎、鷲尾方一

(2) Image Formation by Continuous Writing with Multi-Beam in X-Ray Nanolithography
Microprocess and Nanoechnology 2001, Matsue-shi (Nov., 2001)

E. Toyota and M. Washio,

(3) 25nm レベルの X 線リソグラフィ

第 13 回電気学会次世代リソグラフィ技術調査専門委員会、東京 (2001 年 9 月)

豊田英二郎

(4) 拡大マスクとマルチビーム描画の X 線リソグラフィへの利用

第 62 回応用物理学会学術講演会、愛知工大 (2001 年 9 月)

豊田英二郎、

(5) Two-Dimensional Patterning of 25 nm CD in X-Ray Lithography

International Workshop on X-Ray and EUV Lithography, Yokohama, (Nov., 2000)

E. Toyota, M. Khan, and F. Cerrina,

(6) A Study of the Critical Dimension Variation in a Wide Exposure Field with a Novel
Beamline

International Workshop on X-Ray and EUV Lithography, Yokohama (Nov., 1998)

E. Toyota, M. Khan, and F. Cerrina,

(7) A Comprehensive Consideration of Standardization of SR Exposure System

International Workshop on X-Ray and EUV Lithography, Yokohama (Nov., 1998)

K. Uda, E. Toyota, M. Hirose, Y. Gomei, M. Hasegawa, T. Hosokawa, T. Hayasaka

(8) A high Brightness Beamline for Synchrotron Radiation X-Ray Lithography

International Workshop on X-Ray and EUV Lithography, Yokohama (Nov., 1998)

S. Hirose, E. Tanaka, T. Miyatake, E. Toyota, M. Hirose

(9) Beamlines Standards & Optics

SAL Inc. Business Summit for X-ray Lithography, Burlington (Sept. 28, 1998)

E. Toyota,

(10) Acoustic Delay Line for Compact Beamline with Wide Aperture

Int. Workshop on X-Ray and EUV Lithography, XEL'97, Yokohama (July, 1997)

E. Toyota.

(11) 常伝導小型 SR リング

第 30 回ウルトラクリーンテクノロジースィンポジウム

UCS 半導体基盤技術研究会、東京 (1997 年 6 月) 豊田英二郎

著書

(1) 「マイクロメカニカルシステム」第 9 章シンクロトロン放射光等

p322-331,(1992) フジテクノシステム 豊田英二郎

特許

(1) パターン描画方法、マスクおよびマスク製造方法

(2001 年 10 月出願) 豊田英二郎、鷲尾方一

(2) レジストパターン形成方法、不純物添加領域形成方法及び微細パターン形成方法

(2000 年 7 月出願) 豊田英二郎

(3) X 線露光装置及び露光方法 (2000 年 3 月出願) 豊田英二郎

(4) シンクロトロン放射光伝搬装置 (1999 年 3 月出願) 豊田英二郎

(5) 放射光強度分布調節装置及び調節方法 (1999 年 3 月出願) 豊田英二郎

(6) シンクロトロン放射光伝搬装置

(1998 年 2 月出願、登録番号 3065982) 豊田英二郎

(7) X 線リソグラフィ用音波衝撃遅延管

(1997 年 4 月出願、登録番号 3190596) 豊田英二郎

(8) X 線リソグラフィ用ビームライン

(1997 年 4 月出願、登録番号 3058603) 豊田英二郎

(9) シンクロトロン放射光伝搬装置

(1997 年 5 月出願、登録番号 3118205) 豊田英二郎

(10) シンクロトロン放射装置及び X 線露光装置 (1996 年 12 月出願) 豊田英二郎

(11) 電子蓄積リング (1994 年 4 月出願) 豊田英二郎

(12) 電子蓄積リング (1994 年 4 月出願、登録番号 2949654) 豊田英二郎

(13) 超伝導磁場利用装置 (1989 年 3 月出願、登録番号 2599988) 豊田英二郎

(14) 放射光発生装置 (1986 年 3 月出願、登録番号 2047620) 豊田英二郎