

論文 / 著書情報
Article / Book Information

題目(和文)	電子ビームによるマイクロパターンの測定に関する研究
Title(English)	
著者(和文)	初澤毅
Author(English)	TAKESHI HATSUZAWA
出典(和文)	学位:博士(工学), 学位授与機関:東京工業大学, 報告番号:乙第2472号, 授与年月日:1993年3月31日, 学位の種別:論文博士, 審査員:佐藤拓栄
Citation(English)	Degree:Doctor of Engineering, Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:乙第2472号, Conferred date:1993/3/31, Degree Type:Thesis doctor, Examiner:
学位種別(和文)	博士論文
Type(English)	Doctoral Thesis

電子ビームによる
マイクロパターンの測定に関する研究

1992年10月

初澤 毅

目 次

1	序論	1
1.1	半導体プロセスにおけるマイクロパターンの測定	1
1.1.1	マイクロパターン測定技術の必要性	1
1.1.2	各種パターン測定装置の特徴	2
1.1.3	電子ビームによる測長における課題	5
1.2	研究の目的と位置づけ	6
1.3	論文の構成	9
2	電子ビーム絶対測長装置の基本構成	12
2.1	はじめに	12
2.2	測定原理と基本構成	13
2.3	電子ビーム系	15
2.4	真空系	18
2.5	信号処理系	20
2.6	章のまとめ	21
3	真空用多自由度試料走査機構の開発	23
3.1	はじめに	23
3.2	真空用試料走査機構の構成	23
3.3	走査テーブルの設計製作と性能評価	25
3.3.1	粗動 XY テーブル	25
3.3.2	微動 XY テーブル	26
3.4	回転テーブルの設計製作と性能評価	29
3.4.1	超音波モーターの駆動原理と制御パラメータ	29
3.4.2	各パラメータによる速度制御特性	32
3.4.3	超音波モーターによる位置決め制御系	34
3.4.4	回転テーブルの構成	36

3.5	試料ホルダーの設計製作と性能評価	38
3.5.1	ピエゾ駆動機構の原理	38
3.5.2	ピエゾ駆動機構の実際と位置決め制御系	40
3.6	章のまとめ	43
4	測長用高分解能レーザー干渉計の開発	44
4.1	はじめに	44
4.2	測定機用光学要素の平面度精密測定法	45
4.2.1	デジタル画像による平面度測定	45
4.2.2	情報理論による干渉縞幅の最適化	47
4.2.3	シミュレーションによる解析	49
4.2.4	液面干渉計による確認実験	51
4.2.5	実際の光学部品の測定に対する考察	52
4.3	光路長増倍型差動干渉計の設計製作と性能評価	54
4.3.1	光路長増倍型差動干渉計の原理	54
4.3.2	X 軸干渉計の設計	57
4.3.3	X 軸干渉計の性能評価と測定誤差要因	59
4.4	ファイバー結合型干渉計の設計製作と性能評価	61
4.4.1	ファイバー結合型干渉計の原理	61
4.4.2	Y 軸干渉計の設計	62
4.4.3	Y 軸干渉計の性能評価	63
4.5	章のまとめ	65
5	シリコンによる標準マイクロパターンの製作	66
5.1	はじめに	66
5.2	標準マイクロパターンの現状と製作の方針	66
5.3	異方性エッチングによるシリコンパターン作製原理	70
5.4	異なる線幅を持つパターンの製作と評価	73
5.5	ピッチ・パターンの製作と評価	77
5.6	章のまとめ	79

6	電子ビーム走査によるエッジ信号の理論解析	81
6.1	はじめに	81
6.2	モンテカルロ法によるエッジ信号の推定	82
6.3	修正拡散法によるエッジ信号の推定	87
6.4	円筒領域モデルによるエッジ信号の推定	91
6.5	章のまとめ	95
7	線幅測定とサブ μ m測長標準	97
7.1	はじめに	97
7.2	各種の線幅定義法と特徴	98
7.3	電子ビーム絶対測長装置による測定と精度	100
7.4	各種パターンの測定	102
7.5	光ビームによる測長との整合性の検討	107
7.6	シリコン試料によるサブ μ m測長標準	109
7.7	章のまとめ	113
8	結論	114
	謝辞	119
	参考文献	120
	発表論文等	125
	付録	128
1	FFTによる干渉縞解析法	128
2	第6章の式(6.13)の導出	130

第 1 章

序論

1.1 半導体プロセスにおけるマイクロパターンの測定

1.1.1 マイクロパターン測定技術の必要性

半導体デバイスは「産業の米」と称され、あらゆる方面に応用されるとともに、それ自身が今日の主要な工業分野を形成するに至っている。なかでも大規模集積回路 (VLSI) の進歩はめざましく、デバイス製作の技術的な発展は主として回路の最小設計線幅 (デザインルール) の縮小により達成されてきた。たとえば、半導体プロセス技術のテクノロジードライバと言われるダイナミック RAM (DRAM) では、図 1.1 に示すように 3 年で 4 倍のハイペースで高集積化が進められており、微細化のペースは 1Gbit 程度の集積度に至るまで現状を維持すると予想されている¹⁾。現在量産が始まりつつある 16Mbit の DRAM では $0.5 \sim 0.6 \mu\text{m}$ のデザインルールが採用されており、サブ μm の微小寸法を扱うことが日常化してきた。

このような状況下で効率的にデバイスの製造を行なうためには、無塵環境などの周辺状況の整備とともに、製造プロセス自身も一連の精密なシステムとして機能す

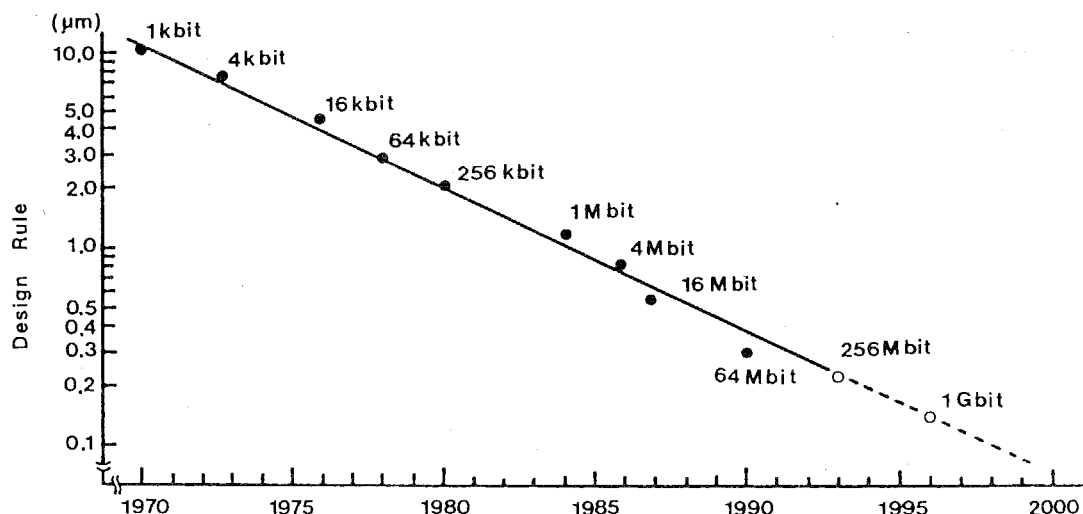


図 1.1: DRAM の集積度とデザインルールの関係

る必要がある。とりわけデバイスの製造過程において、シリコンウェハ上に形成されるレジストやアルミ配線などの微細パターン（マイクロパターン）の寸法や形状の管理は、製品の歩留まり向上などに直接寄与するため工程上重要な位置を占めるようになってきた。これは、デザインルールが小さくなるにつれ、従来は設計マージンにより吸収できたパターン重ね合わせ誤差に余裕が無くなってきたためである。そこで、プロセスの要所において専用の検査装置によりパターンの形状や寸法の抜取り検査が行なわれており、通常25枚程度のウェハカセットを単位とするロットについて数枚のウェハを測定対象としている。これに合格したロットのみ次の工程に流されるためプロセス上の無駄を省くことができ、同時に製造システム全体として要所にフィードバック系が構成されることになる。すなわち、生産システムの中での検査工程の割合が従来に比べて相対的に大きくなってきている。従って、ここで使用される検査装置の正確さや精度を保つための校正技術、および標準参照試料などが、半導体製作技術上での重要な技術要素として認識されるに至った。

1.1.2 各種パターン測定装置の特徴

半導体プロセスにおいてマイクロパターンの検査に用いられる装置としては、従来、光学顕微鏡（OM: Optical Microscope）をベースとしたものが使用されてきたが、パターンの微細化につれて走査型電子顕微鏡（SEM: Scanning Electron Microscope）にその比重が移ってきた。また、特に微細なパターンや構造を観測するために透過型の電子顕微鏡（TEM: Transmission Electron Microscope）、および走査型トンネル顕微鏡（STM: Scanning Tunneling Microscope）や原子間力顕微鏡（AFM: Atomic Force Microscope）などの走査型プローブ顕微鏡（SPM: Scanning Probe Microscope）が一部用いられている。

光学式の測長装置は取り扱いが簡便であり、 $1\text{ }\mu\text{m}$ 以上の線幅を持つフォトマスクなどの検査に用いられてきた。この装置のプローブは対物レンズで合焦したビームスポットであり、これをパターン上に走査することにより測定の開始および終了の判定を行なう。通常、プローブ直径はエアリーディスクの大きさとなり、光の波長により制限を受けるため、サブ μm 領域のパターンに対応することが難しくなっている。また焦点深度が浅いため、これにともなう測定誤差が大きく²⁾、アスペクト比

の高い試料については測定を行なうことが出来ない。現在、短波長光源の採用、共焦点光学系およびレーザー走査型顕微鏡などにより分解能の向上が図られつつあるが³⁾、本格的にサブ μm の半導体プロセスに採用されるには至っていない。

走査型電子顕微鏡は、測定ダイナミックレンジが広く、nmオーダーの分解能が比較的容易に得られるため、現在、半導体生産プロセスで用いられるパターンの主要な検査・測定装置となっている。しかし、電子ビーム発生のために高真空を必要とするため光方式に比べて測定時間が長くなり、またビームのドーズによるデバイスの損傷等のデメリットがあった。最近のプロセス用測長装置では、ロードロック機構、ウェハロード等の付加装置により高速化が図られ、またフレームメモリを援用した画像処理系によるミニマムドーズシステムの採用などにより改善されている。最大の難点は、観察系として発展してきた経緯を持っており画像から寸法を読みとるため、測定系としての信頼性が十分でないことである。すなわち、この装置での測定値は観察画像とメーカー標準との比較測定により得られるもので、パターンを絶対測定しているとは言えない。これにより装置ごとの器差を生じるため、なんらかの方法で校正を行なう必要がある。

透過形の電子顕微鏡は原子オーダーの分解能を持つが、試料の薄片を製作しなければならず基本的には破壊検査であり、デバイスの接合面の観察などの特殊な用途に用いられているのみである。これに代わる原子オーダーの分解能を持つ顕微鏡としてSTMをはじめとするSPMが挙げられるが、測定ダイナミックレンジが数十 μm 角と小さく、観察系として発展してきた経緯による問題点も走査型電子顕微鏡と同様である。また、プローブの形状による影響を免れえず、ステップ状の段差などアスペクト比の高い試料を測定する場合、得られたデータは実際の形状と異なり、触針式の表面粗さ測定器と同様の特性を呈することも問題となる。現在、レーザー干渉計による正確な画像構成系⁴⁾などの研究がなされている。さらに、SPMで検出された原子の格子ピッチを分解能の高いスケールとして測定に用いようという試みがなされている⁵⁾。しかし格子ピッチは、X線干渉計とレーザー干渉計を組み合わせた測定系により光の波長を基準として決定されており⁶⁾、標準スケールとして直接利用することはできない。

測定の方法	測 定 の 原 理	特 徴
光 ビ ー ム		<u>利点</u> ・測定が簡単で扱いやすい。 ・測定時間が短い。 ・測定系の構成が簡単。 <u>欠点</u> ・分解能が光の波長オーダーで制限される。 ・焦点深度の影響が大きい。 <u>分解能</u> 通常 $1\ \mu\text{m}$ 前後 <u>ダイミクロン</u> 数 μm ～ 十数ミリ角
電 子 ビ ー ム		<u>利点</u> ・測定のダイナミックレンジ大。 ・nmオーダーの分解能。 <u>欠点</u> ・電子ビーム走査による長さ基準 ・メーカー標準との比較測定。 ・真空系を必要とするなど測定系が複雑。 <u>分解能</u> ワンギストロム～数nm <u>ダイミクロン</u> 数十nm～数十mm角
走査型プローブ		<u>利点</u> ・ワンギストロムオーダーの上下方向分解能。 ・測定系の構成が比較的簡単。 <u>欠点</u> ・観察系、<u>ダイミクロン</u> 小。 ・プローブ形状の影響。 <u>分解能</u> ワンギストロム～数nm(横方向) サブワンギストロム (上下方向) <u>ダイミクロン</u> 数nm～数十μm角

図 1.2: 主要なパターン測定法の特徴

このように、現在用いられているパターン測定装置はそれぞれ一長一短があり、それぞれの特徴を生かした使い分けがなされているのが現状である。図 1.2に上述した各種の測定装置の特徴の一覧を示す。

1.1.3 電子ビームによる測長における課題

電子ビーム測長装置は、サブ μm 領域のパターン検査を行なうための最も一般的な機器として半導体プロセスで広く用いられている。この装置は走査型電子顕微鏡を主体として、測長専用の画像処理系およびウェハ搬送系などのプロセス用システムを付加した構成となっている。また、レジストや酸化膜などの絶縁体を観測する場合のチャージアップ現象を避けるため、一般に1kV以下の低加速電圧が使用される。

パターンの測長は、電子ビーム走査で得られた画像をフレームメモリに取り込んだのち、作業者の手動あるいは自動処理によって解析することにより行なわれる。画像の情報源としては、加速電子の打ち込みにともなって放出される2次電子の強度分布を用いるのが一般的で、組成を観察するなど特殊な場合は反射電子が用いられることもある。2次電子信号は表面の形状をよく反映するが微分的な信号であるため、実際のパターン形状を直接表わすわけではない。そこで、パターンエッジにおける2次電子信号のピークをとらえ、これに対してさまざまな処理を行なうことによりパターン線幅等を決定する。この決定法には各種の方法が提案されており、メーカーやプロセスごとにノウハウ的な使い分けをされているのが現状である⁷⁾。

電子ビーム走査により得られる画像の正確性(無歪性)は、走査コイルの掃引電圧の直線性や周期の均一性に依存しており、画像自身が長さの次元と直接関係無いところが難点である。画像の倍率等はメーカーにより出荷前に校正されているが、この装置で得られる寸法はあくまでメーカー標準との比較測定の結果である。倍率等の校正を行なうための試料としては、米国国立標準技術研究所(NIST:National Institute of Standards and Technology)の標準参照試料(SRM:Standard Reference Material)を使用することが一般的であるが、半導体工業用に使用可能なサブ μm 領域の試料は未だ開発途上にある⁸⁾。

このように電子ビームによる測長にはさまざまな問題点があるが、測定のダイナミックレンジが広いこととnmオーダーの分解能が手軽に得られることから、パターン検査のプロセス機器として重要な位置を占めており、今後もデザインルールの微細化にともないこの傾向は続くと考えられている。そこで、マイクロパターンの測定の信頼性をいっそう向上するため、電子ビーム測長装置の測定機としての信頼性の確保が緊急の課題として浮上してきた。ここで解決すべき技術的な課題を挙げると以下のようなになる。

1. 電子ビームによるマイクロパターンの絶対測長
2. 装置校正用の標準参照試料の提供
3. パターン実形状と2次電子エッジ信号の対応関係の把握
4. 測定特性の把握および線幅現示法の検討

これらは、相互に有機的に関連を持つ課題であり、総合的な研究の必要性がある。

1.2 研究の目的と位置づけ

本研究の目的は、わが国の半導体工業におけるサブ μm 領域での寸法計測におけるトレーサビリティ確保に資するため、これに必要な技術上の開発を行なうことにある。このため、前節で述べた技術課題に対し、それぞれ下記のような目標を設定し研究を進めた。

1. メートルの定義にトレーサブルな寸法値が測定可能な電子ビーム絶対測長装置の開発
2. 半導体微細加工技術を用いた標準参照試料の製作
3. 2次電子エッジ信号の実験的および理論的解析
4. 電子ビームによる線幅測定特性と標準線幅現示法

電子ビーム絶対測長装置の開発は本研究の根幹をなす重要なテーマであり、本装置の完成によりはじめて残りの研究目標が達成できる。この装置の本格的な研究は、NISTのNyyssonenらにより開始され⁹⁾、レーザー光の波長を基準とした測定システムが開発された。これは、電子ビームを電磁的に走査するかわりに試料を機械的に走査し、この間の走査量を干渉計で読みとる方法で、電子ビーム停留方式と呼ばれ、絶対測長SEM(Metrological SEM)の手法として確立されている。しかし、干渉計の分解能が2nmと比較的大きく、断面の観測機構が装備されていないなど不十分な点があった。本研究による電子ビーム絶対測長装置ではこれらの点を補い、干渉計の分解能0.8nmを達成するとともに、独自の試料姿勢調整機構による断面観測機

能を付加した。これにより、マイクロパターンの実形状と2次電子信号の対応関係をとることを容易にした。また、使用される光学部品の精度測定について検討を行なうなど、システムの精度および確度に十分な注意を払った。

校正用の標準参照試料については、光学式顕微鏡に対してはマスクパターンを用いた手法が理論面および実用面から確立されているが、これらは光の透過率を情報源としており、そのまま電子ビーム測長装置の校正に使用することは出来ない。電子顕微鏡の倍率校正用の試料としては、従来よりNISTのSRM484(第5章図5.1参照)が代表的なものとして用いられてきた。しかし、厚みのある形状でウェハを対象とするプロセス用電子ビーム測長装置では使用しにくく、また部材の一部に強磁性体であるニッケルを使用しており電子レンズ磁界中での影響が無視できない等の難点があった。形状も平面的で、水平面内における組成の相違による線幅現示法を採用しており、半導体産業で要請されているような凹凸形状を持つ試料ではない。そこで、デバイスの主要な材料であるシリコンウェハと微細加工技術を用いて、機械的に形状の整った凹凸形状を持つパターンを製作し、標準参照試料としての使用の可能性の検討を行なった。

このようなステップ状のパターンに電子ビームを走査すると、エッジに対応した2次電子信号のピークが得られる。このピーク位置は線幅などを決定する際の重要な指標となっているが、パターンエッジとの関係は必ずしも明らかにされていない。そこで、実験的および理論的な裏付けを行なう必要があり、これが3つめの課題となった。実験により確認する方法としては、断面SEM写真と上面から走査したときの2次電子信号を対応させることが一般に行なわれており⁷⁾、本研究では前述した絶対測長装置の断面観測機能によりこの関係を調べた。しかし、パターン自身の工作精度やSEMの測定分解能に近い領域の測定であるため、必ずしも完ぺきな測定とは言いがたい。そこで、理論的な推定方法を援用することになるが、代表的な解析法としてモンテカルロシミュレーション¹⁰⁾と修正拡散法¹¹⁾に基づく手法が提案されている。本論文では、シミュレーションの簡便さの観点から修正拡散法を用いた解析手法を採用した。また、入射電子のビーム径を考慮して電子拡散領域に回転楕円体を導入するとともに、パターンの急峻なエッジに対応させるため同法を改良した円筒領域モデルを提案し、実際のパターンにより有用性を確認した。

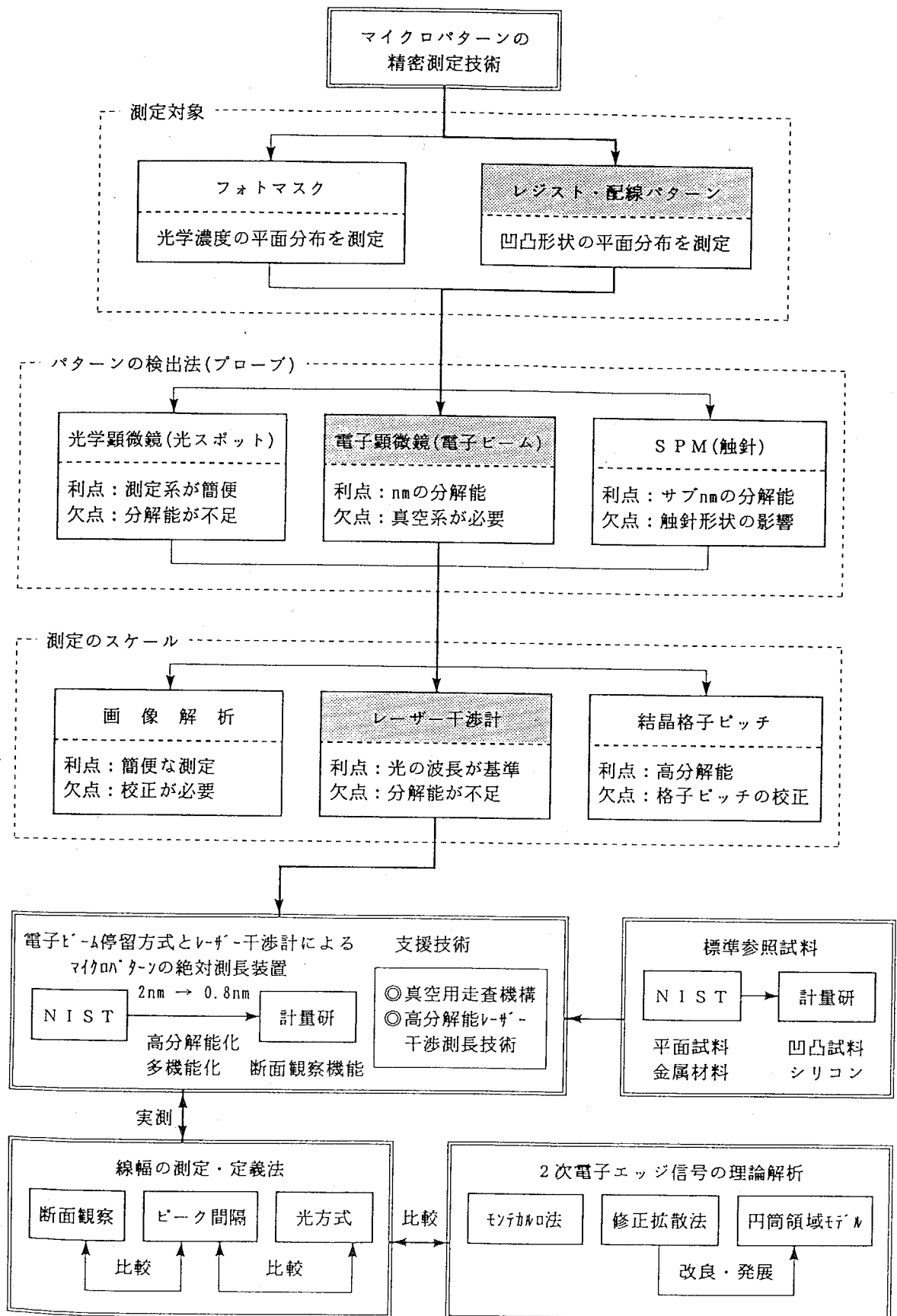


図 1.3: 本研究の位置づけ

最後のテーマでは、標準線幅現示の観点からマイクロパターンの測定法を検討した。2次電子エッジ信号より線幅を決定するアルゴリズムにはさまざまな手法が提案されているが、標準にかかわる測定ではできるだけ少ないパラメータですむ手法が望ましく、最も単純な peak-to-peak 法について主に検討を加え、測長特性を明らかにした。本研究ではこの結果に基づいて、シリコンのマイクロパターンによるサブ μm 線幅の現示方法を提案した。さらに、従来より広く使用されてきた光学式測定機との測定特性の相違を明らかにするため、1 μm 近傍の遷移領域において測定値の比較検討も行なった。

以上の研究内容は、図 1.3 に示すような位置づけとして総括される。このような一連の研究により、電子ビーム測長装置のサブ μm 領域での校正手法、および測長標準に関する技術上の問題を解決した。

1.3 論文の構成

本論文は、図 1.4 に示すように、全 8 章で構成した。

第 1 章「序論」では、半導体プロセスおよび精密測長の観点からマイクロパターンの測定の必要性とおもな測定法について概観した。また、本研究の目的と位置づけを明かにし、論文の構成について述べた。

第 2 章「電子ビーム絶対測長装置の基本構成」では、本研究で重要な位置を占める電子ビーム絶対測長機の基本構成について概説し、電子ビーム・真空系および信号処理系等について述べた。

第 3 章「真空用多自由度試料走査機構の開発」では、 10^{-5}Pa オーダーの高真空環境で使用可能な測長装置用試料走査機構について述べた。試料の微動を行なうための走査テーブルには、板ばねによる支持機構とピエゾ素子駆動方式を採用し運動性能の向上を図った。このテーブルは主要な構成要素であるので、レーザー干渉計により運動性能の評価を行なった。また、本機構の特徴として、断面を観測するために回転テーブルと試料ホルダーより構成される姿勢調整機構を付加しているが、設置場所である電子レンズ直下でレンズ磁界への影響を避けるため、磁気を使用しないアクチュエータを用いる必要がある。そこで、回転テーブルのアクチュエータとして超音波モータを採用し、位置決め要素として用いるために速度特性について調

査し，サーボ制御系を初めて実現した．さらに，ティルトを調整可能するための試料ホルダーには，回転型インチworm機構の一種であるピエゾ駆動スピンドルを新たに開発し，実用に供した．これらの特性評価の結果についても記した．

第4章「測長用高分解能レーザー干渉計」では，絶対測長装置のスケール部分である干渉計について記した．はじめに，干渉計などを構成する光学部品の平面度を精密に測定する方法について述べ，使用する光学要素の精度に十分注意を払った．一般にオプティカルフラットなどの精密光学要素の平面度を測定するためには，基準

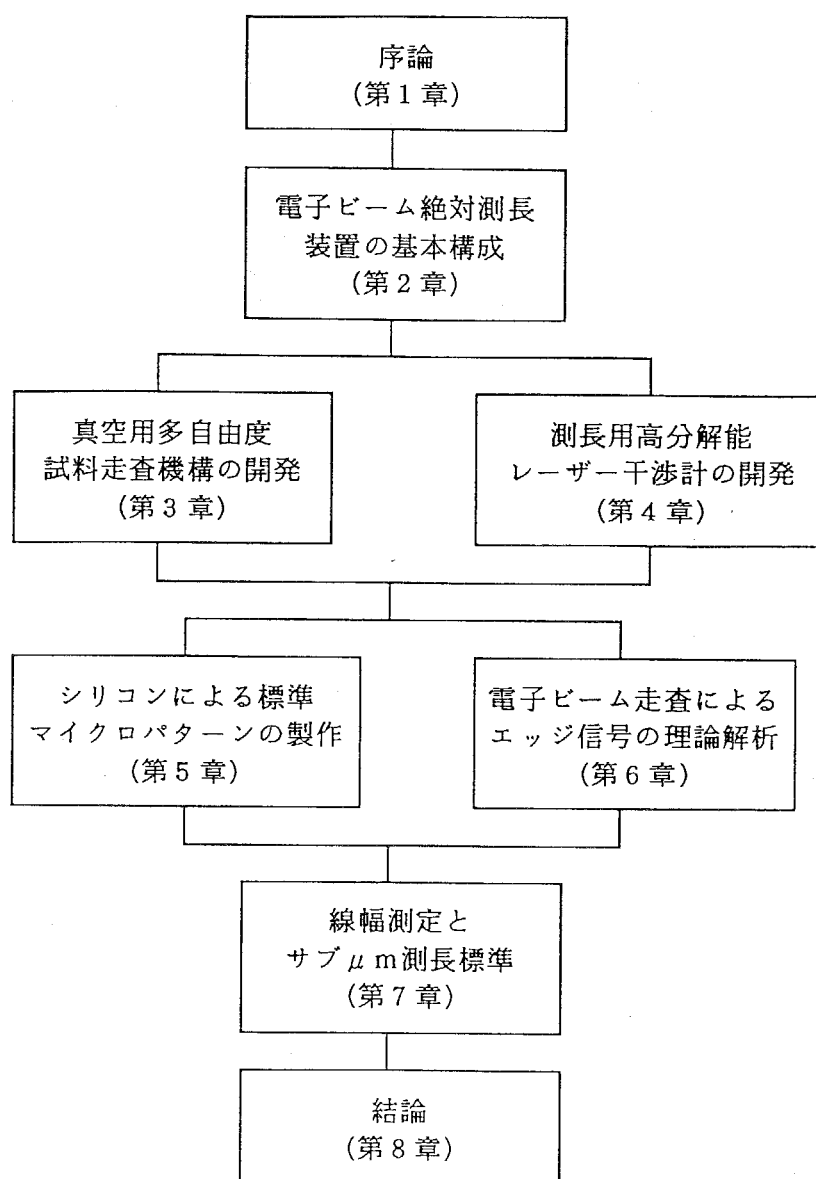


図 1.4: 本論文の構成

平面と干渉縞を発生させ、これを解析することにより平面度を得ている。解析はデジタル画像処理により行なうことが多いが、縞を画面の画素数に対してどのような割合で発生させるかについての指針がなく、経験的な方法に頼っていた。そこで、情報理論を導入した最適化によりこの最適条件を導出し、液面干渉計により確認実験を行なった。この結果をふまえて光学要素に十分検討を加えたのち、測長機の各走査軸ごとに高分解能のレーザー干渉計を設計製作した。具体的には、主要な走査方向であるX軸には分解能 $\lambda/800$ (約0.8nm)を持つ光路長増倍型差動干渉計を、Y方向には分解能 $\lambda/64$ (約10nm)を持つファイバー結合型マイクロ干渉計を開発したので、これらについて詳述するとともに性能評価の結果を記した。

第5章「シリコンによる標準マイクロパターンの製作」では、電子ビーム測長装置の標準参照試料として使用するためのシリコン微細凹凸パターンの製法および評価法について述べた。この試料は機械的に整った形状が必要であるため、(110)の面方位を持つシリコンウェハと水酸化カリウム溶液を用いた異方性エッチングプロセスにより作製した。また、このメカニズムについても記した。

第6章「電子ビーム走査によるエッジ信号の理論解析」では、シリコンのエッジパターンに電子ビームを走査したときの2次電子信号強度の数値解析を行い、線幅測定の見点からエッジ位置と信号ピークの位置関係を理論的に明らかにした。数値解析手法には従来よりモンテカルロシミュレーションによるものと修正拡散法による方法があるが、本論文では修正拡散法に基づく解析を行った。ここでの修正拡散法は入射電子ビームの直径を考慮したモデルに改善されている。さらに、急峻なエッジに対しても適用可能なように本法を発展させた円筒領域モデルを提案した。これらのモデルにより、強度信号のピーク位置と実エッジの対応関係が簡便な計算手法で推定可能となり、実際の測定との対応関係を調べる事が出来るようになった。

第7章「線幅測定とサブ μm 測長標準」では、第5章で作製した試料を電子ビーム絶対測長装置により測定するとともに、第6章で行なったシミュレーションとの整合性の検討を行なった。また、同一の試料を光ビーム方式で測定したときの測定値の整合性についても検討を行なった。さらにこれらの結果を踏まえて、電子ビーム及び光方式の両方に使用可能なサブ μm 領域の寸法標準の例を示した。

第8章「結論」では、本研究で得られた成果の総括を行なった。

第 2 章

電子ビーム絶対測長装置の基本構成

2.1 はじめに

半導体生産ラインで使用する電子ビーム測長装置は、電子ビームの電磁的な走査により 2 次電子画像を得て、これより線幅等の測定を行なっている。SEM の画像系はあらかじめ NIST の標準標準参照試料等により倍率校正がなされているが、ここの測定値は測定機メーカーとの比較測定の結果であることにほかならない。また、画像の無歪性が電子ビームの走査の一様性、すなわち水平および垂直偏向コイルへの印加電圧の直線性にかかわっており、これは長さの次元と直接関係が無いところが最大の難点である。

そこで、SEM に正確なスケールと機械的な走査機構を組み合わせた測長装置の開発が NIST の Nyysönen らにより開始された⁹⁾。この装置は電子ビームを一点に留めおき試料を機械的に走査、この間の移動量をレーザー干渉計により読みとるシステムであり、電子ビーム停留方式と呼ばれる。このシステムの干渉計分解能は 2nm であり、ウェハ状の試料を測定対象としている。これに対して本研究で開発した電子ビーム絶対測長装置は、干渉計分解能を 0.8nm に改善しパターンの微細化に対応した。またウェハの観察はもとより、従来は写真により割り出していた断面寸法が独自の断面観察機構を用いることにより正確に求められるようになり、各種の線幅定義法の相互比較が行えるようになった。

マイクロパターンの絶対測長を行なうためには、長さの絶対単位であるメートルにトレサブルなスケールを用いる必要がある。現在のメートルの定義は、1983 年 10 月に開催された第 17 回国際度量衡総会の決議に従っており、従来のクリプトンランプの波長による定義に代わって、1 秒の 299,792,458 分の 1 の時間に真空中を光が進む行程とされている¹³⁾。これは原子時計の発達により時間の測定精度が 10^{-13} ~ 10^{-15} に向上し、光の波長等を用いた長さの精度 10^{-9} ~ 10^{-11} よりも、高精度の標準

が実現可能になったからである。しかし、実際問題として光速度を標準として用いることは不可能なので、実用上の1つの現示法として沃素安定化レーザーの波長を標準として用いることが行なわれている。従って、本装置のように類似のレーザーの波長を基準とした測定値は、メートルの定義にトレーサブルであると言える。

本章では、はじめに測定原理と装置の基本構成について述べたのち、電子ビーム系、真空系および2次電子の信号処理系について記し、最後にこれらのまとめを行なう。

2.2 測定原理と基本構成

一般に測長系を構成するための基本要素として、

- 精度および確度の高いスケール、
- スケール上で測定の開始および終了を示すためのプローブあるいはポイント、

の二つが必要とされる。電子ビーム絶対測長装置では、レーザー干渉計がスケールに、電子ビームがプローブに相当する。図 2.1 に、本装置の測定原理を示す。

通常の SEM では、直角に配置した二組の走査コイルにより収束電子ビームを試料上にラスタ走査し、このとき得られる2次電子強度を光電子増倍管等の検出器により電気信号に変換する。この信号は画像の輝度信号として用いられ、電子ビームの走査に同期して観察用ブラウン管上に映像として表示される。

これに対して本装置では、前述の電子ビーム停留方式を採用した⁹⁾。すなわち、電子ビームを走査せずに1点に留め置き、試料を機械的に走査することにより2次電子強度分布を得る。このときの走査量は、レーザー干渉計により精密かつ正確に測定される。ビームの電磁的な走査にくらべて速度は遅いが、2次電子の強度分布に対して光のスケールが当たることになり、光の波長を基準とした絶対測定が実現できるのが本方式の特長である。

前述の測定系を実現するためには、走査や測長などの機能を持ったさまざまな機構を SEM の試料室内に設置しなければならない。そこで、ここで必要になる仕様をまとめると、図 2.2 に示すような基本構成となる。すなわち本装置は、電子ビー

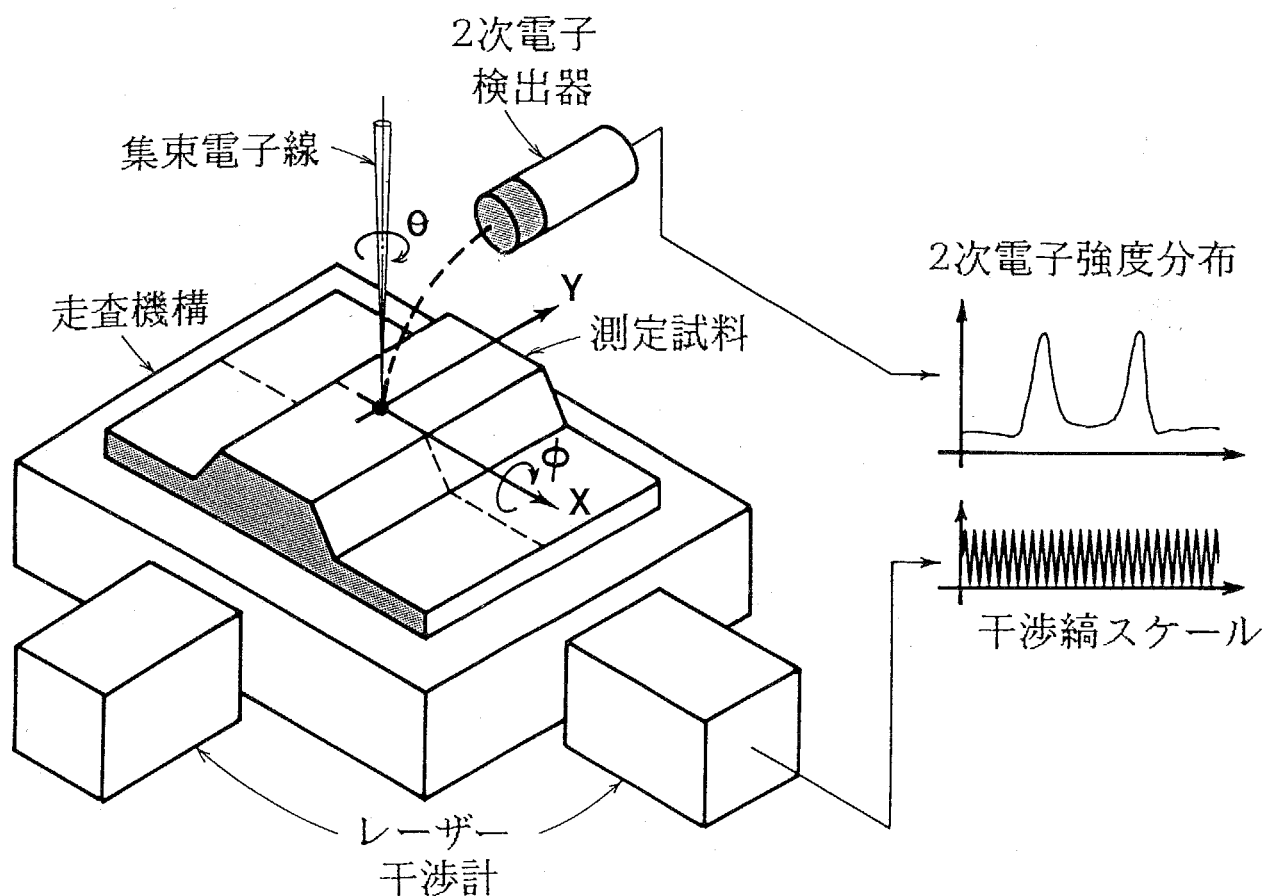


図 2.1: 電子ビームによる絶対測長の原理

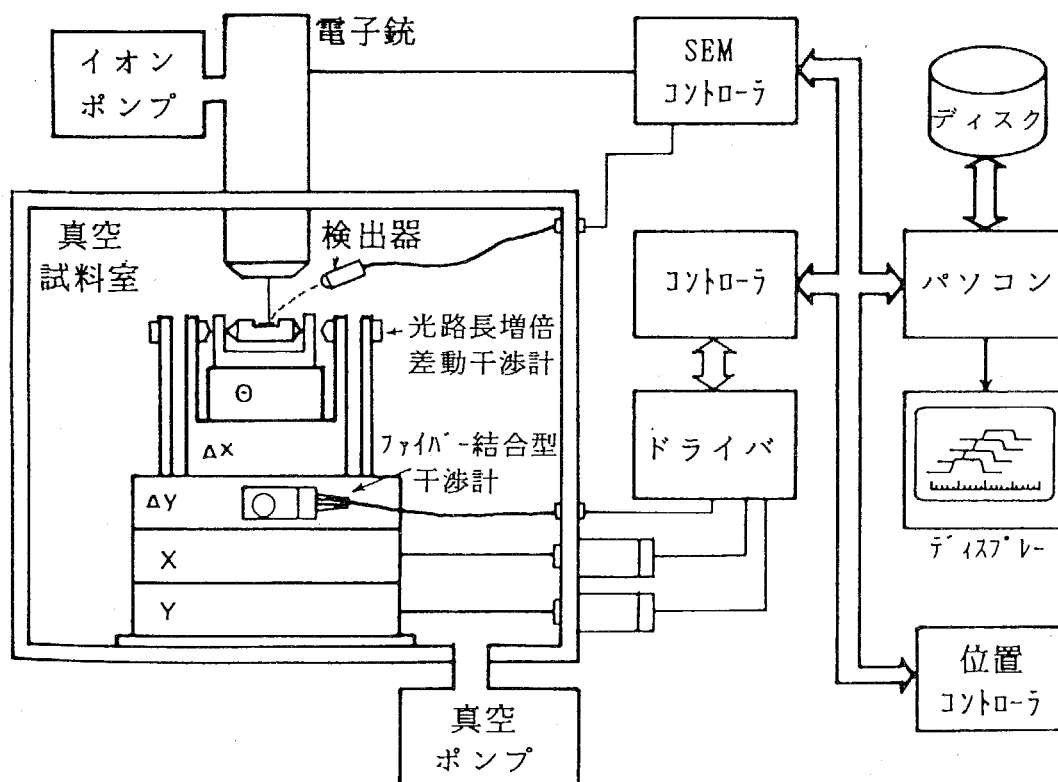


図 2.2: 測長装置の基本構成

装置		分解能	可動範囲	測定手段	アクチュエータ
微動テーブル	X	0.8nm ($\lambda/800$)	$\pm 5 \mu\text{m}$	光路長増倍型 差動干渉計	ピエゾ素子
	Y	10nm ($\lambda/64$)	$\pm 5 \mu\text{m}$	ファイバー干渉計	ピエゾ素子
粗動テーブル	X	$4 \mu\text{m}$	$\pm 20\text{mm}$	ロータリー エンコーダ	直流サーボ モーター
	Y	$4 \mu\text{m}$	$\pm 20\text{mm}$	ロータリー エンコーダ	直流サーボ モーター
姿勢調整	θ	0.45° (水平面内)	360°	ロータリー エンコーダ	超音波サーボ モーター
	ϕ	0.9° (垂直面内)	360°	ロータリー エンコーダ	ピエゾ駆動機構

表 2.1: 装置の主な仕様一覧

ムおよび真空系および信号処理系などの通常の SEM で使用される要素に加え, XY テーブルおよび試料姿勢調整機構などの走査メカニズム, X, Y 各方向ごとの高分解能レーザー干渉計を付加した構成となっている. これらの装置に必要な主な仕様をまとめると, 表 2.1 のように総括される.

本装置はパターンの絶対測定時には電子ビーム停留方式により測定を行なうが, 測定場所の探索や位置合わせなどを行なう場合は通常の SEM としての使用することが可能である. 試料室内部の走査機構およびレーザー干渉計については, 本測長装置の重要な構成要素であるので, それぞれ章を改めて詳述する.

2.3 電子ビーム系

電子ビームの源となる電子を発生させるためには, 真空中での電子放出現象を用いる. これには熱電子放射, および電界放射に基づく電子銃を使用するのが一般的である. 前者は真空中でフィラメントを通電加熱し, 熱電子をアノードで引き出すも

特性項目	熱電子放射型		電界放射型
	W・フィラメント	LaB ₆ ・フィラメント	
電子源の大きさ d_s	30 μ m	~ 10 μ m	~ 5nm
輝度 $B(\text{A}/\text{cm}^2\cdot\text{Sr.})$	~ 5×10^4	~ 5×10^6	~ $\times 10^9$
エネルギー幅 $\Delta V(\text{eV})$	~ 2	~ 2	~ 0.2
陰極温度 ($^{\circ}\text{C}$)	~ 2500	~ 1600	室温
真空度 (Pa)	10^{-3}	10^{-5}	10^{-8}
寿命 (時間)	~ 50	~ 5000	半永久

表 2.2: 各種電子銃の特性¹²⁾

のである。通常、フィラメントにはタングステン細線や、6ホウ化ランタン (LaB₆) 単結晶が用いられる。一方、電界放射型の電子銃は、 10^{-8}Pa 以上の高真空中で先端を尖らせた針などに高電界をかけると、電子が固体から引き出されてくる現象を利用している。常温での現象であるため、熱電子にくらべて電子のエネルギーが揃っており、電子レンズで収束した場合、熱電子型銃より細い電子線が得られる特長を有する。しかし、本装置のようにさまざまな機構を組み込むと、部材からのアウトガスによる真空度低下の危惧があるとともに真空系が複雑になるため、コストパフォーマンスを勘案して6ホウ化ランタンフィラメントによる電子銃を採用した。これらの電子銃の特性を表 2.2に示す¹²⁾。

電子光学系は、一般的な4段縮小レンズと、ビーム電流及びビーム径を制御するコンデンサーレンズで構成した。また、対物レンズは収差を極力小さくするため、作動距離が6mmの短焦点強磁界タイプを使用した。SEMとしての主な性能を示すと、公称ビーム径は加速電圧1kVで15nmであり、このときのプローブ電流は約 $8 \times 10^{-12}\text{A}$ である。また、倍率は30~5万倍の範囲で20ステップの可変で、加速電圧は低電圧が利用できるように0.5kV~3kVの範囲で0.1kVごとに調整可能である。一般に低加速電圧を使用すると、収差が増大するとともにビーム直径の増大を招き、分解能が低くなる傾向があるが、半導体産業用の電子ビーム測長装置では、

- レジストや酸化膜などの絶縁体を観察するときにチャージアップ現象を避ける、

- ビームドーズによるデバイスの損傷を避ける,
- 進入深さの減少にともなう表面情報の増大,
- 1kV 付近で 2 次電子発生率が入射電子よりも大きくなる,

などの利点を重視して高忠実度の観察を実現するため, 通常 1kV 以下が使用される.

電子が固体に打ち込まれると様々の信号を発生するが, SEM では表面の凹凸形状をよく反映する 2 次電子を主要な信号として用いる. この 2 次電子は数 V 程度の低電圧のエネルギーピークを持っており, 2 次電子検出器前面にアノードを設けて捕集する. 検出器には通常, 光電子増倍管が用いられ, 本装置では前述の短焦点を実現するため, 対物レンズの直上に設置 (トップ・ディテクタ方式) されている. また, パターンエッジの向きによる影響を避けるため, 原理図 2.1 に図示したように検出器は主要な走査方向である X 軸に直角に配置した. このような電子ビーム系の概略を図 2.3 に示す.

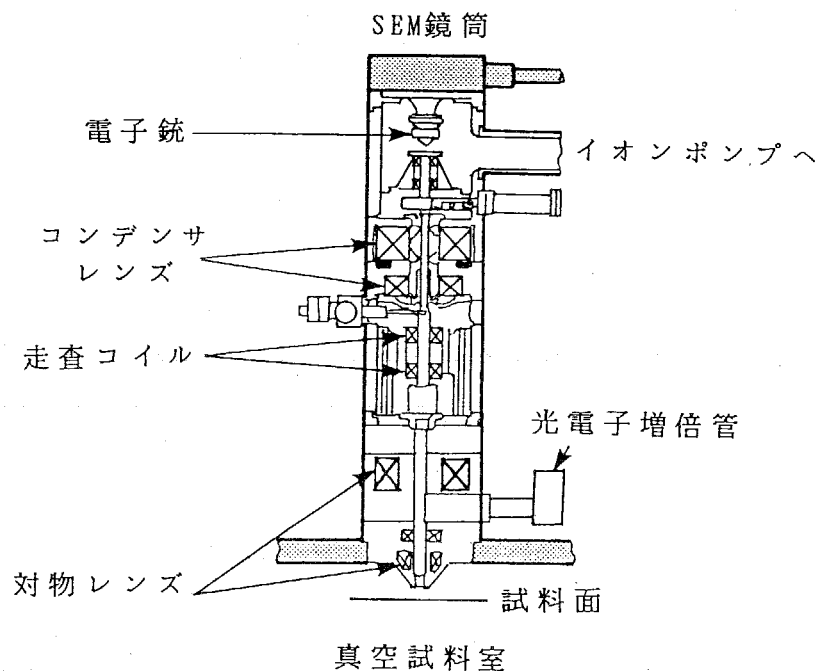


図 2.3: 電子ビーム系の概略

2.4 真空系

本装置の真空試料室はさまざまな機構を納めるため容積が 80l、内壁寸法が 50 × 50 × 32cm と通常の SEM にくらべてかなり大きな構成になっている。そこで真空用のアルミ合金 (A 6061-T6) を使用して重量の低減を図るとともに、壁面からの脱ガス特性に留意した。本体は 30mm 厚の板材による箱型構造で、要所はテルミット・イナートガス・アーク溶接 (TIG 溶接) によった。これは溶接部位にアルゴンガスを吹き付け、部材の酸化を防止する方法であり、真空用の溶接技術として定評がある。

試料室側面には、内部との信号授受、運動の導入、レーザー光の導入などを行なうためのコネクタ、ベローズシール、ガラス窓類を設置したが、これらは高真空用の ICF フランジにより締結されており、一部バイトン製 O リングを用いた封止構造を取った。内部観察用の窓ガラスには石英を使用した。レーザー導入の窓には波面の透過特性を考慮し、一般的な光学ガラス材料である BK7 製のオプティカルフラットを使用した。

試料室天板には SEM の鏡筒が取り付けられており、試料交換などの際には図 2.4 のように 4 本の空気圧シリンダにより上部に持ち上げ、スライドレールにより横方向に移動させることが可能な構造となっている。試料室は防振のため、全体を空気

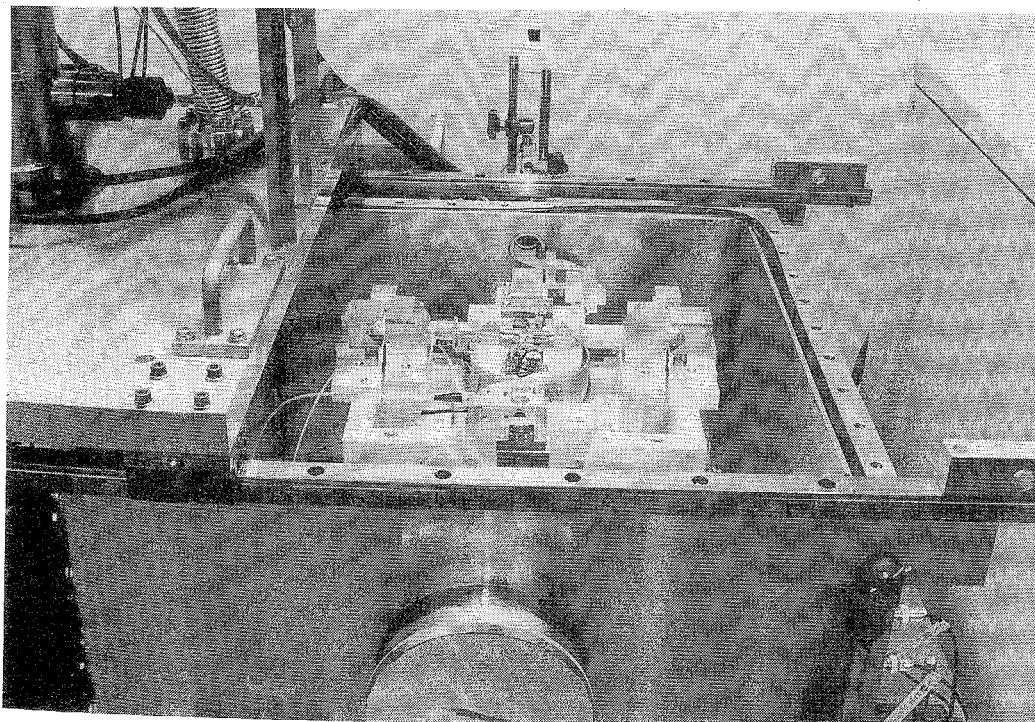


図 2.4: 天板を開けた真空試料室の外観

式の除振台上に設置している。この除振台の主要な仕様は、設計積載荷重約 900kg、垂直方向の共振周波数 $1.5 \pm 0.3 \text{ Hz}$ 、水平方向の共振周波数 $2.0 \pm 0.3 \text{ Hz}$ である。また、防振台天板には真空用の非磁性のステンレス鋼である SUS304 を使用して、電子レンズ磁界への影響が無いように考慮した。

本システムの真空排気系は、図 2.5 のように構成した。SEM の一般的な真空排気系としては、油拡散ポンプとロータリーポンプによる直列排気系を用いるが、本装置ではオイルフリーの環境と大容量の高速排気を実現するため、ターボ分子ポンプとロータリーポンプによる排気系を採用した。ターボポンプは多段で構成されたタービンを数万 rpm という高速で回転することにより排気を行なうが、振動が多いのが難点とされていた。ここでは磁気浮上軸受けタイプで排気速度 600 l/s のポンプを使用することにより、この問題を解決した。また、排気コンダクタンスを最小にする

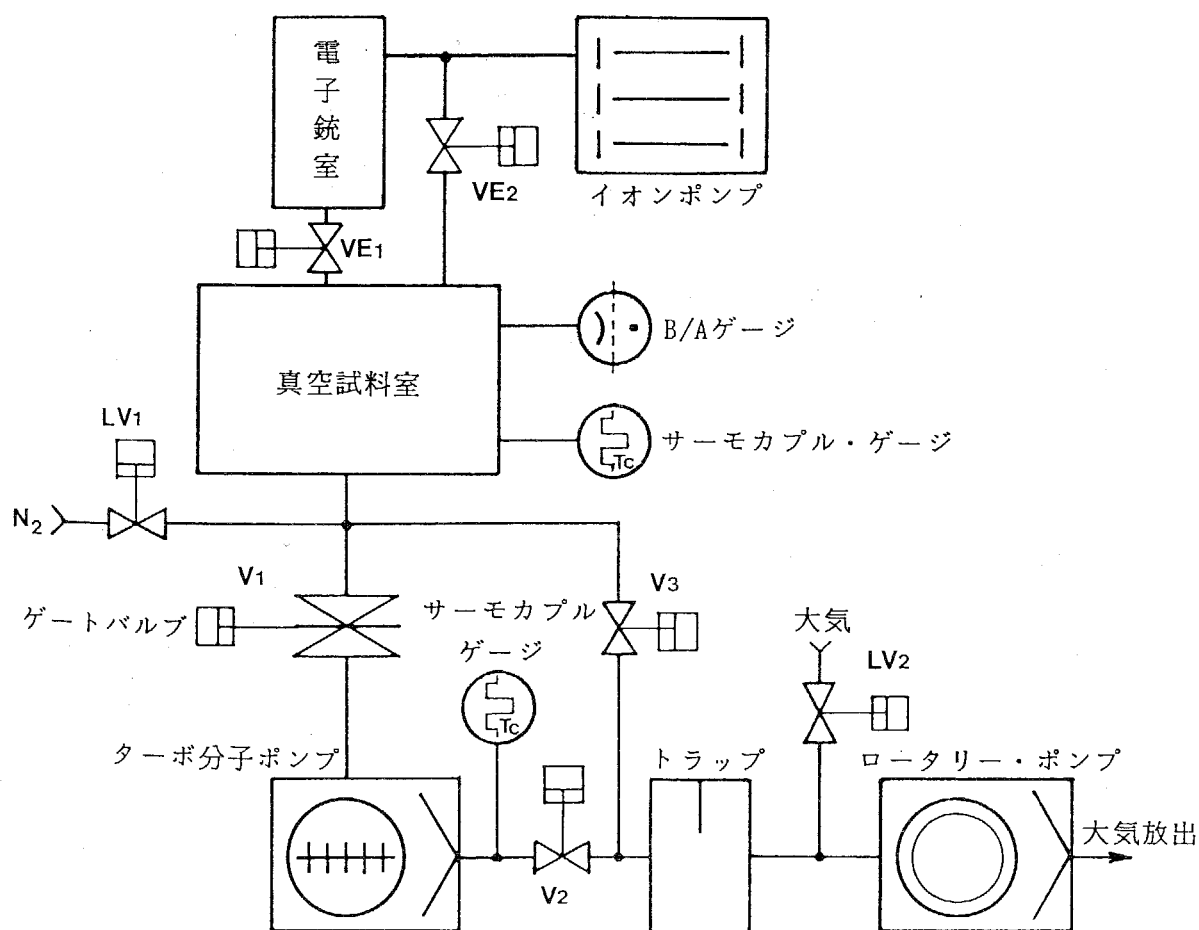


図 2.5: 真空排気系のブロック図

ため、このポンプは金属製ダンパと支持柱を介して試料室直下に取り付けられている。このような主排気系により、測定時 $5 \times 10^{-5} \text{Pa}$ の真空度を實現している。また、電子銃の直近には 20l/s の排気速度を持つスパッタ・イオンポンプを配置し、電子銃の長寿命化に配慮した。真空用ゲートバルブおよび仕切り弁類には、電磁弁および電磁パイロット弁制御の空気圧作動弁を用いて電気信号で制御可能な方式を取った。これら一連の排気システムは、シーケンスコントローラにより制御されており、粗引き、高真空排気、試料室リークなどの操作はすべて自動化されている。

2.5 信号処理系

本装置の信号処理系は、SEMの映像系、操作機構制御系、レーザー干渉計カウンタ、パソコンを利用したデータ・サンプリング系などから構成されている。図2.6に系のブロック図を示す。本系はレーザー干渉計カウンタを基準としたクローズド・

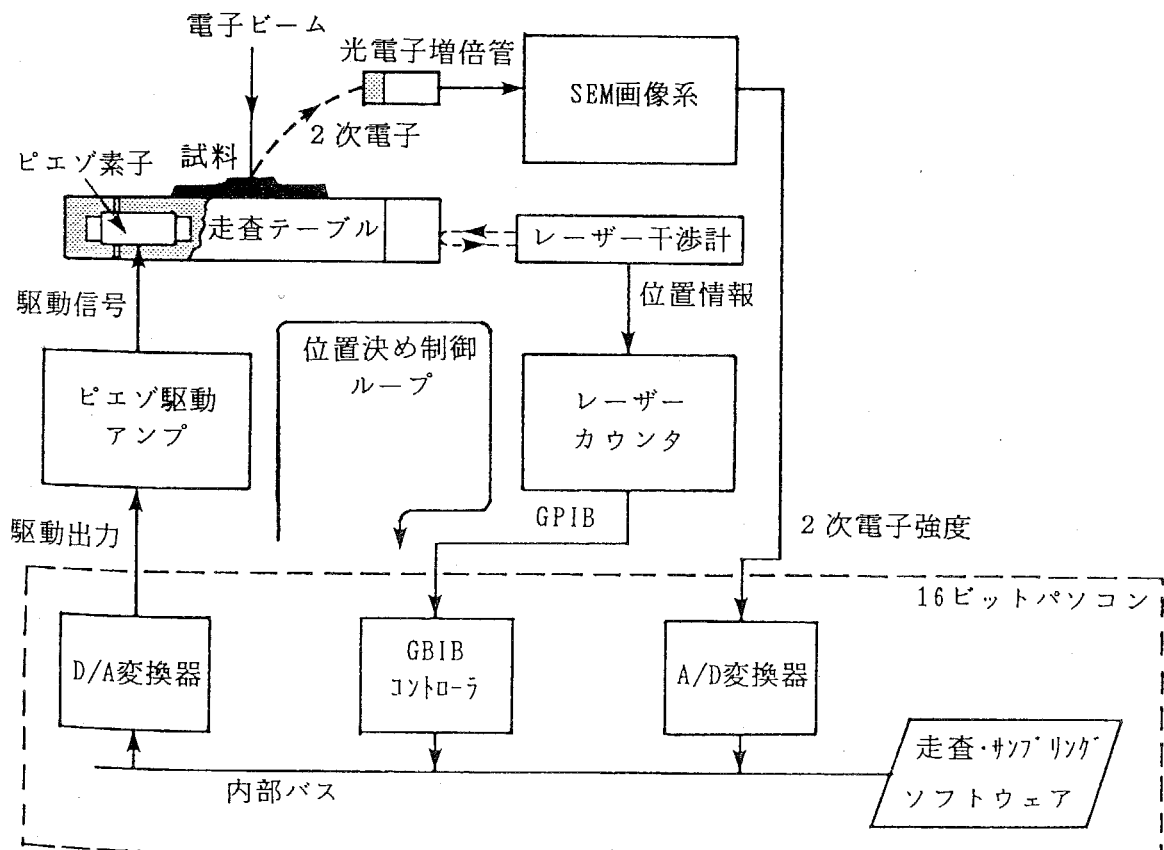


図 2.6: 信号処理系のブロック図

ループ系を基礎としている。すなわち、パソコンの駆動指令によりテーブルが動くと、レーザー干渉計のカウンタより走査量がフィードバックされ、テーブルの位置決めを行なう制御系が構成されている。これにより、試料走査の間、カウンタの1ステップごとにSEMの映像系から2次電子強度をサンプリングし、マイクロパターンによる2次電子強度分布を得る。

すなわち、通常の電子ビーム測長装置ではSEMの画像系のみから寸法の情報を抽出しているが、本系ではレーザーカウンタを基準とした位置決め制御系により、2次電子信号のサンプリング間隔がメートルの定義にトレサブルなかたちで正確に保証されており、これが従来の装置と大きく異なる特長である。

2次電子信号サンプリングの具体的なシーケンスを示すと、パソコンにより出力されたデジタル位置指令は、セトリング時間 $5\mu\text{s}$ の16ビットD/Aコンバーターを介し、走査機構のアクチュエータであるピエゾ素子の駆動アンプ入力に変換される。アンプ出力によりピエゾ素子が伸縮してテーブルが移動すると、干渉計のカウンタが加減算されるので、この結果を GPIB を通じてフィードバックして、位置指令との比較を行なう。位置決めが完了すると、変換時間 $15\mu\text{s}$ の12bitの逐次比較型A/D変換器により、SEM画像系より2次電子強度のサンプリングおよび平均が行なわれる。このプロセスはパソコンのソフトウェアにより制御され、データ取得点数に応じた回数だけ繰り返される。高速化を期するため要所はアセンブリ言語により記述したが、実際のデータサンプリング速度は1点あたり5ms程度かかっている。これは、カウンタとのデータのやりとりが GPIB 経由で行なわれるため、バス転送速度により系全体の速度が制限されるのが主要な原因である。サンプリングされたデータに対しては、ノイズ低減のためFFTによるフィルタリング処理などを行なった後、線幅などのパラメータ抽出を行なう。

2.6 章のまとめ

本章では電子ビームによる絶対測定を実現するため、レーザーの波長を基準とした測定機の基本構成について述べた。この装置は電子ビームを走査する通常のSEM機能に加えて、電子ビームを停留させ試料を機械的に走査する機能を有する。試料の走査量はレーザー干渉計により精密かつ正確に測定され、光のスケールを伴った

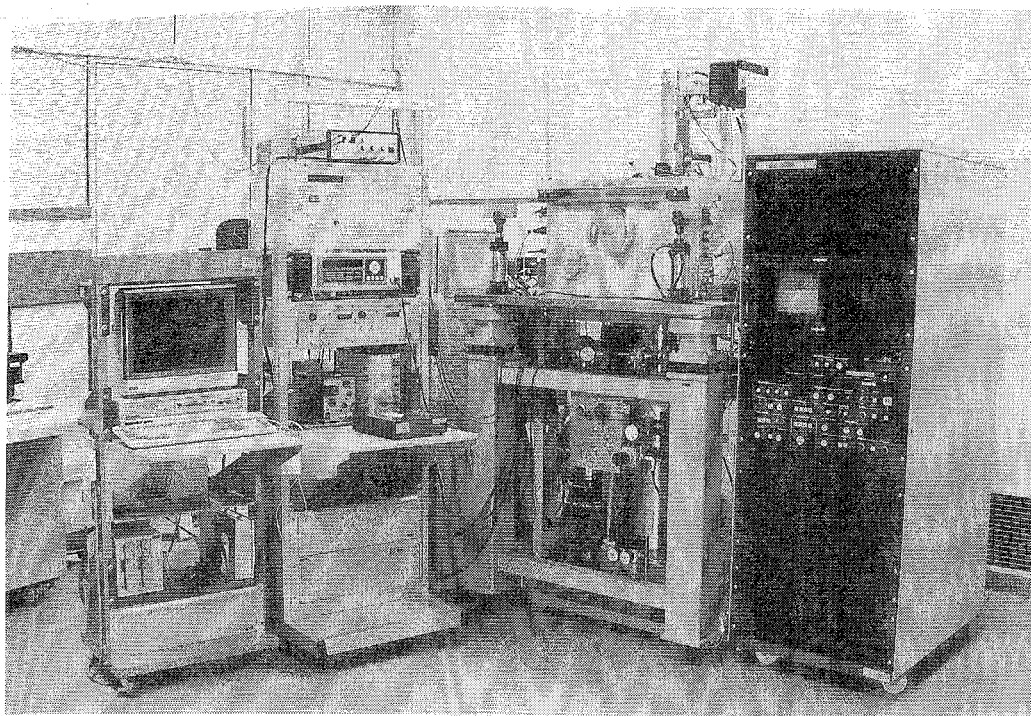


図 2.7: 電子ビーム絶対測長装置の外観

ターンの2次電子強度分布を求めることが出来る。従って、従来の装置ではSEM画像系のみから寸法情報を抽出していたのに対し、電子ビームをパターン検出プローブとした正確な基準スケールを持つ測定系が構成されている。これによりメートルの定義にトレーサブルな電子ビームによるマイクロパターンの測定系を実現した。

本装置の電子線源には、熱電子型高輝度電子銃である LaB_6 タイプを用い、対物電子レンズも6mmの短焦点強磁界型を採用した。また、クリーンな真空環境を実現するため磁気浮上型ターボ分子ポンプを採用するとともに、試料室をアルミ合金で製作し、全体の重量低減にも配慮した。

信号処理系はパソコンを中心として、レーザー干渉計カウンタおよび走査テーブル駆動部などより構成されており、これらはソフトウェアによるクローズド・ループ系の要素として働く。これによりサプリングされたデータは、レーザーの波長を基準とした正確なサプリング間隔を持つことが保証され、前述の絶対測定を実現している。

図 2.7に、本研究で開発した電子ビーム絶対測長装置の外観を示して、章の結びとする。除振台上に設置されている鏡筒を備えた真空試料室を中心に、電子ビーム映像系(右側)、信号処理系(左側)などが配置されており、約3m四方の面積を占有する。

第 3 章

真空用多自由度試料走査機構の開発

3.1 はじめに

本研究で開発した電子ビーム絶対測長装置では、試料の機械的な走査を基本とした各種の測定を行なうため、XY 平面内での位置決めと微小送り、水平・垂直面内の回転などの多自由度を持った真空環境で使用可能な試料走査機構が必要となる。従来このような機構は、SEM 真空試料室の側壁面に設置された試料ステージとして実現されていたが、マイクロメータ・ヘッドとロッド等の機械的な結合要素により複雑に組み合わされたテーブルを駆動するため、槽内の設置の自由度が小かった。また、本機構は試料室の限られたスペースの中に第 4 章で述べる干渉計などとともに組み込まなければならず、さらに機械的な運動性能にも十分な特性が要求されるため、従来の試料ステージでは対処不可能である。そこで、アクチュエータ搭載型を基本として各運動要素ごとに専用の機構を組み合わせることにより、新たに本測長装置専用の真空用多自由度試料走査機構を開発した。

本章では、はじめに全体の構成について述べたのち、各機能要素の設計製作および性能評価の結果について記述した。

3.2 真空用試料走査機構の構成

本機構の基本的な構成は、前章の図 2.2 に示したように、下部より、位置決めを行なうための粗動 XY テーブル、試料の走査を行なうための微動 XY テーブル、オリエンテーション（水平面内回転）を調整するための回転テーブル、および断面観測時に試料のティルト（垂直面内回転）を調整するための試料ホルダーから構成されており、四つの運動の自由度を有する。これらは粗動 XY テーブルを除きアクチュエータ搭載型とし、駆動機構の簡便さを図るとともに試料室内での設置の自由度に配慮

した。また、本機構の設計上の制約条件として注意を払った事項は、

1. 10^{-5} Pa という高真空環境にさらされるため、アウトガスの少ない部材を使用すること、
2. SEM の電子レンズ近傍に設置されるため、電子レンズ磁界への影響を与えないように非磁性の部材およびアクチュエータを用いること、

の 2 点である。

最下部に設置した粗動 XY テーブルは、ステッパーなどで使用されるステンレス製の XY テーブルで、真空試料室の外部より導入したロッドの直線運動により駆動される。本機構のみ、アクチュエータに直流サーボモーターを使用しているが、これはストロークと駆動力が大きく、適当な分解能で位置決めの出来るアクチュエータとして最適である等の理由による。

粗動テーブルの上には、機械的な走査を行なうための微動 XY テーブルを配置した。これはピエゾ素子により駆動されるもので、第 4 章で述べるレーザー干渉計とともに位置決め制御系を構成し、本測長装置で最も重要な機械的構成要素である。本テーブルは、可動部が板ばねにより保持されるメカニズムを採っており、これを直交 2 軸に組み合わせることにより XY 動作を実現した。

回転テーブルは、走査方向をマイクロパターンと直角に調整するためのアライメント調整機能を持つ。このテーブルのアクチュエータには超音波モーターを使用して無磁気化に配慮するとともに、ロータリーエンコーダによる位置決め制御系を実現した。

試料ホルダーは電子レンズの直下 1mm に設置される機構であり、無磁気化と省スペース化には格段の配慮が必要であったので、回転型インチworm機構の一種であるピエゾ駆動スピンドルを開発して対処した。

これらの機構の部材の選定については脱ガス特性を十分配慮し、プラスチックなどの高分子材料については真空試験槽で十分な試験を行い、真空環境を汚染しないことを確認した。他に金属材料としては構造部分にはステンレス材、軽量化を要する部分にはアルミを用い、また特段の軽量化や電氣的な絶縁を要する部分については、マシナブルセラミクスを使用した。

3.3 走査テーブルの設計製作と性能評価

走査テーブルは、粗動 XY テーブルとその上に設置された微動 XY テーブルより構成される。粗動テーブルは主として SEM の画像表示時に測定場所の探索のため、毎秒数ミリ～数 μm の高速動作を数十ミリのストロークで行なう。また、微動テーブルはパターン測定時に数 μm の走査距離を一様な速度で、nm オーダーの微少送り動作を行なうことを主な目的としている。このように各テーブルで要求される運動性能が異なるため、無理な一体化は行なわず、それぞれの特徴を生かした別構成をとった。また、微動テーブルの運動特性は測長装置の測定性能に直接反映されるので、レーザー干渉計により運動性能の評価を行なった。

3.3.1 粗動 XY テーブル

粗動 XY テーブルは、図 3.1 に示ようなテーブル本体と駆動用のロッドおよび直動駆動機構より構成される。本体は真空用の非磁性ステンレス材である SUS304 により製作し、設計積載重量は約 15kgf である。本テーブルは、試料室外部に設置された直流サーボモーターにより駆動する方式を取った。モーターの回転はボールねじ

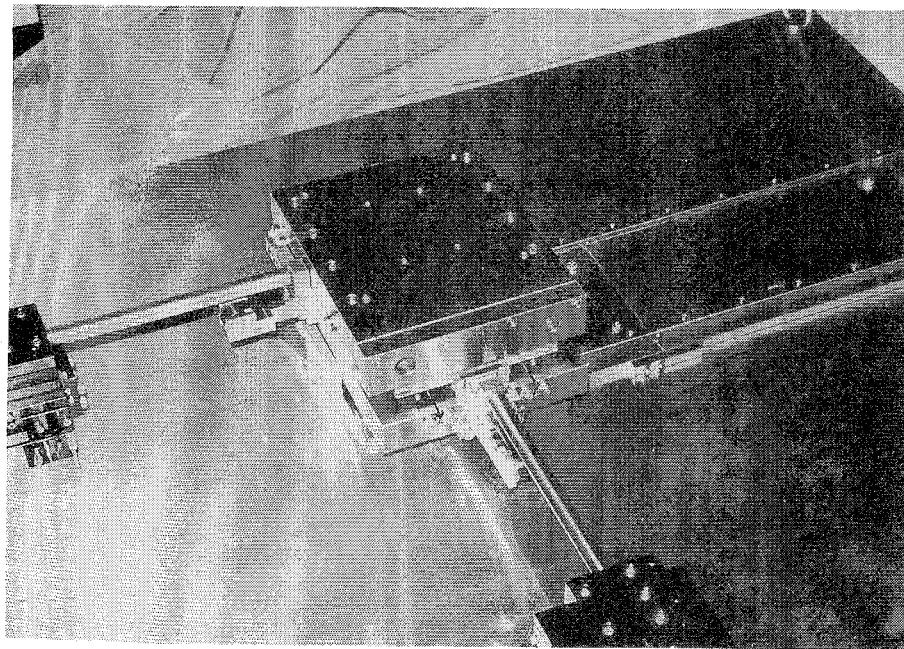


図 3.1: 粗動 XY テーブルの外観 (真空試料室へ設置前)

により直線運動に変換され、ベローズ真空シールを付加したロッドにより試料室内部に導入される。このロッドは熱による膨張・収縮が無いように、室温付近の温度係数がほぼ0である鉄・ニッケル・コバルト合金のインバー材丸棒を使用した。また、テーブルはロールばねにより常にロッド方向に押しつけられており、ガタの無い機構になっている。位置決めはモーター軸に取り付けられたロータリーエンコーダによる通常の方式で、1指令パルスあたり $4\text{ }\mu\text{m}$ の分解能を持つ。テーブルのスライド・レール部分はグリース潤滑の必要があるので、 10^{-5}Pa 程度の高真空用に開発された蒸気圧の低いもの（フォンブリン社 YVAC-3）を用いた。

また、真空試料室に設置する直前に 180°C のオープンで24時間焼き出しを行い、テーブルの表面からの脱ガス現象による真空度低下に注意を払った。

3.3.2 微動 XY テーブル

微動テーブルは数 μm 程度の試料の走査に用いるが、nm オーダーの測定を行なう重要な要素であるため、機械的な運動性能が非常に良いことが要求される。そこで、図 3.2(a) のように可動部分を支持部に対して板ばねで結合する方式を用いることにより、従来のテーブル要素が使用している V 溝やクロス・ローラーガイドのような案内面を一切使わない構造とした。可動部分は板ばねにより両端の4個所を支持された構造で、機構学的には運動の自由度が0である。しかしピエゾ素子を伸縮させると板ばねが同図 (b) のように変形し、横方向の運動は拘束されるが、素子の

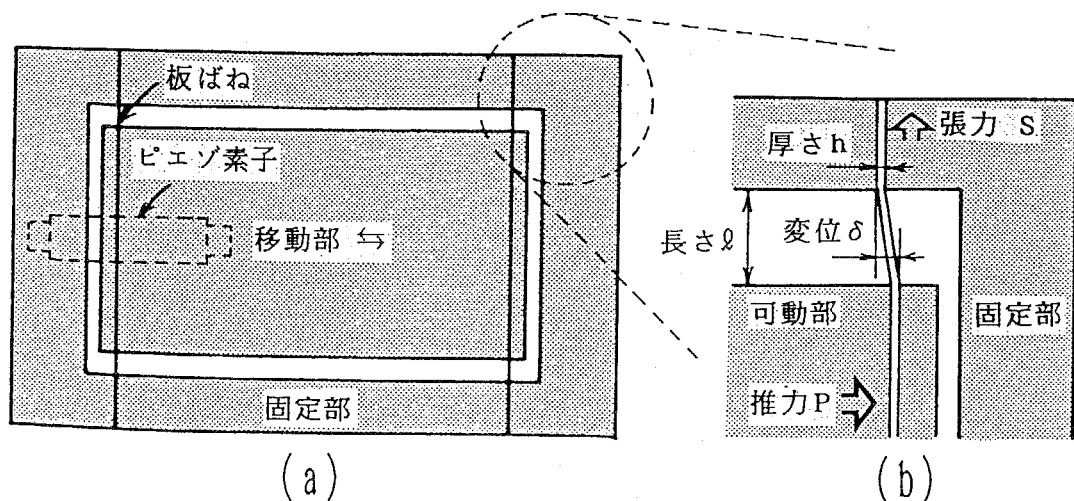


図 3.2: 板ばねで支持した微動テーブル。(a) 基本構成,(b) バネの微小変形の様子。

軸方向にはバネの弾性範囲内で微動することが出来る。

このばねはテーブルを設計する上での重要な要素であるので、図 (b) のモデルについて解析を行なった。両端を固定された板ばねは、 piezo 素子の伸縮量 δ と推力 P に応じて、ばねの長手方向の力 S を生じる。このとき板ばねは非線形の特徴を示し、一個所あたりのばね定数 $K(=\frac{P}{\delta})$ は、板ばねの長さ、厚み、幅をそれぞれ l, h, b 、断面 2 次モーメントを $I_z = \frac{bh^3}{12}$ 、ポアソン比 ν を考慮したヤング率 E' を $E' = \frac{E}{1-\nu^2}$ とし、引張力 S との間に $S = k^2 E' I_z$ の関係が成り立つ場合、

$$K = \frac{k^2 E' I_z}{l - \frac{2}{k} \tanh \frac{kl}{2}} \quad (3.1)$$

で与えられ、テーブル全体のバネ定数は $4 \times K$ で表わされることが知られている^{14, 15)}。しかし、本テーブルは数 μm 以内の微細な送りを使用するため、ほぼ線形領域で使用していると見なして差し支えない。また、これに要する piezo 素子の推力も数 N 以下であり、実用上の問題が無いことが確認できた。

実際に作製した微動テーブルは図 3.3 に見られるように、二つの 1 次元微動テーブルを直角に組み合わせた一体構造となっている。本テーブルは、軽量化の観点から真空用アルミ材により構成し、板ばねは 0.5mm 厚のステンレス製とした。また、アクチュエータには最大ストローク 10 μm の piezo 素子を用いた。素子は 150 倍の増

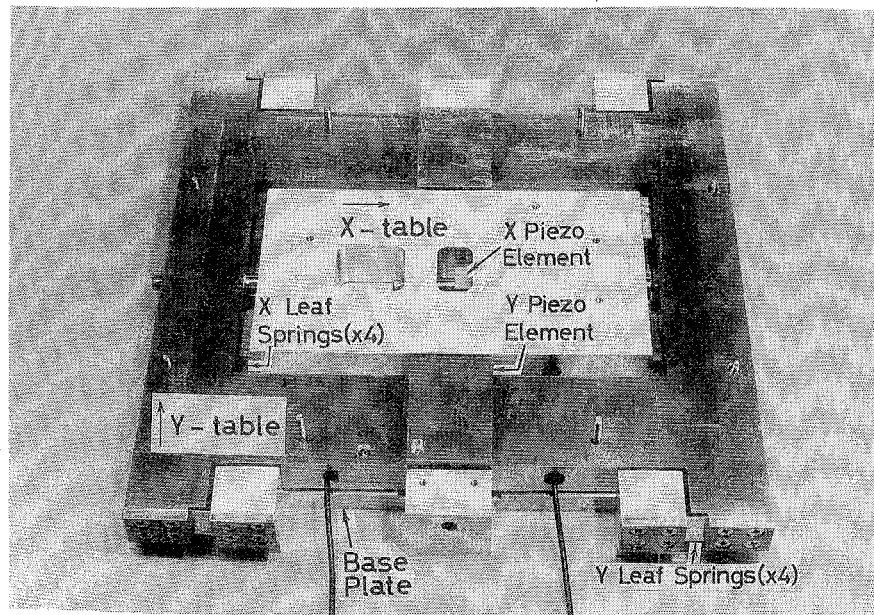


図 3.3: 微動 XY テーブルの外観

幅率を持つ高電圧アンプにより駆動され、直流 10V の入力で 1500V の出力が印加され、このとき最大変位 $10\ \mu\text{m}$ を与える。本アクチュエータは、 piezo 素子に特有のヒステリシス現象を低減し、運動の線形性をよくするため、抵抗線歪ゲージによるフィードバック制御が可能なタイプを用いた。

本テーブルの運動特性を調べるため、HP 社のレーザー干渉システムと角度測定オプションを用いてテーブルの運動三成分であるピッチング、ヨーイング、ローリングを測定した。ローリングについては、テーブル送り量が少ないことから、側方よりレーザーを入射させて測定を行なった。この結果を表 3.1 に示す。これより、最大の運動誤差である Y 軸のピッチングは約 1.3 秒であり、テーブルを $1\ \mu\text{m}$ 送ったとき $6.2 \times 10^{-6}\ \mu\text{m}$ の上下動を生じる微小量となる。これは、縦方向に分解能を持たない SEM では全く問題にならない量である。さらに、その他の運動成分についてもこれ以下の誤差であり、主要な走査方向の X 軸については極めて満足のいく特性が実現できた。

また、本テーブルは水平に 2 段に重ね合わせた一体構造であるため、piezo 素子の推力軸の微少なずれにより、他方のテーブルの板ばね結合部の引っ張り条件に微妙な影響を与える。これともない、非駆動側のテーブルにも動きが現われる干渉運動が起こる。そこでこのような干渉量の測定を行なった結果、表 3.1 に示されているように小さな値であることを確認した。実際の走査時にはテーブル送り量は数 μm なので、干渉量は本測長装置の電子ビーム公称直径 (15nm) 以下となり、実用上の問題にならないことが明らかになった。

軸方向	ピッチング	ヨーイング	ローリング
X 軸送り特性	0.13 秒以内	0.13 秒以内	0.07 秒以内
Y 軸送り特性	1.30 秒以内	0.07 秒以内	0.33 秒以内
X 軸干渉量	52nm/Y 軸送り $25\ \mu\text{m}$		
Y 軸干渉量	17nm/X 軸送り $90\ \mu\text{m}$		

表 3.1: 微動 XY テーブルの運動性能評価結果

テーブルに使用した各要素は、真空中に設置することを考慮して材質等に十分な注意を払った。 piezo素子に使用した電線は絶縁体表面からのガス放出が無いように、テフロン樹脂でコーティングされたものを使用した。またコネクタと電線等の半田付けは、蒸気圧の高い亜鉛を含まない真空シール用の半田であるセロシール（インジウムとスズの50%合金）を使用した。本テーブルも粗動テーブルにならない完成後に慎重に脱脂洗浄を行なうとともに、オープンによる焼き出しを行なった。しかし、セロシールの軟化点が116°Cと低く、piezo素子のキュリー点も100°C程度であるため、80°C程度の低温で長時間行なった。粗動テーブルとの結合はノッキング・ピンによる方式とし、狭い真空試料室内での組み立て作業に配慮した。

以上により粗動および微動の機能を持つ走査テーブルを設計製作するとともに、レーザー干渉計により運動性能の評価を行ない、nmオーダーの測定を行なうのに十分な運動性能を持つことを確認した。

3.4 回転テーブルの設計製作と性能評価

回転テーブルは、マイクロパターンの向きを走査方向に対して自由に調整する、いわゆるオリエンテーションを取るための水平面内の回転機構であり、前述の走査テーブル中央に設置される。本テーブルは電子レンズの近傍に設置されるため無磁気化に配慮し、超音波モーター¹⁵⁾をアクチュエータとして用いた。このモーターの制御パラメータについては詳しい研究がなされていなかったもので、試験系を構成して速度制御特性を明らかにするとともに、ロータリーエンコーダによるフィードバックを用いた位置決め制御系を実現した。また、このテーブルには後述する試料ホルダーとの電力・信号のやりとりのため、10極スリップリングを組み込んだ。本節では、はじめに超音波モーターの制御特性および位置決め制御系について述べたのち、回転テーブル全体について記した。

3.4.1 超音波モーターの駆動原理と制御パラメータ

超音波モーターは通常のモーターと比較し、

1. 薄型形状,

2. 低速回転領域での大トルク,
3. 停止時にローターがロックされる,
4. 磁気を使用しない

などの特長がある。このモーターは図 3.4 に示すように、環状の Piezo 素子により励振されるステーターとダイヤフラム状のローターより構成されており、使用時にはローターは加圧力調整ナットにより適当な圧力でステーターに圧接される。Piezo 素子はステーターの固有振動数に応じて適当な間隔で分極が施されており、 90° 位相のずれた 2 相の正弦波高周波電圧を印加すると、それぞれによる定在波が重畳されてステーター上に環状の進行波を生じる。これにともない、ローターは図 3.5 に示すように、波乗りを行なうようにして回転する。進行波の頂上部分は楕円運動を行っており、ローターとの接触部分での速度成分は進行波自身の向きと反対であるので、ローターもこの向きに回転する。

本モーターの制御パラメータを明らかにするため、ステーター上の進行波について定式化を行なう。励振する 2 相の正弦波電圧をそれぞれ $\cos \omega t$ 、および $\sin(\omega t + \phi)$

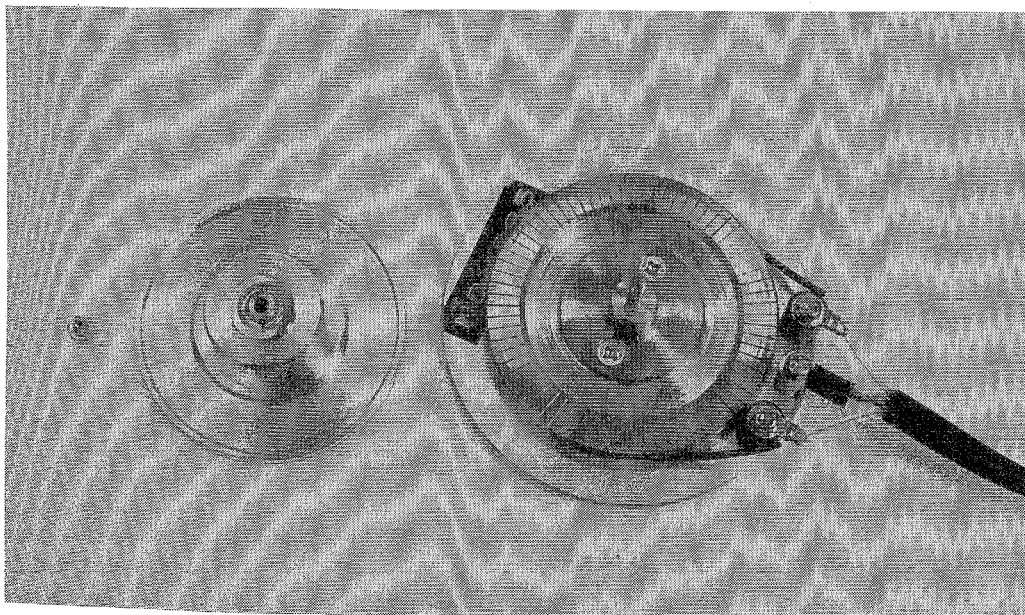


図 3.4: 超音波モーターの構成部品。左より加圧力調整ナット、ローターおよびステーター。

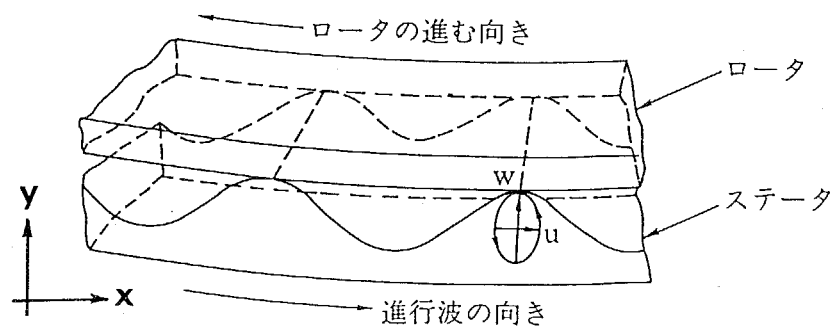


図 3.5: ステータ上の進行波とロータの関係

とすると、これによるステータ上の定在波 y_1 , および y_2 は,

$$y_1 = A \cdot \cos kx \cdot \cos \omega t, \quad (3.2)$$

$$y_2 = B \cdot \sin kx \cdot \sin(\omega t + \phi) \quad (3.3)$$

となる。ここで k は進行波の波長で決まる波数である。この二つの定在波は重畳されて一つの進行波 y ,

$$y = y_1 + y_2 = C \cdot \sin(\omega t + Kx) \quad (3.4)$$

$$C = \sqrt{(A \cdot \cos kx)^2 + AB \cdot \sin 2kx \cdot \sin \phi + (B \cdot \sin kx)^2}$$

$$K = \frac{1}{x} \cdot \tan^{-1} \left(\frac{A}{B} \cdot \cot kx \cdot \sec \phi + \tan \phi \right)$$

を生じる。

ここで、実際にローターの回転に寄与するのは進行波のピークであることを考え、この位置座標 $x_s(t)$ を求めると、 $\frac{\partial y}{\partial x} = 0$ より、

$$x_s(t) = \frac{1}{k} \cdot \tan^{-1} \frac{B}{A} (\tan \omega t \cdot \cos \phi + \sin \phi) \quad (3.5)$$

で与えられる。さらに、頂上部分における x 方向の速度成分 $v_s(t)$ は、 $\frac{\partial x_s}{\partial t}$ より、

$$v_s(t) = \frac{\omega}{k} \cdot \frac{B}{A} \cdot \frac{(1 + \tan^2 \omega t) \cdot \cos \phi}{1 + \left(\frac{B}{A} \cdot \tan \omega t \cdot \cos \phi + \sin \phi \right)^2} \quad (3.6)$$

で表わされる。この速度は瞬時値であり平均的な速度ではないが、速度制御パラメータを調べるには十分である。すなわち、2つの励振源の振幅比 $\frac{B}{A}$, 位相シフト ϕ , 励振周波数 $f(= \frac{\omega}{2\pi})$ の三つのパラメータで速度を制御できることがわかる。

この他に機械的なものとして、ローター・ステータ間の摩擦力、および前述のローターの圧接力なども制御パラメータとして挙げられるが、前者は表面状態に左

右され定式化が難しく、また後者も後述するようにモーターの共振周波数と微妙に係わっているため、制御を行なう上での実際のパラメータとして使用するのには困難である。

3.4.2 各パラメータによる速度制御特性

前小節で明らかにした超音波モーターの速度制御パラメータに対する特性を調べるため、図 3.6 に示した系により評価を行なった。この系は励振周波数 f ，位相シフト ϕ ，振幅 $\frac{B}{A}$ などが制御できるとともに、チョップによる制御も行なうことができる構成となっている。

使用したモーターは新生工業製のもので、基本的なドライブ条件は、ステーター共振周波数 43.5kHz，印加電圧 90Vpp，位相差 $\phi = 0$ ，定格トルク 0.49N・m(5kg・cm) である。また、加圧力調整ナットの締め付けトルクは経験的に決定し、 2.45×10^{-2} N・m(250g・cm) とした。各種特性試験の結果を図 3.7 に示す。

振幅比 $\frac{B}{A}$ による速度制御は線形性の良いのが特長であるが、比を 0 にする前に回

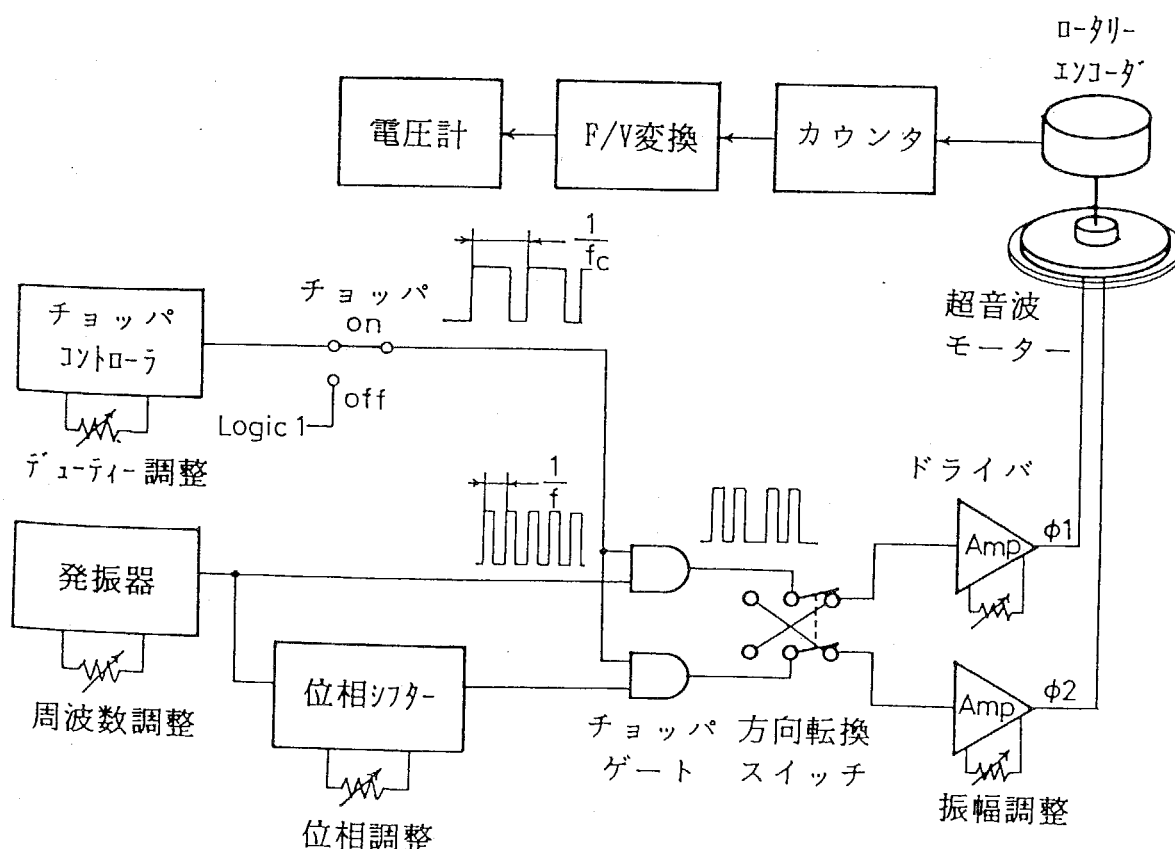


図 3.6: 特性試験に用いた実験系

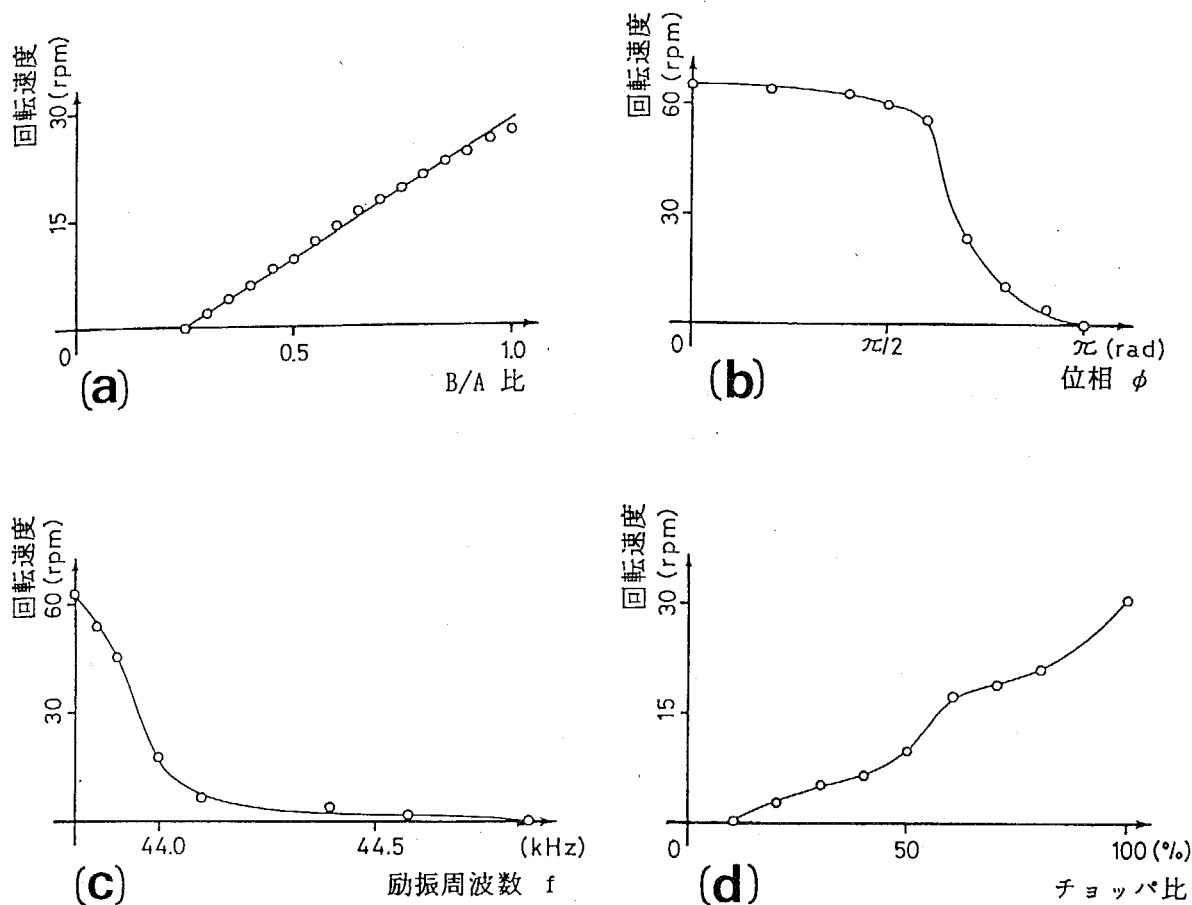


図 3.7: 速度制御特性の試験結果. (a) 振幅比 $\frac{B}{A}$, (b) 位相シフト ϕ , (c) 励振周波数 f , および (d) チョップ制御による.

転が停止してしまい、低速時のトルクが小さい。これは、モーターが回転するためには、ある程度の進行波の成長が必要であることを示唆する。

位相差 ϕ による制御は非線形性が大きいが、 π を中心として対称な特性になるため、ここを中心に制御をかけることにより励振相を入れ換えることなく、滑らかに回転方向を転換することが出来る。

上記 2 つの制御方式の共通の問題点として、励振をいったん止めるとローターが再起動しにくいことが挙げられる。これは励振時と停止時のステーター共振周波数が異なることに起因する。すなわち、励振時にステーターにかかる圧力は停止時に比べて進行波の上下動による分だけ軽減されている。したがって、ステーターの剛性は停止時の方が等価的に大きくなるため共振周波数も高くなり、再起動のためには励振周波数を少し高くするか、加圧力調整ナットを緩めて圧力を軽減する必要がある。

そこで周波数制御によりモーターの制御を行なうと、スムーズなスタートを実現することが出来る。実際には励振周波数を高いほうから共振周波数に近づけて行くことにより、大きなトルクでローターのスロー・スタートが可能となった。

チョップのデューティー比 ($\frac{\text{励振時間}}{\text{チョップ周期}}$ の百分率) による制御は、線形性は良くないが低速回転時でも安定したトルクが得られた。図 3.7(d) でのチョップ周波数は 125Hz を使用したが、振動、チョップノイズともかなり大きかった。そこで、チョップ周波数を上げていったところ、デューティー比 50% でチョップ周波数が 1kHz を少し上回った付近で回転が不安定になった。このことより、チョップされたドライブ信号には少なくとも 20 個程度の波連を含む必要があるようである。

以上、一連の制御特性の調査により、励振周波数を速度制御パラメータに用いることが最適であることが明らかになった。

3.4.3 超音波モーターによる位置決め制御系

超音波モーターの位置決め要素としての性能を調べるため、図 3.8 に示すようなマイクロコンピュータとロータリーエンコーダによるデジタルサーボ系を構成した。超音波モーターの回転角度はロータリーエンコーダにより検出され、目標値と比較の後、PLL 発振器に入力される。ここでの発振波形は、ドライバで電力増幅されたのち、超音波モーターの励振入力となる。

超音波モーターの制御要素としての特性は、180ms 程度の速い応答速度を持つ 1

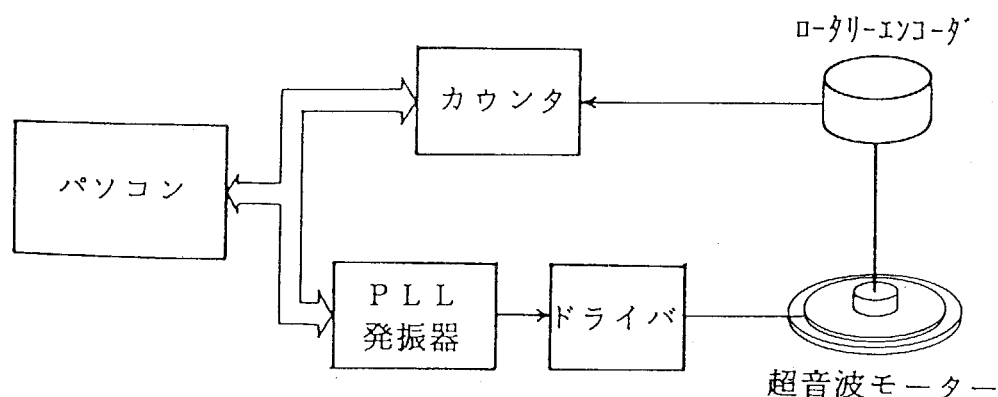


図 3.8: 超音波モーターのサーボ制御系

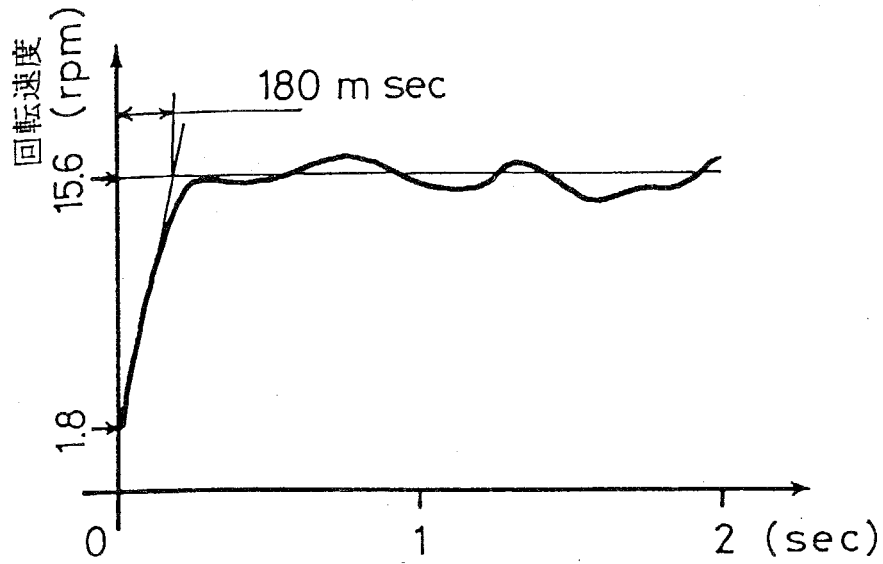


図 3.9: 超音波モーターのステップ応答

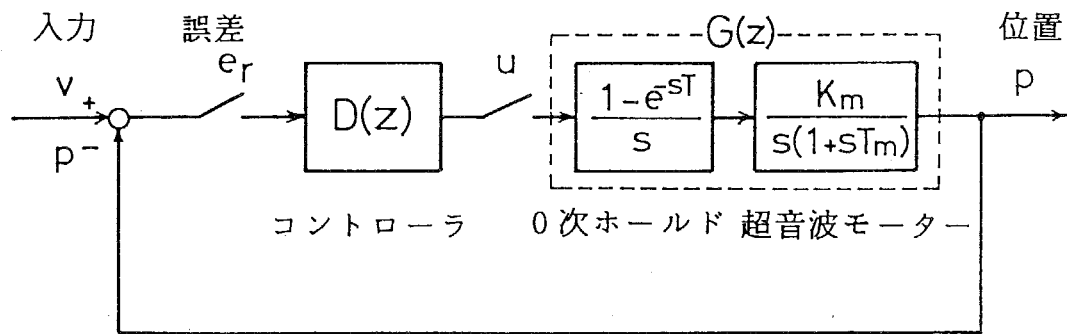


図 3.10: サーボ系のブロック図

次系であることが、図 3.9 に示すステップ応答から明らかになった。ここでオーバーシュートのように見えるのは、ローター・ステーター間の摩擦の不安定さによるワウ・フラッターである。

本サーボ系のブロック図を示すと、図 3.10 に示すように 0 次のサンプルホールドを介した系となる。ここでの入力 v から出力 p までのパルス伝達関数は、

$$H(z) = Z \left(\frac{p(t)}{v(t)} \right) \quad (3.7)$$

$$= \frac{[T - T_m \cdot D_m] \cdot z + T_m \cdot D_m - T \cdot e^{-\frac{T}{T_m}}}{z^2 + \left\{ K_d [T - T_m \cdot D_m] - 1 - e^{-\frac{T}{T_m}} \right\} \cdot z + K_d [T_m \cdot D_m - T \cdot e^{-\frac{T}{T_m}}] + e^{-\frac{T}{T_m}}}$$

$$D_m = 1 - e^{-\frac{T}{T_m}}$$

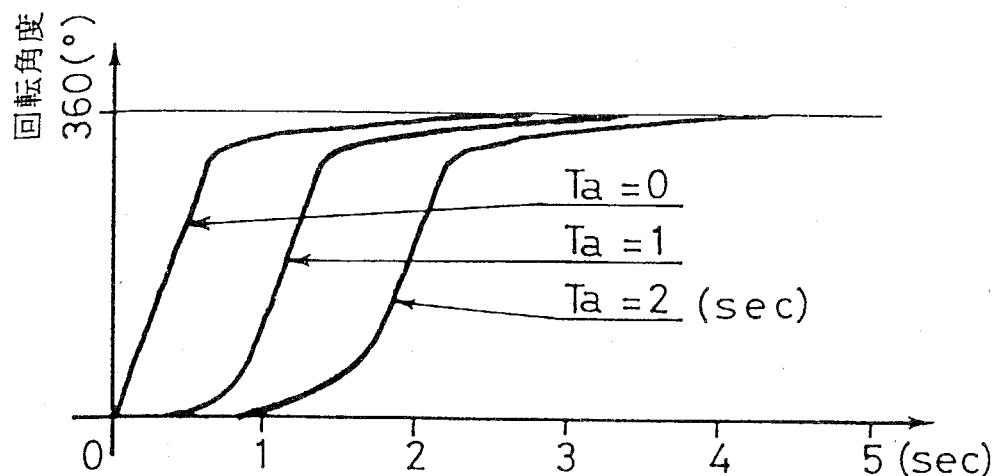


図 3.11: 1 回転コマンドに対する応答例

で表わされる．ここで， T は 0 次ホールドの時定数， T_m ， K_m は超音波モーターも時定数と比例定数である．これは連続系での 2 次系に相当し，モーターの位置決め制御系としてごく一般的な形である．

制御則は，スロースタートを実行するため，ある一定の時間 T_a だけ等加速を行なうように，

$$u = \begin{cases} \min(K_d \times e_r, \alpha t) & (0 \leq t \leq T_a) \\ K_d \times e_r & (t \geq T_a) \end{cases} \quad (3.8)$$

で与えた．ここで， u は PLL 発振器への出力， K_d は比例ゲイン， α は加速定数である．実際の実験では，1 回転あたり 4000 パルスの分解能を持つロータリーエンコーダを使用した．位置データのサブリング間隔は 10ms で，このときの制御プログラムのオーバーヘッドは約 $120 \mu s$ であった．図 3.11 に，本制御系において 1 回転のコマンドを与えたときの応答の様子を示す．このときのパラメータは， $T_m=180ms$ ， $T=10ms$ ， $K_d=0.08$ である．スロースタートを与えない場合は約 2.6s で整定しており，エンコーダの分解能である $1/4000$ 回転 (角度で 5.4 分) の性能を持つ位置決め制御系が実現できた．

3.4.4 回転テーブルの構成

回転テーブルは，図 3.12 のように底部にアクチュエータである超音波モーターを配置し，中央部に後述するピエゾ駆動機構と信号や電力を送受するスリップリングを配置した構造となっている．外筒等の構造体は，SUS304 材により作製した．同様

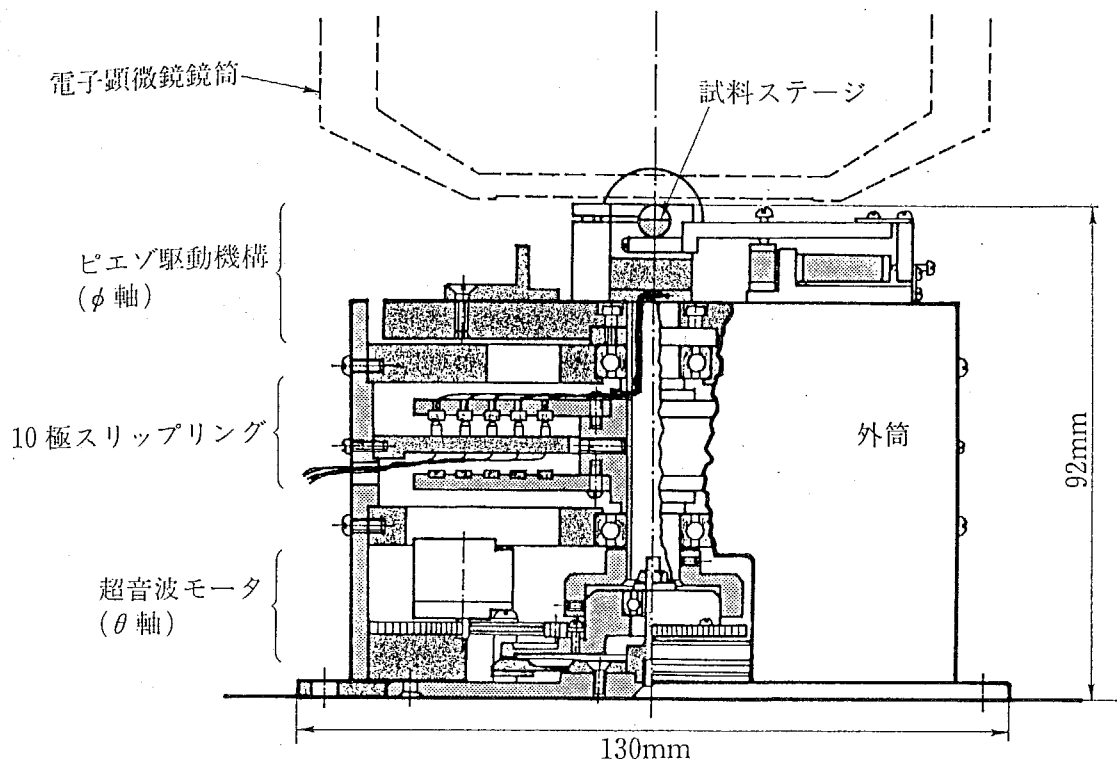


図 3.12: 回転テーブルの断面図 (ピエゾ駆動機構を含む)

に、ここで使用した超音波モーターは真空での使用を考慮して、ステーターをステンレスで製作した。また、ローターの接触部分にはポリイミド・アミド樹脂をコーティングして、摩擦特性を向上させるとともに摩耗に配慮した。超音波モーターの回転は、ローターに取り付けられたエンジニアリング・プラスチック製の歯車を介して、1回転当りの分解能が800パルスのロータリーエンコーダに伝達されるようになっている。ローターより立ち上げられたシャフトはベアリングにより支持され、上部のテーブルに結合されている。このベアリングは無潤滑であるが、耐摩耗性を向上させるため銀のイオンプレーティングが施された真空用のものを使用した。スリップリングは全10極の構成で、回転板はマシンブル・セラミクスにより製作して絶縁と軽量性に配慮した。回転電極とブラシ類は金メッキした銅合金を使用して、熱硬化性エポキシ接着剤によりセラミクス円板に固定した。ここで使用する電線もテフロン樹脂コーティングされたものを使用して、脱ガスに留意した。

位置決め制御系は前節と同じ系を用いており、エンコーダーの分解能が位置決め分解能となるが、マニュアルによる制御もできるように配慮した。以上により、超

音波モーターのサーボ制御系を実現するとともに、これを用いて位置決め制御が可能な真空用回転テーブルを構成した。

3.5 試料ホルダーの設計製作と性能評価

試料ホルダーは、試料の上面および断面の観測を行なうため、ティルトを調整する機構が設けられている。前図 3.12 から分かるように、電子レンズ直下に 1mm にまで接近して設置されるため、設置スペースの制約を受けると同時に、アクチュエータには特別な配慮が必要となった。そこで、独自のメカニズムであるピエゾ駆動機構を開発してこれに対処した。ホルダー本体は直径 6mm の棒材によりスピンドル状に製作して小型化を図るとともに、中央部に切り欠きを設けて試料ステージとした。このスピンドルはピエゾ駆動機構により駆動され、ロータリーエンコーダによる位置決め制御が可能となっている。以下これらについて詳述する。

3.5.1 ピエゾ駆動機構の原理

ピエゾ駆動機構は、微少な送りを連続することにより大きなストロークを得ることが出来る尺取虫機構（インチワーム・メカニズム）をベースとした回転機構である。通常、尺取虫機構は直線運動に用いられるが、本機構ではスピンドルの回転運動に対して応用したところに新規性がある。図 3.13 にピエゾ駆動機構の概略図を示す。スピンドルを中心にして、2つのアクチュエータ・ユニットが対象に配置されている。これらのユニットのアクチュエータ・シューはピエゾ素子により、上下および前後方向の動作を行なう。すなわち、クランプ用のピエゾ素子に電圧を印加することによりスピンドルの動きを拘束する動作（クランプ）を行なうとともに、フィード用のピエゾ素子による前後動によってスピンドルの微小回転動作（フィード）を行なう。ピエゾ素子の伸縮量は、印加電圧 150V においてフィード用が $16\ \mu\text{m}$ 、クランプ用が $7\ \mu\text{m}$ であり、そのままの大きさではクランプ部分の工作精度が厳しくなるとともにフィード量が小さくなるので、板ばねによるてこ機構を用いて変位を拡大した。拡大量はフィード側の $\frac{L_2}{L_1}$ が約 5 倍、クランプ側の $\frac{L_2}{L_1}$ が約 1.6 倍である。

スピンドルの回転は、図 3.14 に示すようなシーケンスに従って、逐次クランプとフィード動作を行なうことにより実現される。すなわち、

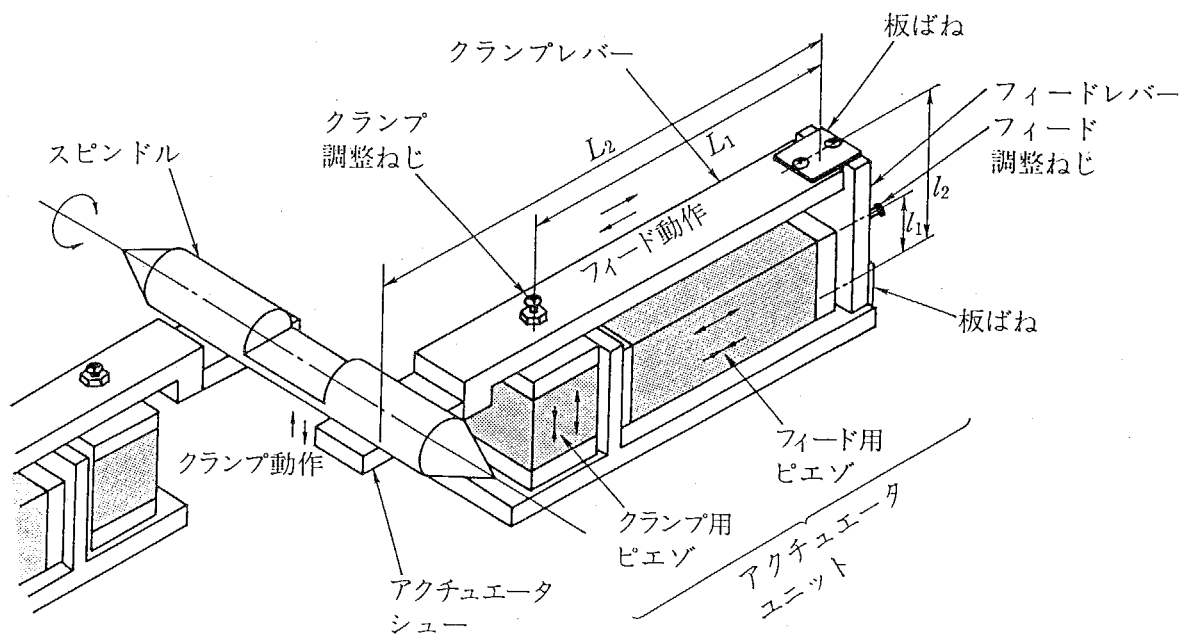


図 3.13: ピエゾ駆動機構の概略

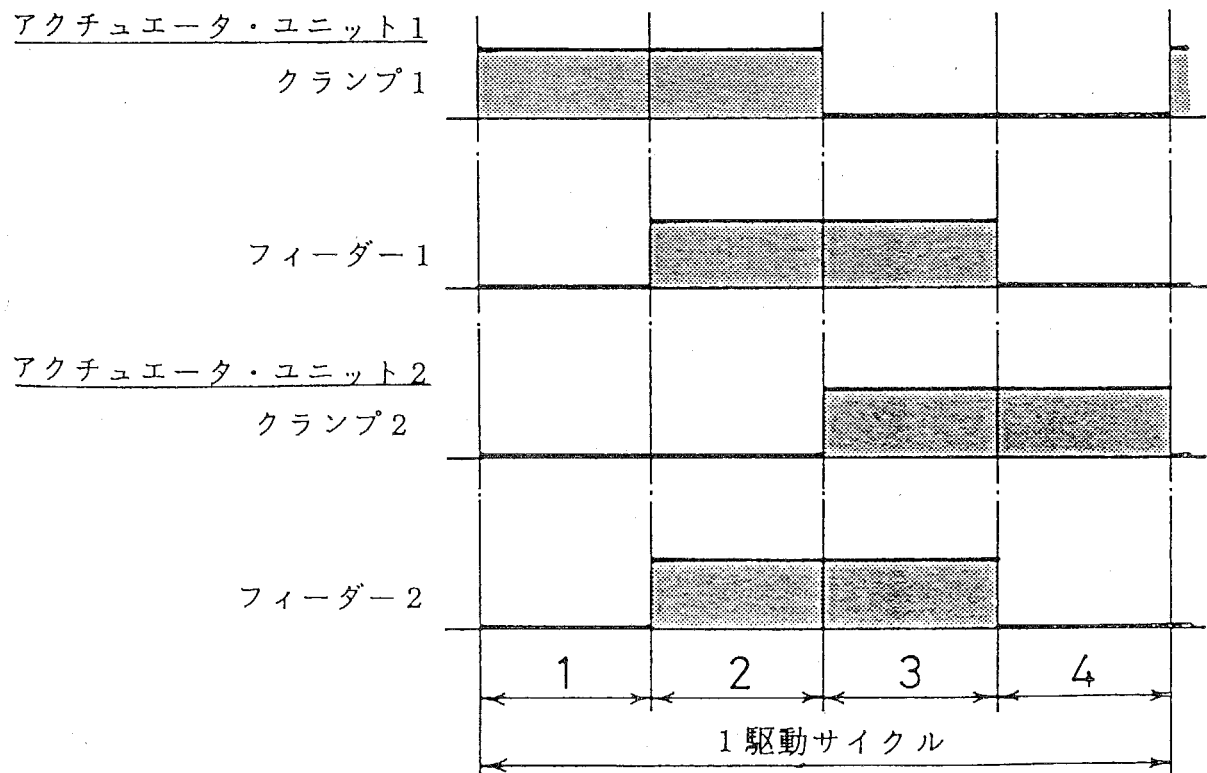


図 3.14: アクチュエータとクランプの駆動シーケンス

1. 一方のユニットのクランプ状態を解除し、他方をクランプ状態にしてスピンドルに接触させる、
2. 接触側のユニットをフィード動作させると、アクチュエータ・シューとの摩擦によりスピンドルが小量回転する、
3. 現状を維持するため、他方のユニットによりクランプ状態にするとともに、フィード動作させたユニットのクランプを解除する、
4. クランプ側のユニットをフィードするとともに、他方をもとの位置に逆フィードする、

という四つのフェーズの繰り返しにより行われる。回転の向きは、アクチュエータを前後するタイミングをクランプのタイミングに対して反転することにより自由に変えることができる。

3.5.2 ピエゾ駆動機構の実際と位置決め制御系

ピエゾ駆動機構は、前節で述べた回転テーブル上に設置されている。この様子を図 3.15 に示す。真空に対する配慮はこれまでに述べてきたのと同様で、脱ガス現象を極力少なくすることと、電子レンズの磁場に影響を与えないことを念頭においた。回転テーブルは電気的な絶縁性を確保するためマシナブル・セラミクス製で、その他の部材にはおもにステンレスを使用した。試料ホルダーを兼ねるスピンドルは、中央部に切り欠きを設けてステージとするとともに両端を円錐状にテーパ加工しており、ミニチュア・ベアリングにより支持している。このスピンドルは、回転させたときに振れが大きいとアクチュエータ・シューに接触してしまうので、ラッピング加工を用いて円筒部分とテーパの中心が一致するように特に念入りに工作した。アクチュエータ・シューにはアルミを用いたが、これは硬度の大きいステンレス製のスピンドルとの接触で、適度の変形と摩擦を持たせるためである。このシューは摩耗時に交換可能なように、スローアウェイ・チップ状に製作した。この機構は、0.4mm 厚のステンレス製板ばねにより連結する構造を取った。クランプ用のピエゾ素子とてこの間には、クランプ動作の上下動とフィード動作の前後動が加わるので、これをスムーズに行なうため直径 2.5mm のテフロン球を置いた。ピエゾ素子は、電

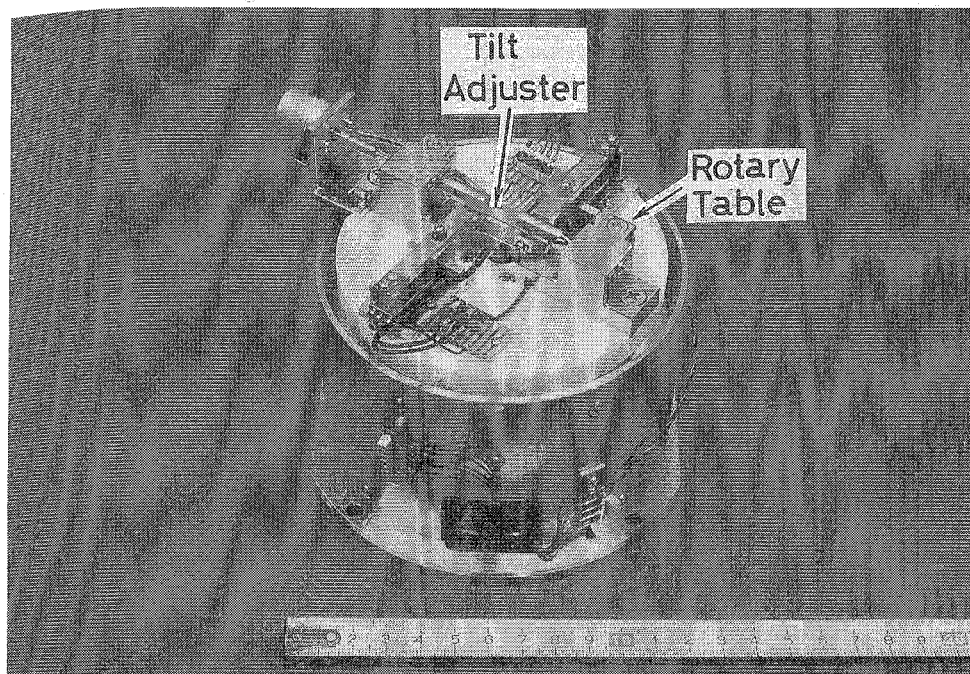


図 3.15: 回転テーブル上に設置されたピエゾ駆動機構

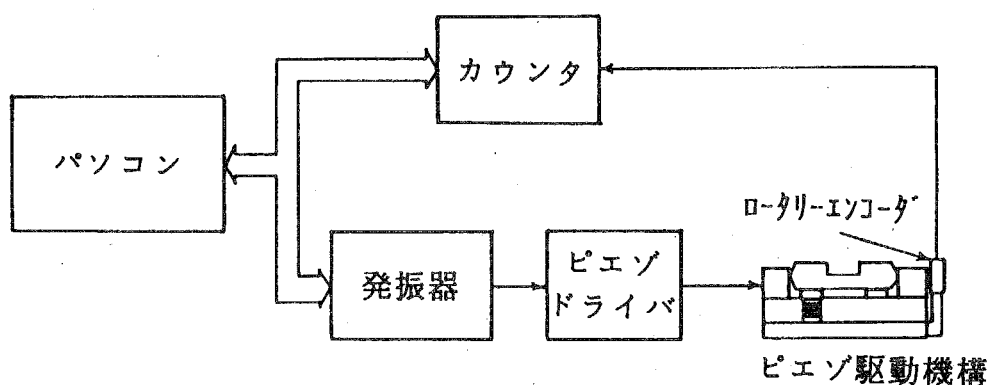


図 3.16: ピエゾ駆動機構のデジタル制御系

気的には 150Hz 程度の周波数まで $2\mu\text{F}$ のコンデンサとして扱えるので、駆動回路は充放電に十分配慮してトータム・ポール型のトランジスタ駆動とした。また、位置決めを行なうためにスピンドルと同軸上に 1 回転あたりの分解能が 400 パルスのロータリィエンコーダを設置した。このエンコーダは、1mm のシャフトを介してスピンドルと結合されている。

このようにして製作を行なったピエゾ駆動機構の回転性能を調べ、位置決め制御系を構成するため、図 3.16 に示すデジタル制御系を構成した。これは、ロータリィエンコーダの位置情報に応じて駆動周波数を変え、回転速度を制御、位置決めを行なう系である。この系は前述の超音波モーターのサーボ制御系と可能な限り同様の

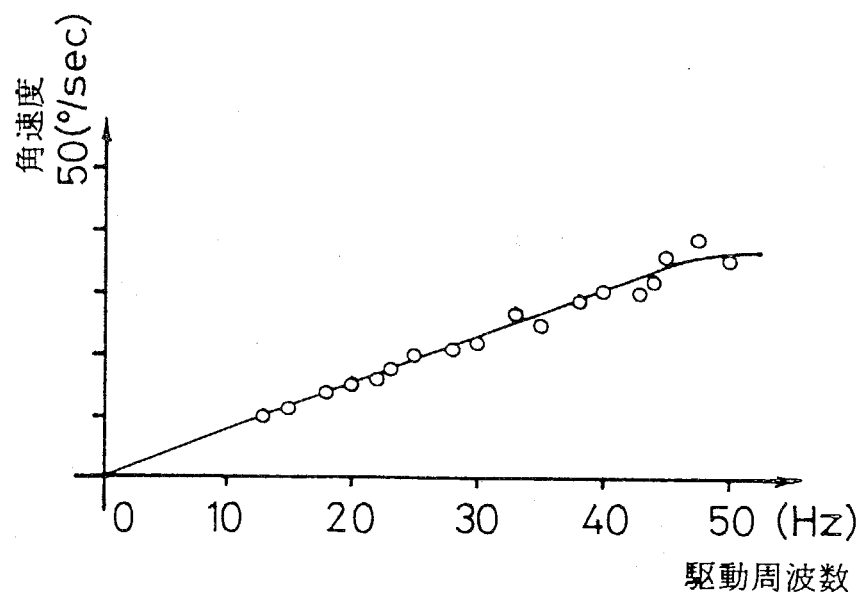


図 3.17: 回転速度特性の評価

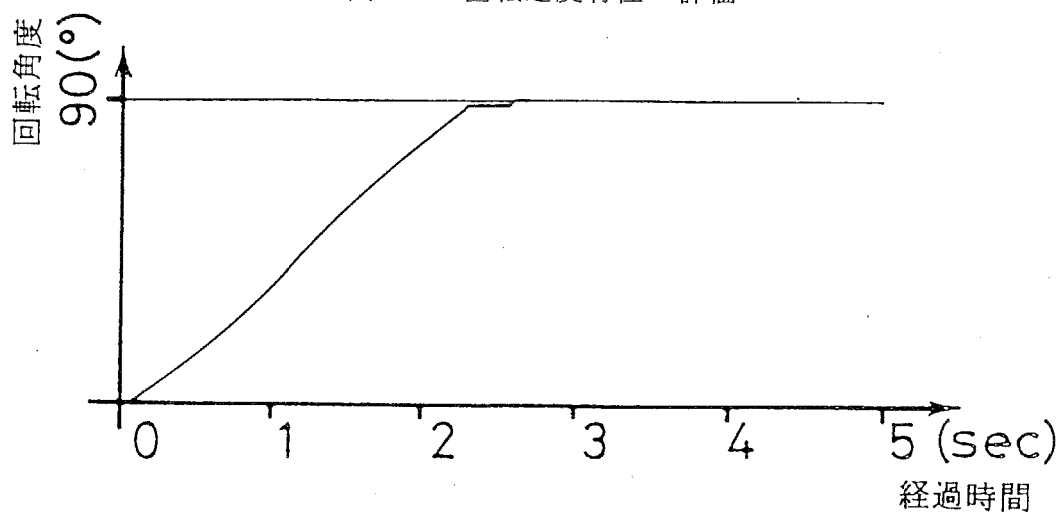


図 3.18: 90°回転命令に対する位置決め制御系のステップ応答

構成とし、ハード部分の設計や制御ソフトウェアの共通化を図った。

はじめに一駆動サイクルの周波数と回転速度の関係を調べた。この様子を図 3.17 に示す。50Hz 付近までは駆動周波数と回転速度は比例したが、これ以上の周波数では、てこ機構部分の機械的な応答性に制限されてうまく回転しなかった。最高回転速度は周波数 48Hz のとき $38.3^{\circ}/s$ で、1 回転あたりの時間に直すと約 9.4s である。

また、位置決め制御系における 90°回転命令に対する応答を図 3.18 に示す。これよりスピンドル回転角度は約 2.7s で整定しており、分解能 0.9° の位置決め制御系が実現できた。

真空槽に設置する前の焼き出し等は、走査テーブルの条件に準じて 80°の低温で行なった。また、実際に SEM により画像を観察している最中にピエゾ駆動機構および回転テーブルを動作させてみたが、これらの影響による画像の乱れ等は全く見られなかった。これより本機構は、所期の性能を十分に発揮していることが確認できた。

3.6 章のまとめ

本章では、SEM の真空試料室に設置する多自由度走査機構について述べた。この機構は、走査テーブル、回転テーブルおよびピエゾ駆動機構の組合せにより構成され、XY 方向の粗動と微動、水平面内の回転およびティルトの四つの運動の制御を行なうことが出来る。各要素は 10^{-5} Pa という高真空にさらされるため、部材および工作法には表面からの脱ガスが極力無いようなものを採用するとともに、SEM の電子レンズ磁界に影響を与えないようなアクチュエータを用いた。XY 粗動テーブルのみ直流サーボモーターにより駆動したが、その他の機構はすべてピエゾ素子を登載してアクチュエータとの一体化を図り、真空試料室内での設置の自由度を向上した。微動テーブルは、従来の微動テーブルに必ず採用されていた機械的な案内面を廃し、板ばねによる支持機構を採用し、数 μ m の距離をスムーズに移動するためのテーブルとして十分な運動性能を実現した。回転テーブルのアクチュエータには超音波モーターを採用し、同モーターによる位置決め制御系を初めて実現した。また、超音波モーターの速度制御特性について理論・実験の両面から明らかにするとともに、周波数による速度制御が最適であることを確認した。さらに、電子レンズの直下に設置される試料ホルダーには、独自の構造を持つピエゾ駆動機構を用いてサーボ制御系を構成した。これら一連のメカニズムにより、従来のような機械結合部を持たない SEM 真空試料室用の多自由度試料走査機構を実現した。

第 4 章

測長用高分解能レーザー干渉計の開発

4.1 はじめに

測長用高分解能レーザー干渉計は、電子ビーム絶対測長装置の基準スケールとして使用される重要な構成要素である。マイクロパターンの測定ではサブ μm の寸法を対象領域としているので、通常のマイケルソン型の光波干渉計の分解能では基準スケールとしての性能が不足する。そこで主要な走査方向である X 軸用には、He-Ne ゼーマン・レーザーによる測長システムとプリズム光学系の組合せにより、 $0.8\text{nm}(=\lambda/800)$ の高分解能を持つ光路差増倍型差動干渉計を開発して十分な性能を確保した。また、Y 軸方向は走査の位置決めに使うことが主な目的であるため X 軸ほどの分解能は必要とせず、真空試料室内のスペース的な制約も考慮して、小さな筐体中にマイケルソン型の干渉計を組み込んだファイバー結合型干渉計を開発し、分解能 $10\text{nm}(=\lambda/64)$ を達成した。

このような測定機のスケールとしての干渉計を開発するにあたっては、光学要素の性能に十分な注意を払わねばならない。特に反射鏡などの光学要素の平面度は、反射波面の形状を左右するため最も重要な特性評価項目である。通常、平面度を求めるためには、基準平面を用いて被測定面と干渉縞を生じさせ、これを評価することにより測定を行なう。最近ではデジタル画像処理により干渉縞の解析を行なうことが一般的であるが、限られた画素数の中で有効に表面の凹凸情報を抽出するための測定条件が求められていなかった。そこで、情報理論による干渉縞の発生本数の最適化を行い、液面干渉計により確認実験を行なった。これより、従来経験則しか用いられていなかった平面度測定の方法について、理論的な指針を得ることが出来た。

本章では、はじめに平面度の精密測定法について述べたのち、光路長増倍型差動干渉計およびファイバー干渉計の各要素について記述した。

4.2 測定機用光学要素の平面度精密測定法

光学部品などの平面度を測定するためには、オプティカル・フラットなどの基準平面を用いて被測定面との間にフィゾー干渉縞を発生させ、この縞の曲がり具合から平面内の最大高低差すなわち平面度を求めている¹⁷⁾。従来この測定は干渉縞を写真に撮影して引き延ばし拡大し、作業者が手作業で平面度を計算していた。ここで、測定面に何本程度の干渉縞を生じさせるかは、作業者の経験に頼っていた。

縞の解析にデジタル画像処理が用いられるようになると、有限の画素から構成される画像に対してどのような干渉縞を生じさせるかの指針が必要となったが、このような研究はわずかに Macy¹⁸⁾により、測定の標準偏差を最小にする観点から研究されているにすぎなかった。そこで、画像に含まれる凹凸情報が最大になるように、情報理論のエントロピーを用いて干渉縞のデジタル画像への割り当ての指針を導出した。また、計算機シミュレーションおよび液面干渉計による実験により本方法の有用性を確認した。以下、これらについて記す。

4.2.1 デジタル画像による平面度測定

平面度の測定で使用する干渉縞は、図 4.1 に示すように、被測定面に対し基準平面を若干傾けて得られる $\frac{\lambda}{2}$ おきの明暗間隔を持つ等厚干渉縞 (フィゾー・フリンジ) である。これは光学部品が通常 $\frac{\lambda}{20}$ 以下の平面度で仕上げられているため、基準参照面を被測定面に対して完全に平行にすると、縞の明暗の判別が不可能なるからである。平面度は被測定面内の凹凸量 z の最大量として与えられるが、ある位置 (x, y) における高さ方向の凹凸 $z(x, y)$ は、光の波長を λ 、等厚干渉縞の間隔を D 、縞の歪みを $d(x, y)$ とすれば、

$$z(x, y) = \frac{d(x, y)}{D} \times \frac{\lambda}{2} \quad (4.1)$$

で表わされる。干渉縞の強度分布 $I(x, y)$ そのものは、キャリア空間周波数を $f_c (= \frac{1}{D})$ とすると

$$I(x, y) = a(x, y) + b(x, y) \times \cos[2\pi f_c x + \phi(x, y)] \quad (4.2)$$

$$\phi(x, y) = \frac{4\pi}{\lambda} \times z(x, y) \quad (4.3)$$

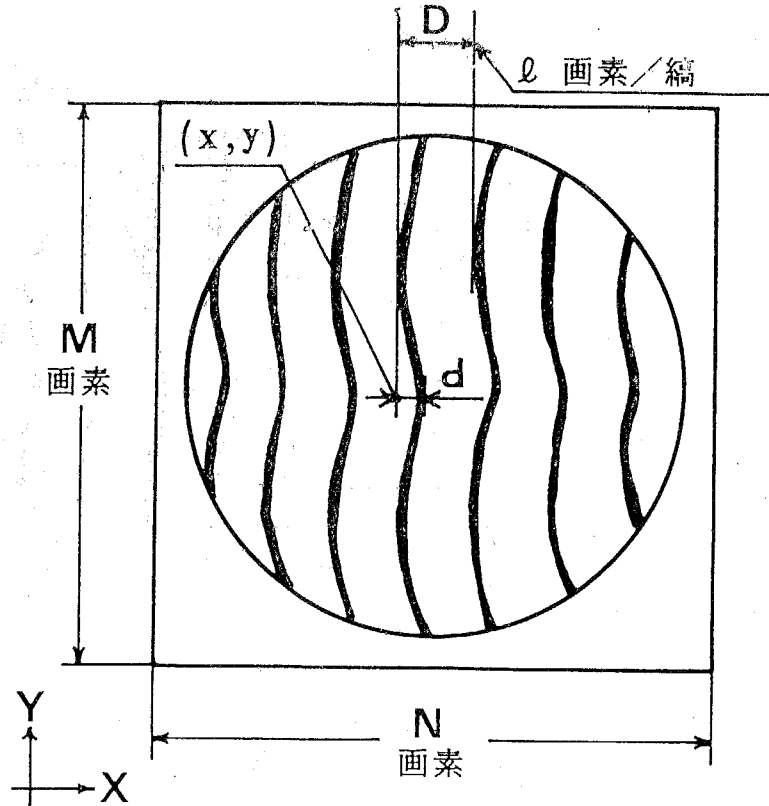


図 4.1: $M \times N$ 画素のデジタル画像における等厚干渉縞

の強度分布を持つ．ここで， $a(x,y), b(x,y)$ はキャリア空間周波数により生じる干渉縞よりも緩慢な強度分布とする．これより，等厚干渉縞は表面形状 $z(x,y)$ によりキャリア空間周波数による干渉縞が位相変調を受けたものであることが分かる．これはまた，表面情報の凹凸情報を干渉縞間隔 D でサンプリングしていることにも相当する．

縞の解析を $M \times N$ 画素のデジタル画像において行なう場合，図 4.1 の水平方向の一本の走査線について凹凸情報を求め，これを垂直方向に繰り返すことにより全面の凹凸情報を得ることが出来る．ここで，干渉縞を l 画素おきに発生させたとすると，画像上の全干渉縞本数は $\frac{N}{l}$ 本となり，このときの高さ方向の測定分解能は $\frac{\lambda}{2} \cdot \frac{1}{l}$ になる．一方，サンプリング定理のナイキスト周波数により縞本数の最大値は $\frac{N}{2}$ と決定されるが，これは 2 画素おきに 1 縞発生させることに相当する．このとき測定分解能は， $\frac{\lambda}{4}$ と最小になる．また，最小値は全画像で 1 縞の場合で，測定分解能は $\frac{\lambda}{2N}$ と最大になる．すなわち，サンプリング点数と測定分解能にはトレードオフの関係があり，測定対象に応じて必要な精度と測定点数を決定する必要がある．

4.2.2 情報理論による干渉縞幅の最適化

等厚干渉縞による平面度の測定は、図 4.2 に示すように、干渉縞の明部（あるいは暗部）が干渉縞 1 本あたりの占める画素 l 個のどの部分を占めるかを決定することに他ならない。この位置は表面の凹凸形状により決定されるが、これが全く未知の場合には確率過程としてとらえることが出来る。すなわち測定におけるピーク位置の同定は、凹凸情報の通報と見なすことが出来る。そこで、横方向の走査線 1 本当りの情報量（エントロピー）を最大にする事を考える。

ピーク位置が l 個の画素のなかで i 番目になる確率を p_i とすると、このときの確率事象系 A は

$$A = \begin{bmatrix} 1 & \cdots & i & \cdots & l \\ p_1 & \cdots & p_i & \cdots & p_l \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

により表わされる。このときのシャノンの情報量 H_0 は、

$$H_0 = \sum_{i=1}^l p_i \cdot \log \frac{1}{p_i} \quad (4.5)$$

で与えられる。これは 1 縞あたりの情報量なので、走査線 1 本あたりの情報量 H は干渉縞の本数 $\frac{N}{l}$ を掛けることにより、

$$H = \frac{N}{l} \times H_0 = \frac{N}{l} \times \sum_{i=1}^l p_i \cdot \log \frac{1}{p_i} \quad (4.6)$$

となる。

最も単純な場合として、確率事象系が一様分布の場合、 p_i は等しい確率 $\frac{1}{l}$ を持つ。このときの情報量 H は

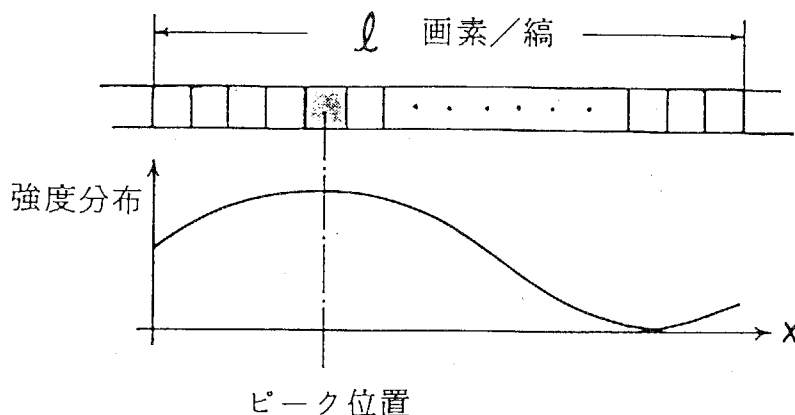


図 4.2: l 画素内での干渉縞ピーク位置の決定

$$H = \frac{N}{l} \times \log l \quad (4.7)$$

と計算される。この式は、前述したトレードオフの関係を満たしており、1次微分 $\frac{\partial H}{\partial l}$ をとると、

$$\frac{\partial H}{\partial l} = \frac{cN}{l^2} \times (1 - \ln l) \quad (4.8)$$

が得られる。ここで c は、対数の底の変換による定数である。 $\frac{\partial H}{\partial l} = 0$ より最大情報量を与える l を求めると、 $l = e \simeq 3$ となる。すなわち3画素おきに干渉縞を発生させると、1走査線あたりの計測情報量が最大となる。

より現実的な確率分布として、 l 画素の幅に $\pm 3\sigma$ が広がるガウシアン分布を考える。これは、被測定面が非常にランダムな凹凸から構成され、隣合うサンプル点間では凹凸に全く関連性が無いと仮定した場合である。ガウシアン分布の情報量 H' は、

$$H' = \log \sqrt{2\pi e} \sigma \quad (4.9)$$

であることが知られているので¹⁹⁾、 $6\sigma = l$ を考慮すれば H_0 は、

$$H_0 = \log \frac{\sqrt{2\pi e} l}{6} \quad (4.10)$$

が得られる。そこで、走査線1本当りの情報量 H は、

$$H = \frac{N}{l} \times \log \frac{\sqrt{2\pi e} l}{6} \quad (4.11)$$

となり、最大値を与える l を求めるため $\frac{\partial H}{\partial l} = 0$ を計算すると、

$$\frac{\partial H}{\partial l} = \frac{cN}{l^2} \left[1 - \ln \frac{\sqrt{2\pi e} l}{6} \right] = 0 \quad (4.12)$$

が得られる。これより $l = 3\sqrt{\frac{2e}{\pi}} \simeq 4$ となり、4画素おきに干渉縞を発生させると最大の情報量が得られることになる。これは、きわめてランダムな凹凸を持つ平面の情報量を、干渉縞を使用して最も効率よく、かつ取りこぼしが無いように抽出する条件として位置づけることが出来る。また本法により得られた結果は、Macy の FFT による干渉縞解析の実験結果¹⁷⁾と一致している。

4.2.3 シミュレーションによる解析

前小節で導出した条件の有効性を確認するため、図4.3に示すような手順によりシミュレーションを行った。はじめに、 $6\sigma \leq \frac{\lambda}{2}$ の条件を満たす乱数により、 $N=256$ 画

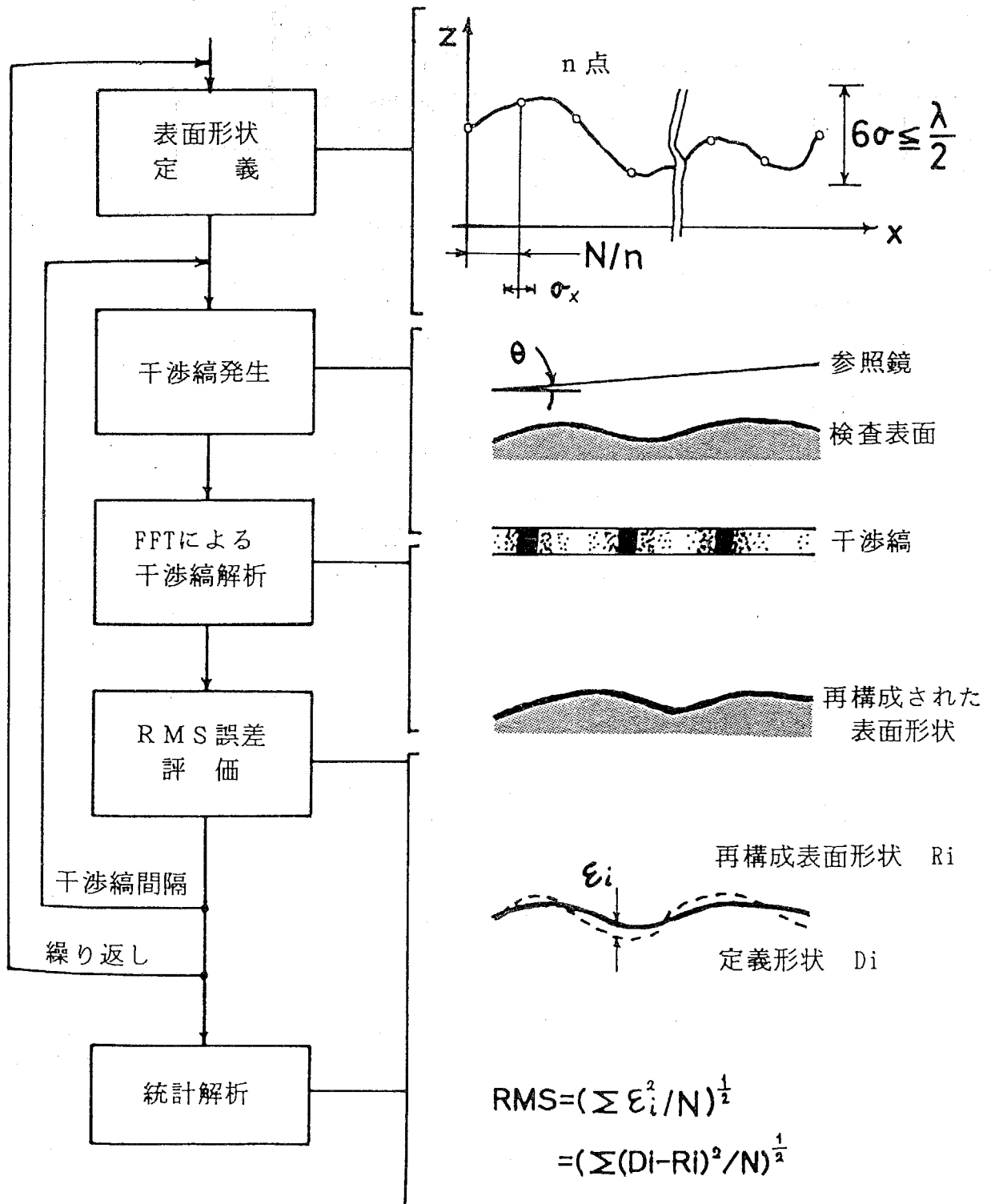


図 4.3: 干渉縞幅設定の最適条件確認のためのシミュレーション手順

素にわたる表面形状の定義を行なったが、定義点数 n は最小 3、最大 n_{max} として、この間はスプライン補間によった。また、定義間隔 $\frac{N}{n}$ による空間周波数成分が支配的にならないように、定義間隔もガウシアン分布により σ_x の変移をもたせた。これより、 n が大きいほど、高い空間周波数成分を含む複雑な表面形状が定義される。

次に基準平面との干渉縞を発生させたのち、縞解析アルゴリズムにより表面形状の再構成を行なう。ここでは、FFT による干渉縞解析法¹⁸⁾を用いた(付録参照)。これは、走査線一本の強度分布をフーリエ変換し、キャリア成分を中心とした部分のみを取り出し、フーリエ逆変換により位相分布 $\phi(x, y)$ を求める方法である。次に、再構成した表面形状と定義した表面形状の最大誤差を求めるが、このプロセスは干渉縞の本数を 1 本から 128 本まで変えて繰り返される。最後に最大誤差そのものの 2 乗平均 (rms) 誤差を求めて、これを評価の対象とした。

図 4.4 は He-Ne レーザーの波長 $\lambda = 0.628 \mu\text{m}$ に対するシミュレーション結果であ

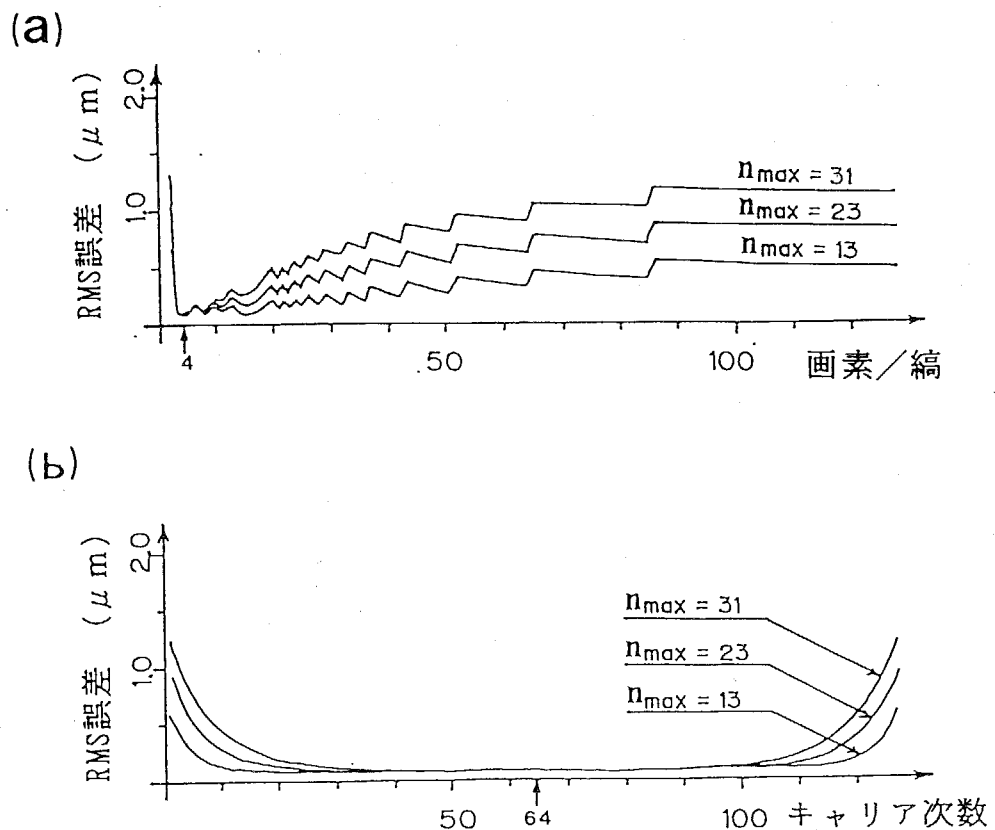


図 4.4: 最適干渉縞幅のシミュレーションによる評価結果。(a) 干渉縞の画素ピッチによる表示, (b) キャリア空間周波数の次数による表示。

る。同図 (a) では、干渉縞のピッチにより rms 誤差が評価されている。所々で不連続になっているが、これは画素ピッチが空間周波数の逆数であるため、FFT による干渉縞解析では連続となり得ないからである。この結果から、4 画素ごとに発生させた干渉縞による平面度測定の測定誤差が最も良いことがわかる。これは、 n_{max} が大きく高い空間周波数を含む場合でも同様である。同図 (b) では、キャリア空間周波数により (a) 図を書き直してあるが、4 画素おきの干渉縞設定は $N=256$ の場合、64 次の周波数に相当する。これはスペクトル面でちょうど中央に当たり、FFT による縞干渉縞析を行なう場合、表面情報を含むキャリア近傍の周波数成分が、高低両方の周波数ノイズに対して帯域的に余裕がある場所に割り当てられるという特長も持っている。

4.2.4 液面干渉計による確認実験

干渉縞本数割当の最適条件を実験的に明らかにするため、液面干渉計による評価実験を行なった。

オプティカル・フラットなどの光学要素の平面度を測定するためには、被測定面以上に良い平面度を持つ基準平面を用意して干渉測定を行なわなければならない。このような平面は人工的に製作することは出来ないので、図 4.5 に示したような液面を基準平面に用いる測定系が使用される。液体には、振動に対する液面の揺れを抑えるため、電気機器冷却用の 5000cSt の高粘度を持つシリコンオイルを用いた。液面は地球の曲率半径を持つが、30cm の容器に液面を作ったとき周辺に対する中央部の盛り上がりは、計算上約 3nm と見積られる。これは通常の光学要素の平面度 $\lambda/20$ (約 30nm 程度) よりも 1 桁良い平面度である。また、周辺部では液体の表面張力による凹凸現象が起こるが、これも 3cm 程度離れた場所では事実上無視できることが確認されている²¹⁾。被測定フラットは液面中に沈め、浮力を生じさせて支持によるたわみを軽減する。レーザー光は l_1, l_2 のレンズ系により十分な直径にコリメートされたのち、液槽に導入される。液面とフラットの上面による等厚干渉縞は、TV カメラにより 256×240 画素の 4 ビット (16 レベル) 画像としてフレームメモリに取り込まれ、前述した FFT による干渉縞解析法によりフラットの表面形状を求める。

図 4.6 は液面干渉計により、干渉縞のピッチを変えてオプティカルフラットの平面度を測定した例である。測定の前に中央部から左上部 (11 時方向) にむけて、攪拌棒

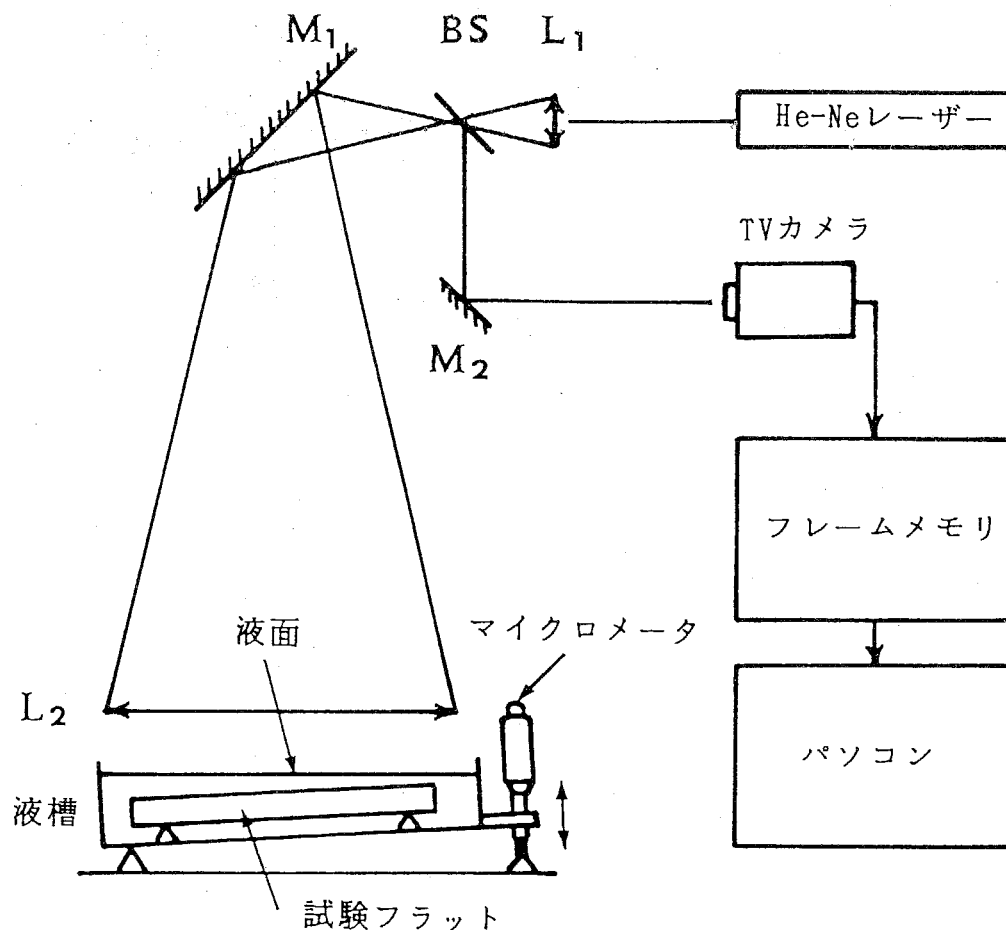


図 4.5: 液面干渉計による平面度測定系

で液面に変形を与えて空間周波数の高い部分を作った。4画素おきの測定ではこの変形が観察できるが、ピッチが粗くなるにつれサプリング間隔が粗くなり高い周波数成分を取り逃がし、変形が観測できなくなる様子がわかる。

4.2.5 実際の光学部品の測定に対する考察

情報理論による最適干渉縞幅は、画像あたりの情報量を最大にするという観点から導出された条件である。このため、4画素おきという干渉縞幅は分解能的には $\frac{\lambda}{8}$ に過ぎず、実際の測定においては分解能が不足する場合が多い。すなわち、凹凸に富んだ未知の平面を初めて測定するときの初期設定値として有効であるが、非常に精度良く仕上げられた光学要素に対しては細かすぎるピッチ設定である。

通常オプティカルフラットの形状は、研磨の工程により生じる凸、凹の2種類のどちらかであることがほとんどである。したがって空間周波数的には、1次から数

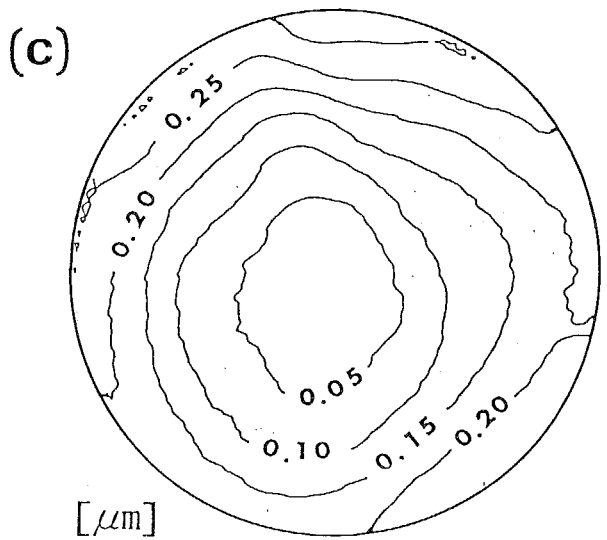
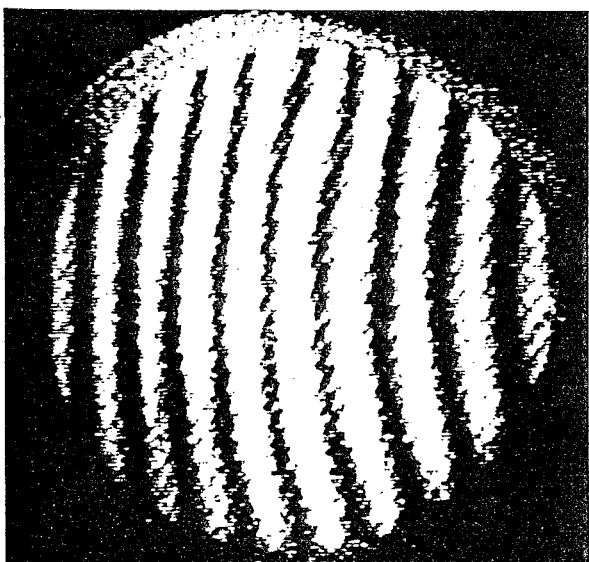
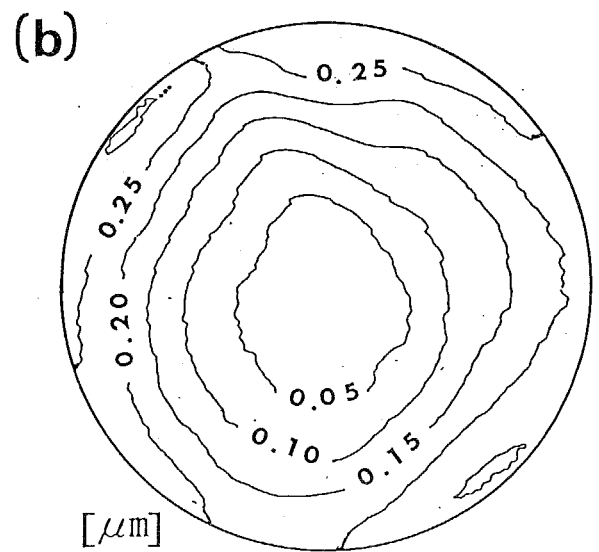
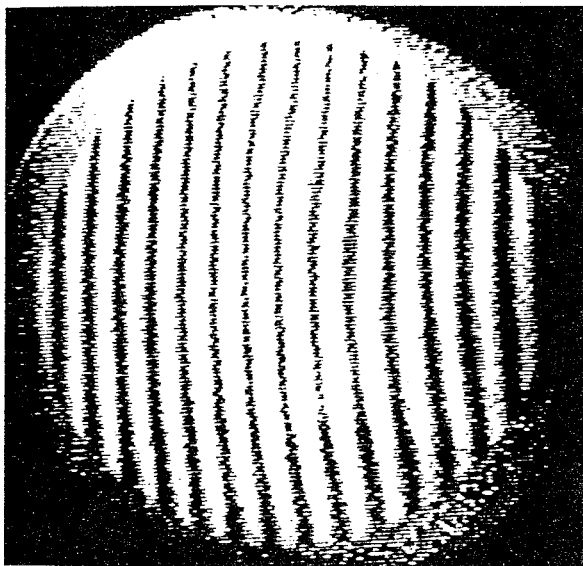
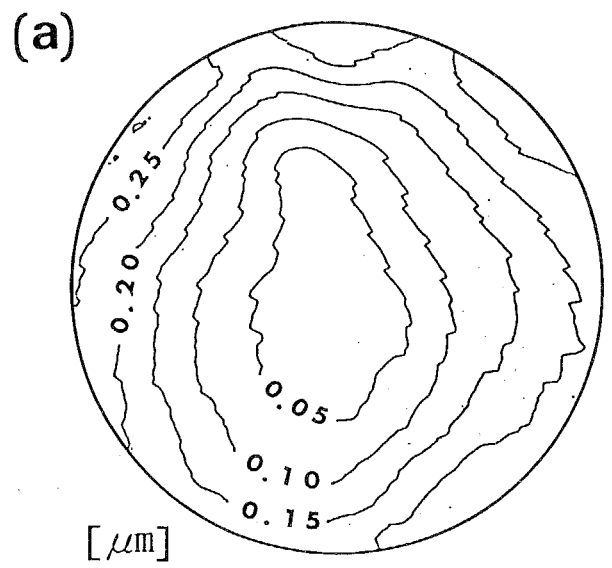
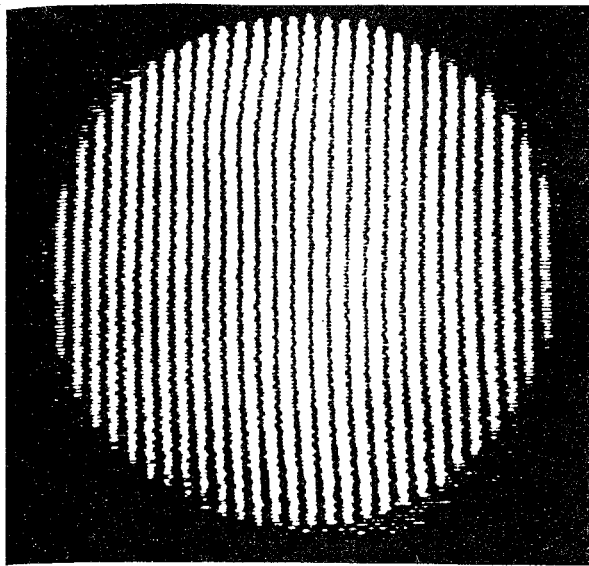


図 4.6: 液面干渉計による実測結果. (a)4 画素/縞,(b)8 画素/縞,(c)12 画素/縞.

次までの成分が分かれば事実上問題はない。通常、情報処理などで通常用いられるサプリング周波数は、余裕を含めてナイキスト周波数の5倍程度が用いられている。そこで1次の周波数成分を求めるには、測定面内のサンプル点が10点あれば十分である。これは平面度の干渉測定では、測定面に対し10本程度の縞を生じさせれば良いことに相当し、奇しくも熟練した作業者が経験的にこの程度の割合で干渉縞を生じさせているのとは一致する。また、測定したい分解能に応じて4本程度まで縞本数を少なくすることもあり、このような場合にも対応可能なように本理論における計測情報量のより良い定義法が必要となる。

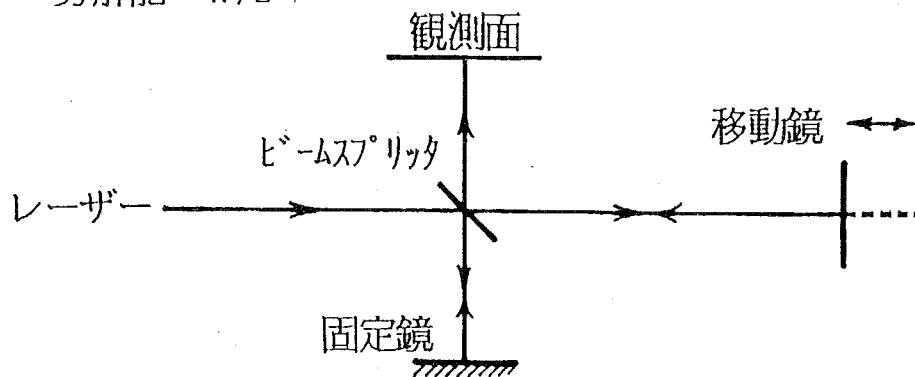
4.3 光路長増倍型差動干渉計の設計製作と性能評価

光路長増倍型差動干渉計は、電子ビーム絶対測長装置の主要な走査方向であるX軸のスケールであり、サブ μm のパターンの測定に対して十分な分解能を持つ必要がある。従来より精密かつ正確な測長にはレーザー干渉計が用いられているが、本装置で用いた干渉測長システムの分解能は $\frac{\lambda}{40} \simeq 16\text{nm}$ であり、サブ μm を精密に測定するスケールとしては分解能が不足である。そこで、谷村らの研究^{22, 23)}に基づき、干渉測長システムと複数のプリズムによる光の多重往復光路を組み合わせることにより、サブ nm の高分解能を持つレーザー干渉計を実現した。

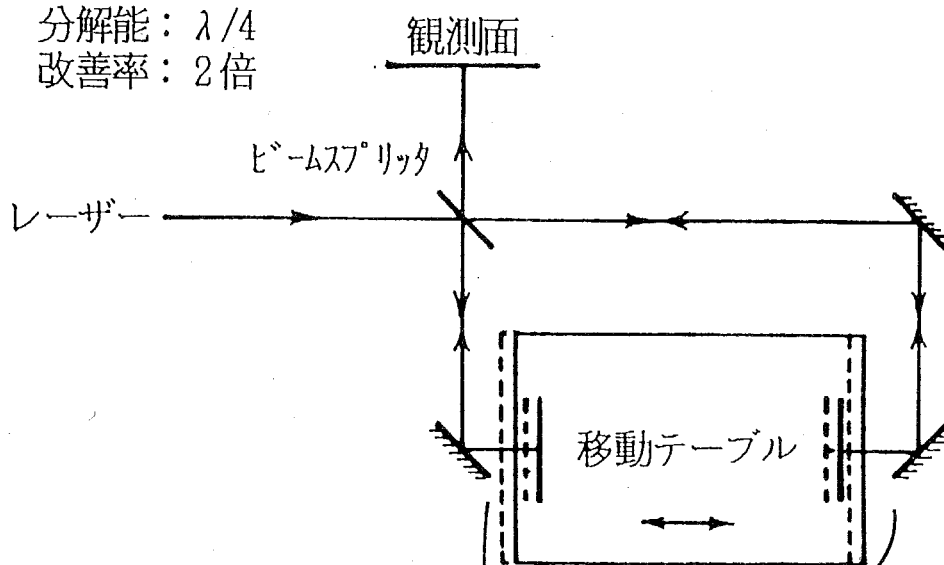
4.3.1 光路長増倍型差動干渉計の原理

本干渉計はマイケルソン型の干渉計をベースとしているが、図4.7に示すように光学要素の配置を工夫することによって、分解能の改善を図っている。同図(a)は一般的なマイケルソン型の干渉計の原理である。すなわち、レーザー光を半透鏡により分割し一方を固定鏡、もう一方を移動鏡により反射させ、二つの光の干渉により生じる明暗をカウントして光の波長を基準とした移動量の検出を行なう。この明暗は両光の位相が 2π (移動量換算で λ)ずれるごとに起こるが、光路が往復であるので移動鏡が π (同 $\frac{\lambda}{2}$)動くごとに観測される。これが光のスケールの目盛りのとしての役割を果たす。測定用としてよく使用されるHe-Neレーザーの波長は $0.633\mu\text{m}$ であるので、半波長ではスケールの目盛りは約 $0.3\mu\text{m}$ となり、サブ μm の測定を行なうためには分解能が不足する。そこで分解能改善のため、反射鏡の差動配置とプリ

(a) 分解能: $\lambda/2$



(b) 分解能: $\lambda/4$
改善率: 2倍



(c) 分解能: $\lambda/40$
改善率: 20倍

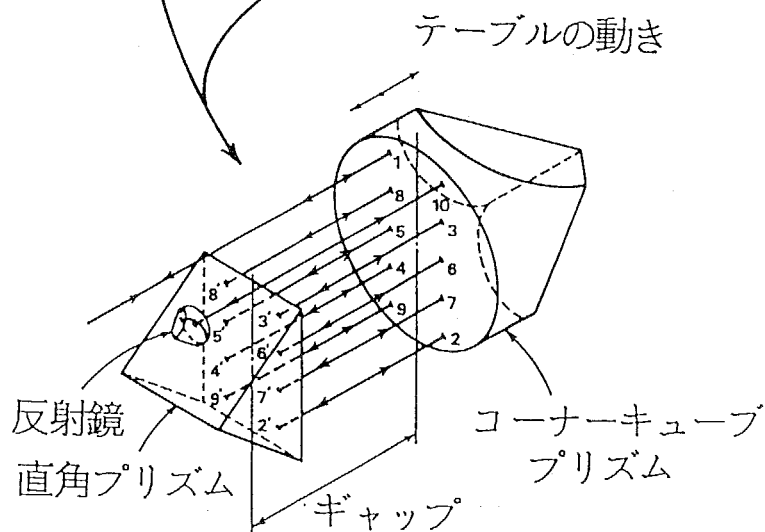


図 4.7: 光路長増倍型差動干渉計の原理. (a) 通常のマイケルソン型干渉計, (b) 反射鏡の差動配置, (c) コーナークューブ・プリズムと直角プリズムによる光路長の増倍.

ズムによる光路長増倍を行なった。

差動配置は図 4.7(b) に示すように、移動テーブルの両端に反射鏡を配置することにより、両方の反射鏡が相反する方向に等しい距離だけ移動するようにしたものである。これにより同図 (a) 中の固定鏡も動くことになり、分解能は 2 倍改善される。さらに、同図 (c) に示したようなコーナーキューブ・プリズムと直角プリズムの組み合わせをテーブルのギャップ部分に配置することにより、光路長の増倍を図っている。これはコーナーキューブ・プリズムが入射したビームをコーナーポイントに対して点対称に返す性質と、直角プリズムがビームを稜線に対して線対称に返す性質をうまく組み合わせたもので、両者の位置を適当に合わせると図 (c) のように光を多重往復させることが出来る。この場合はギャップに対してビームを 10 往復させているので、分解能は 10 倍改善されることになる。

本干渉計のシステム本体は、ヒューレット・パッカード (HP) 社のレーザー干渉測長システムを使用した。これはゼーマン・レーザーを基本としており、He-Ne レーザー管の軸方向に磁界をかけて周波数が約 1.8MHz ずれた左・右円偏光のレーザービームを発生する。両偏光の発振強度が等しくなるようにレーザー管に熱的なサーボ制御をかけることにより発振周波数の安定化を図っており、波長安定度 0.1ppm を達成している²³⁾。波長の確度についても計量研究所の光学研究室の基準レーザーとの比較により、実用上問題無いことが確認されている²⁴⁾。光の干渉の検出には左・右両偏光の周波数のビートによるヘテロダイン方式を用いており、反射鏡の動きにより生じたドップラー周波数を検出することにより測長を行なう。従って、図 4.7 中の半透鏡には、偏光ビームスプリッタを用いる必要がある。

この干渉システムの基本分解能は $\frac{\lambda}{4}$ であり、電子的な 10 倍増感法により $\frac{\lambda}{40}$ が得られる。これと前述の光路長増倍型差動干渉計を組み合わせると、以下のような分解能が実現できる。

$$\frac{\lambda}{4} \times \frac{1}{10} \times \frac{1}{2} \times \frac{1}{10} = \frac{\lambda}{800}$$

HP システム	電子回路	差動配置	光路長増倍	干渉計の
基本分解能	による改善	による改善	による改善	全分解能

ここで、He-Ne レーザーの発振中心周波数 $\lambda = 0.633 \mu\text{m}$ により $\frac{\lambda}{800}$ を計算すると約 0.8nm となり、これが本干渉計の分解能となる。通常、このような高分解能の干渉計は電子的な増感法により分解能の改善を図るのが一般的であり、ノイズや偏波面

のクロストーク成分により測定の信頼性が低くなるという欠点がある。しかし、本干渉計では実際の光路長を増加させることにより高分解能を実現しており、電子的な増感の誤差が $\frac{1}{20}$ に軽減される利点がある。

4.3.2 X 軸干渉計の設計

本干渉計は、前章で述べた真空用多自由度試料走査機構上に一体的に組み込んだ。この設計の概略を、図 4.8 に示す。真空試料室の外部より導入されたレーザービームは、X, Y 両方向の粗動を逃げるためのプリズム系を介したのち、偏光ビームスプリッタにより左・右の円偏光成分に分けられる。さらに反射鏡により光路を対向するように設定し、微動テーブル上に設置された光路長増倍プリズム系に導入される。このうち反射光は同一の経路を通して真空試料室外に取り出され、干渉計システムの受光素子に導入され電気信号に変換される。干渉計の中心軸であるコーナーキューブ・プリズムと試料ホルダーの中心軸は完全に一致するようにして、測定におけるアッペの原理¹を満たすように配慮した。光学要素は微動テーブル上に配置したスペーサーに取り付けられているが、このスペーサーは軽量化の観点からマシナブル・セラミクスにより製作した。また、線膨張率がテーブルの構成材であるアルミ ($12.2 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$) に近いもの ($9.4 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$) を採用し、取り付け部での熱による応力発生に配慮した。

コーナーキューブ・プリズムは本干渉計の主要な光学要素であり、直径 50mm のものを使用した。光の多重反射による損失を少なくするため、He-Ne レーザーの波長に合わせた多層コーティングを施した。このプリズムの直角 3 面の角度誤差は測長の際の誤差原因となるが、10 μm の測長で 0.1nm 以下の誤差に納めるための条件として、各面の公差が ± 15 秒以内であれば良いことが明らかにされている²²⁾。そこで、本プリズムもこの仕様を満たすように製作するとともに、前小節で述べた平面度の測定法により反射波面の検査を行ない、十分な精度を持っていることを確認した。

また、試料ホルダーは干渉計の中央に位置しているため、熱的なドリフトによりメカニズムが伸縮しても、伸縮量が線対称である成分については反射鏡の差動配置によりキャンセルされ、干渉計に検出されない。さらに、ビームが同一のギャップ

¹ スケールと測定物を同一軸上に配置しないと測定誤差を生じるという原理。

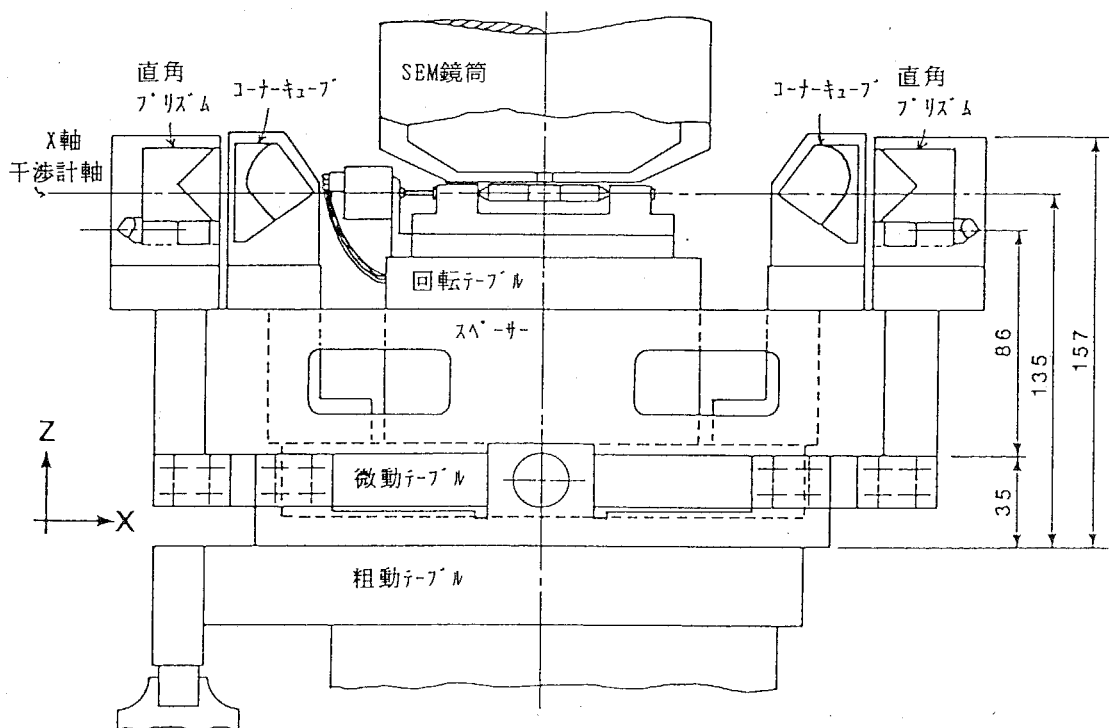
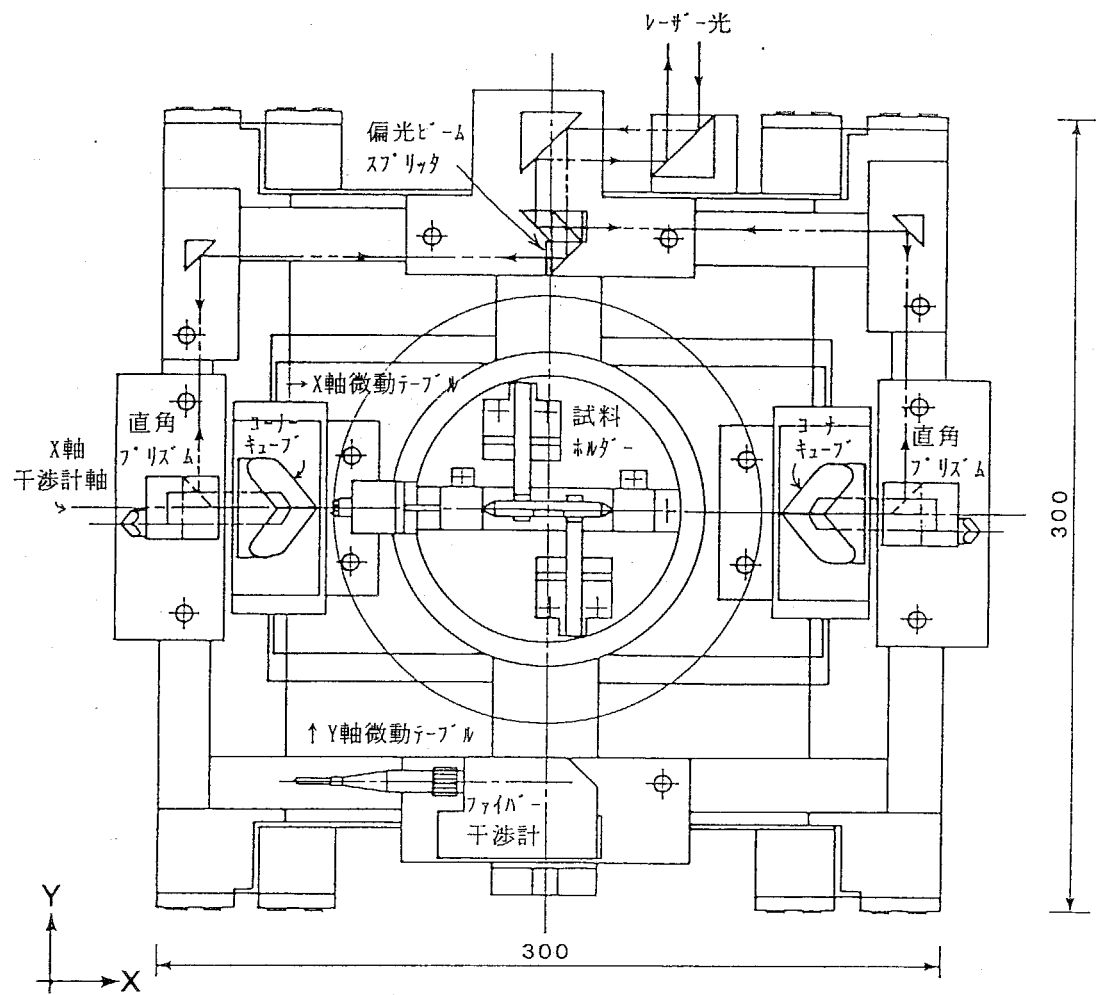


図 4.8: 光路長増倍型差動干渉計の構成

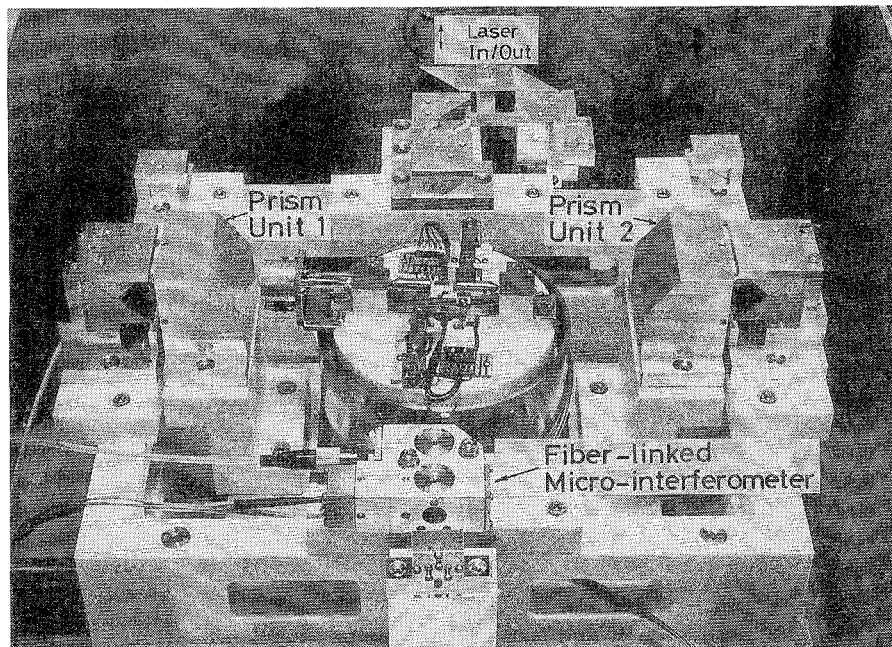


図 4.9: 試料走査機構と一体的に組み込まれた光路長増倍型差動干渉計の様子

を 10 回往復しているので実際の移動距離を 10 倍して測るとともに、差動配置の効果もあいまって、HP 社製の干渉計システムの測長誤差が $\frac{1}{20}$ に軽減されることも特長である。

図 4.9 に、本干渉計を試料走査機構に組み込んだ様子を示す。

4.3.3 X 軸干渉計の性能評価と測定誤差要因

本干渉計の波長確度は前述のように 0.1ppm であり、十分な性能を持っている。しかし、実際の運用に当たっては、主として機構部分の熱変形により測定の誤差を生じる。このため、本干渉計を 24 時間連続稼働することにより、この影響を調べた。その結果、数十 nm のドリフトが観測されたが、通常の測定は 1 走査 1 分以内で終了するので、この影響は無視することが出来る。

多重反射時の偏光面の回転については、光学系が左右対称であり両方の光路で回転量が等しいため、キャンセルされる。また、ヘテロダイン検波におけるクロストーク成分の影響について、4% のクロストーク量で 4nm 程度の測定誤差を生じるとの指摘があるが²⁶⁾、前述した光路長増倍差動配置の効果によりこの量も軽減されるため、本干渉計では問題とならない。マイクロパターンの線幅等を測定する際の主要な誤

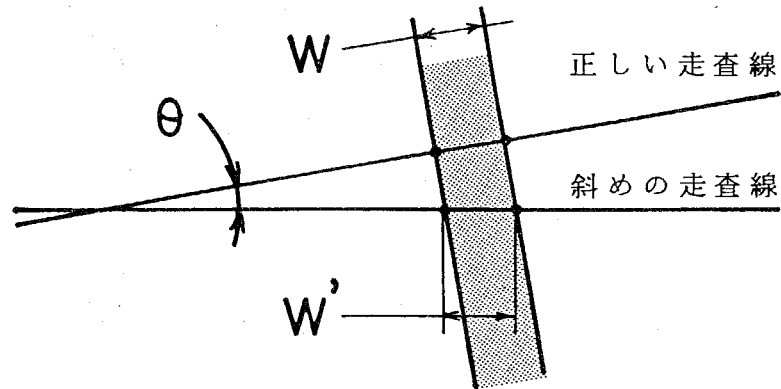


図 4.10: 試料測定時のオリエンテーション誤差

差は、図 4.10 に示すようなパターンのオリエンテーションミスやテーブルのヨーイングによる斜め走査によって生じる。このとき、実際の線幅 W は

$$W' = W \cdot \sec \theta \quad (4.13)$$

のように、実際よりも $\sec \theta$ だけ大きく測定される。この差 $W' - W$ が X 軸干渉計の分解能以内であれば、実際の測長に影響はない。この関係は、

$$W' - W < \frac{\lambda}{800} \quad (4.14)$$

により表わされる。これら 2 式より、

$$\theta < \sec^{-1} \left(\frac{\lambda}{800W} + 1 \right) \quad (4.15)$$

が得られる。すなわち W の距離を走査するとき、オリエンテーション誤差は θ 以内であれば X 軸干渉計に不感である。この計算例を表 4.1 に示すが、通常の測定では

走査距離	許容オリエンテーション誤差
1 μm	2. 2' 8°
2 μm	1. 6 1°
5 μm	1. 0 2°
10 μm	0. 7 2°

表 4.1: 走査距離と許容オリエンテーション誤差の例

5 μm 以内の走査距離なので、オリエンテーション調整機構の回転角度分解能は 1° 程度あれば問題無いことが分かる。

4.4 ファイバー結合型干渉計の設計製作と性能評価

Y 軸方向の座標測定を行なうために、X 軸と同様の干渉計を使用したいところであるが、前図 4.9 からわかるように走査テーブル上のスペースに余裕が無く、実際の配置は困難である。また、この方向の測定は主として走査線の走査間隔の決定に使用するため、X 軸ほどの分解能は必要でない。そこで、谷村らにより開発された測定分解能 10nm のファイバー結合型干渉計^{27, 28)}を用いて、問題解決にあたった。この干渉計もマイケルソン型に基づいているが、光学要素が予め小型の筐体中に配置されているため、干渉縞を出すため要素のアライメント等が不要である利点を有する。また、偏波面保存ファイバーによるレーザー光導入方式を取っているため、部材が複雑に入り組んでいる場所でも光路の確保を気にすることなく設置可能であることも、従来の干渉計には見られない大きな特長である。さらに、熱源であるレーザー発振管を干渉計の使用場所から隔離できるため、熱による変形等を部材に与えない利点がある。

4.4.1 ファイバー結合型干渉計の原理

図 4.11 にファイバー結合型干渉計のシステム構成を示す。レーザー光は偏波面保存ファイバーにより、可干渉性を保たれたまま干渉計筐体に導入される。筐体内部にはマイケルソン型の干渉計が構成されており、レンズによりコリメートされたビームはビーム・スプリッタにより分割され、一方が固定鏡、もう一方が移動鏡で反射される。干渉縞は 4 連のフォトダイオード・アレー上に投影されるが、縞ピッチの一周期がアレーの長さに一致するように光学系が調整されている。このような光学素子の物理配置により $\frac{\lambda}{2}$ ピッチの干渉縞が 4 分割され、 $\frac{\lambda}{8}$ の分解能が得られる。さらに、ダイオードによる電気信号は、直流成分やノイズを取り除くため差動アンプにより減算処理したのち、強度を 8 レベルに分割して電氣的に縞位相の分解能を増加させている。従って、本干渉計の分解能は、

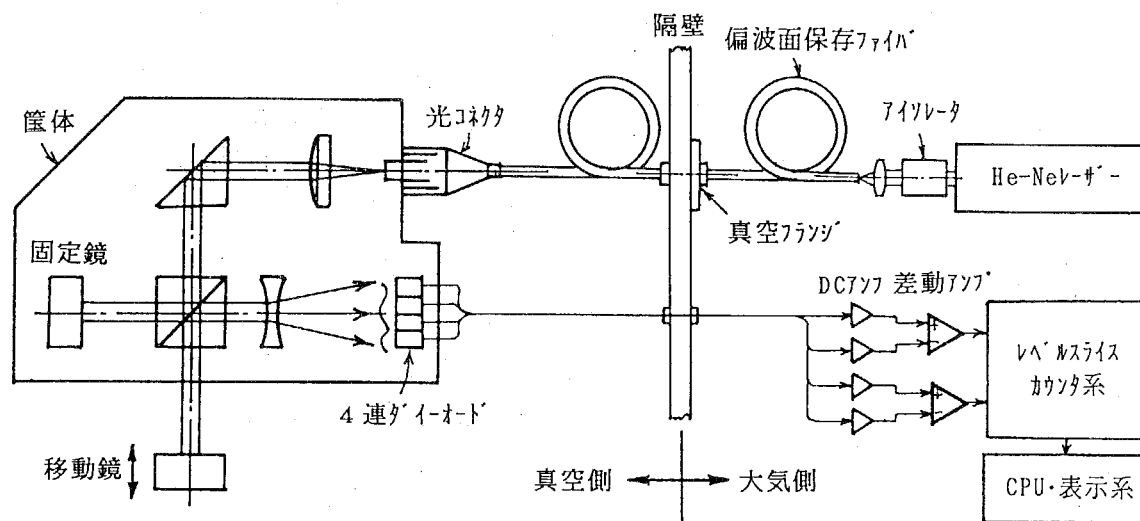


図 4.11: ファイバー結合型干渉計のシステム構成

$$\begin{array}{ccccccc}
 \frac{\lambda}{2} & \times & \frac{1}{4} & \times & \frac{1}{8} & = & \frac{\lambda}{64} \\
 \text{干渉計} & & \text{4連ダイオード} & & \text{電氣的な分割} & & \text{ファイバ干渉計の} \\
 \text{基本分解能} & & \text{による改善} & & \text{による改善} & & \text{全分解能}
 \end{array}$$

により与えられる。光源には波長 $\lambda = 0.633 \mu\text{m}$ の He-Ne レーザを用いているので、分解能は $\frac{\lambda}{64} \simeq 10\text{nm}$ となる。

4.4.2 Y 軸干渉計の設計

Y 軸干渉計はファイバー結合型干渉計をベースとして、真空仕様に改めたものを製作した。偏波面保存ファイバについては途中にフランジを設けるとともに、真空試料室内部の外被はテフロンチューブによりコーティングし、脱ガスの無いように配慮した。筐体はステンレス製とし、レーザービームの中心と試料ホルダーの軸が一致するようにして、アッペの原理を満たすように配置した。本干渉計は X 軸の干渉計と同様に微動テーブル上のセラミック・スペーサー上に取り付けられている。移動鏡は、本体から約 10mm 離れた場所にセラミクス製のスペーサーを介して微動走査テーブルの固定側に取り付けた。信号の伝達を行なうケーブルは、ノイズの影響を避けるためツイステッド・ペアとして、真空試料室側面のケーブルコネクタに結線した。また、コネクタからカウンタまで直接ケーブルを引き回すと、フォトダイオードの微弱信号にノイズが乗るおそれがあるので、引出し部直後にアンプを設けて信号の増幅を行なっている。カウンタ部分はオペアンプを多用したアナログ回路

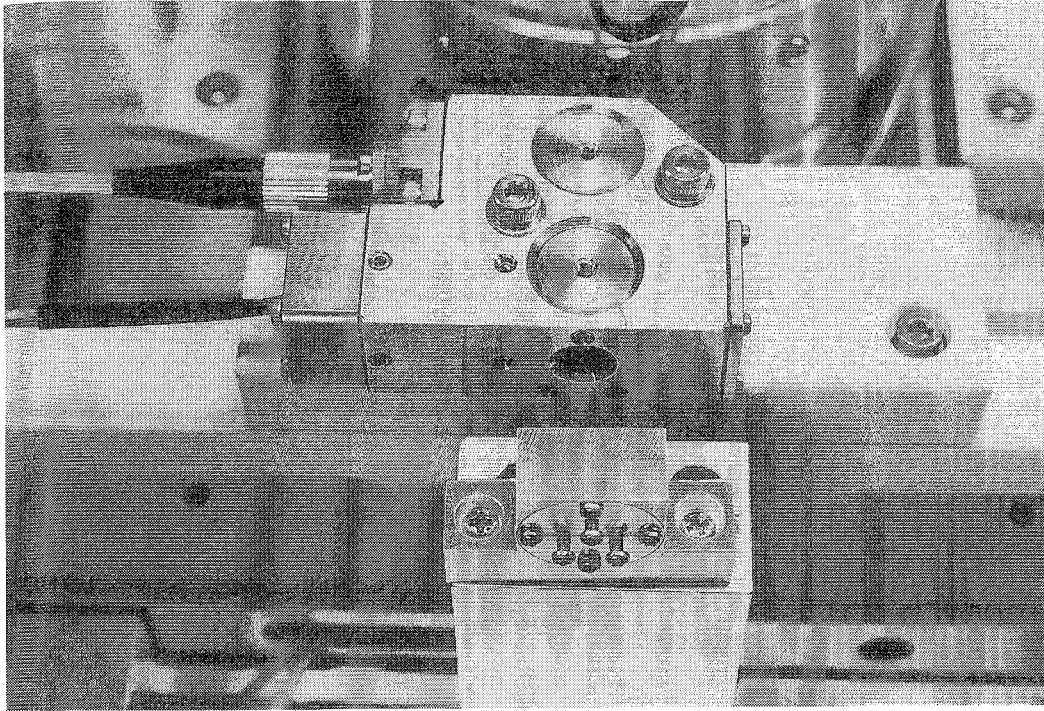


図 4.12: 試料室に設置されたファイバー結合型干渉計

と専用の CPU ボードにより，高速化が図られており，最大移動速度 400mm/s まで追従可能である．このとき，移動速度が 32mm/s を越えると，分解能を自動的に $\frac{\lambda}{64}$ から $\frac{\lambda}{2}$ に落とし，追従性を向上する工夫がなされている．図 4.12 に，絶対測長装置の真空試料室に設置されたファイバー結合型干渉計の様子を示す．

4.4.3 Y 軸干渉計の性能評価

本干渉計の性能を評価するため，前述の X 軸干渉計で使用した HP 社のレーザー干渉測長システムと比較測定を行なった²⁷⁾．ここでは，移動テーブルにコーナーキューブ・プリズムを取り付け，両干渉計の指示値の差を求めることにより，HP 社のレーザーを基準とした誤差を求めた．この際，テーブルの振れ等による影響を避けるため，2つの干渉計のコーナーキューブは同一のものをを用いたが，ビームが相互に干渉しないように，図 4.13 に示すような入射方法をとった．

図 4.14(a) は，干渉縞の 1 ピッチである $0.32 \mu\text{m}$ の範囲で 10nm ごとに比較測定した結果であり，誤差の最大最小差 40nm が得られた．この誤差は，主としてカウンタの内挿誤差が原因と考えられる．また，両干渉計とも表示部分の量子化誤差が $\pm 10\text{nm}$ であり，両者の誤差の最大値が 40nm であることから，所期の性能を発揮し

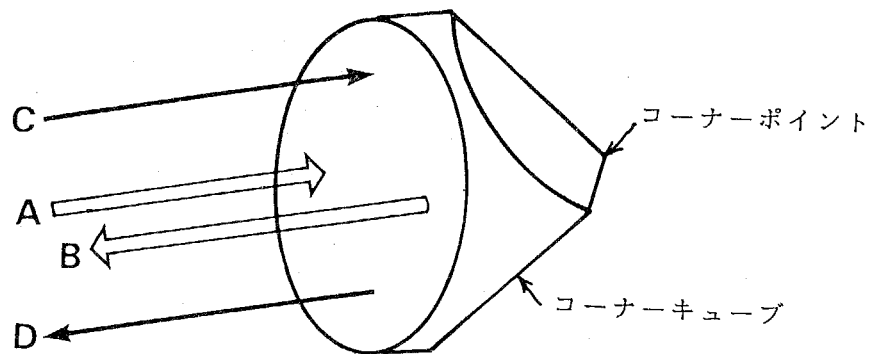


図 4.13: コーナーキューブへのレーザービーム入射パターン

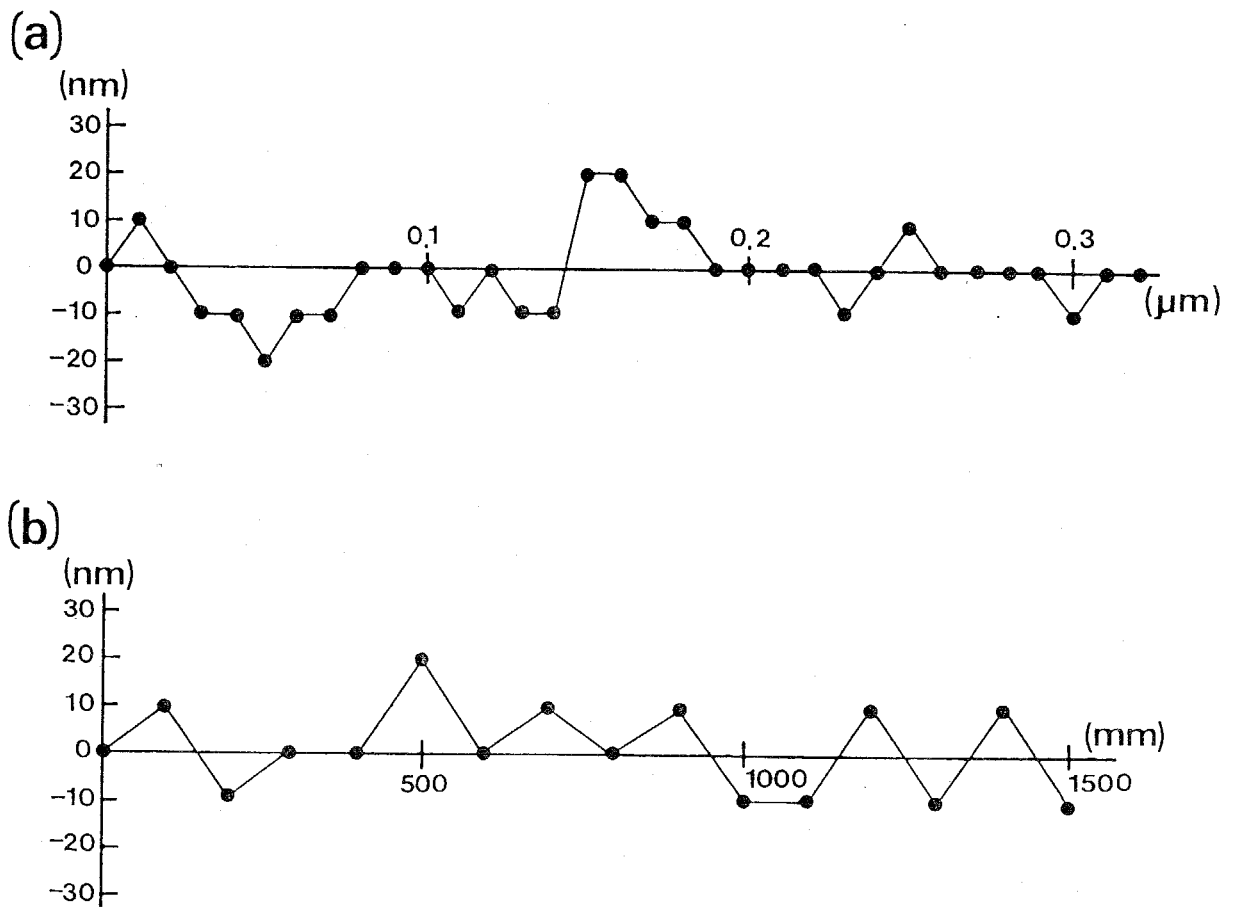


図 4.14: ファイバー結合型干渉計の性能評価. (a) 干渉縞の 1 ピッチ送り以内の測定値の相違, (b) 1.5m にわたる測定値の相違

ていると判断できる。

図 4.14(b) は、1.5m の長距離にわたり 10cm ごとに比較測定を行なった結果であり、誤差の最大最小差は 30nm に納まっている。これはサブ μm の送りを行なったときとほぼ同様の誤差範囲であり、著しい累積誤差は生じていないことを示している。

以上の比較測定により、X 軸に用いたレーザー干渉測長システムと同程度の性能が実現されていることを確認した。

4.5 章のまとめ

電子ビーム絶対測長装置のスケールとして使用するための高分解能レーザー干渉計について述べた。

はじめに光学要素の精度に十分な注意を払うため、平面度の測定方法について十分検討を加え、デジタル画像処理による干渉縞解析を行なう場合の最適条件が 4 画素/縞であることを導出した。また、シミュレーションおよび液面干渉計による実験により、この条件の有用性を確認した。これより、従来経験的な指針しか提供されていなかった平面度測定における干渉縞本数の設定法について、初めて理論的な指針を与えた。

X 軸の干渉計には、市販のレーザー干渉測長システムとプリズム系による光路長増倍型差動配置を組み合わせ、分解能 $\frac{\lambda}{800} \simeq 0.8\text{nm}$ を実現した。これは従来には無い高分解能であり、電氣的な分割のみでなく実際の光路長を増加することにより感度を上げているため、測定の信頼性が大きい特長を有する。

Y 軸には偏波面保存ファイバーを利用して、小型化と設置場所の自由度を増した分解能 $\frac{\lambda}{64} \simeq 10\text{nm}$ を持つファイバー結合型干渉計を開発した。これは、複雑な光波干渉計を位置測定センサとして簡単に使えるようにしたシステムとして、工業的な意義を持つ。

以上、一連の高分解能干渉計の開発により、絶対測長装置の基準となる座標測定が nm オーダーで正確かつ精密に行なうことが出来るようになった。

第5章

シリコンによる

標準マイクロパターンの製作

5.1 はじめに

本研究による電子ビーム絶対測長装置で得られる測定値を基準として他の類似装置の測定値の信頼性を確保するためには、標準寸法を他の場所へ移し替える仲介物である標準参照試料が極めて有効である。このような試料は従来より NIST を中心に一連の標準参照物質として供給されてきたが、半導体用の電子ビーム測長装置に使用できる NIST の参照試料は未だ開発途上にある⁸⁾。また、材質についてもフォトリソマスク上のクロム膜や、ニッケルと金の積層構造に基づくもので、電子ビーム測長装置の使用に耐えるものではなかった。そこで、半導体工業界で要請されているような凹凸形状を持つ標準参照試料として、シリコンの微細加工技術を応用したサブ μm の線幅を持つ標準マイクロパターンを製作した。本章では、はじめに現在の標準マイクロパターンについて触れ、調査研究により得られた製作方針を明らかにするとともに、シリコンによるマイクロパターンの作製技術と評価について記した。

5.2 標準マイクロパターンの現状と製作の方針

電子顕微鏡の校正の目的は、単純に倍率の校正を行なう場合と、プロセス中の測定システムとしての性能を把握する場合の二つに大別される。前者のための標準参照試料としては、2次電子の放出量に左右されずに微小な長さが決定できるものが望ましく、表面が平坦で標識線部分の材質の異なる試料が使用される。後者では、実際の生産プロセスで加工される凹凸形状を模した既知の寸法を持つマイクロパター

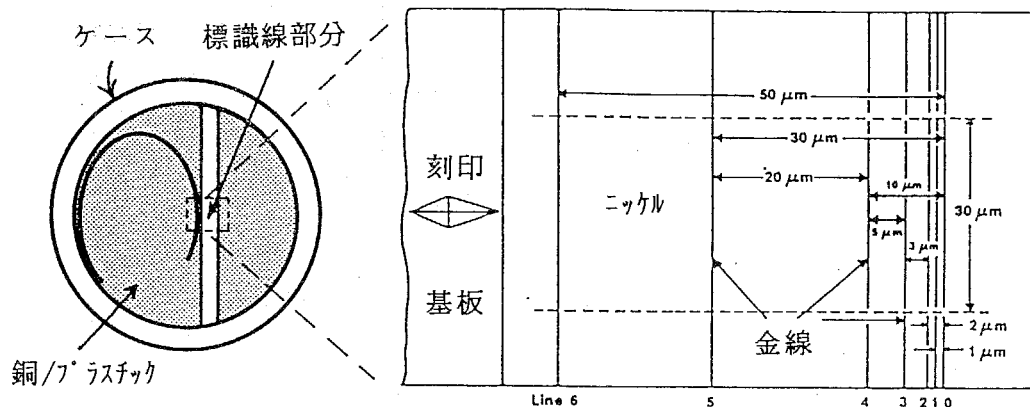


図 5.1: 倍率校正用標準参照試料 SRM484. (左) ダイの形状, (右) 標識線の構成.

ンにより, 測長システム全体の校正を行なう. 従って, SEM 用の校正試料には 2 種類のものが存在することになる.

倍率校正用の試料として最も広く用いられているものは, NIST の標準参照資料 SRM484 である. この試料は 200 ~ 2 万倍の倍率校正用として設計されており, 図 5.1 のように公称値 $1\ \mu\text{m}$, $2\ \mu\text{m}$, $3\ \mu\text{m}$, $5\ \mu\text{m}$, $20\ \mu\text{m}$, $30\ \mu\text{m}$, $50\ \mu\text{m}$ の 7 種類の線間隔が用意されている. 線間隔には 2% の精度で値付け¹がなされており, NIST が発行する成績書とともに供給される. 試料は, 直径 11mm, 高さ 6.3mm の SUS304 製の円筒状ケースに納められており, 内側には銅粉とプラスチックの混合物が充填されている. 参照部分は, ニッケルを介在物として $0.1\ \mu\text{m}$ 幅の金線により標識線が作られている. 金とニッケルの組成の差により 2 次電子放出量が異なるため, 電子ビーム走査により標識線のピーク信号を探索し, 校正された寸法間隔を得る. 標識線は試料の深さ方向に貫入しているので, 表面が電子ビーム・ドーズにより汚染されても, 表面を研磨することにより再生が可能である.

しかし本試料は,

- 半導体用測長装置でよく使用される加速電圧 1kV 前後でコントラストが低下するため標識線を見つけにくい,
- シリコン・ウェハに比べて厚みがある,

¹あたづけ: 標準として通用する校正値を与えること.

- 電子レンズ磁界中でニッケル部分が磁化される、

などの難点を有しており、電子ビーム測長装置用としては使用しにくいのが実状である。また本試料をエッチングし、金線部分をニッケル地に対して露出させることにより、凹凸形状を形成する試みもなされたが、エッジラフネスがわるく、実用には至っていない。そこで、最近の電子ビーム測長装置に適合した、半導体プロセス向きの標準マイクロパターンが必要となり、この開発に着手した。

電子ビーム測長装置用の校正試料について、産業界サイドからどのような仕様のものが要請されているかを明らかにするとともにパターン製作のための方針を得るため、昭和61年8月から約1年半に渡り「マイクロパターンの計測に関する検討会」を主催し、半導体関連メーカーおよび測定機メーカーなど15社を含めたニーズの把握に努めた。この調査結果より、適当な参照試料が無いため、各社各様に寸法測定 of 校正を行なっていることが分かった。そこで、マスク・メーカー3社よりフォト・マスク上に製作された標準パターンの提供を受け、現状把握のための持回り測定を行なった。この際、特に測定条件は設けず、プロセスの作業者が現在行なっている方法に準じ、測定方法も光と電子ビームの2方式の混在を認めた。結果として最小線幅である $1\mu\text{m}$ のパターンを測定した場合、最大値と最小値の差が $0.3\mu\text{m}$ あり、最大33%ものばらつきのあることが明らかになった。

この後さらに検討を重ねたが、持回りで使用したフォト・マスク様の試料よりも、実際に凹凸の形状を持つ標準マイクロパターンの必要性が大きいことが分かった。とりわけパターンの微細化に連れ、サブ μm の線幅で凹凸形状を持つ試料の必要性が示唆され、材質についてもシリコン基板あるいは酸化薄膜上の金属またはシリコンのニーズが大きいことが明らかになった。このような標準パターンの候補としての代表例とその特質を、表5.1²⁸⁾に示す。この表から明らかなように、すべての条件を満たすような万能な試料を製作することは難しい。しかし、材料の汎用性に関してシリコンを用いることが総合的には得策であるとの結論を得るとともに、手持ち機器による製作の容易性を加味して、一般的に半導体工業で使用されているシリコン・ウェハを素材とした凹凸パターンを採用することにした。また、製作手法については加工対象がサブ μm の寸法を持つパターンであり、半導体加工技術であるマイクロ・ファブリケーション技術によることとした。

構成材	特質				総合 評価	備考
	エッジ ラフネス	保存性	2次電子像 コントラスト	製作の 容易性		
Si 凹凸	◎	△ (酸化)	△	◎	○	コーティングにより改善可能
SiO ₂ 薄膜上の Ta パターン	○	○	◎	×	△	導電性基板に変更の必要性
SiO ₂ 薄膜上の Mo パターン	×	○	○	×	×	エッチング法の改善の必要性

表 5.1: 標準マイクロパターンの作製候補と特質

マイクロ・ファブ리케이션によるプロセスは、電子または光ビームによりパターンニングを行なうリソグラフィー工程と、ガスや薬液により除去加工を行なうエッチング工程の繰り返しにより行なわれる。

電子ビームによるパターンニングは、SEMの偏向レンズの電圧制御とビーム・ブランキング機能によりウェハに塗布した電子ビーム・レジストを露光する。ソフトウェアにより手軽に描画パラメータを変えられるので、少量の実験的なパターンニングに最適である。そこで、さまざまな線幅を持つ標準マイクロパターンの製作には電子ビーム露光プロセスによる方法を採用した。また、マイクロパターンのピッチで寸法を規定する場合、規則正しい凹凸形状を連続して形成する必要があるが、これには光リソグラフィーの応用である干渉縞投影法を用いた。

エッチング・プロセスは実際の凹凸形状を形成する重要な工程であるが、ここで要求される仕様として以下のような項目が上げられる。

- エッチング後のパターン・エッジ形状が直角に近く、機械的に整っていること、
- 2次電子信号が鋭いピークを持つように、高アスペクト比の形状が得られること、
- パターン長手方向に対して線幅がバラつかないように、エッジ・ラフネスが良好であること。

通常のエッチングでは、レジストよりも内側にエッチングが進行するアンダーカット現象が起こるため、エッチング深さの進行に連れてパターンの線幅が均一でなくなる。この現象を軽減するため、乾式のプロセスでは反応ガスを用いたプラズマ・エッチング一種であるリアクティブ・イオン・エッチング (RIE) が提案されているが、完全に直線的なスロープ形状を得ることは難しい。そこで、薬液を用いた湿式プロセスで、シリコン・ウェハの結晶方位に依存してエッチングが進行する異方性エッチングを採用することにより、これら条件を満たすこととした。

5.3 異方性エッチングによるシリコンパターン作製原理

異方性エッチングは、シリコンの結晶方位に従って特定の方位にのみエッチングが選択的に進行する化学現象を利用している。液体のエッチャントを用いるため溶液中の微粒子管理が難しく、最近の微細加工プロセスではあまり用いられない。しかし、大容量の MOS FET などのデバイスや X 線リソグラフィーのマスク製作など特殊な用途に応用されている^{29, 30)}。以下、このメカニズムについて述べる。

シリコン結晶は、図 5.2 のようにダイヤモンド型の共有結合型結晶で構成されている。結晶の表面を考えると、界面の原子は電子的に結合の相手がおらず、不安定な状態にあり、これをダングリング・ボンドと称する。主要な結晶の方位面である (100), (110), (111) の 3 面について、このようなダングリング・ボンドの密度を計算すると、表 5.2³¹⁾ が得られる。ここで a はシリコン単結晶の単位格子ピッチであり、 $a=0.54\text{nm}$ である。これより、それぞれの結晶面により原子の結合力が異なるため、適当な化学反応エネルギーをもつ溶液を用いることにより、特定の結晶方位のみエッ

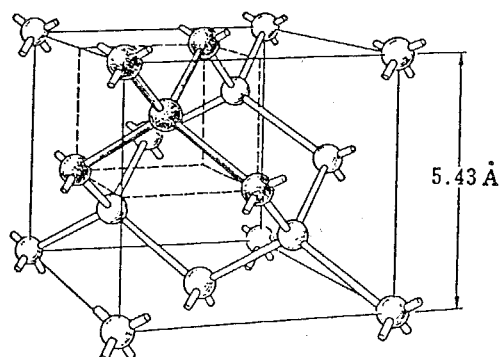
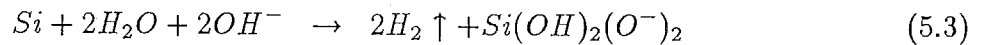
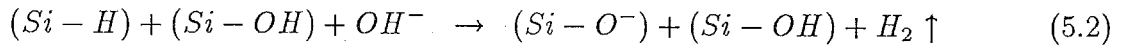
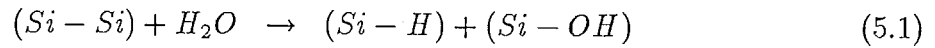


図 5.2: シリコン単結晶の構造。

面方位	ダングリング・ボンド密度	1m ² あたりの数
(111)	$\frac{4}{\sqrt{3}} \cdot \frac{1}{a^2}$	7.92×10^{18}
(110)	$\frac{4}{\sqrt{2}} \cdot \frac{1}{a^2}$	9.70×10^{18}
(100)	$\frac{4}{a^2}$	1.37×10^{19}

表 5.2: 主要な結晶面のダングリング・ボンド密度

チングを進行させることが出来る．たとえば水酸化カリウムでシリコンをエッチングするときの化学反応式は³³⁾，



のように表わされ，多段の反応により水素ガスを発生する．式中に水酸化カリウムが現われないが，実際にはカリウム・イオンに配位した水分子が反応に寄与している．

標準参照試料としてのマイクロパターンはシリコンの凹凸線により表現するため，パターン長手方向に直角に近い整ったエッジを形成する必要がある．このようなパターンは，(110)の面方位を持つシリコン・ウェハの結晶軸方向<112>にパターンを描画し，水酸化カリウム水溶液によりシリコンの異方性エッチングを行うことにより製作することができる．このプロセスの概略を図 5.3 に示す．

はじめに，シリコンウェハの表面に酸化膜を形成して，アルカリに対するマスクを作製する．これは，レジストが強アルカリに犯されやすく，アルカリ・エッチングでマスクの働きを果たせないからである．また，気相成長法 (CVD) プロセスにより酸化膜を形成した方が厚みを取ることができるが，稠密さに欠けエッチング耐性が劣るため，熱酸化法による酸化膜を採用した．この後，ウェハ表面にレジストを塗布し，電子ビームまたは光によるリソグラフィーによりパターンニングを行なう．この際，描画方向と結晶軸方向は十分に合わせる必要がある．現像処理の後，酸化膜穴あけを行うが，これにはシリコンには反応せず酸化シリコンだけを溶かすフッ酸を用いる．穴あけが終わると不要になったレジストを除去して，異方性エッチン

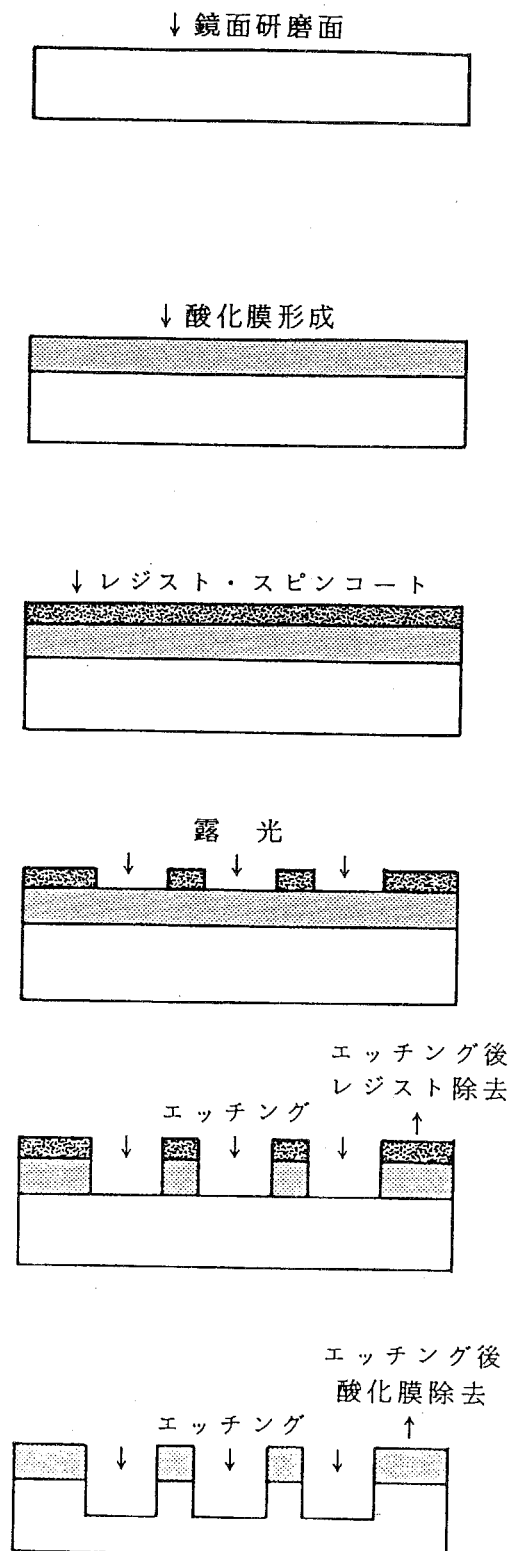
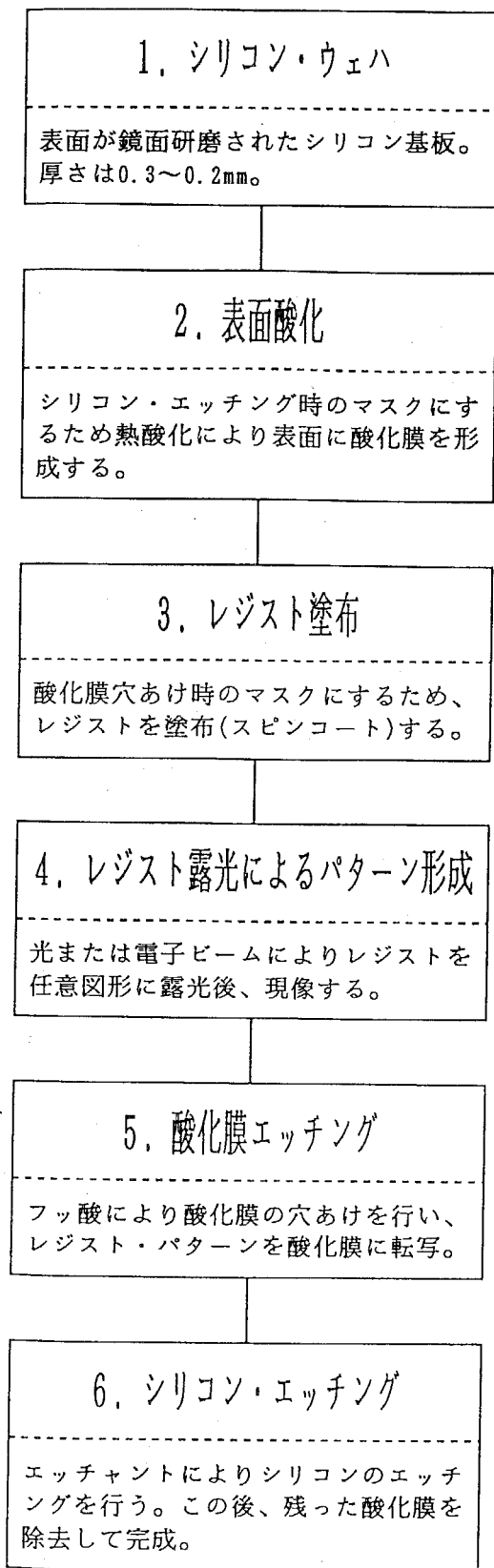


図 5.3: アルカリによるシリコン異方性エッチングのプロセス。

グのための準備が完了する。最後に、熱した水酸化カリウム溶液によって異方性エッチングを行なった後、残った酸化膜を再度フッ酸により除去すればマイクロパターンの完成となる。

5.4 異なる線幅を持つパターンの製作と評価

サブ μm の異なる線幅を持つ孤立パターンの集合からなる標準マイクロパターンを製作するために下記のような具体的なプロセス条件を用いた。製作はパターンの清浄さを保つため、すべてクリーンルーム中で行なった。シリコン表面酸化は 1150° の水蒸気雰囲気中にて24時間行い、平均膜厚 $0.4\ \mu\text{m}$ を得た。電子ビーム・レジストには東京応化製のポジ型レジストOEBR 1030を使用して $0.3\ \mu\text{m}$ 厚にスピコートをし、加速電圧 5kV 、試料電流 $3\times 10^{-9}\text{A}$ でパターンの露光を行なった。このレジストはメチル・メタアクリレートとアクリル・ニトリルの共重合体で、分子量 $70\text{万}\pm 7\text{万}$ を持ち、ポジ・レジストとしては高感度でエッジ・ラフネスが良好なのが特長である。酸化膜穴あけを行なうフッ酸は、フッ化アンモニウムによる緩衝溶液として、水素イオン濃度を一定に保つとともに、強酸性蒸気の蒸散が無いように配慮した。シリコンの異方性エッチャントである水酸化カリウム溶液は重量濃度47%に調製したが、エッジ・ラフネス向上のためイソプロピル・アルコールを十分に添加した飽和溶液とし³²⁾、本プロセスの標準的な温度である 80°C 付近でエッチングを行なった。この際、アルコールと溶液の蒸散を極力避けるため冷却管を用いて蒸気の還流を図るとともに、反応ガスである水素の放出に留意した。また薬液に使用した水は、すべて電気伝導度 10^{-6}S/cm 以下の純水を使用した。本プロセスでのエッチング・レートは約 $1\ \mu\text{m}/\text{分}$ であり、パターン深さ方向の寸法制御はエッチング時間により行なった。ただし、異方性エッチングと言えども深さ方向の $\frac{1}{100} \sim \frac{1}{150}$ の割合で側壁方向にもエッチングが進行するので、エッジ角度は完全に 90° にはならず、最小線幅も横方向のエッチング・レートにより制限される。

異方性エッチングで得られるマイクロパターンのエッジ形状とエッジ・ラフネスは、パターンの描画方向と結晶軸 $\langle 112 \rangle$ 方向の一致度にかかわっている。そこでシリコン・ウェハの結晶軸方位を十分に調べ、パターン描画方向に合わせ込む作業

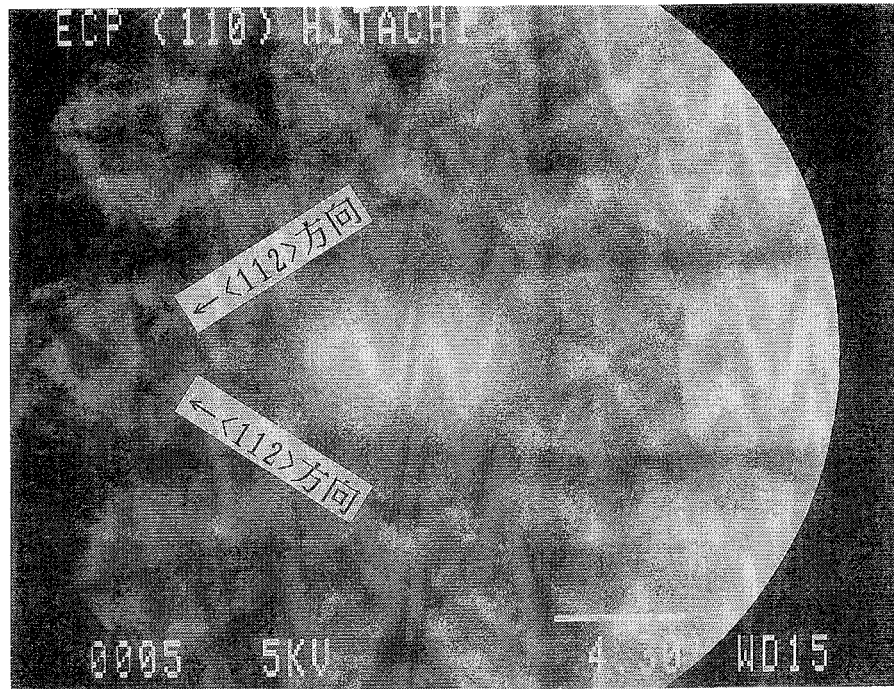


図 5.4: (110) 面のエレクトロ・チャネリング・パターン.

が必要となる。結晶方位を調べるには図 5.4 のような電子線の回折現象に基づくエレクトロ・チャネリング・パターンを観察する。これは波長 λ の電子線を入射角度 θ で格子ピッチ a を持つ結晶性試料に打ち込むと、ブラッグの回折条件

$$2a \sin \theta = n\lambda \quad (5.4)$$

を満たす入射角で後方散乱電子や吸収電子の量に著しい変化が見られ、結晶面や方位に特有のパターンが現われる現象である。(110) 面では、図中に示した $\langle 112 \rangle$ 軸が四つ存在する。

前述したプロセスにより、実際に製作したマイクロパターンの一例を図 5.5(a) に示す。この例では 6 種類の異なるサブ μm の線幅を持つパターンが作製されており、L と S の標記はパターンが凸か凹かを示している。また測定時の走査の便宜のために、パターン垂直方向 3 個所にガイドラインを設けた。試料片の大きさは 12mm 角で、1 つのチップにはこのようなパターンが縦方向に 4 個所、横方向に 2 列の合計 8 個所描画されている。線幅や深さは前述のように電子ビームリソグラフィーの描画パラメータやエッチング時間により可変できるので、使用目的に応じたマイクロパターンの製作を行なうことが可能である。同図 (b) は (a) のパターンをガイドラ

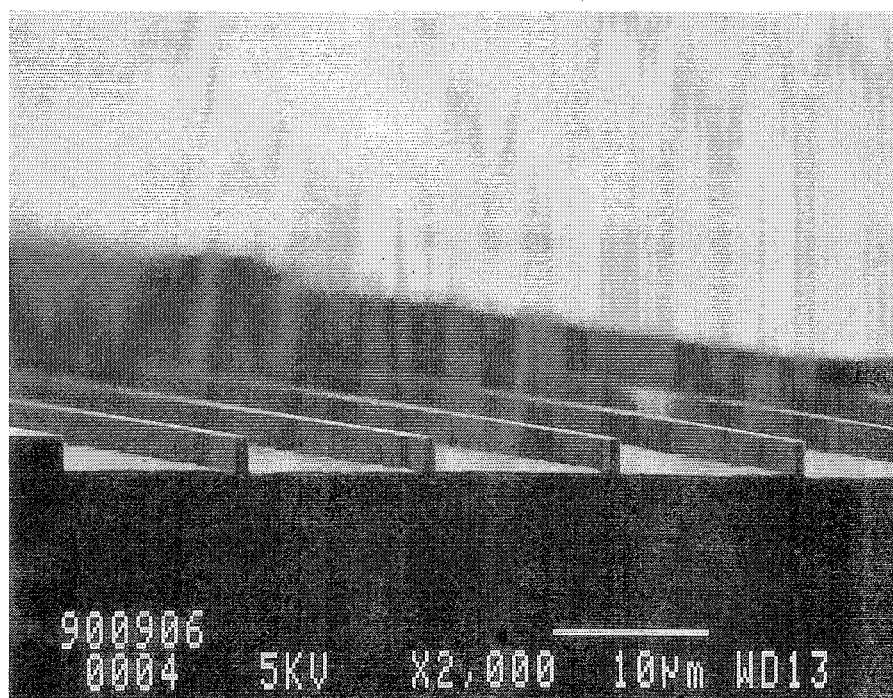
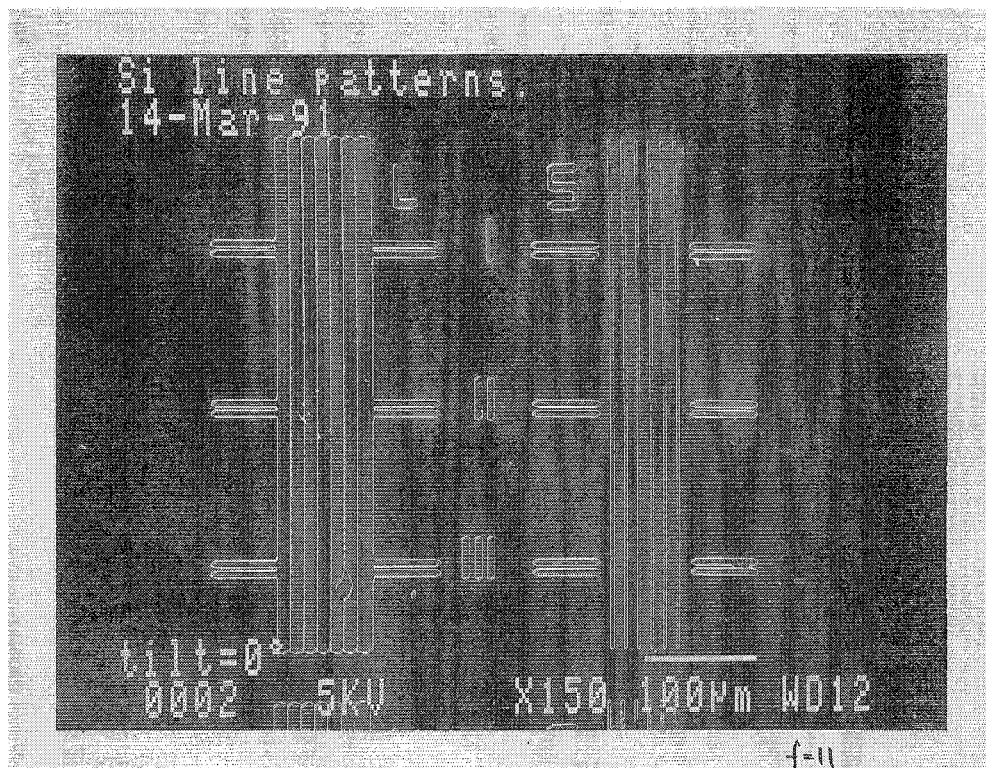


図 5.5: (110) ウェハの異方性エッチングによるマイクロパターン. (a:上) パターンの全体像, (b:下) パターンの劈開面

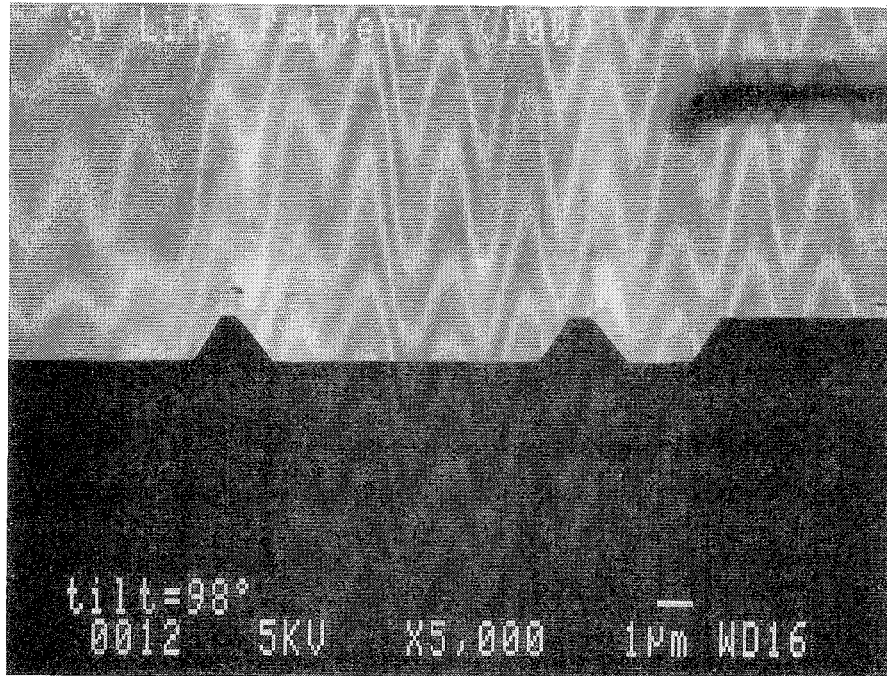


図 5.6: (100) ウェハを用いた異方性エッチングによるマイクロパターン。

インに沿って劈開し、劈開面の観察によりパターン・エッジの評価を行なった例である。これよりエッジ角度約 88° の良好な形状が得られており、エッジ・ラフネスも少ない様子がわかる。

またこれ以外の角度のエッジを製作する方法として、(100) のウェハを用いて $\langle 110 \rangle$ 方向にパターンニングし、同様の手順で異方性エッチングを行なうと、 54.7° のエッジ角度が得られることが知られている³¹⁾。図 5.6 は、このような方法により製作した緩斜面を持つパターンの劈開面である。

劈開面観察以外のパターンの評価としては、エッチング直後に光学顕微鏡により外観検査およびエッチング底部の検査を行っている。底部検査はエッチングに起因する微細な凹凸により 2 次電子放出能率に著しい差が生じないように、これが一定の範囲に納まっているかどうかを確認するものである。通常、マスクされた部分はエッチング前に仕上げられていた鏡面が残っているが、エッチング部分は数 10 ～ 数 nm の梨地状になる³³⁾。そこで、ノマルスキー型の微分干渉顕微鏡によりパターン底部を観察し、著しい干渉色が生じないことを確認することにより良否を判定した。また、形状については測定に用いないパターン隅部で SEM による観察を行い、仕上がりチェックを行なった。

以上のプロセスにより，異なる線幅を持つ標準マイクロパターンが製作できるようになった。

5.5 ピッチ・パターンの製作と評価

標準マイクロパターンによる寸法校正の別の手法として，規則正しく形成されたパターンのピッチにより寸法間隔を表示する方法がある．これは光学的な標準試料でも用いられており，前節で製作したような一つ一つが独立した寸法を持つパターンと併用されることが多い．電子ビームにおいても第7章で述べるようにピーク信号の発生メカニズムの関係から，ある程度より細い線幅はピッチにより定義する必要がある．このため，規則正しいピッチを持つ標準マイクロパターンの製作の必要性が生じた。

このような試料は，図5.7のような系を用いた干渉縞投影法により製作される³⁴⁾．これは本来，半導体レーザーの分散フィードバック (DFB) 格子の製作に用いられる系であり，マッハ・ツェンダ型の干渉計がベースとなっている．観測面にはレジストを塗布したウェハが置かれており，この上に 2θ の角度をもってレーザー光が投影される．このとき発生する干渉縞のピッチ p は，

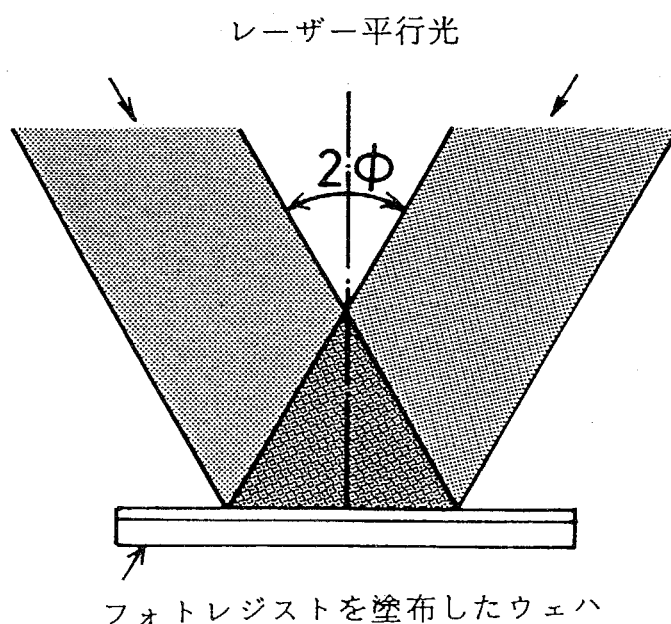


図 5.7: ピッチ試料製作のための干渉縞露光系.

$$p = \frac{\lambda}{2 \cdot \sin \theta} \quad (5.5)$$

で与えられる。ここで λ はレーザーの波長であるが、レジストは紫外領域に感度を持つので、光源には通常 He-Cd レーザー ($\lambda=0.325 \mu\text{m}$) が用いられる。この際、干渉縞の長手方向を前節と同様に (110) ウェハの $\langle 112 \rangle$ 方向に合わせてパターンニングを行い異方性エッチングで仕上げれば、干渉縞のピッチにより規定された間隔を持つ凹凸試料を製作することが出来る。光の波長を基準としたピッチであるため寸法の信頼性が大きいと同時に、サブ μm のピッチ・パターンニング手法自体としても有用である。しかし実際には、レジストの描画／現像性能により最小ピッチが決定される。図 5.8 は本手法により製作されたパターンの一例であり、ピッチ間隔約 $0.24 \mu\text{m}$ の規則正しい凹凸マイクロパターンが形成されている様子が分かる。

本パターンの特長として、光学的な測定によりピッチの推定が可能なが挙げられる。すなわち、ピッチ試料である回折格子上に一定の角度 θ でレーザー光を照射すると、特定の角度 ϕ に n 次の回折光が現われる。この関係は

$$p \cdot (\sin \theta + \sin \phi) = n\lambda \quad (5.6)$$

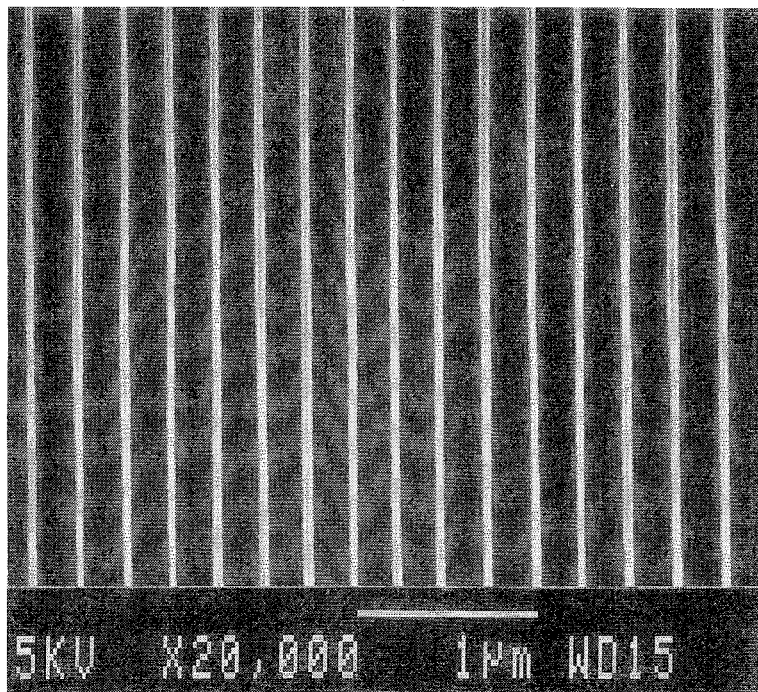


図 5.8: 干渉縞露光法による標準ピッチ・パターン。

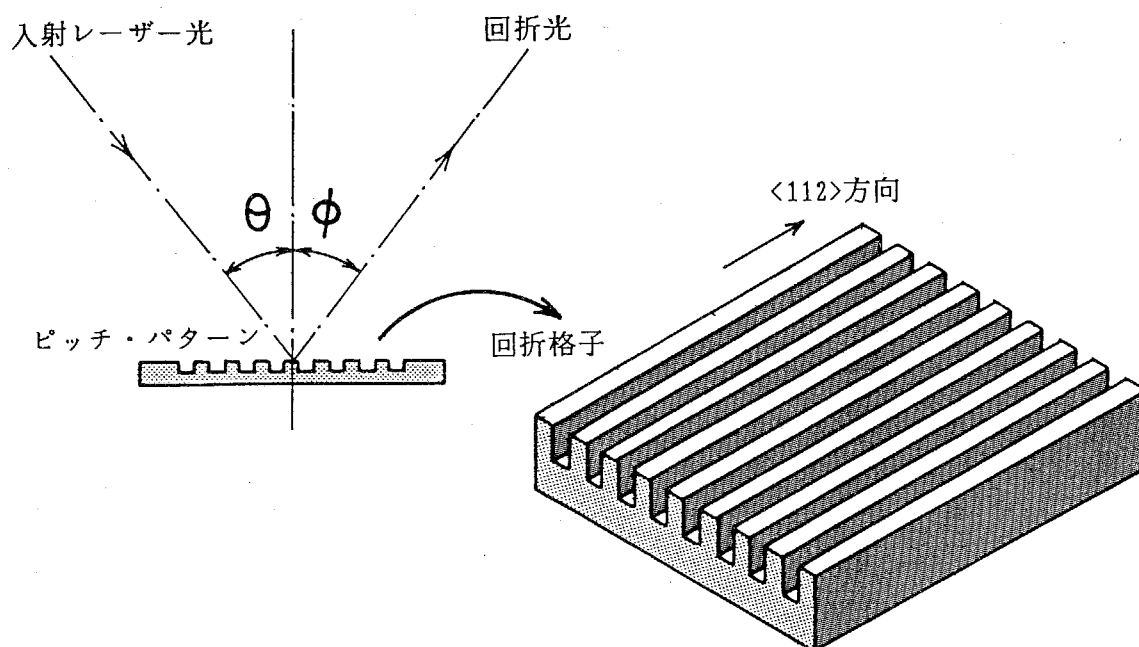


図 5.9: 回折光角度測定によるピッチの評価.

により表わされる．従って，図 5.9 のようにレーザーの入射角度と回折光の生じる角度を測定することにより，ビームが当たっている領域内での平均的なピッチ p を推定することが可能である．

図 5.8 の試料に対して，実際に本法を適用して得られたピッチ寸法は $p = 0.240 \pm 0.001 \mu\text{m}$ であった．一部半導体メーカーでは，このようなピッチを基準として電子ビーム測長装置の校正が行なわれている．

5.6 章のまとめ

電子ビーム絶対測長装置での測定値を他の装置に移し替える媒介物として，標準マイクロパターンを製作した．このパターンはシリコンの凹凸形状によるサブ μm の線幅を持つもので，半導体工業界のニーズとも合致している．試料は標準として使用される場合を考慮して機械的な仕上がり形状を重視し，(110) および (100) の面方位を持つシリコン・ウェハとアルカリによる異方性エッチング・プロセスにより

製作した。この試料には線幅に応じて、孤立線およびピッチからなる2種類のタイプを製作した。リソグラフィーによるパターンニングもそれぞれの特長を生かすため、電子ビーム露光法と干渉縞露光法を併用した。これらのプロセスにより、急峻なエッジ形状でエッジ・ラフネスの良好なサブ μ m線幅を持つシリコン標準マイクロパターンを製作することが出来た。これは電子ビーム測長装置用の参照試料として本格的なもので、参照試料として新たな分野に進出を果たしたことに本研究の意義が認められる。

このようなシリコンパターンの問題点としては、低加速電圧時のビーム・ドーズによる試料汚損や表面酸化の問題が避けきれない。現在のところ、前者は高加速電圧やミニマム・ドーズシステムによりハード側で、また後者は真空中で保存する等の運用面で解決している。

第 6 章

電子ビーム走査による

エッジ信号の理論解析

6.1 はじめに

マイクロパターン上に電子ビームを走査すると、組成の変化やパターンのエッジに応じて 2 次電子信号の鋭いピークを発生する。このピーク位置は絶対測長装置を用いたパターンの測長などにおいて、測定の指標としての役割を果たす。すなわちこれは干渉縞スケールに対するポイントであり、測定の開始・終了点を検出するための標識である。しかし、ピークの位置が実際のパターン・エッジに対してどのような関係にあるのかは、完全に明らかにされていない。これを解明するため、断面の SEM 写真と断面近傍を走査したときの 2 次電子強度分布を対比することが一般的に行なわれているが⁷⁾、SEM の分解能に近い数 nm の領域が問題となるため完ぺきな測定を期すことは難しい。また実際の生産現場における線幅測定では、ピークに対するさまざまな線幅定義法を用いてプロセスや生産メーカー単位でノウハウ的に対処しているのが現状である。そこで、パターン・エッジと 2 次電子信号のピーク位置の対応を理論的に予測し、実際の測定において正確な線幅を求めるための指針作りが必要となる。

電子ビームを試料上に打ち込むと固体との相互作用により、図 6.1 に示すような領域からさまざまな脱出粒子を生じる³⁵⁾。このような粒子のうちで、2 次電子は脱出領域が表面から数十 nm 以内に限られているため表面凹凸情報を多く含み、SEM の映像信号として用いられる。

マイクロパターン上に電子ビームを走査したときに得られる 2 次電子信号の推定法としては従来より、モンテカルロ・シミュレーションによる方法³⁶⁾と修正拡散法に

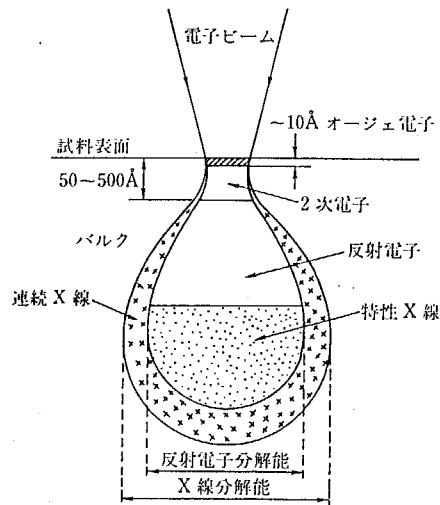


図 6.1: 入射電子による表面からの脱出粒子分布

に基づく方法^{11, 44)}が提案されてきた。前者は打ち込まれた電子一つ一つについて、エネルギー・ロスモデルや散乱モデルを考慮しながら追跡計算を重ねていく方法で、物理的なプロセスをよく反映しているものの膨大な計算時間がかかる難点を有する。一方後者はシリコンなどの低原子番号物質中での電子挙動が拡散により支配されることに着目した方法であり、モデルが単純で計算は速いがマイクロパターンのような急峻なエッジスロープには適用しにくかった。本研究ではシミュレーションの簡便さに着目し修正拡散法による推定を用いたが、電子ビーム径を考慮するとともに急峻なエッジスロープにも適用可能なようにモデルの改善を図った。

本章では、始めにモンテカルロ・シミュレーションによるエッジ信号推定について述べたのち、修正拡散法およびこれを発展させた円筒領域モデルによるエッジ信号推定法について記した。

6.2 モンテカルロ法によるエッジ信号の推定

固体内に打ち込まれた電子は自由電子との相互作用、結晶内のクーロン・ポテンシャルによる弾性散乱（エネルギー保存則が成立）、および自由電子ガスによるプラズモン散乱、イオン化衝突による非弾性散乱などによりエネルギーを失いながら、複雑な軌跡を描く³⁸⁾。この過程で上図 6.1 のような励起粒子を生じるが、散乱により発生した 2 次電子自身も衝突のカスケード過程により数を増加しながらエネルギーを失っていく。電子はやがて固体中で停止するか表面から放出されるが、これが最初に打ち込まれたものか散乱により発生したものを区別することはもはや不可能で

あり無意味である。

入射電子のエネルギーが大きい場合は、特定の電子を個別的に励起する弾性散乱が支配的になり、これは古典物理の2体衝突問題として扱うことが出来る。この衝突でエネルギー E を持つ2次電子を発生するが、この確率を支配する散乱断面積 $\sigma(E)$ は、

$$\sigma(E) = \frac{e^4 k_f^3}{3\pi E_p (E - E_f)^2} \quad (6.1)$$

により与えられる。ここで e は電気素量、 k_f はフェルミ準位における電子波数、 E_f はフェルミ・エネルギー、 E_p は入射エネルギーである。

電子が局所的に固体内に入射することにより固体の電氣的な中性が保たれなくなるが、この際自由電子系の集団応答としてプラズモンが励起され電氣的なアンバランスを解消しようとする。このような応答はプラズモン散乱と呼ばれ、散乱角が小さい場合に特有の現象である。例えばシリコンの4個の原子がプラズマ振動する場合、10kVの入射エネルギーで 10^{-3} ラジアン・オーダーの前方散乱となる。

イオン化衝突による非弾性散乱は電子の内殻遷移を伴い、エネルギー交換を行なう殻の準位やそれにとまなう電子遷移の準位に応じて、特性X線やオージェ電子などを発生する。衝突の微分散乱断面積 $d\sigma$ は、内殻準位波動関数 ψ_0 を初期値、外向き平面波 $\psi_n = e^{ikr}$ を終状態として、ボルン近似¹による行列要素から、

$$d\sigma = \left(\frac{e^2 m}{\hbar} \right)^2 \cdot \frac{4k'}{kq^4} \cdot \left| \int (\sum_a e^{-iqr_a}) \psi_n^* \psi_0 d\tau \right|^2 d\Omega \quad (6.2)$$

$q = k' - k$

で与えられる³⁸⁾。ここで、 m は電子質量、 $\hbar (= \frac{h}{2\pi})$ はプランクの定数、 k', k は遷移前と後の電子波数である。この散乱は励起電子の運動量方向にピークを持ち、通常の古典的な散乱で近似可能である。

¹散乱問題で断面積を計算する代表的な手法。各種相互作用は、自由粒子系に対する摂動として扱う。

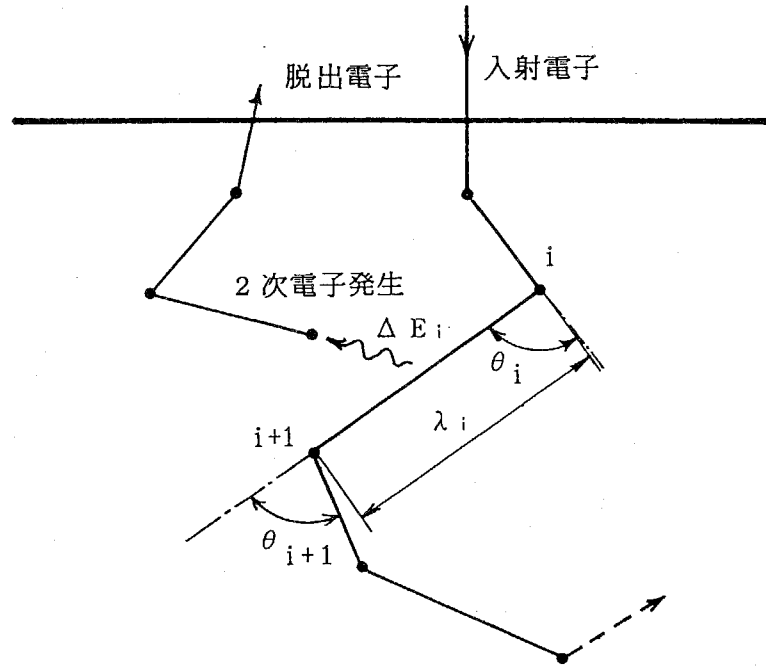


図 6.2: 固体中での電子の飛跡

モンテカルロ法では上記各種の散乱過程を単純化するため比較的高い入射電子による弾性散乱のみを考え、他の散乱は無視することによりシミュレーションを行なう。すなわち図 6.2 に示すように、電子の i 番目と $i+1$ 番目の衝突の間には、 i 番目の衝突による角度変化 θ_i 、飛距離 λ_i の間のエネルギー・ロス ΔE_i を生じるものとする。この際、角度変化を与える確率分布として遮蔽されたラザフォード・モデル、飛距離には固体中の平均自由行程、エネルギー・ロス・モデルにはベーテの近似則またはこれに類するモデルを用いるのが一般的である¹⁰⁾。

これらのモデルを表わす数式はそれぞれ、

$$\theta_i = \cos^{-1} \left[1 - \frac{2\beta \cdot RND}{(1 + \beta) - RND} \right], \quad \beta = \left(\frac{1}{2ka} \right)^2 \quad (6.3)$$

$$\lambda_i = -\Lambda \cdot \ln RND \quad (6.4)$$

$$\Delta E_i = 2\pi e^4 Z \left(\frac{N_A}{A E_i} \right) \cdot \ln \left(\frac{2E_i}{J} \right) \lambda_i = E_i - E_{i+1} \quad (6.5)$$

のように記述される。ここで、 k は電子波数、 a はラザフォード遮蔽半径、 Λ は固体中の平均自由行程、 Z は原子量、 N_A はアボガドロ数、 A は原子番号である。またイオン化ポテンシャル $J(\text{eV})$ は、

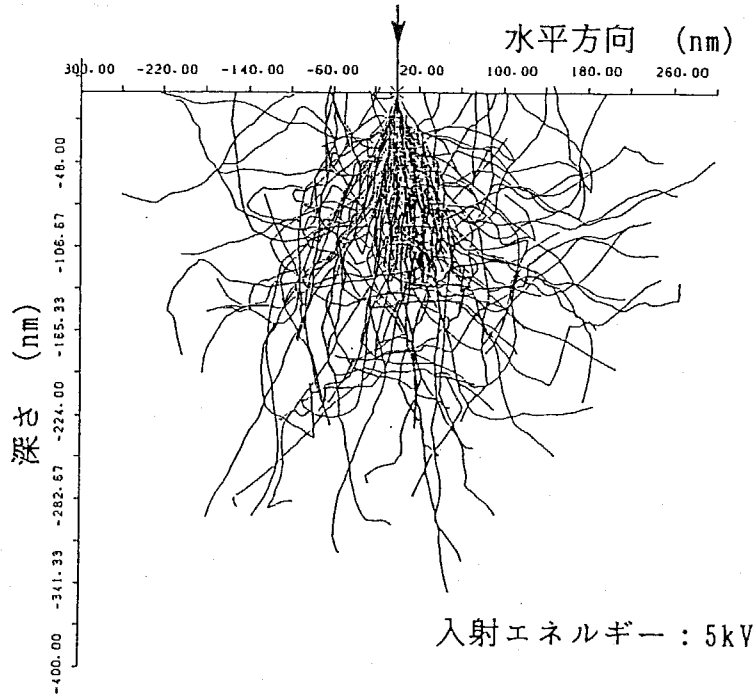


図 6.3: モンテカルロ・シミュレーションによる固体中での電子の飛跡

$$J = 9.76Z + \left(\frac{58.5}{Z^{0.19}} \right) \quad (6.6)$$

で与えられる¹⁰⁾。式中の RND は $0 \sim 1$ の値を持つ一様乱数であり，入射電子の挙動を確率的に決定して行くのでモンテカルロ法の名が付けられている。図 6.3 は，入射エネルギーが 5keV の 100 個の電子について，エネルギーを失うか表面から脱出するまで追跡した例である。

電子は固体中を伝播するにともない 2 次電子を発生するが，深さ z における 2 次電子の発生個数 n はエネルギー損失 ΔE の平均値に比例し，

$$n(z, E) = -\frac{1}{\varepsilon} \cdot \frac{dE}{d\lambda} \quad (6.7)$$

で表わされる。ここで ε は 2 次電子を発生するのに必要なエネルギーである。従って，エネルギー損失 ΔE の累計が ε を越えた場合，ある確率で新たな電子を発生する。

深さ z における 2 次電子の固体表面からの脱出確率を $p(z)$ とすると，

$$p(z) = C \cdot e^{-\frac{z}{\lambda}} \quad (6.8)$$

で与えられるので，この式を用いて i 番目から $i+1$ 番目までの伝播経路で発生した 2 次電子が表面から脱出する確率 $p(z_i, z_{i+1})$ を計算すると，

$$p(z_i, z_{i+1}) = \frac{C \cdot \lambda}{z_{i+1} - z_i} \cdot (e^{-\frac{z_i}{\lambda}} - e^{-\frac{z_{i+1}}{\lambda}}) \quad (6.9)$$

が得られる。ここで C は便宜上 0.5 前後の定数とする。

従って 2 次電子の強度を計算するためには前述の飛跡を計算するとともに、散乱と伝播にともなう 2 次電子の発生個数と確率を計算していく必要がある。この際計算時間を減らすため、追跡する 2 次粒子のいくつかを選択し、その数を入射粒子の質量を基準に決定して行くロシアン・ルーレットと称する方法も提案されており、イオン打ち込みの際の計算手法として用いられている³⁹⁾。しかし基本的にはモンテカルロ法によるシミュレーションは非常に複雑であり、大型計算機で 1 点あたり 2 時間程度、スーパーコンピュータを用いても数分かかり、エッジスロープ全体について計算を行なうには膨大な時間を必要とする。

マイクロパターンに電子ビームを走査したときの 2 次電子信号は、前出のモデルを定義された形状の横方向にビーム位置を少しずつずらして計算を繰り返すことにより求められる。この際に注意すべきことは、SEM の検出器により捕捉される 2 次電子には以下の 4 種類のものが混在していることである⁴⁰⁾。

- SE1 入射電子により試料から直接散乱されたもの、
- SE2 後方散乱電子により試料表面から散乱されたもの、
- SE3 後方散乱電子により SEM の電極から発生するもの、
- SE4 その他の後方散乱や SEM 鏡筒との相互作用によるもの。

このうちもっとも重要なのは SE1 の成分であり、SEM の空間分解能は SE2 に対するこの成分の割合で決まるが、モンテカルロ法では通常この二つの成分を同時に計算する。また、試料表面から検出器までの電位分布を計算して、検出器の位置による 2 次電子捕収効率の変化まで含めて計算する方法が一般的である。

図 6.4 は、このようなモンテカルロ・シミュレーションにより得られたマイクロパターンのエッジ信号である³⁶⁾。銅の $0.5 \mu\text{m}$ 角の凸パターンについての計算例で、ビーム径が太くなるにつれてエッジ信号が鈍くなり、内側にずれて行く様子がわかる。

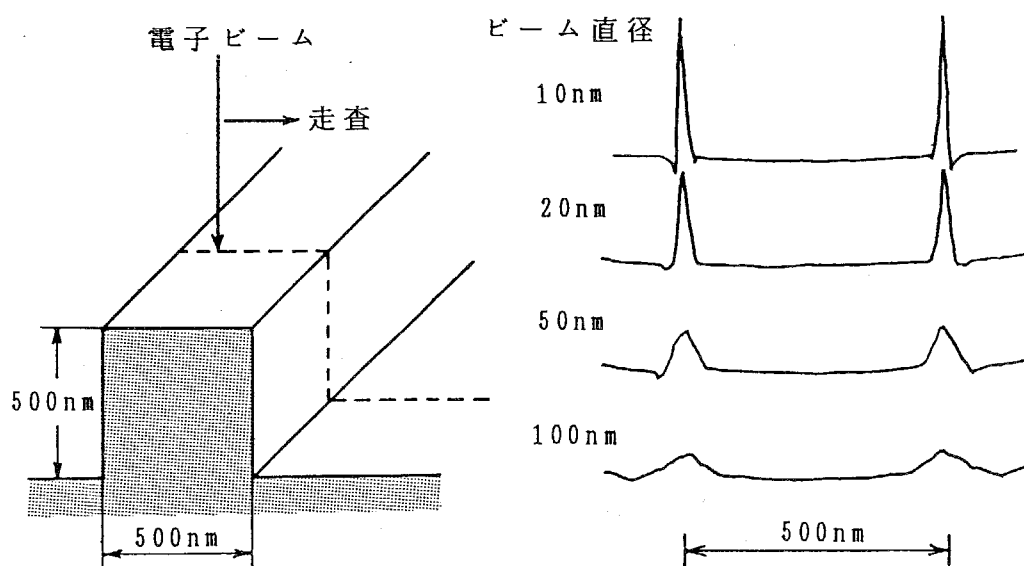


図 6.4: モンテカルロ・シミュレーションによるマイクロパターンのエッジ信号³⁶⁾. 定義形状 (左) とエッジ信号 (右).

6.3 修正拡散法によるエッジ信号の推定

修正拡散法は、シリコンのように原子番号が小さい物質中に電子を打ち込むと、結晶格子内の電子挙動はモンテカルロ法のように散乱としてではなく、拡散現象として見なせるという理論に基づく^{41, 42)}. すなわち入射電子は、図 6.5 のように固体表面から一定の到達距離 Z_r だけ直線的に進入するが、この直線上にある完全拡散距離 Z_d を中心として拡散現象によりあらゆる方向に広がって行く. 電子は拡散中心から、

$$R = Z_r - Z_d \quad (6.10)$$

の半径を持つ球体の範囲内を拡散により伝播し、これよりも外側には脱出することはできない. 従って固体表面から脱出可能な電子は、球体が表面と交わってできる円錐 (後方散乱円錐体) の内部で発生したものに限られる. さらに実際の 2 次電子は表面から数十 nm 以内の浅い領域で発生することが知られているため³⁵⁾, 円錐体の底面積は 2 次電子信号強度に比例するものとして近似することができ、これが修正拡散法によるエッジ信号の推定原理となる^{11, 43)}.

完全拡散中心 Z_d はベーテの定義によれば入射電子に対する進行電子の角度の余弦平均が $\frac{1}{2}$ になる深さとされる. これは電子の固体内伝播に伴うエネルギー・ロスの積

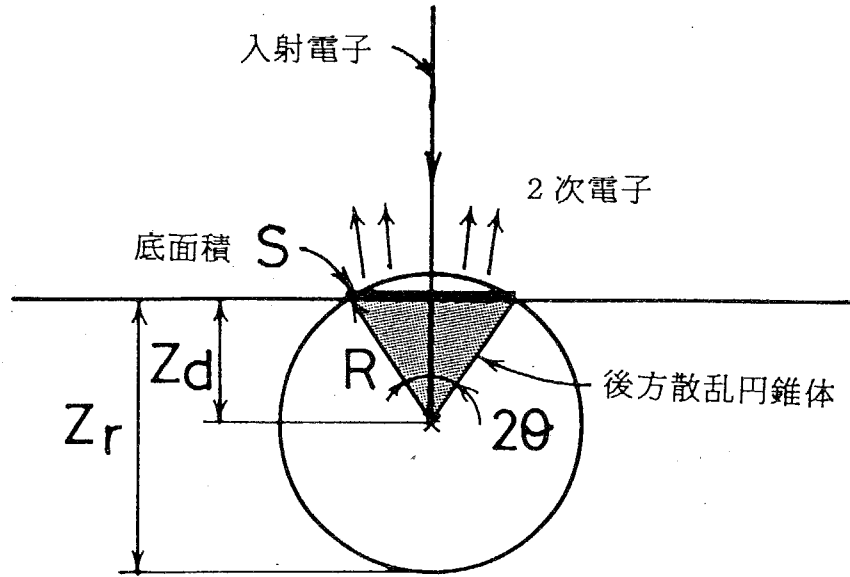


図 6.5: 修正拡散法の原理.

分値が,

$$\int_{E_d}^{E_0} \frac{dE}{\lambda \left| \frac{dE}{dx} \right|} = \frac{1}{2} \quad (6.11)$$

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{\pi N_c e^4 Z^2}{2E^2} \cdot \ln \frac{2a_h m \left(\frac{2E}{m} \right)^{\frac{1}{2}}}{\hbar Z^{\frac{1}{3}}} \quad (6.12)$$

となる E_d を与える深さである. ここで, N_c は 1cm^3 あたりの原子個数, a_h はボーアの水素半径, E_0 は入射時の初期エネルギーである. また, エネルギー・ロス は前式 (6.5) によりあたえられる. 以上の式を原子番号が小さいことに注意するとともに, さまざまな近似則をあてはめ (付録参照), 最終的には,

$$Z_d = \frac{40 \cdot Z_r}{7 \cdot Z} \quad (6.13)$$

が得られる⁴¹⁾. また到達距離は Z_r はヤングらの実験結果から,

$$Z_r = \frac{0.115 \cdot E_a^{0.35}}{\rho} \quad (6.14)$$

で与えられる⁴⁴⁾. ここで E_a は電子加速電圧 (kV), ρ は原子密度 (g/cm^3) である. このようにして得られる計算結果は, モンテカルロ法の結果とよく一致することが知られている⁴⁵⁾.

電子ビームの強度分布

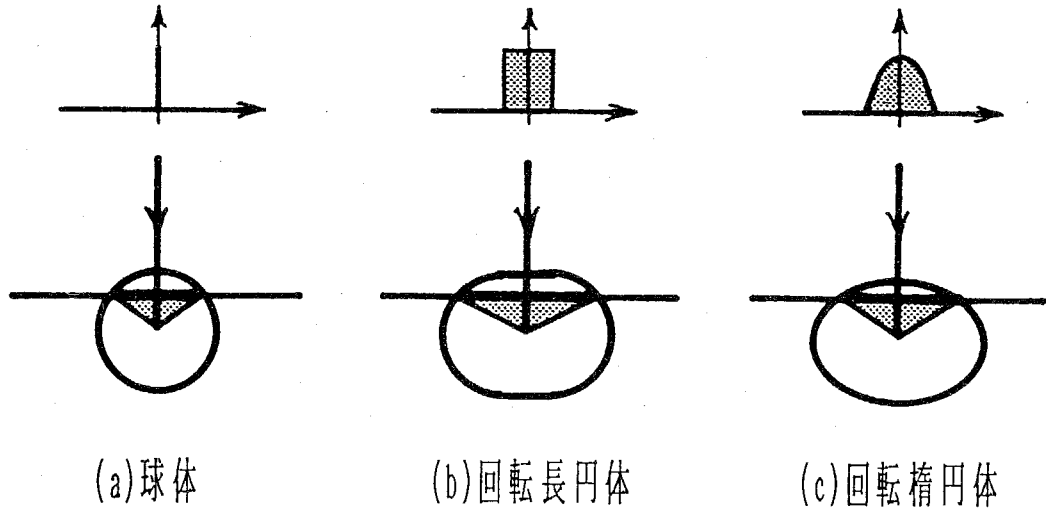


図 6.6: 電子拡散領域の定義法の改良の様子. (a) オリジナル, (b) 一様分布の場合, (c) ガウシアン様の分布を持つ場合.

従来の修正拡散法は電子拡散領域が球体により定義されていたが、実際の電子ビームは有限のビーム径を持つため領域の定義法を変える必要がある。そこで図 6.6 に示すように、電子ビームの強度分布を考慮して電子拡散領域の定義の改良を行なった。ビームが一様分布をしている場合は、同図 (b) に示すように電子拡散領域は横方向に長い回転長円体となる。しかし実際には同図 (c) のようにビーム中心から外側に向けて分布強度が小さくなっている場合がほとんどである。この場合は (a) により得られた 2 次電子強度を、分布関数にしたがって重み付けの演算を行なわなければならない。しかしこのような計算は修正拡散法の簡便さを損ない、シミュレーションの計算時間を長くする。そこで、入射電子ビームを軸とする回転楕円体により電子拡散領域を定義し、近似を試みた。

この回転楕円体は電子ビーム直径を $2 \times r$ とすると、

$$\frac{x^2}{(R+r)^2} + \frac{y^2}{(R+r)^2} + \frac{(z-Z_d)^2}{R^2} = 1 \quad (6.15)$$

により与えられる。そこで図 6.7 のように、定義された表面形状に対して電子拡散領域を走査し、表面形状による楕円体の切断面積を計算することにより、2 次電子強度を推定することが出来る。

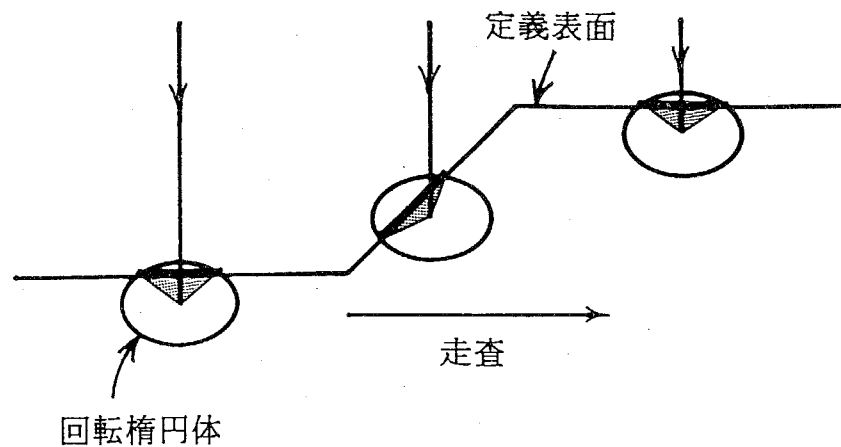


図 6.7: パターン上での電子拡散領域の走査.

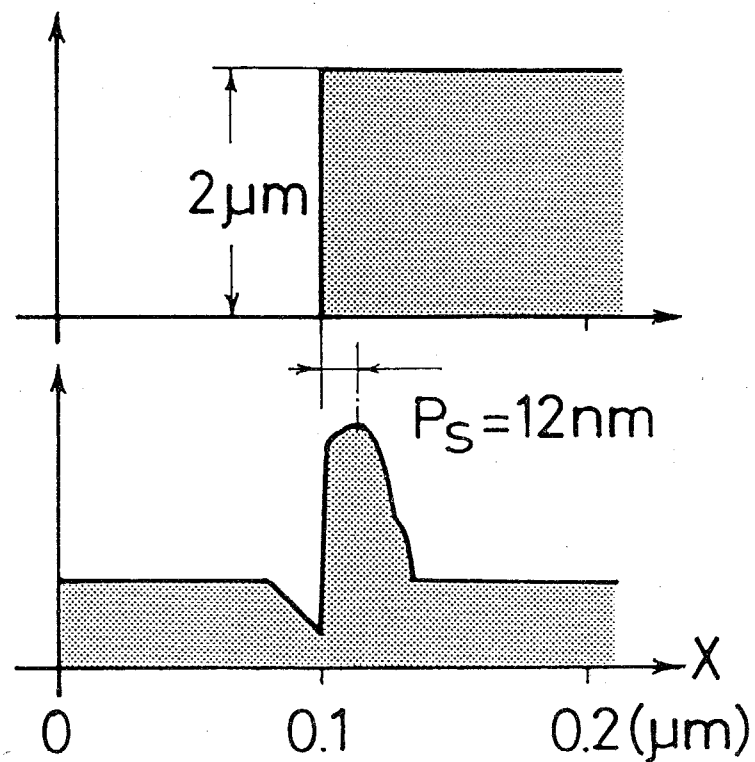


図 6.8: 修正拡散法による 2 次電子の推定. (上) 定義形状, (下) 2 次電子強度分布.

修正拡散法によるシミュレーションの例として, パターンの高さが $2 \mu\text{m}$ のシリコンの直角ステップエッジ近傍で直径 10nm の電子ビームを加速電圧 $E_a = 1\text{kV}$ で走査したときの 2 次電子強度分布を図 6.8 に示す. このとき電子到達距離 $Z_r = 49\text{nm}$, 完全拡散中心距離 $Z_d = 20\text{nm}$, 電子拡散半径 $R = 20\text{nm}$ が得られる. また 2 次電子

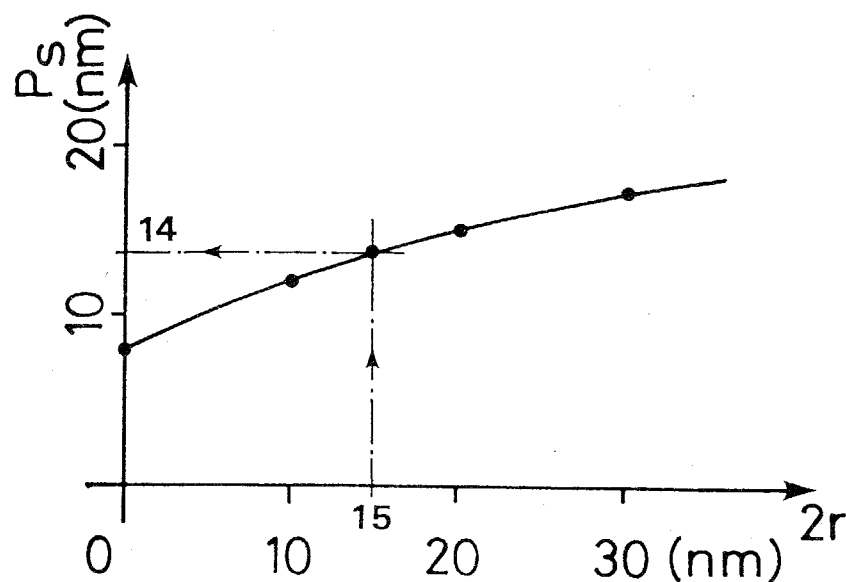


図 6.9: 電子ビーム直径とピーク・シフト量の関係.

のピーク位置は、約 12nm パターンの山側にずれることがわかった。

このようなパターンエッジからのピークのシフト量 P_s を、電子ビーム径に対してプロットしたものが図 6.9 である。これより電子ビーム走査によりマイクロパターンの線幅を測った場合、 $2 \times P_s$ だけ実際のエッジ間隔よりも小さく測定されることが予想される。また、ビーム径が大きくなるにつれてピークの位置が内側にずれる傾向は、前図 6.4 に示したモンテカルロ・シミュレーションによる計算結果と同様の傾向を示している。

6.4 円筒領域モデルによるエッジ信号の推定

従来の修正拡散法のモデルは緩やかなエッジスロープに対しては有効であるが、急峻なエッジスロープに対しては電子拡散領域を回転楕円体で定義することが難しいという問題があった。そこで、このような緩急両方のエッジスロープにも十分対応可能なように修正拡散法を発展させた円筒領域モデルを提案した。

従来の修正拡散法によりエッジスロープにおける 2 次電子発生領域を定義すると図 6.10(a) のようになり、急峻なパターンの上下方向に対して領域の定義が十分なされないという不都合があった。そこで、傾斜角度の大きなスロープに対しても発生領域が十分になるように、同図 (b) に示すような円筒に包含されるエッジパターン

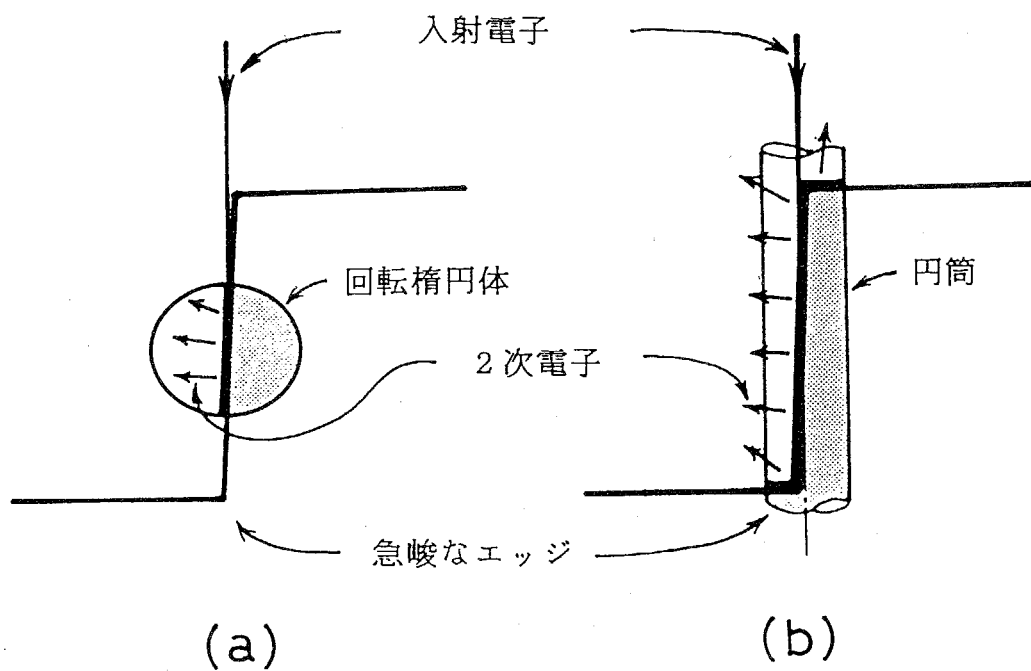


図 6.10: 電子発生領域の定義. (a) 従来の修正拡散法のモデル, (b) 円筒領域モデル.

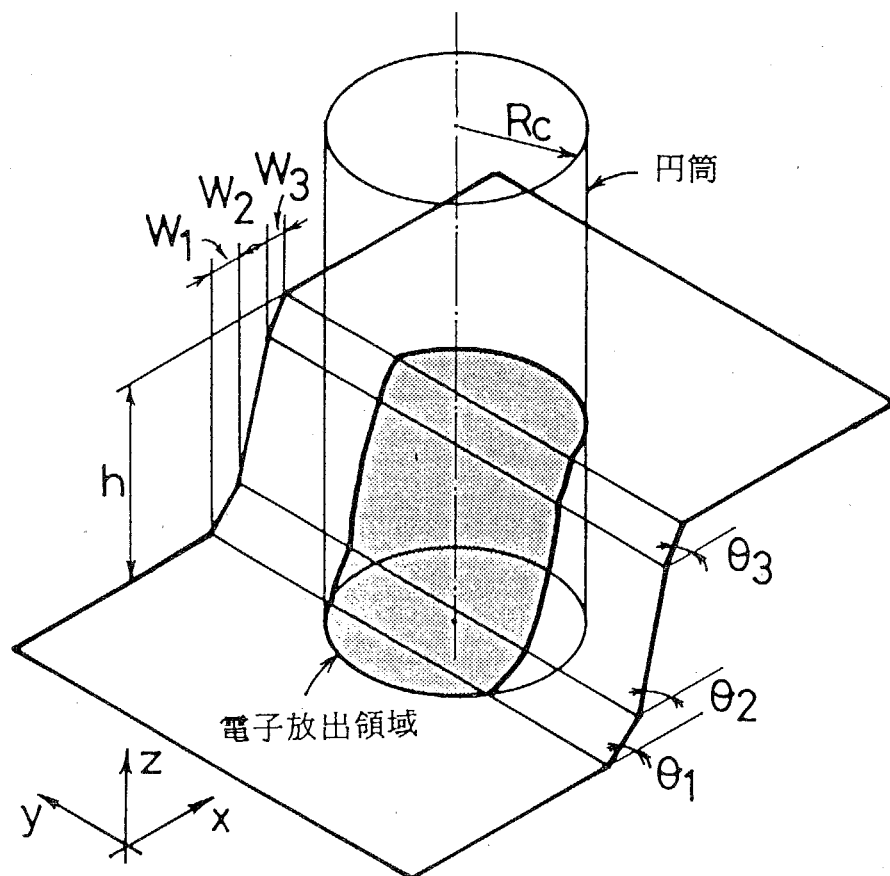


図 6.11: 円筒領域モデルによる 2 次電子強度計算のためのエッジ定義.

表面積で領域を定義しようというのが本モデルの基本的な考え方である。

2 次電子発生領域を計算するため、エッジスロープ形状を図 6.11 に示すように、ある角度 θ_i をもつ幅 w_i の斜面の組合せによる y 方向のライン状のパターンで定義する。スロープが n 個の斜面から構成される場合、エッジ幅 W およびエッジ高さ h は、それぞれ

$$W = \sum_{i=1}^n w_i \quad (6.16)$$

$$h = \sum_{i=1}^n w_i \times \tan \theta_i \quad (6.17)$$

の関係を満たす。

円筒領域は、前節で述べた電子ビーム径を考慮した回転楕円体 (式 (6.15)) が XY 平面と交わる円 ($z = 0$)

$$x^2 + y^2 = \frac{(R+r)^2(R^2 - Zd^2)}{R^2} \quad (6.18)$$

を上方に延長したものと考え、半径 $Rc(\mu m)$

$$Rc = \frac{R+r}{R} \sqrt{R^2 - Zd^2} \quad (6.19)$$

を持つとする。

このとき、2 次電子放出領域はスロープに対する円筒中心位置により $m(\leq n+2)$ 個の異なる傾斜角度を持つ領域に分割される。これに従い XY 平面上の円もストライプ状の領域に分割され、それぞれの面積を s_j とすると、信号強度 S はこれらの各斜面への射影 $s_j \times \sec \theta_j$ の総和

$$S = \sum_{j=1}^m s_j \times \sec \theta_j \quad (6.20)$$

で現わされる。すなわち、定義されたエッジ・パターン上で円筒を走査し、円筒領域内に含まれるパターン表面積を積算すれば、2 次電子強度に比例した信号が得られるというのが本モデルの計算手法である。

たとえば、最も単純な例として高さ h の直角ステップエッジに r の半径を持つ電子ビームを照射したとき得られる x 方向の信号強度分布 $S(x)$ は、

$$S(x) = \begin{cases} \pi Rc^2 & (|x| \geq Rc) \\ \pi Rc^2 + 2h\sqrt{Rc^2 - x^2} & (|x| \leq Rc) \end{cases} \quad (6.21)$$

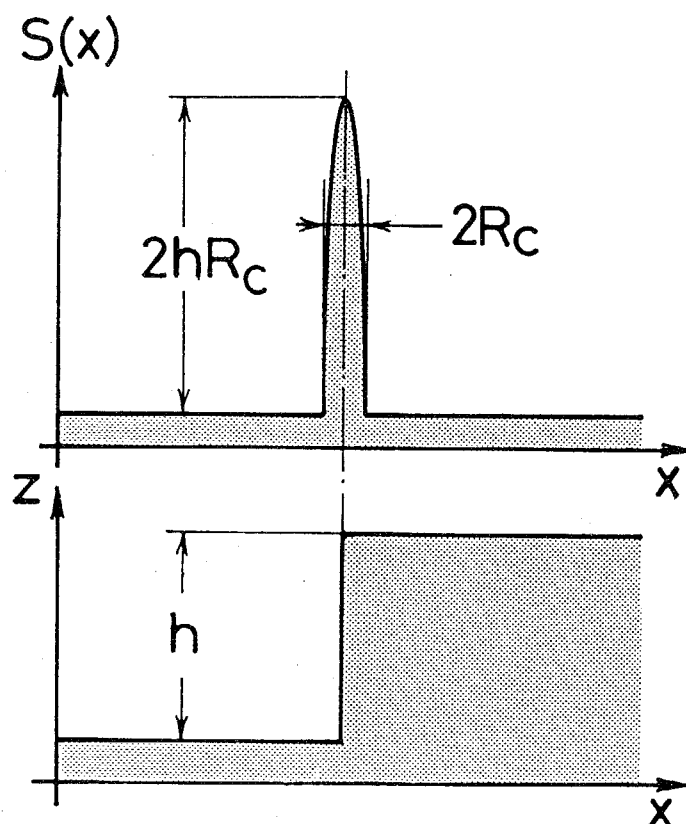


図 6.12: 円筒領域モデルによる直角エッジ (下) における 2 次電子強度分布 (上)。

で表わされる。

この信号分布は図 6.12 のようになり，エッジから $\pm R_c$ の範囲で半楕円状のピーク信号を発生し，ピーク位置はパターン・エッジと完全に一致する．従来の修正拡散法で得られるピーク位置がエッジ位置よりも山側にずれる傾向が大きかったのに比べると，本モデルによるエッジ信号の方がより物理的な現象に近く，ピーク位置の直角エッジにおける極限を示していると考えられる．また，ピーク信号の大きさはエッジ高さ h に比例しており，アスペクト比の高い試料ほど鋭いピーク信号を発生するという実験事実とも符合している．これは従来の修正拡散法では得られなかった本法の特長である．

より実際に近い例として，前章で作製したシリコン・パターンの 88° のエッジに対するシミュレート結果を図 6.13 に示す．この例ではエッチングによるダレを想定して，立ち上がり部分と頂上部分に小さな面取り部分を付加している．結果として 2 次電子ピークの位置は最も大きなエッジ角度を持つスロープの中央に位置しており，付加部分の影響は見られなかった．また，付加部分の幅や角度を適宜変化させてシ

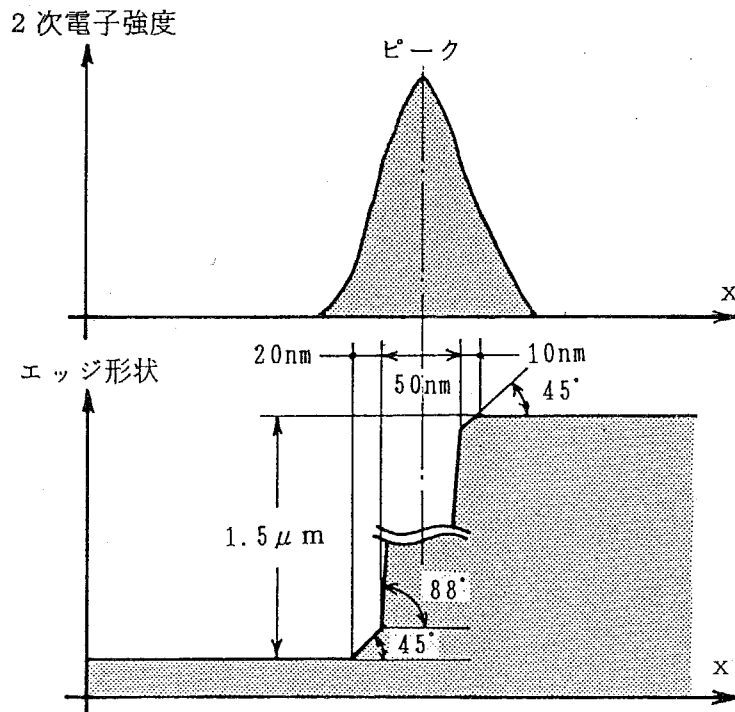


図 6.13: 面取りを付加した急峻エッジ (下) における 2 次電子強度分布 (上)。

ミュレーションを行なったが、最急勾配を持つスロープ中央にピークが現われる傾向は変わらなかった。これより、本ミュレーションによる 2 次電子ピーク位置は、エッジ角度により支配される傾向が顕著で、スロープ長は角度が緩やかである限り、ピーク位置に関してあまり影響を与えないことが明らかになった。

6.5 章のまとめ

電子ビームによるマイクロパターンの測定において重要な働きをする 2 次電子ピーク信号の理論的な解析法について述べた。

乱数により電子の挙動を決定するモンテカルロ法は、物理モデルをよく反映しているが膨大な計算時間がかかる難点を有する。また、低加速電圧では弾性散乱以外の要因も考慮しなければならず、モデルは一層複雑となる。

修正拡散法は電子の拡散現象を用いて、幾何学的に 2 次電子放出領域を計算する簡便な方法であるが、急峻なエッジスロープへの適用が難しかった。そこでこれを改善した円筒領域モデルを提案し、緩急両方のエッジスロープにおいて 2 次電子信

号ピークの計算を行えるようにした．これより理論的なピーク位置は，最も急峻なエッジ角度を持つスロープの中央付近に現われることが予測された．円筒領域モデルによるこのような2次電子信号の挙動は，実際の物理現象を良く現わしていると考えられ，実験により得られたデータとも良く符合している．これについての詳細は次章で述べる．

第 7 章

線幅測定とサブ μm 測長標準

7.1 はじめに

マイクロパターンの測定は、サブ μm のデザイン・ルールを持つデバイスの製作で必要不可欠な検査行程であり、主としてパターン外観の検査、およびパターン線幅が規定の寸法公差以内に納まっているかどうかの判定が行なわれる。外観検査はレジスト等のパターン形状が矩形に製作されているか、下地に正しく密着しているかの検査であり、SEM の画像情報により判断する。パターンの線幅測定は定量的な測定であり、デザイン・ルールの $\frac{1}{10}$ 程度の精度で測定を行ことが要請されている。電子ビーム測長装置では両者を一度に行なうことが可能であるが、測定機としての信頼性は画像による線幅測定の正確さにかかっている。これについては前述の通り、標準参照試料を用いて倍率の校正が行なわれているが、完全に測定値の信頼性が確保されているわけではない。そこで、絶対測長装置と標準参照試料によりサブ μm 領域での寸法標準を実現し、電子ビーム測長装置による測定値の信頼性を確保することを目的に研究を進めてきた。この際、標準パターンに対してどのように校正された寸法（線幅など）を与え、また読み取るかが課題となる。

本章では、第 5 章で作製した標準参照試料に電子ビーム絶対測長装置により測定値を与え、またこのような試料から標準値を読みとることを目的として、電子ビームによる線幅の測定方法について述べた。はじめに電子ビームによる線幅測定の各種法の特徴について明らかにし、peak-to-peak 法を用いた場合の電子ビーム絶対測長装置の測定精度についての実験結果を示す。次に、第 5 章で作製した標準マイクロパターンの測定結果と、第 6 章で示したシミュレーションとの比較結果について記した。また、従来から使用されてきた光方式の測定値との整合性を考察するため、 μm からサブ μm での遷移領域において、電子ビームによる測定値との比較を行なった。最後に、電子ビーム測長装置用のサブ μm 測長標準としてのシリコン製の標準

マイクロパターンについて、研究結果を示した。

7.2 各種の線幅定義法と特徴

電子ビーム測長装置では、マイクロパターン上に電子ビームを走査し、このときに得られる2次電子エッジ信号から線幅を求める。しかし、エッジ信号のピークがエッジ・スロープのどの位置に相当するかは、すべてのパターン材料の組合せや測定条件について明らかにされているわけではなく、線幅定義のためにいくつかの手法が混在して用いられている。代表的なものに、peak-to-peak 法、閾値法、最大勾配法、直線回帰法の四つが挙げられ、この様子を図 7.1 に示す。

peak-to-peak 法は最も単純な定義法であり、ピーク間を線幅として定義する方法であり、レジストの頂上部分などの測定に用いられている。閾値法はベース・ラインを 0% とピークを 100% としたときに特定の%に相当するエッジ信号の間隔を線幅とする方法で、溝の底部寸法測定などに用いられる。最大勾配法はエッジ信号を微分して、最も急な傾きを持つ部分の間隔により線幅を定義する。直線回帰法は最も複雑な方法で、エッジ信号の 20% と 80% を結んだ直線がベース・ラインの延長線と交わった部分の間隔により線幅を定義する。これら各手法は、測定対象やプロセス

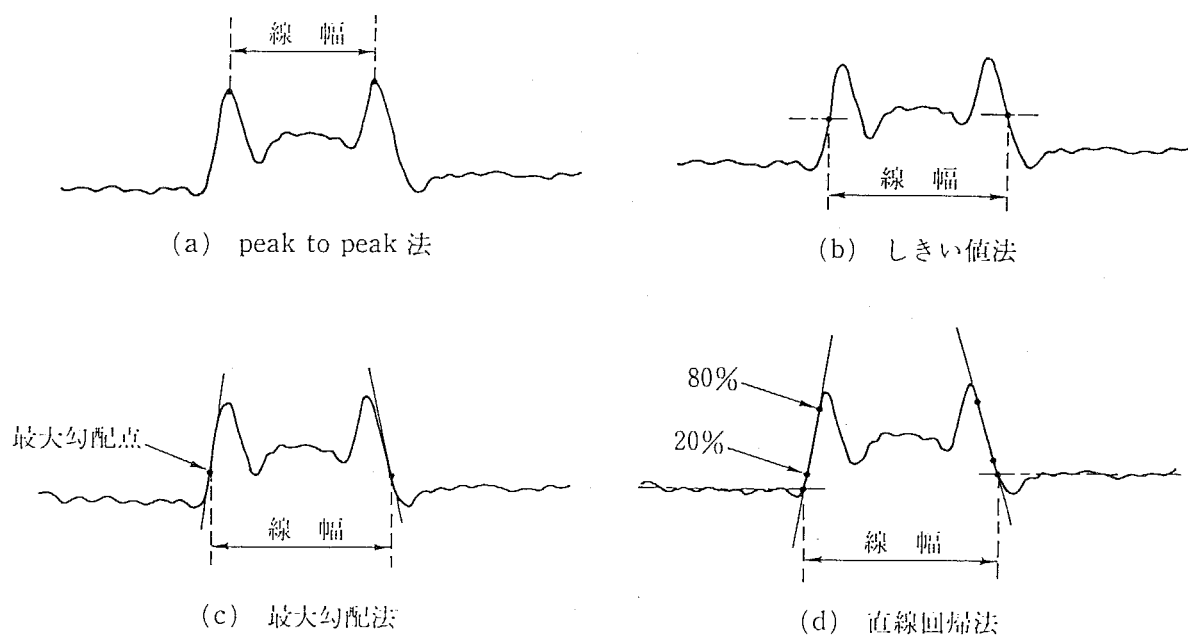


図 7.1: 各種線幅定義法の一覧

測定対象	レジスト			アルミ 配線 パターン
	線幅 (頂上寸法)	溝幅 (底部寸法)	ライン/ スペース	
peak-to-peak 法	最適な方法	85%の閾値で 定義		頂上部の寸法 計測に最適
閾値法		最適な方法 65%の閾値	最適な方法 65%の閾値	底部の寸法が 測定可能
最大勾配法	50%閾値法に 近い, 多めの 測定値	少な目の値	閾値法に近い 溝は少な目 線は多め	底部の寸法が 測定可能
直線回帰法	多少多め 測定の不確定 性の範囲内	20-50nm 多めに測定 される	溝 50nm 多く 線 30nm 少く 測定される	底部の寸法が 測定可能 (要注意)

表 7.1: 各種線幅定義法の特徴⁷⁾.

およびメーカー/ユーザーごとにノウハウ的に使い分けられているのが現状である。これらのうちで、試料の帯電の影響をもっと受け易いのは閾値法であり、電子ビームのフォーカスずれの影響は直線回帰法 > $\frac{\text{閾値法}}{\text{最大勾配法}}$ > peak-to-peak 法の順に小さくなる。表 7.1は、シリコン基板上のレジストとアルミ配線パターンの線幅を測定する場合について、各種の定義法の特徴をまとめた一覧表である⁷⁾。

これらの手法の中で閾値法と直線回帰法は、閾値やベースラインの設定に関してプロセスに依存するノウハウ的な部分が多く、最大勾配法も微分演算を必要とする。そこで、

- 標準にかかわる測定においてはできるだけ少ないパラメータが望ましいという要請、
- 前章で行なったシミュレーションにより、2次電子ピーク位置がエッジ位置と直接関連を持つこと、

- ピーク間隔での寸法標準現示の可能性の検討,

などの諸条件を考慮して、最も単純なアルゴリズムを持つ peak-to-peak 法による線幅定義を用いることとした。

7.3 電子ビーム絶対測長装置による測定と精度

電子ビーム絶対測長装置におけるマイクロパターンの測定精度を調べるために、高さが $0.3\ \mu\text{m}$ 、幅が $0.9\ \mu\text{m}$ の 10 本の孤立ラインを持つ試料をフロン (CF_4) ガスを用いたプラズマ・エッチングにより製作した。これは第 5 章で述べた異方性エッチングと異なり、等方性の除去加工プロセスであるため、パターン・エッジが鋭くならず台形状のパターンとなっている。敢えてこのようなパターンを使うことにより、悪条件下での測定精度の評価を行なうことが出来る。

測定の具体的な条件は、加速電圧 1kV、ビーム電流 10^{-10}A 台、データ点数は 1 走査あたり 4096 点、サンプリング間隔 0.8nm (He-Ne レーザーの $\frac{1}{800}$)、1 走査当りの時間は約 30 秒である。この間の電子ビームの位置安定性については、幅が 40nm のシリコン孤立パターンに 30 分連続してビームの照射を続けたとき、パターン上からビームが逸脱しないことを確認しており、測定の時間内においては十分な安定性を持っていることを確かめた。

SEM の 2 次電子信号には光電子増倍管や電子回路に起因するショット・ノイズ等が含まれているため⁴⁶⁾、サンプル点で 10 回平均を取るとともに、FFT による 20 次の矩形ローパス・フィルタをかけた。フィルタ次数は、実験的に決定した。この後、逐次探索法によりピークの検出を行い、peak-to-peak 法による線幅を求めた。これらの実際の解析の様子を図 7.2 に示す。

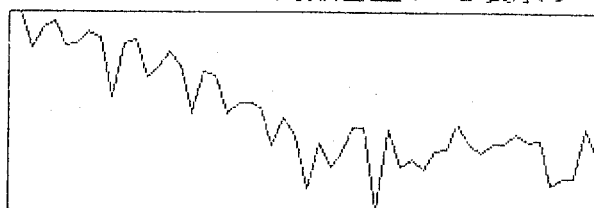
本装置での走査は電磁的な電子ビームの走査に比べると速度が 1000 倍程度遅く、同じ測定場所を 7～8 回走査するとかなりのコンタミネーションが観測された。これは真空中に浮遊している微量の炭素系の分子 (本測長装置の場合はガイドレールに塗布した真空グリスと考えられる) などが電子ビームにより試料に焼き付けられる現象で、低加速電圧時に特有であり、像のコントラストを悪化させる。また連続して 10 回以上測定を繰り返すと、多量のビーム・ドーズによりパターンに変形をきたし、1 走査あたり 2～3nm の割合で線幅が増加する現象が観測された。このため

井井井 FFTフィルタリングとPeak to Peak法による線幅決定(ID:PPM) 井井井
 サンプルした線幅データを表示しています。 ファイル名：B:L62



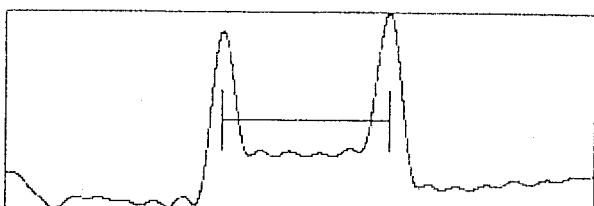
サンプリング間隔： 0.7910 (nm)
 X軸走査距離： 3.2391 (μm)
 平均回数： 10 (回)
 最大値： 3496
 最小値： 2193

パワースペクトル(対数目盛り)を表示しています。



第 50 次成分まで表示
 最大パワー： 255.107
 最小パワー： 125.123

フィルタリングされたデータを表示しています。



フィルタ次数： 20
 最大値： 3294.54
 最小値： 2311.99
 閾値： 0.50
 線幅は .90965 μm です。
 確認(再=A)?

図 7.2: peak-to-peak 法によるマイクロパターンの線幅測定の様子。

場所	線幅平均値 (μm)	標準偏差 (nm)
1	0.929	7.9
2	0.927	9.2
3	0.928	7.8
4	0.924	6.2
5	0.947	12.2
6	0.935	8.7

表 7.2: 測定精度評価のためのパターン測定。

測定の繰り返し回数は 5 回に制限した。試料のオリエンテーションをとるため、測定場所から数 μm 離れた場所で走査を行い、コンタミネーションによるラインとパターンが直角になるように、SEM 画面上の十字線を補助として目視により合わせ込んだ。

このような条件を用いて、前述のパターンのうち中央部の 6 本について測定を行った結果を表 7.2 に示す。これより、標準偏差の平均値を取ると約 9nm が得られ、

測定場所		線幅平均値 (μm)	
項目		場所 7	場所 8
測定日	測定初日	0.936	0.929
	46 日後	0.941	0.927
線幅の差 (μm)		0.005	-0.002

表 7.3: リセッタビリティの評価.

これが試料と測長装置の両方を含めた測定の不確かさとなる．標準パターンでは，試料のエッジ形状がここで用いた試料よりも良くできているため，これよりも小さな不確かさとなることが予想される．

測定のリセッタビリティを確認するため，同一の試料を用いて 46 日後のパターンの測定値と比較したのが表 7.3 である．これはステージの位置決めやシステムの立ち上げなどを，完全に初めからやり直して測定を行なうもので，測定機の性能として重要である．この結果から，システムのリセットに伴う測定誤差は，通常の測定における繰り返し誤差の範囲内であることが確認できた．

7.4 各種パターンの測定

電子ビーム絶対測長装置により，前図 5.5 の異なるサブ μm の線幅を持つシリコン標準マイクロパターンを測定した．この試料は電子ビームを走査したときに鋭いエッジ信号が得られるように高アスペクト比で製作され，パターンの高さが約 $2\mu\text{m}$ に仕上げられている．測定条件は前節に準じたが，表面の自然酸化膜を除去するため測定前に短時間フッ酸でエッチングを行なった．パターン線幅の参照値として劈開面の測定値を用いたが，これはパターン高さが 50% の位置を電子ビーム走査し，得られた 2 次電子強度からエッジ・スロープ中央間の断面寸法を求めたものである．従来，このような値は断面の写真から読みとっていたが，本測定では第 3 章で示した試料ホルダーの断面観察機能によりレーザーの波長を基準として直接測定が行えるため，測定値の信頼性は格段に向上している．また，パターン上面の電子ビーム走査による測定は，劈開面から約 $0.5\mu\text{m}$ 離れた場所で行なった．

設計線幅	peak-to-peak 法 による線幅 (A)	劈開面走査 による線幅 (B)	両者の相違 (B-A)
0.4	0.411±0.005	0.425	0.014
0.5	0.503±0.005	0.520	0.017
0.6	0.590±0.008	0.598	0.008
0.7	0.693±0.006	0.707	0.014
0.8	0.818±0.004	0.830	0.012
0.9	0.911±0.006	0.918	0.007

表 7.4: 標準マイクロパターンの測定結果 (単位: μm).

peak-to-peak 法による線幅測定結果と、断面寸法の比較を表 7.4 に示す. 測定の標準偏差の平均は約 5.6nm で、機械的な形状が整ったパターンを使用した分だけ測定の不確かさが減少している. また、peak-to-peak 法による線幅は、断面中央間隔よりも平均で 14nm 小さめに測定されている. これはピーク・シフト量 P_s が 7nm であることを示すが、前節で示したように SEM の測定精度がこの領域にあるため誤差範囲内の値であるとともに、完全に同一の場所の測定ではないので、ピーク位置はパターンエッジのほぼ中央と判断してよいと考えられる. 本装置の公称電子ビーム径は 1kV の加速電圧で 15nm なので、図 6.9 から P_s を読み取ると 14nm となり、従来の修正拡散法では大きめのシフトを与えている. また、本法は前述した通り急峻な斜面には適用しにくい難点を有している. そこで、1 μm 程度の線幅を持つシリコン製のマイクロパターンを測定し、円筒領域モデルによるシミュレーションとの比較検討を行なった.

使用したパターンは異方性エッチングにより作製したもので、2 μm の高さを持ち、エッジ角度は約 88°, ピーク間隔は $0.911 \pm 0.006 \mu\text{m}$ (5 回平均), パターン劈開面の 50% 高さの線幅は 0.918 μm であった. 図 7.3(b) は写真 (a) と断面測定の結果をふまえ、50% 高さ位置の幅が 0.918 μm になるように定義したパターン形状である. なお、(a) の写真撮影に使用した SEM は、NIST の標準参照試料 SRM484 により十分校正されている. 写真から明らかなように斜面そのものは急峻であるが、立ち上がりに円弧状の部分があるので、これを 45° の小斜面で近似した. シミュレー

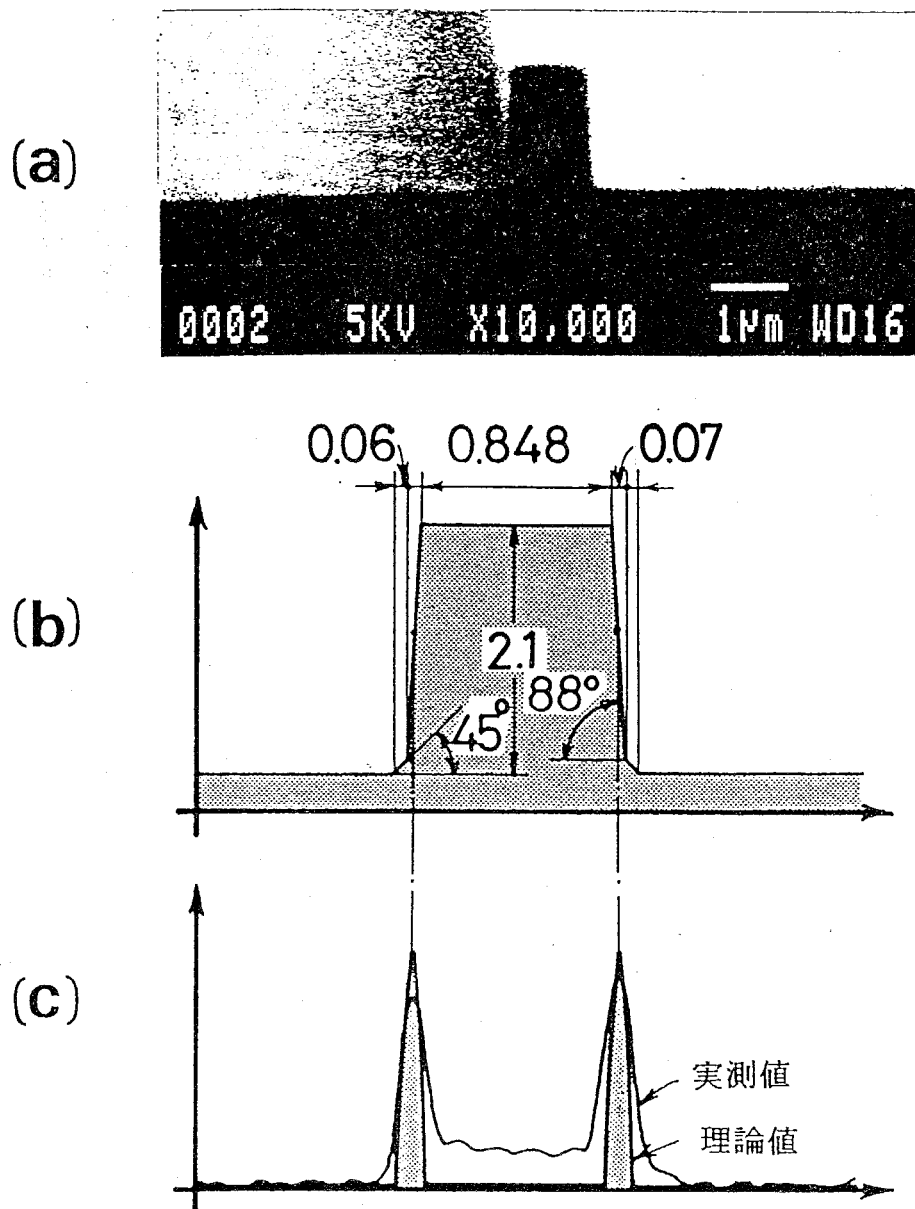


図 7.3: 円筒領域モデルと実際の測定との比較 (急斜面の場合) (a) 断面写真, (b) 写真に基づく断面形状, (c) シミュレーションと実測結果.

シミュレーションは (b) の形状を基に, 加速電圧 1kV, 電子ビーム径 15nm(測長装置の公称値)で行い, このときの円筒直径は 73.2nm となった. 同図 (c) に実測値と理論値を示す. 測定条件はこれまでの測定に準じている. 実験値の中央部分が完全に下がりきっていないが, これはパターン頂部がエッチング前の鏡面であるのに対し, 周辺部はエッチングによる微細な凹凸があるため 2 次電子放出能率が多少劣り, コントラスト

トの低下となって現われるからである。シミュレーションでは立ち上がり部分に緩斜面を付加しているが、ピーク位置は最急勾配を持つ斜面中央に一致している。また、頂上部にも若干の緩斜面を付加してシミュレーションを行ってみたが、ピーク位置に影響を及ぼさなかった。したがって、円筒領域モデルは急峻な斜面における2次電子放出現象をよく反映していると考えられる。

また、緩やかな斜面における円筒領域モデルの有用性を確認するため、このような斜面形状を持つマイクロパターンにより測定を行なった。(100)の面方位を持つシリコンウェハの $\langle 110 \rangle$ 方向にパターンを形成して異方性エッチングを行うと斜面角度は 54.7° になることは第5章で示したが、ここでは描画方向を $\langle 110 \rangle$ 方向から約 3° ほどずらし、左右で異なる斜面角度が得られるようにした。図7.4にパターンの断面写真と結果を示す。これより、斜面における2次電子強度の理論値と実験値はほぼ同様の分布を呈しており、緩やかな斜面でも円筒領域モデルによるシミュレーションの妥当性を示している。また斜面の立ち上がり部分は、実験値および理論値ともほぼ50%の高さの相当しており、この部分を測定の指標に応用できる可能性を示している。さらに、パターン左右で斜面角度が異なることにより、より急な斜面の2次電子強度が大きく得られているが、シミュレーションで得られている左右の信号強度比も実験値と同様の値(約8対5)を示しており、緩やかな斜面における本モデルの有用性を示している。

以上の測定結果から孤立パターンの線幅は、peak-to-peak法により表現可能であることが示された。また、円筒領域モデルを用いたシミュレーションのピーク位置はpeak-to-peak法の与える位置とほぼ一致しており、予測手法として有用であることが確認された。

もう一つの標準試料の候補であるピッチ試料の測定は、試料上の任意の部分を電子ビームで走査し、図7.5のような2次電子強度分布のピークから平均ピッチを求めることにより行なった。この場合試料の凸部分が小さいため左右のエッジによる別々のピーク信号とはならず、一本のピークとして観測される。また、アスペクト比が高いため、凹部がファラデー・カップ¹の役割を果たし、入射した電子はすべて試料

¹SEMにおいてプローブ電流を測るために使用する、ビーム吸収用の深穴を持つ試料。

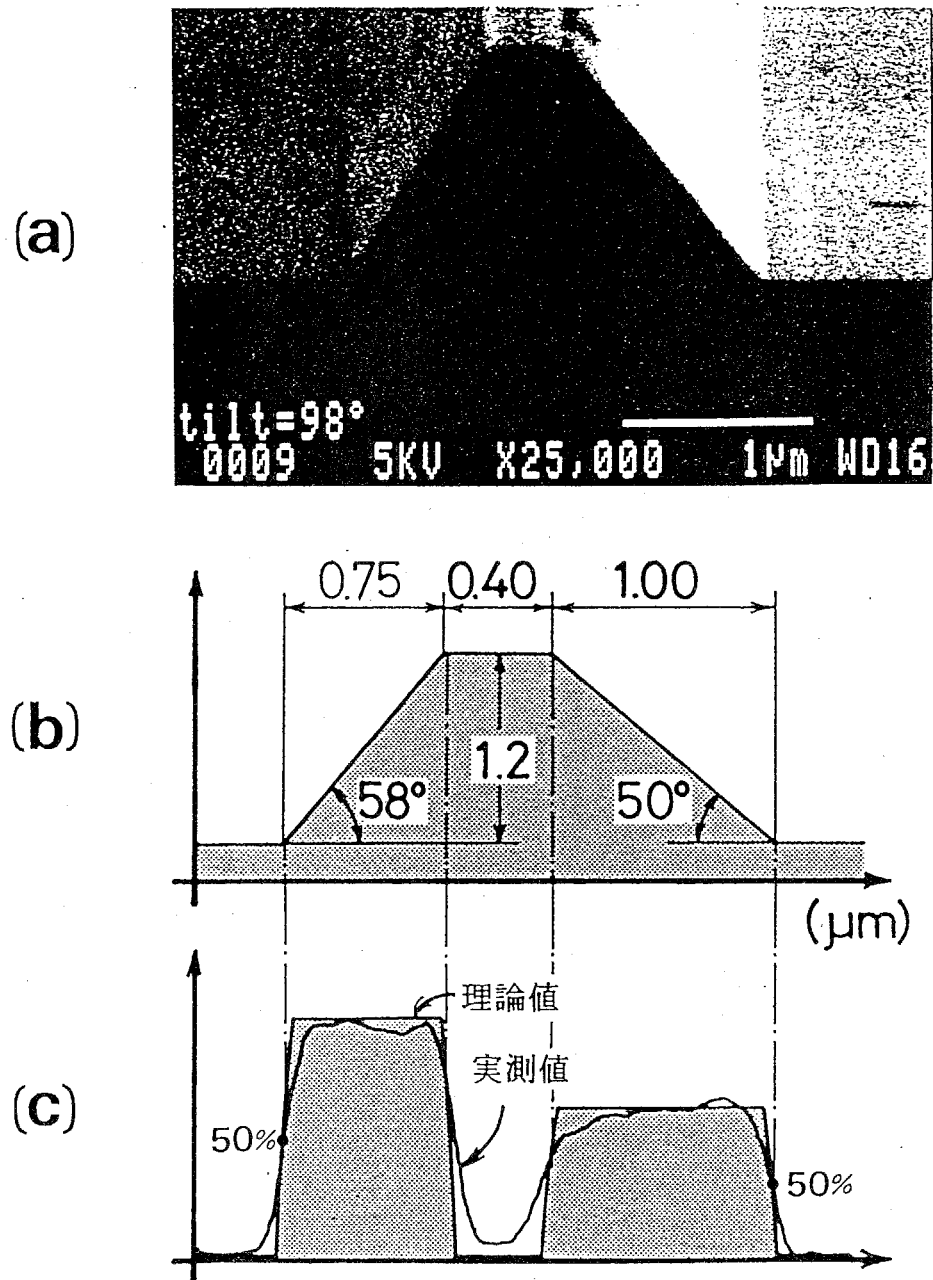


図 7.4: 円筒領域モデルと実際の測定との比較 (緩斜面の場合) (a) 断面写真, (b) 写真に基づく断面形状, (c) シミュレーションと実測結果.

内に吸収されるとともに, 発生した 2 次電子も大部分が側壁で吸収されるので, コントラストの強い信号が得られている. 同試料の 3 個所でランダムに測定を行なった平均ピッチは $0.237 \pm 0.004 \mu\text{m}$ (11 ピーク間隔平均) であり, 回折光の角度から求めた試料の大域的な平均ピッチ $0.240 \pm 0.001 \mu\text{m}$ とよく一致している. これより本

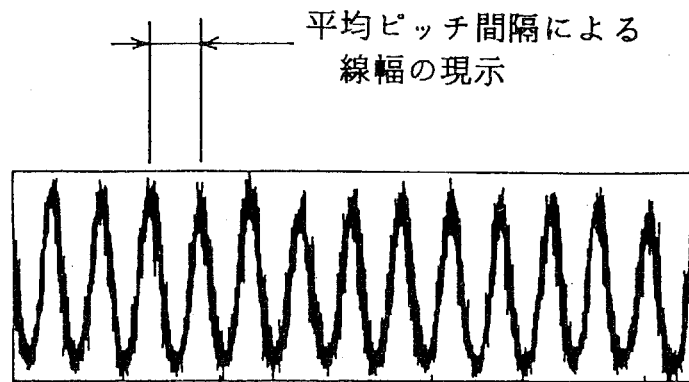


図 7.5: シリコン・ピッチ試料の 2 次電子強度信号.

試料は、サブ μm の小さい領域でピーク間の平均ピッチにより寸法を表現する方法として優れていることが明らかになった。

7.5 光ビームによる測長との整合性の検討

マイクロパターンの測定におけるもう一つの課題として、従来から使用されている光方式の測定機によるパターン線幅の測定値の整合性の検討が挙げられる。この測定機の原理は、図 1.2 に示したように対物レンズで絞り込んだビームをパターン上に走査し、エッジで散乱される光をフィト・ディテクタで検出することによりエッジ信号を得るものである。ビーム・スポット径が光の波長により制限されるのでサブ μm 領域の計測は難しいが、電子ビーム測長装置に比べて真空が必要でなく取扱が簡便なため、 $1\mu\text{m}$ 以上のパターン計測に用いられている。エッジ検出方法が異なるため、測定値もある傾向を持って相違が現われることが指摘されてきた⁴⁸⁾。そこで、サブ μm から μm にいたる遷移領域でのパターン線幅を電子ビーム絶対測長装置による値と比較した。

使用した測定機はニコン社製の LAMPAS M-2 で、フォト・マスクの検査などでは標準的に用いられている装置である。この測定機の主要な測定誤差は対物レンズのフォーカスずれによることが明らかにされている²⁾。主な使用は、対物レンズの倍率 50 倍、N.A. は He-Ne レーザーの波長 $0.328\mu\text{m}$ に対して 0.75、走査スポットは S/N 比改善のため長円形で、短径 $1.0\mu\text{m}$ 、長径 $4.5\mu\text{m}$ (光強度 $\frac{1}{2}$ にて) を持つ。本装置では分解能向上のために 3kHz の振動ミラーによりスポットを $0.1\mu\text{m}$ 程度

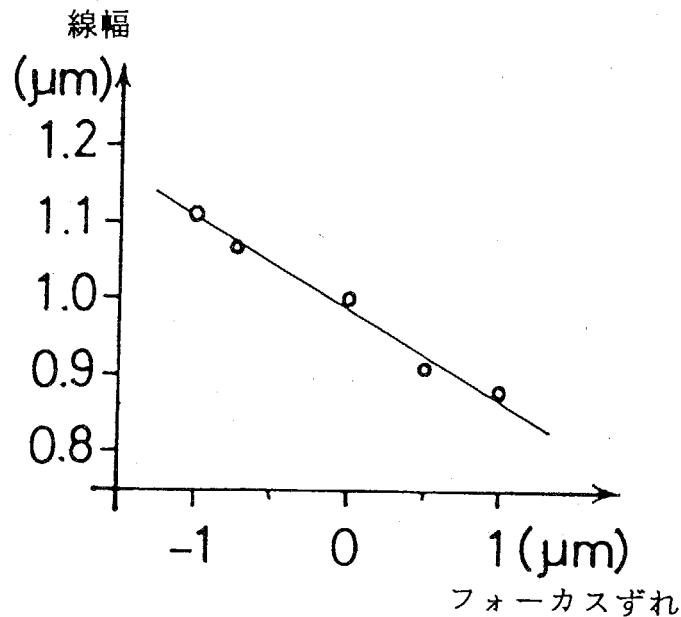


図 7.6: LAMPAS において焦点ずれが線幅測定値に及ぼす影響.

微振動させており、フォト・ディテクタで表面形状の微分係数に比例した信号が得られるように同期検波モードを備えている。エッジの検出はパターンの反射率等を考慮してディテクタの電圧の設定により行なうが、本測定では実験的に最適値を探索し、0.5V に設定した。なお、本測定機は VLSI スタンダーズ社製の光学測定機用標準パターン⁴⁹⁾により校正されており、1 ~ 5 μm の範囲で平均誤差 40nm が得られている。この標準パターンは MIL-STD-45662 規格を満たし、ピッチ校正は NIST にトレーサブルである。

最初の測定では前節までと同様の 2 μm の高さを持つ試料を用いてみたが、測定機の焦点深度に比べてパターンの高さが大きく測定値がバラついたうえ、エッジの検出ミスが多く起こり正しい測定は困難であった。そこで焦点ずれの影響を調べるため、設計線幅 1 μm のパターンを用いて焦点の位置を変えて測定を行なった。図 7.6 はこの結果であるが、焦点位置が 1 μm 下方にずれるにしたがって、約 0.1 μm の割合で線幅が大きくなる傾向が分かる。これは焦点が下になるほどパターンの頂部により合焦前のビームが遮られ、散乱光が返りにくくなるのが原因と考えられる。

そこで、焦点ずれの影響を軽減するため、パターンの高さが 0.5 μm の試料を製作し、測定を行なった。この試料は電子ビーム走査でも良好なエッジ信号を発生し、光学式測定機でも焦点ずれを原因とする支障は生じなかった。測定は電子ビームに

設計線幅	光学式測長機 による線幅 (A)	電子ビーム方式 による線幅 (B)	両者の相違 (A-B)
0.8	0.84±0.008	0.825±0.006	0.015
1.0	1.08±0.005	0.979±0.007	0.101
1.2	1.15±0.005	1.127±0.007	0.023
1.3	1.33±0.009	1.281±0.002	0.049
1.4	1.46±0.007	1.423±0.009	0.037
1.6	1.61±0.009	1.573±0.006	0.037

表 7.5: 光学方式と電子ビーム方式の測定値の違い (単位: μm).

よる測定を先行し、ビーム走査によるコンタミネーション跡を光方式で測定した。電子ビームによる peak-to-peak 法との比較結果を表 7.5 に示す。

1 μm よりも大きい領域では、電子ビーム方式による線幅は光方式よりも数十 nm 小さな値を示すことが知られているが⁴⁸⁾、ここでもその傾向が現われている。これは光によるエッジ検出は電子ビームよりもプローブ径が太いため、プローブ中心がエッジ中央に至る以前に十分な散乱光があったとしてエッジの判定がなされてしまうためと考えられる。また、0.8 μm よりも小さな領域では、LAMPAS の測定限界を越えるためエッジ検出がうまく行えず、測定は困難であった。これは測定対象がビーム・スポット径に比べて小さいために、両方のエッジに同時に光が当たり一つのエッジと判定されてしまうからである。これら比較実験結果より光方式の適用下限は必要とされる測定の信頼性に応じて、横方向の分解能を決定するビーム・スポット径の 1.2 倍から 2 倍程度に設定するのが実用上妥当なようである。また、電子ビーム測長装置での測定値とはオフセット量が生じることに注意し、これについて予め測定を行なっておけば両者の混在が可能である。

7.6 シリコン試料によるサブ μm 測長標準

寸法標準としてシリコンによるマイクロパターンをとらえると、電子ビームをパターン上に走査したときにエッジで鋭いピークを発生し、このピーク間隔をもって

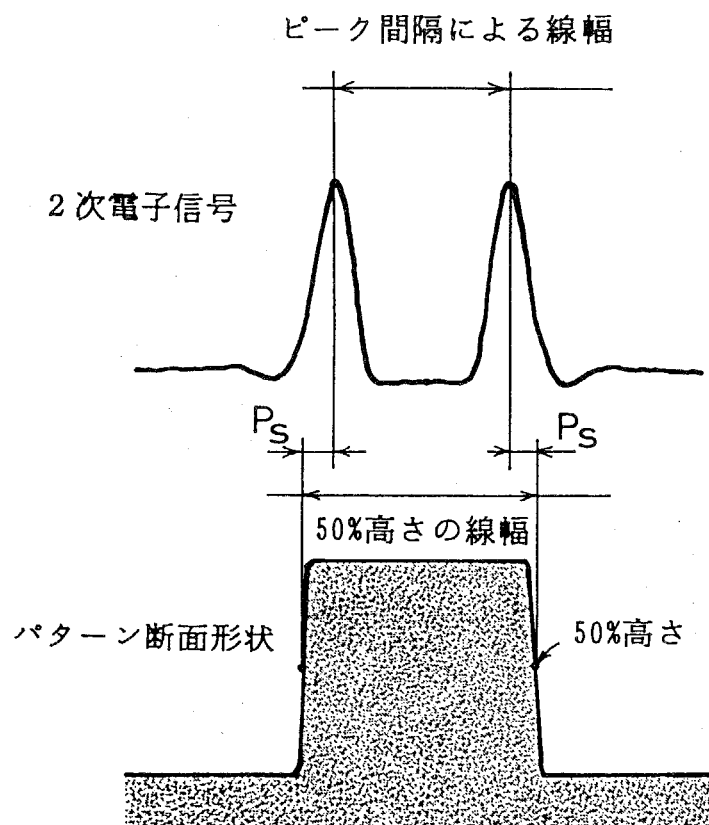


図 7.7: マイクロパターン断面とピーク信号の関係.

標準寸法の現示を行なう試料ととらえることが出来る．この際に図 7.7のように断面形状が機械的に整っており，エッジ角度が 90° であり，かつ $P_s = 0$ であれば理想的である．しかし本試料はブロック・ゲージ的な端度器としての使用は考えられず，またサブ μm 領域であるためパターン製作方法にもおのずから限界がある．そこで機械的な形状にいたずらにこだわるよりも，ピーク信号の発生器としての働きを重視する．すなわち，測定条件などが同一であれば試料の測定におけるロバスト性が保たれる限り，同一のピーク間隔を与える 2 次電子信号パターン発生器と見なす．

解析面でこれを実行するためには，前節までに測定特性を明らかにした peak-to-peak 法により，

- パターンに対して値付けを行なう場合，
- パターンから標準寸法を読みとる場合

の両方について，単純なアルゴリズムで実行可能なため，寸法標準現示法として使用することが出来る．そこでこれら両者の組合せにより，サブ μm の寸法標準を現

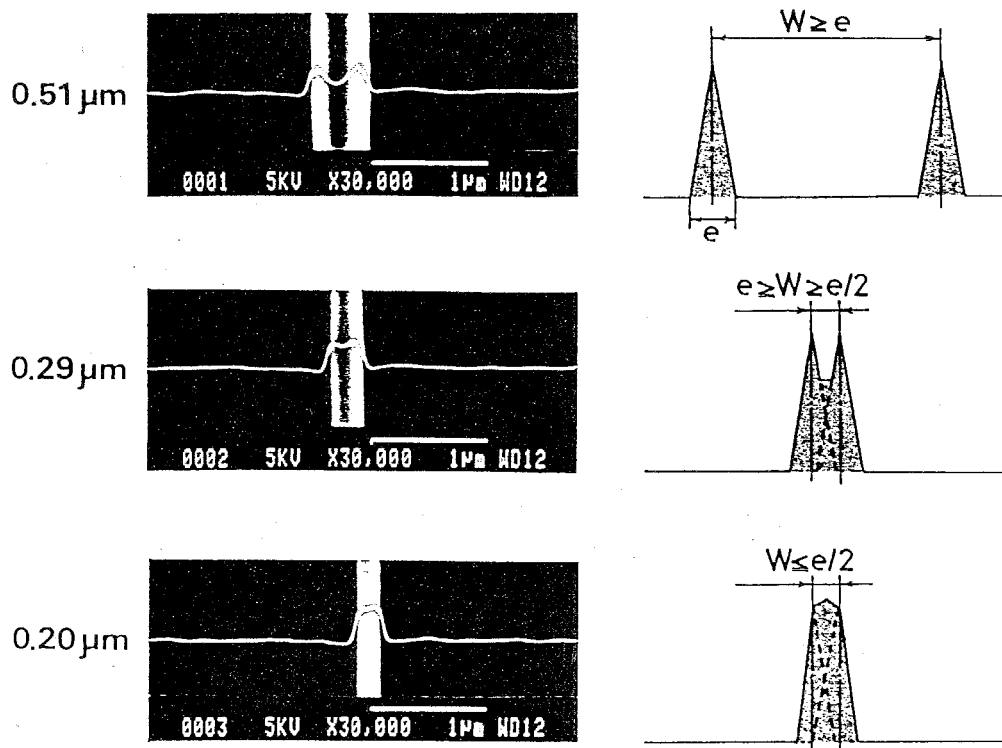


図 7.8: さまざまな線幅を持つ孤立パターンの 2 次電子強度プロフィール. (左) 実際の SEM 信号, (右) 解析モデル.

示するためのハードウェア (標準参照試料) とソフトウェア (解析・寸法現示手法) が実現される.

ところで, さまざまな線幅を持つ孤立パターンに電子ビームを走査すると, 図 7.8 のように線幅が小さくなるに連れて左右のエッジ信号が分離不可能となり, peak-to-peak 法による寸法現示は不可能になる. この限界を見きわめるため, 同図右のモデルを用いて信号の挙動を考察する. ここではエッジ信号は底部の幅 e を持つ三角形で近似する. 線幅 W が e よりも十分大きいときは二つの明瞭なピークが観察されるが, 幅が小さくなり $e \geq W \geq \frac{e}{2}$ になると左右のピークの相互作用が始まる. $W \leq \frac{e}{2}$ になると一つのピーク信号となり, この領域では peak-to-peak 法による線幅現示は不可能になる. e の値は円筒領域モデルにおける 2 次電子発生領域の大きさに関係を持つと考えられるが, 実際には使用する SEM の性能に依存する. たとえば, タングステンや LaB_6 電子銃を使用して加速電圧 1kV においてシリコン孤立パターンを観測する場合, $0.3 \sim 0.2 \mu\text{m}$ 程度の値が実験により得られている.

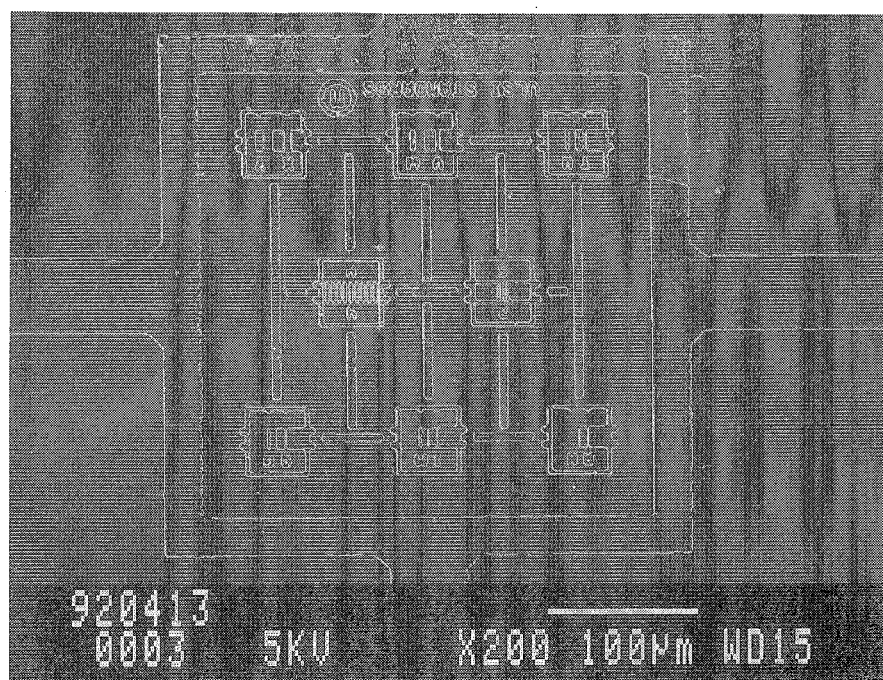


図 7.9: シリコン製標準マイクロパターンの試作例 (VLSI スタンダーズ社のご好意による)。

そこで、比較的小さなサブ μm 領域の寸法を現示する試料として、ピッチ試料が重要になる。すなわち、1桁 μm のオーダーから0.3 μm 程度までは代表的な線幅を持つ孤立パターンの2次電子ピーク間隔により寸法の現示を行い、それ以下の領域ではピッチ試料のピッチ間隔で微小寸法の現示を行なうという組合せが必要となる。

図 7.9は、このような要求を満たすために試作したシリコン製の標準マイクロパターンの例である。全体は1cm角のチップ上に製作されており、ガイドラインをたどるとマイクロパターン部分に到達できるように工夫されている。パターンは(110)ウェハの $\langle 112 \rangle$ 方向に描画されており、異方性エッチングにより仕上げられているので、直角に近いパターンエッジを持っている。中央にピッチパターン、周辺部に孤立凹凸パターンを配置しており、 μm からサブ μm の線幅を現示することが可能である。パターン高さは0.5 μm であり、光を用いた測定にも応用できるように考慮されている。実際に凹凸形状を持つシリコン製の半導体測長装置用多目的標準試料としては、初めてのものとして特筆できる。本試料はまだ開発途上であり、中央のピッチ部分も干渉縞露光法によるものではないが、将来的にはこれらを組み合わせて、より確度の高い標準参照試料を製作可能である。また、シリコン試料の欠点として表面の酸化現象が挙げられるが、真空中での保存を原則とし、表面に金属

薄膜を蒸着することにより、長期の保存に耐えるものが製作できる。

7.7 章のまとめ

電子ビーム測長装置におけるサブ μm の測長標準を実現するため、シリコン製のマイクロパターンの測定特性について明らかにした。パターン線幅の値付けに使用する電子ビーム絶対測長装置の測定精度は数 nm 以内であり、レーザーの波長の確度とあいまって精密かつ正確な計測が実行可能なことを確認した。本研究ではパターンの線幅定義法として peak-to-peak 法を用いたが、同法による定義はパラメータが少なく単純な解析アルゴリズムを持つため、標準寸法の値付けと現示の両方に適当であることを示した。また、円筒領域モデルが実際の測定の様子をよく表わしていることを実験により確認した。標準寸法を現示するパターンは $0.3\ \mu\text{m}$ 程度を境として、線幅の大小に応じて孤立凹凸パターンとピッチ・パターンを組合せる方法が良いことを明らかにした。標準マイクロパターンの材質と使用法／保存法に関しては一層の改善を図る余地があるが、電子ビーム測長装置用のサブ μm 測長標準の設定およびトランスファーにかかわる基礎的な課題は解決できた。

第 8 章

結論

本論文は、昭和 59 年以来約 8 年に渡り、通商産業省工業技術院計量研究所において行なってきた「測定器要素の測定の研究」、「マイクロリモートセンシング技術に関する研究」、「標準マイクロパターンの研究」、および「複合組成面の寸法測定の信頼性向上に関する研究」の成果を取りまとめたものである。以下に、本研究で得られた主要な成果を要約して意義を明らかにするとともに、今後の展望等を述べ結論とする。

本研究では、半導体工業で使用されている電子ビーム測長装置による測定値の信頼性を確保することを目的として、以下に示すテーマについて研究を進め、それぞれの成果を得た。

- 標準の設定にかかわるハードウェアの整備
 - － 電子ビームによるマイクロパターン絶対測長装置の開発
 - 1. 板ばねによる微動テーブル
 - 2. 超音波モーターのサーボ制御系
 - 3. ピエゾ駆動機構による試料ホルダー
 - 4. 平面度測定における干渉縞本数の最適化
 - 5. 光路長増倍型差動干渉計
 - 6. ファイバー結合型干渉計
 - － シリコンによる標準マイクロパターンの製作
 - 1. 異方性エッチングによる孤立パターン
 - 2. 干渉縞露光法によるピッチパターン
- 寸法標準のトランスファーにかかわるソフトウェアの整備
 - － マイクロパターン・エッジ信号の理論解析

1. 回転楕円体を導入した修正拡散法
 2. 円筒領域モデル
- － 値付けを行なう際の測定方法
1. peak-to-peak 法の適用
 2. 断面寸法との比較
- － 標準線幅の現示法
1. 孤立パターンのエッジ信号ピーク間隔による線幅現示
 2. ピッチパターンのエッジ信号ピーク間隔による線幅現示

ハードウェアに関しては、従来の電子ビーム測長装置での画像によるメーカー標準との比較測定にかわり、光の波長を基準とした絶対測長が出来る装置を完成した。この測長機は、現在事実上の国家標準的な意味あいを持つものとして位置づけられる。また、ここで使用するサブ μm の線幅を持つ標準参照試料に関しても内製を行い、半導体微細加工技術において電氣的な特性よりも機械的な形状を重視する姿勢を取ったことも本研究の特徴である。

実際のプロセスにおける電子ビーム測長は、パターンがさまざまな組成により構成され複雑な様相を示し、経験的なノウハウに頼る部分が多い。しかし標準のトランスファーにかかわる測定では、誰が見ても納得がいく明確かつ単純な解析手法が望ましい。そこで問題を単純化することに努め、シリコンのみによるパターンについて、2次電子エッジ信号の理論解析と線幅値付け／現示法の検討を行い、これらを確立した。

以下に各章で得られた結果を要約する。

第1章「序論」では、本研究の必要性、目的、位置づけについて説明し、論文の構成を記した。

第2章「電子ビーム絶対測長装置の基本構成」では、レーザーの波長を基準とした絶対測定が可能な電子ビーム測長装置を開発して、測定のためのハードウェアを確立した。この装置は走査型電子顕微鏡をベースとして、多自由度試料走査機構と高分解能レーザー干渉計が一体的に組み込まれたシステムである。測定は電子ビームを一点に停留し試料を機械的に走査、この間の移動量を干渉計で測定することにより行なわれ、光のスケールと電子ビームのポイントによる測長システムを実現し

た。これにより、従来の電子ビーム測長装置の画像計測では得られない高精度、高信頼性が保証された測定値を得ることが出来るようになった。

第3章「真空用多自由度試料走査機構」では、電子ビーム絶対測長機の真空試料室に設置し、試料の走査や姿勢調整のための機構について記した。本機構は、走査テーブル、回転テーブルおよびピエゾ駆動機構の組合せにより構成され、XY方向の粗動と微動、水平面内の回転およびティルトの四つの運動の制御を行なうことが可能である。各要素は 10^{-5} Paという高真空にさらされるため、部材および工作法には表面からの脱ガスが極力無いようなものを採用するとともに、SEMの電子レンズ磁界に影響を与えないようなアクチュエータを用いた。XY粗動テーブルのみ直流サーボモーターにより駆動したが、その他の機構はすべてピエゾ素子を登載してアクチュエータとの一体化を図り、真空試料室内での設置の自由度を向上した。微動テーブルは、従来のテーブルにみられる案内面を廃し、板ばねによる支持機構を採用して、数 μ mの距離をスムーズに移動するための機構として十分な運動性能を実現した。回転テーブルには、超音波モーターによるサーボ制御系を初めて実現し、ロータリーエンコーダの分解能と等しい位置決め分解能を実現した。また、電子レンズの直下に設置される試料ホルダーには、独自の構造を持つピエゾ駆動機構を用いて対処した。これら一連のメカニズムにより、従来のような機械結合部を持たないSEM真空試料室用の多自由度試料走査機構を実現した。

第4章「測長用高分解能レーザー干渉計の開発」では、測長装置のスケール部分として重要なレーザー干渉計について記した。この際、光学要素の精度に十分な注意を払うため、平面度の測定方法について情報理論を用いて十分検討を加え、デジタル画像処理による干渉縞解析を行なう場合の最適条件が4画素/縞であることを導出した。また、シミュレーションおよび液面干渉計による実験により、この条件がランダムな平面を計測する際の初期値として有用であることを確認した。X軸の干渉計には、市販のゼーマン・レーザー干渉測長システムとプリズム系による光路長増倍型差動配置を組み合わせ、分解能 $\frac{\lambda}{800} \simeq 0.8\text{nm}$ を実現した。本干渉計は電子的増感に頼る従来の方法と異なり、実際の光路長を増倍することにより増感を行なっているため、従来の干渉計では得られなかった高信頼性を実現した。Y軸には偏波面保存ファイバーを利用して、小型化と設置場所の自由度を増した分解能 $\frac{\lambda}{64} \simeq 10\text{nm}$ を持つファイバー干渉計を開発した。これらの干渉計により、絶対測長装置の基準

となる座標測定が正確かつ精密に行なうことが出来るようになった。

第5章「シリコンによる標準マイクロパターンの製作」では、電子ビーム絶対測長装置で校正された寸法をユーザーにトランスファーする際の媒介物となる標準試料の製作について述べた。このため、シリコンによる標準マイクロパターンを製作したが、研究会活動により半導体関連業界の動向調査およびニーズ把握の把握に努め、シリコンの凹凸パターンによるサブ μm の線幅を持つものとした。標準として使用される場合を考慮して機械的な仕上がり形状および実行可能性を重視し、(110)の面方位を持つシリコン・ウェハとアルカリによる異方性エッチング・プロセスを用いた。また、線幅に応じて孤立線およびピッチからなる2種類のタイプを製作し、パターンニングもそれぞれの特長を生かすため、電子ビーム露光法と干渉縞露光法を併用した。これらのプロセスにより、急峻なエッジ形状でエッジ・ラフネスの良好なサブ μm 線幅を持つシリコン標準マイクロパターンを初めて製作した。

第6章「電子ビーム走査によるエッジ信号の理論解析」では、マイクロパターン上に電子ビームを走査したとき発生する2次電子ピーク信号と実際のエッジ位置の同定について、線幅測定の観点から理論的な推定を行なった。本研究では、電子の散乱過程に乱数を用いるモンテカルロ法よりも計算が簡単な修正拡散法によりシミュレーションを試みた。また、従来の修正拡散法を改良し、電子ビーム径を考慮して電子拡散領域に回転楕円体を導入した。しかし、標準マイクロパターンの持つ急峻なエッジスロープへの適用が難しかったため、さらに円筒領域モデルを提案して本法の改善を図り、緩急両方のエッジスロープにおいて2次電子信号ピークの計算を行えるようにした。これよりピーク位置は、最も急峻なエッジ角度を持つスロープの中央付近に現われることが予測された。

第7章「線幅測定とサブ μm 測長標準」では、マイクロパターンに校正された寸法を与え、読みとることを目的に実際の測定について記し、測長標準としての実行可能性を検討した。線幅を測定する方法には各種の手法が用いられているが、標準寸法を与えまた読みとることを目的とした場合、peak-to-peak法による方法が優れていることを明らかにした。この解析手法により第5章で製作したサブ μm の線幅を持つ孤立マイクロパターンを測定し、試料も含めた線幅測定の不確かさが1桁のnmオーダーでおさまっていることを確認した。また電子プローブの性質から、ある程度以下の線幅は孤立パターンでは線幅現示が出来ないため、ピッチ・パターン

による標準寸法現示が有効なことを示した。さらに、従来から使用されている光方式の測長装置と電子ビーム測長の結果について比較検討を行い、両者のオフセットに注意すれば混在が可能であることを示した。

以上、一連の研究成果により、わが国の電子ビーム測長装置による測定値の信頼性を確保し、トレーサビリティ体系を確立するための技術的な整備がなされた。実際には標準マイクロパターンに対して値付けを行い、寸法を記した成績書と解析アルゴリズムをユーザーに提供する標準の供給体制が必要であるが、これを完全に実施するためには法令や組織面での整備が望まれる。

本研究で開発した試料の長期安定性や測定におけるロバスト性については今後の課題となり、導電性のコーティングや保存方法の検討、測定条件の統一およびマニュアル化などの検討により対処する必要がある。また、半導体産業分野の進歩のスピードは激しく、常にハードウェアの改善を図る必要があり、適宜設備の更新で対処して行かなければならない。本研究による標準は、物理標準よりも約束ごとの多い工業標準の世界であり、今後とも関連メーカー／ユーザーの協力を得て一層の発展および確立を図る必要がある。

謝 辞

本論文をまとめるにあたっては、東京工業大学 大学院総合理工学研究科 佐藤 拓宋教授にご懇切なるご指導およびご助言をいただきました。ここに厚くお礼申し上げます。

また、精密工学研究所 下河辺 明教授、同 丸山 一男教授、同 大塚 二郎助教授、大学院総合理工学研究科 小杉 幸夫助教授には本論文のご審査およびご助言をいただきました。教官各位に厚くお礼申し上げます。

シリコン標準参照試料の製作技術の指導およびピッチ参照試料の提供については、(株)日立製作所 中央研究所 第3部 中山 義則研究員のお世話になりました。

同じくシリコン標準参照試料の試作については、米国カリフォルニア州の VLSI スタンダーズ社 (株) にご助力をいただきました。

ファイバー干渉計の製作およびピエゾ駆動機構のスピンドル製作および試料のダイシングでは、(株)東京精密 技術研究所 黒沢 俊郎氏のご尽力をいただきました。

関連各位のご協力、および関係会社のご好意にお礼を申し上げます。

米国標準技術研究所 (NIST) の Micrometrology Group Leader Dr.Larrabbie, SEM Metrology Project Leader Dr.Postek および IC Metrology Group Leader Mr.Linholm, 同 Physicist Dr.Cresswell の各位からは、研究の動向や技術上の問題点について有益なご議論、ご助言をいただきました。各位にお礼申し上げます。

本研究の共同研究者である計量研究所 谷村 吉久力学部長、および豊田 幸司機械計測研究室長には終始研究遂行上のご指導をいただきました。研究の立ち上げに際しては、栗田 良春計測システム部長にもご指導いただきました。量子部 山田 啓文主任研究官には、ピエゾ駆動回路の設計・製作についてご協力をいただきました。また、実験データの整理等では研究室秘書 斉藤 あい子氏のお世話になりました。機械計測研究室の各位には、終始さまざまのご助言をいただきました。以上、関係諸氏に厚くお礼申し上げます。

参 考 文 献

- 1) 秋山, 河野 : 超 LSI の高集積化とシリコン基板の加工技術, 精密工学会誌, Vol.58(2), 211/214(1992)
- 2) 中沢, 谷本, 吉田 : レーザーによるマイクロパターン測定機, 精密機械, Vol.44(3), 380/385(1978)
- 3) 河田, 南 : 光学走査顕微鏡, 光学, Vol.18(8), 380/391(1989)
- 4) H.Yamada, T.Fujii and K.Nakayama : Linewidth Measurement by a New Scanning Tunneling Microscope, Jpn. Jour. Appl. Phys., Vol.28(11), 2402/2404(1989)
- 5) 川勝, 樋口, 川合, 西沖 : 結晶格子の STM 像を基準に用いた超精密位置決め機構, 1991 年度精密工学会秋期大会学術講演会論文集, 911/912(1991)
- 6) M.Tanaka, K.Nakayama and K.Kuroda : Experiment on the Absolute Measurement of a Silicon Lattice Spacing at the NRLM, IEEE Trans. on Instrum. and Measurement, Vol.38(2), 206/209(1989)
- 7) M.G.Rosenfield : Analysis of Line Width Measurement Technology Using Low Voltage SEM, SPIE Vol.775, 70/79(1987)
- 8) M.T.Postek : Scanning Electron Microscope-Based Metrological Electron Microscope System and New Prototype Scanning Electron Microscope Magnification Standards, Scanning Microscopy, Vol.3(4), 1086/1099(1989)
- 9) D.Nyyssonen and M.T.Postek : SEM-based System for Calibration of Linewidth SRMs for the IC Industry, SPIE Vol.565, 180/186(1985)
- 10) D.C.Joy : A Model for Calculating Secondary and Backscattered Electron Yields, Jour. of Microscopy, 147-Pt1, 51/64(1987)

- 11) A.Kuni, Y.Kembo, K.Yoshimura and N.Aoki, : Accurate Length Measuring Machine by the Use of SEM, Microelectronics Measurement Technology Seminar Proceedings, 67/79(1980)
- 12) 外村編：電子顕微鏡技術，丸善，p.121(1989)
- 13) News from BIPM, Metrologia, Vol.20, p.25(1984)
- 14) 坂野，谷村，荒武：板ばねを利用した微動テーブルの性能，昭和62年度精密工学会春期大会学術講演会論文集，487/488(1987)
- 15) K.Toyoda and Y.Tanimura : Micro-scanning Table Realizing Smooth Motion to a Few Nanometer, Bull. Jpn. Soc. Prec Eng., 22(1), 64/65(1988)
- 16) 指田：超音波モータ，応用物理，Vol.54(6), p.589(1985)
- 17) JIS B7430 オプチカルフラット，および JIS B7431 オプチカルパラレル
- 18) W.W.Macy,Jr. : Two-Dimensional Fringe-Pattern Analysis, Appl.Opt., Vol.22(23), 3898/3901(1983)
- 19) M.Takeda, H.Ina and S.Kobayashi : Fourier-Transform Method of Fringe-Pattern Analysis for Computer-Based Topography and Interferometry, Jour. of Opt. Soc. of Am., Vol.72(1), 156/160(1982)
- 20) E.Shannon and W.Weaver, The Mathematical Theory of Communication, Dover, New York, p.3(1957)
- 21) 横山，松田：平面度干渉計の試作，昭和46年度精機学会学術講演会論文集，305/306(1971)
- 22) 谷村：光路差増倍の差動式レーザー干渉計，精密機械，Vol.48(12), 1573/1577(1982)
- 23) 谷村：光路差増倍の差動式レーザー干渉計（続報），精密機械，Vol.49(12), 1687/1691(1983)

- 24) 松崎：最新のレーザー干渉計システムの基本動作原理と応用, O puls E, Vol.38, 86/93(1982)
- 25) 岩崎, 桜井：市販波長安定化レーザーの波長校正とその安定度, 応用物理学会誌, Vol.49(9), 870/875(1980)
- 26) 山田：非線形誤差の低減, 応用物理, Vol.58(10), 1515/1516(1989)
- 27) 黒沢, 清水, 菊池, 谷村：汎用型光ファイバー結合レーザー干渉測長機, 昭和63年度精密工学会春期学術講演会論文集, 721/722(1988)
- 28) 谷村, 黒沢：光ファイバと結合した小型レーザー干渉計, 精密工学会誌, Vol.55(12), 2157/2162(1989)
- 29) 原田：標準パターン作製法の検討, マイクロパターンの計測に関する検討会資料, 2-1(1986)
- 30) E.Bassous : Fabrication of Novel Three-Dimensional Microstructures by the Anisotropic Etching of (100) and (110) Silicon, IEEE Tran. of Electron Devices, ED-25-10, 1178/1184(1978)
- 31) K.E.Bean : Anisotropic Etching of Silicon, IEEE Trans. of Electron Devices, ED-25-10, 1185/1193(1978)
- 32) 高橋：物質の構造, コロナ社, p.130(1983)
- 33) 古川：異方性エッチングにおける加工過程の解明と仕上がり精度の事前予測, 平成元年度科学研究費補助金(一般研究B)研究成果報告書, 23/27(1990)
- 34) 古川：異方性エッチングプロセスの解析, 精密工学会誌, Vol.52(2), 283/288(1992)
- 35) Y.Nakayama and S.Okazaki : Proposal for a New Submicron Dimension Reference for an Electron Beam Metrology System", Jour. Vac. Sci. Tech., Vol.136(6), 1930/1933(1986)
- 36) L.L.Lenvison,: Scanning Electron Microscopy III, SEM Inc., AMF O'Hare, 925/936(1982)

- 37) M.Kotera, T.Fujiwara, N.Kanai and H.Suga : Theoretical Evaluation of a Topographic Contrast of Scanning Electron Microscope, Jpn. J. Appl. Phys., 30(11B), 3287/3293(1991)
- 38) 山田: 表面構造及びトポグラフィーの高分解能計測, 計量研究所報告, Vol.34(2), 170/180(1985)
- 39) N.F.Mott and H.S.W.Massey : The Theory of Atomic Collision, Clarendon Press, Oxford, p.493(1965)
- 40) 日経マイクロデバイス, No.54, 118/120(1989)
- 41) M.T.Postek : Submicrometer Dimensional Metrology in the Scanning Electron Microscope, SPIE Vol.775, 166/171(1987)
- 42) G.D.Archard : Back Scattering of Electrons, Jour. of Appl. Physics, Vol.32(8), 1505/1509(1961)
- 43) K.Kanaya and S.Okayama : Penetration and Energy-loss theory of Electrons in Solid targets, J. Phys. D, 5(1), 43/58(1972)
- 44) M.Miyoshi and Y.Yamazaki : Topographic Contrast in the Linewidth Measurement with Scanning Electron Microscope, J.Electron Microsc., 35(2), 118-128(1986)
- 45) J.R.Young : Dissipation of Energy by 2.5-10keV Electrons, Jour.of Appl. Phys. Vol.28(5), 524/525(1957)
- 46) K.Murata, T.Matsukawa and R.Shimizu : Monte Carlo Calculations on Electron Scattering in a Solid Target, Jour. of Jpn. Appl. Physics, Vol.10(6), 678/686(1971)
- 47) J.R.Pearce and D.C.Holnes : Noise Contribution to Feature Dimension Measurement in Scanning Electron Microscope, SPIE Vol.775, 153/158(1987)
- 48) 土井, 谷村: 光ビームによる IC パターンの線幅測定, 1989 年度精密工学会春期大会予稿集, 547/548(1989)

- 49) VLSI スタンダーズ社カタログ : LWS-2100 シリーズ,(1991)
- 50) C.R.Worthington and S.G.Tomlin, Proc. of Phys. Soc., Vol.A69, p.401(1956)
- 51) E.Jahnke and F.Emde, Table of Functions, Dover Publications, New York,
(1945)

発表論文等

学会誌上

- (1) T.Hatsuzawa, "Optimization of Fringe Spacing in a Digital Flatness Test", Applied Optics, Vol.24(15), 2456/2459(1985)
- (2) T.Hatsuzawa, K.Toyoda and Y.Tanimura, "Speed Control Characteristics and Digital Servosystem of a Circular Travelling Wave Motor", Review of Scientific Instruments, Vol.57(11), 2886/2890(1986)
- (3) T.Hatsuzawa, Y.Tanimura, H.Yamada and K.Toyoda, "Piezodriven Spindle for a Specimen Holder in the Vacuum Chamber of a Scanning Electron Microscope", Review of Scientific Instruments, Vol.57(12), 3110/3113(1986)
- (4) T.Hatsuzawa, K.Toyoda and Y.Tanimura, "A Metrological Electron Microscope System for Microfeatures of Very Large Scale Integrated Circuits", Review of Scientific Instruments, Vol.61(3), 975/979(1990)
- (4') 初澤, 豊田, 谷村: マイクロパターン絶対測長装置の開発, 計測自動制御学会論文集, Vol.26(9), 983/988(1990)
- (5) 初澤, 土井, 豊田: サブ μ m領域における線幅標準とその測定, 計測自動制御学会論文集, Vol.28(1), 3/9(1992)
- (6) 初澤, 谷村: 円筒領域モデルによる2次電子エッジ信号の推定, 計測自動制御学会論文集, 1993年2月号に掲載予定

国際会議

- (1) T.Hatsuzawa, K.Toyoda and Y.Tanimura, "Development of an Attitude Control Device for a Small Specimen in an SEM", IMEKO XI, Applications, 643/650(1988)

- (2) T.Hatsuzawa and K.Toyoda, "Critical Dimension Measurement by Electron and Optical Beams for the Establishment of Linewidth Standards", IEEE ICMTS'92, Vol.5, 180/184(1992)

学会口頭発表

- (1) 初澤：干渉縞画像処理のための最適縞幅の一決定法，精機学会昭和 59 年度秋期大会 (1984.10)
- (2) 初澤，豊田，谷村：回転型表面波モーターの速度制御特性と位置決め制御系，第 25 回計測自動制御学会 (1986.7)
- (3) 初澤，谷村，山田，豊田：ピエゾ駆動機構を用いた SEM 用試料ホルダー，応用物理学会昭和 61 年度秋期大会 (1986.10)
- (4) 谷村，山田，初沢，豊田，黒沢：マイクロ干渉計の開発，昭和 61 年度精密工学会秋期大会 (1986.10)
- (5) 初澤，豊田，谷村：マイクロパターン絶対測長装置の開発，応用物理学会平成元年度秋期大会 (1989.10)
- (6) 初澤，豊田，モンテベルデ：電子ビーム測長装置校正用標準試料 (1) 基本設計，応用物理学会平成 2 年度秋期大会 (1990.10)

その他の発表

学会誌上

- (1) 初澤：超音波モーターとピエゾ駆動機構を用いた SEM 用試料ホルダ，精密工学会誌，Vol.53(5)，701/703(1987)
- (2) 初澤：マイクロパターン測長におけるエッジ，精密工学会誌，Vol.54(11)，2059/2062 (1988)

- (3) T.Hatsuzawa, "Automatic Centering System for a Roundness Tester using Force Feedback Techniques", Precision Engineering, Vol.10(1),19/23(1988)

商業誌上

- (4) 初澤：超音波モーターの位置決め制御系，計測技術，Vol.15(2), 35/40(1987)
(5) 初澤：超音波モータ，省力と自動化，Vol.20(6),78/80(1989)

その他

- (6) 谷村，豊田，初澤：マイクロパターンの計測に関する調査研究，計量研究所調査研究報告書 (1988)
(7) 谷村，初沢：超高分解能レーザー干渉計と2次元微動台，計量研究所月例研究発表会 (1989.2)
(8) 谷村，山田，初沢，豊田，黒沢：分離型レーザー干渉計，実用新案出願 (昭62-52868 ほか3件)

また，

- (1) 1991年度計測自動制御学会技術賞 (論文 (4') に対して)
(2) 計測自動制御学会論文集 創立30周年記念号 特別表彰論文 (論文 (5) に対して)
を受賞している。

付録

1.FFT による干渉縞解析法

FFT による干渉縞解析は、画像処理により縞の明暗部分を抽出して凹凸情報を計算していた従来手法に比較すると、計算機向きのアルゴリズム的な解析手法である。ここでの解析の概要を図 9.1 を用いて説明する。

(a) のような強度分布を持つ干渉縞は、

$$I(x, y) = a(x, y) + b(x, y) \times \cos[2\omega_0 x + \phi(x, y)] \quad (9.1)$$

$$\omega_0 = 2\pi f_c \quad (9.2)$$

のような形で表わされ、これより位相部分 $\phi(x, y)$ を抽出すれば表面の形状を求めることが出来る。上式を複素数表示に改めると、

$$I(x, y) = a(x, y) + c(x, y) \cdot e^{j\omega_0 x} + c^*(x, y) \cdot e^{-j\omega_0 x} \quad (9.3)$$

$$c(x, y) = \frac{1}{2} \cdot b(x, y) \cdot e^{j\phi(x, y)} \quad (9.4)$$

が得られる。

ここで、ある y_0 についてフーリエ変換し、走査線一本あたりの周波数成分 $F(\omega, y_0)$ に着目すると、

$$F(\omega, y_0) = A(\omega, y_0) + C(\omega - \omega_0, y_0) + C^*(\omega + \omega_0, y_0) \quad (9.5)$$

となり、(b) のように直流分、正の周波数成分、負の周波数成分の 3 項に分かれる。これら 3 項のうち表面情報を含むのは正の周波数成分であるので、ハイパス・フィルタリングにより $C(\omega - \omega_0, y_0)$ のみ残し他の成分を切り捨てる。さらに周波数軸を ω_0 だけシフトすると、(c) のように $C(\omega, y_0)$ が得られる。

これを逆 FFT すると式 (9.4) の形式を持つ $c(x, y_0)$ となるが、ここで両辺の自然対数をとると

$$\ln[c(x, y_0)] = \ln \left[\frac{1}{2} b(x, y_0) \right] + j\phi(x, y_0) \quad (9.6)$$

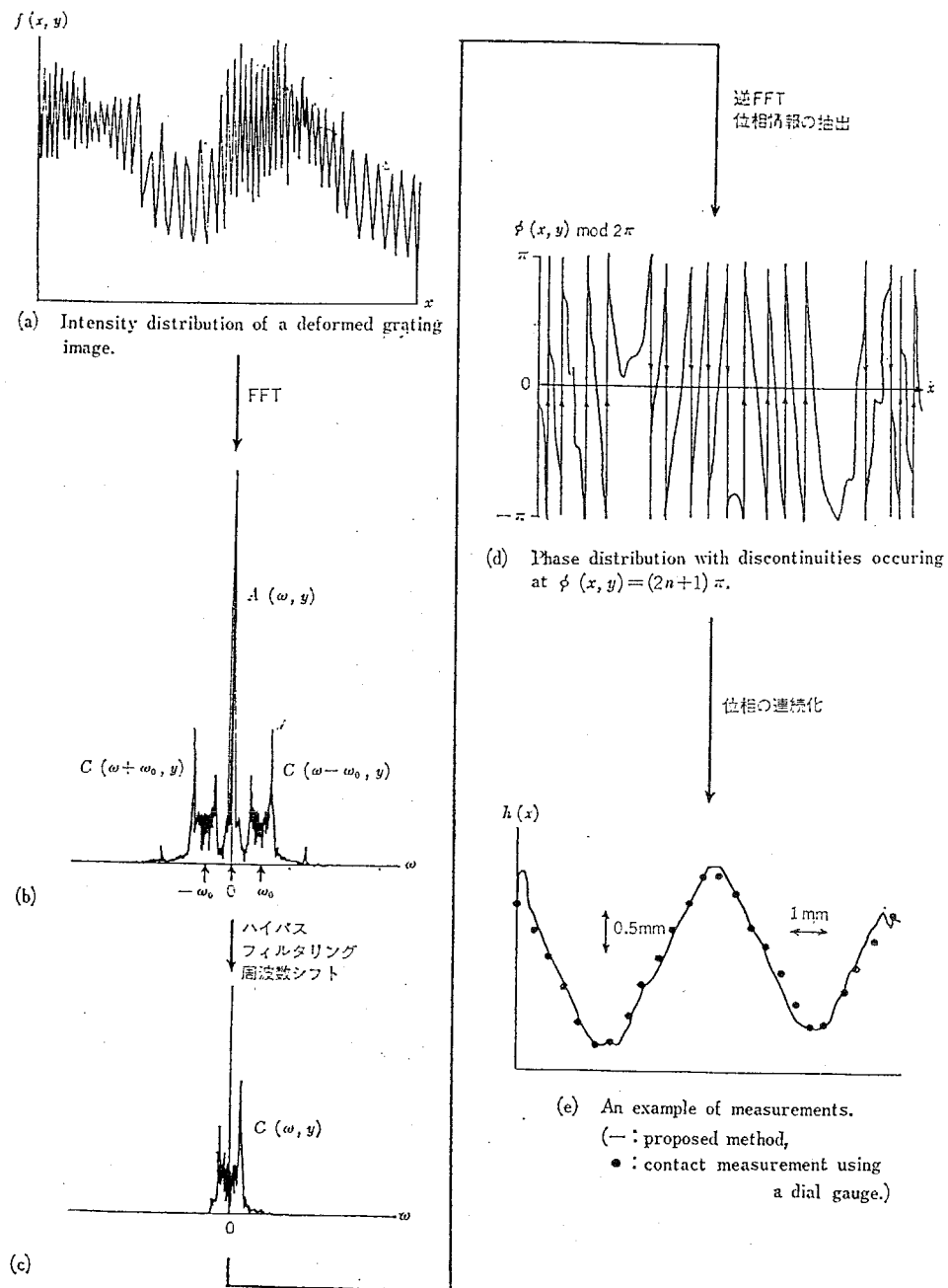


図 9.1: FFT による縞解析の様子.

が得られ、物体の位相分布が純虚数部分として抽出される。計算機の内部では位相は $\bmod 2\pi$ で表わされるので、(d) のように不連続な位相分布になるが、適宜つなぎ合わせ処理を行なうことにより (e) のような凹凸情報を得ることが出来る。

以上が FFT による干渉縞解析のあらましであり、画像を通信理論的なアプローチにより解析するため、従来の画像処理法に比較して処理が簡便かつ正確になった。

2. 第6章の式 (6.13) の導出

式 (6.11) 中の $\frac{dE}{dx}$ は Thomson-Wedington 則⁵⁰⁾により,

$$\frac{dE}{dx} = \frac{2\pi N e^4 Z \cdot \ln\left(\frac{2E}{J}\right)}{E} \quad (9.7)$$

$$J = 11.5Z(ev) \quad (9.8)$$

と与えられる. ここで, $V = \frac{E}{e}$ としてエネルギーを電圧に書換え, 上記2式と式 (6.12) を式 (6.11) に代入すると,

$$\int_{V_d}^{V_0} \frac{Z}{4V} \cdot \frac{\ln(0.54V^{\frac{1}{2}}Z^{-\frac{1}{3}})}{\ln(0.174VZ^{-1})} dV = \frac{1}{2} \quad (9.9)$$

が得られる.

原子番号 Z が 10 ~ 80 の間では, 対数内は 5,000V から 50,000V の範囲内ではほとんど変わらず, $V_0 \sim V_d$ の積分範囲で小さな値である. 従ってこれを定数として積分の外側に置き, 初期電圧が 10kV で原子番号 10 ~ 80 の間での平均値を 0.7 とすれば, 上式は

$$Z \ln\left(\frac{V_0}{V_d}\right) = \frac{20}{7} \quad (9.10)$$

と近似される.

一方, 拡散中心 Z_d は式 (9.7) を積分することにより

$$\rho Z_d = 4.24 \times 10^{-10} Z A [f(V_0) - f(V_d)] \quad (9.11)$$

$$f(V) = \langle E_i \rangle \left[2 \ln\left(\frac{0.174V}{Z}\right) \right] \quad (9.12)$$

と与えられる. ここで $\langle E_i \rangle$ は Jahnke と Emde による関数表⁵¹⁾から求められるが, 1 より大きな変数 y に対しては,

$$\langle E_i \rangle (y) = \left(\frac{e^y}{y}\right) \left(1 + \frac{1}{y} + \frac{2!}{y^2} + \dots\right) \quad (9.13)$$

のような収束級数で与えられる.

式 (9.11) より, 電子到達距離 Z_r は

$$\frac{Z_d}{Z_r} = \frac{f(V_0) - f(V)}{f(V_0)} \quad (9.14)$$

と表わされるが, 上記2式を使って書き直すと,

$$\frac{Z_d}{Z_0} = 1 - \left(\frac{V_d}{V_0}\right)^2 \frac{\ln\left(\frac{0.174V_0}{Z}\right) \left(1 + \frac{1}{y_d} + \dots\right)}{\ln\left(\frac{0.174V_d}{Z}\right) \left(1 + \frac{1}{y_0} + \dots\right)} \quad (9.15)$$

となる．対数の中と級数は 1 に近いので，上式は

$$\frac{Z_d}{Z_r} = 1 - \left(\frac{V_d}{V_0}\right)^2 \quad (9.16)$$

と近似することが出来る．さらに $V_0 - V_d$ は V_0 に比べて小さいことに注意して，式 (9.10) の近似則を用いると，

$$\frac{Z_d}{Z_r} = \frac{40}{7Z} \quad (9.17)$$

が得られ，式 (6.13) となる．