

論文 / 著書情報
Article / Book Information

題目(和文)	結像光学系によるアライメント計測とX線リソグラフィへの応用に関する研究
Title(English)	
著者(和文)	宮武勤
Author(English)	
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3584号, 授与年月日:2002年2月28日, 学位の種別:論文博士, 審査員:
Citation(English)	Degree:Doctor (Engineering), Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:乙第3584号, Conferred date:2002/2/28, Degree Type:Thesis doctor, Examiner:
学位種別(和文)	博士論文
Type(English)	Doctoral Thesis

結像光学系によるアライメント計測と
X 線リソグラフィへの応用に関する研究

平成 13 年 12 月

宮 武 勤

目次

第1章 序論	
1. 1 緒言	1
1. 2 X線リソグラフィにおけるアライメント計測	2
1. 2. 1 要求性能	2
1. 2. 2 従来の計測方法の特徴と問題点	3
1. 3 本論文の目的と概要	5
参考文献	7
第2章 色収差2重焦点法によるアライメント計測	10
2. 1 緒言	10
2. 2 色収差2重焦点法	10
2. 2. 1 レンズの軸上色収差	10
2. 2. 2 パターンバリアフィルタ	11
2. 2. 3 帯域光照明	13
2. 3 光学系の設計と評価	13
2. 3. 1 レンズ設計	13
2. 3. 2 レンズ仕様と製作	15
2. 3. 3 レンズ評価	16
2. 3. 4 光学系の全体構成	18
2. 4 実験結果	20
2. 4. 1 帯域光照明の効果	20
2. 4. 2 検出再現性と直線性	21
2. 4. 3 焦点はずれによる誤差	22
2. 5 結言	23
参考文献	24
第3章 色収差2重焦点法のX線リソグラフィへの応用	25
3. 1 緒言	25
3. 2 色収差2重焦点法のアライメント精度	25
3. 2. 1 X線リソグラフィシステム	25
3. 2. 2 X線ステッパ	26
3. 2. 3 アライメント精度の評価方法	28
3. 2. 4 アライメント精度	28
3. 2. 5 ギャップ補正方式による精度改善	31

3. 3	半導体デバイス試作におけるアライメント精度	3 2
3. 3. 1	NMOSFET 試作	3 2
3. 3. 2	64Mb-DRAM 模擬デバイス試作	3 4
3. 3. 3	焦点はずれ補正方式による精度改善	3 8
3. 3. 4	SiC-X 線マスクへの適応性	4 1
3. 4	アライメント誤差の解析	4 2
3. 4. 1	モデリング	4 2
3. 4. 2	焦点はずれによるアライメント誤差	4 7
3. 4. 3	ウェハマークの断面形状によるアライメント誤差	4 9
3. 4. 4	マスクマークの断面形状によるアライメント誤差	5 3
3. 5	結言	5 6
	参考文献	5 7
第4章	セクタフレネルゾーンプレートによるアライメント計測	5 9
4. 1	緒言	5 9
4. 2	アライメント計測方法	5 9
4. 2. 1	セクタフレネルゾーンプレート	5 9
4. 2. 2	斜方検出	6 1
4. 2. 3	ビデオ信号処理	6 3
4. 3	実験結果	6 4
4. 3. 1	実験条件	6 4
4. 3. 2	集光ビームの結像特性	6 5
4. 3. 3	アライメント計測性能の評価	6 6
4. 4	考察	6 9
4. 4. 1	プロセス薄膜が集光ビームに与える影響	6 9
4. 4. 2	反射防止膜と遮光膜の効果	6 9
4. 4. 3	SFZP によるアライメント精度の考察	7 1
4. 5	結言	7 1
	参考文献	7 2
第5章	エッジ散乱光によるアライメント計測	7 4
5. 1	緒言	7 4
5. 2	エッジ散乱光によるアライメント計測	7 4
5. 2. 1	アライメントマークと結像光学系	7 4
5. 2. 2	ビデオ信号処理	7 8
5. 2. 3	ギャップ可変機能	7 9

5. 2. 4	実験結果	8 0
5. 2. 5	エッジ像の形状についての考察	8 2
5. 3	検出精度の評価	8 4
5. 3. 1	実験方法	8 4
5. 3. 2	実験結果	8 5
5. 3. 2. 1	検出再現性	8 5
5. 3. 2. 2	プロセスウエハの検出精度	8 6
5. 3. 2. 3	SiC メンブレン厚さの影響	8 9
5. 3. 3	考察	9 0
5. 4	分光透過率が低い SiC-X 線マスクに対する計測性能	9 1
5. 4. 1	アライメントマークと結像光学系の改良	9 1
5. 4. 2	エッジ散乱光強度の評価	9 3
5. 4. 3	検出精度の評価	9 4
5. 5	アルミ薄膜が計測性能に及ぼす影響	9 8
5. 5. 1	実験方法	9 8
5. 5. 2	実験結果	9 9
5. 5. 3	考察	1 0 1
5. 6	結言	1 0 4
	参考文献	1 0 5
第 6 章	エッジ散乱光によるアライメント計測法の X 線リソグラフィへの応用	1 0 6
6. 1	緒言	1 0 6
6. 2	X 線リソグラフィへの応用	1 0 6
6. 2. 1	X 線リソグラフィシステム	1 0 6
6. 2. 2	X 線ビームライン	1 0 7
6. 2. 3	X 線ステッパ	1 0 9
6. 3	X 線露光によるアライメント精度の評価	1 1 2
6. 3. 1	アライメント精度の評価方法	1 1 2
6. 3. 2	露光条件	1 1 5
6. 3. 3	初期の露光結果	1 1 6
6. 4	アライメント誤差の原因と改善	1 1 8
6. 4. 1	アライメント検出光軸と X 線の角度補正	1 1 8
6. 4. 2	レーザ干渉計における大気ゆらぎの低減	1 1 9
6. 4. 3	多重露光によるステージ位置誤差の低減	1 1 9
6. 5	X 線露光による総合評価	1 2 0

6. 5. 1	アライメント精度	1 2 0
6. 5. 2	精度改善に関する考察	1 2 2
6. 5. 3	微細パターンの転写特性	1 2 3
6. 6	結言	1 2 4
	参考文献	1 2 4
第7章	結論	1 2 6
7. 1	本研究のまとめ	1 2 6
7. 2	今後の課題	1 2 9
7. 3	本研究の将来展望	1 2 9
	参考文献	1 2 9
付録	ビデオ信号処理	1 3 1
1	緒言	1 3 1
2	パターン位置の計算方法	1 3 1
2. 1	アルゴリズム	1 3 1
2. 2	ハードウェアの構成	1 3 4
3	結言	1 3 5
	参考文献	1 3 5
謝辞		1 3 6

第1章 序論

1. 1 緒言

半導体集積回路 (IC: Integrated Circuit) は, Si 基板中の層状プレーナ構造からなり, 各層の加工には光リソグラフィ技術が使われている. この光リソグラフィ工程では, 各層の異なるパターン同士を正確に重ね合わせる (以下, アライメントと呼ぶ) 必要があるために, 光学的なアライメント計測技術が用いられている. 一般にアライメント精度は, IC の中でもっとも微細なパターン幅 (以下, 最小線幅と呼ぶ) の $1/3 \sim 1/5$ 程度が必要と言われている.

光リソグラフィ技術の開発は, 解像力とスループット (ここでは, 時間当たりの生産量をさし, 不良率は扱わない) の向上を第一の目的として進められている¹. 高解像化では, 光源の短波長化が, g 線 (波長 436nm), i 線 (波長 365nm), KrF (波長 248nm) レーザ²から ArF (波長 193nm) レーザ³へ移行し, さらに F2 (波長 157nm) レーザの検討も活発に行われている. 一方で, 量産中の 256M ビット DRAM (Dynamic Random Access Memory) の最小線幅 220nm⁴は, 光源波長 248nm よりも小さくなり, 光の回折現象による理論的な解像限界に近づきつつある. このような状況のなかで, 波長 1nm 前後の軟 X 線を用いる X 線リソグラフィは, 光リソグラフィの解像限界を打破する将来技術として位置づけられ, 実用化に向けた研究開発が進められている.

X 線リソグラフィ^{5,6}は, H. I. Smith らが 1972 年に提唱した微細パターンの露光技術である. 原理は, 図 1. 1 に示すように X 線を透過する薄膜 (以下, メンブレンと呼ぶ) の上に, X 線を吸収する重金属パターン (以下, 吸収体と呼ぶ) 形成し, この X 線マスクに軟 X 線を照射して, マスクパターンを Si ウエハ上のレジストに転写する, 1:1 等倍近接露光 (PXL: Proximity X-ray lithography) である.

X 線源として, シンクロトロン放射光 (SR: Synchrotron Radiation) が提案^{7,8,9}されると, X 線リソグラフィは, 高いスループットが見込める経済的に有利な技術として位置づけられ, その後, 床面積の小さな小型 SR リング^{10,11,12}の稼動が実証されると, さまざまな LSI (Large Scale Integration) 試作への適用評価^{13,14,15,16,17,18}が開始されるようになった.

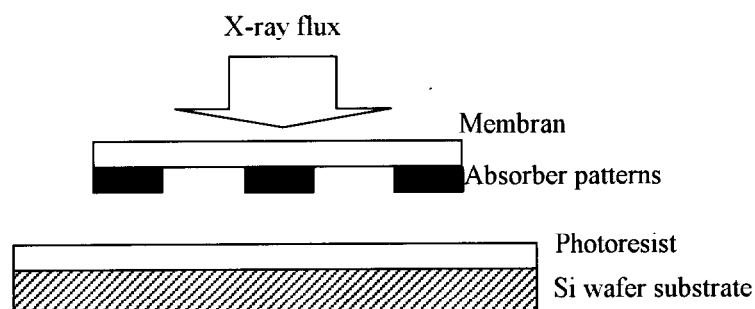


Fig. 1.1 Principle of proximity X-ray lithography

IC パターン転写における今後の可能性として、縮小露光と近接露光に別れることが考えられる。縮小露光では、4～5倍に拡大したマスクパターンを縮小投影することから、寸法精度が高く、無欠陥のマスク製作技術を確認しやすいという利点がある。しかしながら、マスクとウエハの間に縮小投影光学系が介在するため、筐体の振動などにより両者の位置がずれやすく、高いアライメント精度を得るのが難しいと考えられる。

近接露光では、等倍マスクパターンの精度が直ちに転写パターンに反映されるため、寸法精度が高く、無欠陥のマスク製作技術を確認することが難しいといえる。一方で、近接したマスクとウエハの相対位置を同一のアライメント計測装置で測定可能なことから、もっとも高いアライメント精度を達成できる露光技術だと考えられる。本研究では、このアライメント計測における近接露光の優位性から X 線リソグラフィへの応用を試みる。

1. 2 X 線リソグラフィにおけるアライメント計測

1. 2. 1 要求性能

X 線リソグラフィにおけるアライメント計測に要求される性能を表 1. 1 に示す。1) 高いアライメント精度、2) 高いスループット、3) 高いプロセス適応性に大別される。

Table 1.1 Requirements of optical alignment system for proximity x-ray lithography.

アライメント精度	スループット	プロセス適応性
IC 設計ルールにおける最少線幅の 1/3～1/5	・ウエハ当たりのオーバーヘッド時間 ・フィールド当たりのオーバーヘッド時間	・IC プロセス薄膜の製造条件 ・X 線マスクの製造条件

1) アライメント精度：

アライメント精度は、最終的にウエハ上に転写された基準パターン間のずれ量（以下、アライメント誤差とよぶ）から定義され、X 線リソグラフィが使われる最少線幅 100nm（4 Gbit DRAM に相当）で要求されるアライメント精度は、30nm ($|\text{Mean}|+3\sigma$) 以下である。

アライメント精度の平均値 ($|\text{Mean}|$) はウエハ上の転写パターン位置の一方向への偏りであり、偏差 (3σ) はウエハ上の転写パターン位置のばらつきを表す。アライメント精度には、ウエハステージの位置誤差、マスクパターンの位置歪などがすべて含まれることから、アライメント計測装置単体ではさらに高い精度が要求される。

2) スループット：

アライメント計測がスループットに関与する要因は、(1) ウエハ 1 枚当たりのアライメント計測に必要なオーバーヘッド時間、(2) 各露光フィールド当たりのアライメント計測に必要な

なオーバヘッド時間，に大別される．高いスループットを実現するためには，これら計測のオーバヘッド時間を零にすることが必要である．

3) プロセス適応性：

ウエハ上にはレジストを含むプロセス薄膜（例えば絶縁膜，金属膜）が形成され，その厚さや表面あらさは，IC の構造によりさまざまに変化する．このプロセス薄膜の変化に適応できる計測性能が要求される．X 線マスクでは，マスクパターンの位置歪や X 線照射耐性¹⁹を劣化させる反射防止膜²⁰と遮光膜²¹を必要としない計測性能などが必要とされる．

1. 2. 2 従来の計測方法の特徴と問題点

図 1. 2 は，X 線リソグラフィ用に開発されたアライメント計測法を，宇根²²が分類したものに追加・改定したものである．まず，アライメントマークの位置検出に用いる光に X 線と可視光を併用するものと，可視光（光の波長：400-800nm 前後）だけを用いるもので分類した．可視光を用いるアライメント計測は，さらに「光の散乱・反射」を利用するものと，「光の回折・干渉」を利用するものに分類される．

「光の散乱・反射」を利用したアライメント計測法は，光学顕微鏡対物レンズを用いてマーク像を検出する「顕微鏡スキャン」，2 重焦点レンズを用いてマーク像を検出する「2 重焦点」，顕微鏡対物レンズを斜めに傾けてマーク像を検出する「斜方結像」に分類される．

「光の回折・干渉」を利用したアライメント計測法は，回折光の「強度」を位置情報とし

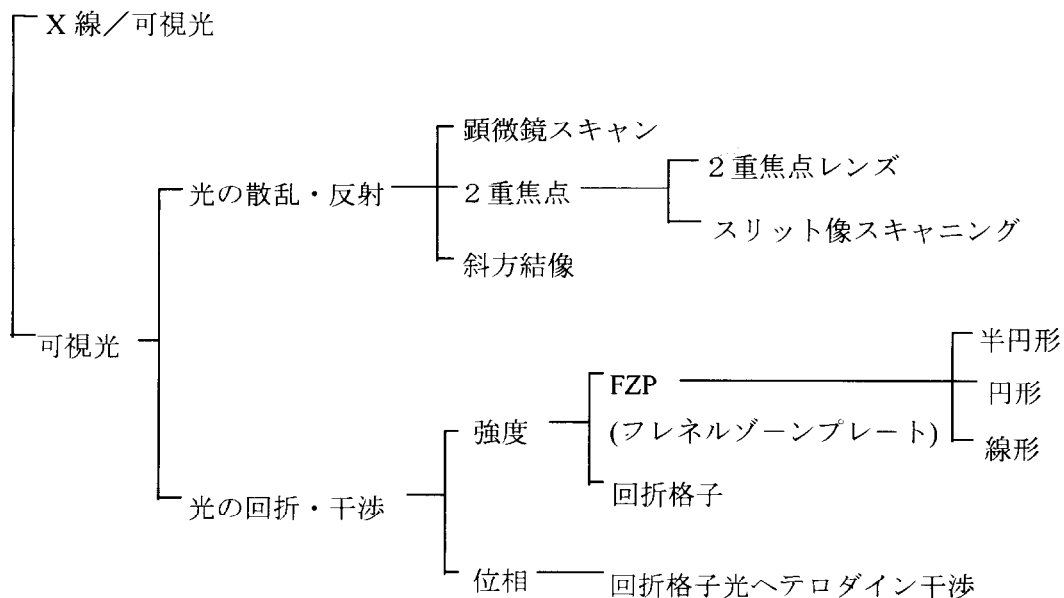


Fig 1.2 Grouping of alignment methods developed for proximity x-ray lithography

て利用する方法と、回折光の「位相」を位置情報として利用する方法に分類される。さらに回折光の「強度」を利用する方法は、フレネルゾーンプレート (Fresnel zone plate, FZP と略す) の集光作用を利用する「FZP」と、回折格子による回折光の強度変化を利用する「回折格子」に分類される。また、回折光の「位相」を利用する方法は、わずかに異なる2つの周波数の光を干渉させる、いわゆるヘテロダイン干渉を応用した技術である。

次に、図1．2に分類された従来のアライメント計測法の問題点を述べる。

〔X線〕を利用したアライメント計測^{2,3}では、マスクとウエハの位置を、それぞれX線と可視光により2つのセンサで個別に計測しているため、2つのセンサ間の距離変動が、計測誤差となる欠点をもつ。

〔光の散乱・反射〕を利用したアライメント計測では、検出分解能が観察するマーク像の鮮明度に依存して低下するという欠点をもつ。

〔光の回折・干渉〕を利用したアライメント計測では、ウエハマーク段差の高さやレジスト厚さの変化、あるいはマスク・ウエハ間の多重反射干渉により回折光の強度が低下するという欠点をもつ。

〔顕微鏡スキャン〕を利用したアライメント計測では、マスクとウエハを別々に観察するために移動させる対物レンズ^{2,4}の光軸のぶれが計測誤差になる、という欠点をもつ。

〔2重焦点〕を利用したアライメント計測^{2,5,26,27}では、〔2重焦点レンズ〕マスクとウエハ像の解像度が半分に低下する²⁸、あるいは〔スリット像スキャニング〕スリット像を移動させるスキャナ²⁹の駆動誤差が計測誤差になる、という欠点をもつ。

〔斜方結像〕を利用したアライメント計測³⁰では、斜方から観察する時のマーク像歪みや対物レンズの分解能が低い、などの欠点をもつ。

〔FZP〕を利用したアライメント計測では、円形フレネルゾーンプレート³¹の加工性、半円フレネルゾーンプレートの加工性³²、線形フレネルゾーンプレートの長さで回折光の強度低下^{33,34}などの問題を持っている。

〔回折格子〕を利用したアライメント計測では、マスク・ウエハ間の多重反射干渉による回折光の強度低下³⁵や、マーク段差の変化による回折光の強度低下³⁶を解決するために、遮光膜と反射防止膜を必要としているが、これは前節で述べたように、実用的なX線マスクを実現する上での障害となっている。

〔回折格子光ヘテロダイン干渉〕を利用したアライメント計測^{37,38}においては、マスク・ウエハ間の多重反射干渉によるビート信号の強度低下^{39,40}を解決するために、遮光膜と反射防止膜を必要としているが、これは前節で述べたように、実用的なX線マスクを実現する上での障害となっている。

1. 3 本論文の目的と概要

焦点深度が深く、100nm 以下の微細パターンの形成が可能で、かつ高スループットを実現できる X 線リソグラフィは、最小線幅 100nm 以下の半導体量産技術として位置づけられている。アライメント計測に要求される精度は、約 30nm 以下の高いレベルと、量産でのスループットに対応できる高速な検出能力が求められる。さらに高集積化する LSI 製造プロセスや X 線マスク製造プロセスなどに対する高い適応能力も必要とされる。しかし、前節で述べているように、これらの要求を満足するアライメント計測法は確立されていない。

本研究では、半導体量産技術として、X 線リソグラフィが要求するアライメント性能を達成することを目的として、光の反射・散乱・回折を利用したマスクとウエハの位置計測法を提案し、その計測性能を評価する。次に、そのアライメント計測法を X 線リソグラフィに応用し、その性能を X 線露光により評価する。

具体的には、①、②、③の方法を提案し、計測装置単体を試作・評価するとともに、X 線露光装置のアライメント計測装置として適用し、その性能を評価する。

①色収差 2 重焦点法（第 2 章と第 3 章）

②セクタ FZP 法（第 4 章）

③エッジ散乱光検出法（第 5 章と第 6 章）

アライメント計測に利用する光は、①正反射光、②回折光、③散乱光と異なるが、いずれも“結像光学系”を利用する点で共通点をもっている。なお“結像光学系”は、松居⁴¹により提案された光学用語である。

第 2 章「色収差 2 重焦点法によるアライメント計測」では、従来の光の正反射を利用したアライメント計測におけるマーク像の鮮明度低下、対物レンズのスキャン精度誤差、像歪みを解決する色収差 2 重焦点法を提案する。一般的な顕微鏡対物レンズを用いて X 線マスクの像に焦点を合わせると、数十マイクロメートル離れたウエハの像はぼけてしまうため、X 線マスクとウエハを同時に観察することができない。この問題を、レンズの軸上色収差と光学フィルタを組み合わせることにより解決し、光学的に理想的な 2 重焦点レンズを実現する。次に、色収差 2 重焦点レンズの設計と製作について述べ、製作した 2 種類の 2 重焦点レンズの結像性能を比較する。実験では、X 線ステッパ用に製作した一軸のアライメント装置単体を用い、X 線マスクとウエハの位置を計測した結果を述べる。

第 3 章「色収差 2 重焦点法の X 線リソグラフィへの応用」では、第 2 章で述べた色収差 2 重焦点法を X 線リソグラフィに応用し、そのアライメント精度を測定した結果を述べる。X 線源には SR リングを用い、アライメント精度の評価は、X 線露光によりウエハ上に焼き付けられたバーニアパターンの測定に基づいている。露光実験では、試作した 2 種類の色収差 2 重焦点装置によるアライメント精度の比較を行う。次に、半導体デバイス試作を通して評価

したアライメント精度について述べる．さらにアライメント精度を改善するために，ギャップ補正方式と焦点はずれ補正方式を提案し，その効果を X 線露光により評価する．アライメント誤差の解析では，モデル化した 2 重焦点レンズとアライメントマークにおいて，焦点はずれとアライメントマーク形状に起因して生じる誤差の解析について述べる．最後に，色収差 2 重焦点法の課題として，焦点はずれによる誤差の低減，焦点はずれ補正や色収差 2 重焦点装置の移動に要するオーバヘッド時間の短縮，プロセスウエハでの精度低下の改善，SiC メンブレンでのコントラスト低下の改善の必要性を指摘する．

第 4 章「セクタフレネルゾーンプレートによるアライメント計測」では，第 3 章の色収差 2 重焦点法の課題となった焦点はずれによる誤差の低減，オーバヘッド時間の短縮を解決するために，リニアゾーンプレートを扇状に変形したセクタフレネルゾーンプレート (SFZP) を提案する．集光ビームの角度を自由に設定できる SFZP では，斜方検出による高いスループットを実現できる．まず，SFZP の設計方法と製作した反射型 SFZP の仕様について述べる．次に，He-Ne レーザ光を光源とし，X 線マスクとウエハを使った実験方法と，集光ビームのピーク信号を用いたビデオ信号処理方法について述べる．実験結果として，DRAM の代表的な 4 種類のプロセスウエハにおける集光ビームの特性と，検出再現性について述べる．さらに，レジスト膜厚の変化が集光ビームに及ぼす影響，安定した集光ビーム強度を得るために反射防止膜と遮光膜が有効な手段となることを示す．SFZP の課題として，プロセス薄膜の変化に対する適応性を改善する必要があることを指摘する．

第 5 章「エッジ散乱光によるアライメント計測」では，第 3 章の色収差 2 重焦点法の課題となった焦点はずれによる誤差の低減，オーバヘッド時間の短縮，SiC メンブレンでのコントラスト低下の改善，プロセスウエハでの精度低下の改善，第 4 章のセクターフレネルゾーンプレート法の課題となったプロセス薄膜の変化に対する適応性の改善を解決するために，エッジ散乱光によるアライメント計測法を提案する．まず，二次元配列パターンのエッジ部分からの後方散乱光を，斜め方向から検出する結像光学系の構成を示し，焦点はずれによる誤差が生じない理由と結像光学系の移動が不要であることを述べる．試作したアライメント装置単体により，SiC メンブレンの X 線マスクとウエハを繰り返し測定した結果，高いコントラストと高い検出再現性が得られることを示す．検出精度の評価では，ウエハに作り込んだ 4 種類のプロセスウエハマークによる実験結果と，分光透過率が異なる 4 種類の SiC メンブレンを用いた実験結果を述べる．さらに，アルミ薄膜付きウエハでの誤差要因と改善方法を述べる．最後に，エッジ散乱光によるアライメント計測により，色収差 2 重焦点法とセクターフレネルゾーンプレート法に残された 5 種類の課題をすべて解決できることを述べる．

第 6 章「エッジ散乱光によるアライメント計測の X 線リソグラフィへの応用」では，第 5 章のエッジ散乱光によるアライメント計測を X 線露光装置に応用し，X 線露光により評価し

た結果を述べる。まず、露光に用いた X 線リソグラフィシステム (X 線光源, ビームライン, X 線露光装置) の構成と性能を述べる。次に, 初期の露光結果を示し, アライメント誤差の要因と対策を明らかにする。これらの対策を実施した結果, レジストパターンを使った X 線 2 重露光により, 20nm 以下のアライメント精度 ($|Mean|+3\sigma$) が得られることを示す。さらに, 計測のオーバヘッド時間が零であることを述べ, 高いスループットが予想できることを述べる。最後に, エッジ散乱光によるアライメント計測が, 本研究が目的とする最小線幅 100nm 以下の半導体デバイス製造で要求されるアライメント性能を達成できることを述べる。課題として, ロセスウエハでのアライメント精度の評価が必要であることを述べる。

第 7 章「結論」は, 各章で得られた結論を要約するとともに, 今後の課題と将来展望について述べる。

参考文献

1. 飯塚清著: 超精密生産技術体系 第 2 巻 第 3 編 第 11 章 第 1 節「主な露光方式と装置の特徴」, フジ・テクノシステム, p. 435.
2. V. Pol, J. H. Bennewitz, G. C. Escher, M. Feldman, V. A. Firtion, T. E. Jewell, B. E. Wilcomb, and T. Clemens: Proc. SPIE, No. 633, p. 6, 1986.
3. M. Rothschild and D. J. Ehrich: J. Vac. Sci. Technol., vol. B5(1), p. 389, 1987.
4. 日経マイクロデバイス 7 月号 NO. 181, p119 図 9, 日経 BP 社, 2000.
5. D. L. Spears and H. I. Smith: Electron. Lett., vol. 8, p. 102, 1972.
6. D. L. Spears and H. I. Smith: Solid State Technol., vol. 15, No. 7, p. 21, 1972.
7. E. Spiller, D. E. Eastman, R. Feder, W. D. Grobman, W. Gudat, and J. Topalian: J. Appl. Phys., vol. 47, No. 12, p. 5450, 1976.
8. H. Aritome, T. Nishimura, H. Kotani, S. Matsui, O. Nakagawa, and S. Namba: J. Vac. Sci. Technol., vol. 15, p. 992, 1978.
9. H. Betz, F. K. Fey, A. Heuberger, and P. Tischer: IEEE Trans. Electron Devices, vol. ED-26, No. 4, p. 693, 1979.
10. T. Hosokawa et al.: NTT superconducting storage ring-Super-ALIS, Rev. Sci. Instrum., vol. 60, No. 7, pp. 1783-1785 (1989).
11. N. Takahashi: Compact SR light source for x-ray lithography, AURORA, Microelectronic Eng., vol. 11, pp. 283-286 (1990).
12. M. N. Wilson et al.: Update on the compact synchrotron x-ray source HELIOS, Proc. Of 1990 Int. MicroProcess Conf., JJAP Series 4, pp. 105-109 (1990).
13. R. DellaGuardia et al., SPIE 2437, 112 (1995).
14. Y. Nishioka et al.: Tech. Dig. Int. Electron Devices Meet. 903 (1995).
15. K. Sunouchi et al.: Tech. Dig. Int. Electron Devices Meet. 601 (1996).
16. S. Subbana et al.: Tech. Dig. Int. Electron Devices Meet. 695 (1994).
17. K. Deguchi, K. Miyoshi, H. Ban, T. Matsuda, T. Ohno, and Y. Kado: J. Vac. Sci. Technol. B 13, 3040 (1995).
18. S. J. Wind et al.: J. Vac. Sci. Technol. B 13, 2688 (1995).

-
- 1 9 . T. Shoki, R. Ohkubo, H. Kosuga, Y. Yamaguchi, N. Annaka, G. M. Wells, K. Yamazaki, and F. Cerrina: Accelerated radiation damage studies of antireflection materials on SiC x-ray mask membrane, *J. Vac. Sci. Technol. B* 12 (6), 2476 (1994).
 - 2 0 . K. Koga, I. Higashikawa, T. Itoh, K. Araki, K. Fujita, J. Yasui, and S. Aoki: Evaluation of heterodyne alignment technique for x-ray steppers, *J. Vac. Sci. Technol. B* 10 (6), 3248 (1992).
 - 2 1 . M. Fukuda, M. Suzuki, and A. Shibayama: *Microelectronics Eng.*, vol. 23, p. 189, 1993.
 - 2 2 . 宇根篤暢著：超精密生産技術体系 第2巻 第3編 第11章 第5節「X線露光装置，SOR露光装置」，pp.499-525，フジ・テクノシステム。
 - 2 3 . A. C. Chen, A. L. Flamholz, R. Rippstein, R. H. Fair, D. A. Heald, and R. J. Amodeo: Overlay performance of 180 nm ground rule generation x-ray lithography aligner, *J. Vac. Sci. Technol. B* 15 (6), 2476 (1997).
 - 2 4 . R. Emmett Hughlett and Keith A. Cooper: A Video Based Alignment System for X-ray Lithography", *Proc. SPIE Vol. 1465*, (1991)100-108.
 - 2 5 . T. Hayasaka et al: A step-and-repeat x-ray exposure system for 0.5 μ m pattern replication, *J. Vac. Sci., Technol., B*, Vol. 3, No. 6, pp. 1581-1586 (1985).
 - 2 6 . D. Maydon: X-ray lithography for microfabrication, *J. Vac. Sci. Technol.* 17 (5), 1164 (1980).
 - 2 7 . A. D. White: Simple bifocus element for microscope objective, *Applied Optics*, Vol. 16, (3), 549 (1977).
 - 2 8 . 久保田広：応用光学，p169，岩波全書。
 - 2 9 . N. Bobroff, R. Tibbetts, J. Wilczynski, and A. Wilson: An optical alignment microscope for x-ray lithography, *J. Vac. Sci. Technol. B* 4 (1), 285 (1986).
 - 3 0 . M. Taniguchi, R. Funatsu, A. Inagaki, K. Okamoto, Y. Kenbo, Y. Kato, and I. Ochiai: X-ray exposure system with plasma source for microlithography, *Proc. SPIE Vol. 1089*, (1989)240-251.
 - 3 1 . M. Feldman, A. D. White, D. L. White: Application of zone plates to alignment in microlithography", *J. Vac. Sci. Technol., Vol. 19* (4), 1224 (1981).
 - 3 2 . Koichi Sentoku and Takahiro Matsumoto: Advanced synchrotron radiation stepper alignment system performance, *J. Vac. Sci. Technol., B* 16 (6), 3466 (1998).
 - 3 3 . B. Fay, J. Tritel, and A. Frichet: Optical alignment system for submicron x-ray lithography", *J. Vac. Sci. Technol., Vol. 16* (6), 1954 (1979).
 - 3 4 . B. S. Fay and W. T. Novak: Advanced x-ray alignment system, *SPIE*, vol. 632, pp. 146-155 (1986).
 - 3 5 . 内田憲男 他：二重回折格子による間隙変化に鈍感なマスクとウエハの位置合わせ法，精密工学会誌，vol. 54, No. 10, pp. 1951-1956 (1988).
 - 3 6 . A. Une, N. Takeuchi and Y. Torii: A high-accuracy alignment technique using single-and double pitch dual gratings, *J. Vac. Sci. Technol., vol. 8*, pp. 51-56(1990).
 - 3 7 . M. Suzuki and A. Une: An optical heterodyne alignment technique for quarter-micron x-ray lithography, *J. Vac. Technol., B*, vol. 7(6), pp. 1971-1976 (1989).
 - 3 8 . 山本正樹 他：ホログラフィアライメントへのヘテロサイン干渉の応用，昭和 63 年精密工学会秋季大会学術講演会論文集，pp. 163-164 (1986).

-
39. M. Fukuda, M. Suzuki, and A. Shibayama: Improvement of alignment accuracy of an SR stepper, *Microelectronic Engineering*, vol. 23, pp. 189-192, (1994).
40. K. Koga, I. Higashikawa, and T. Itoh: Evaluation of heterodyne alignment technique for x-ray steppers, *J. Vac. Sci. Technol., B* 10 (6), 3248 (1992).
41. 松居吉哉著：結像光学入門，啓学出版，1988.

第2章 色収差2重焦点法によるアライメント計測

2. 1 緒言

光学顕微鏡レンズを応用した、さまざまなアライメント計測が実用化され、X線リソグラフィにおけるX線マスクとウエハの位置検出に应用されている。光学顕微鏡対物レンズを移動させて、マスクとウエハの像を別々に観察する方法¹が実用化されている。この方法では、対物レンズを移動させる時に生じる光軸のブレが計測誤差となるため、駆動機構には高い繰り返し精度が要求される。また、光学顕微鏡対物レンズを使って、十数ミクロン離れたマスクとウエハを斜め方向から観察する方法²も実現されている。この方法では20nm以下の検出再現性が得られているが、斜方結像による像歪み³が計測誤差となりやすい。

本章では、これらの前例がもつ問題点を解決することを目的として、1) 機械的な駆動機構によらず、2) 像歪みのない、鮮明なX線マスクとウエハの像を、同時に観察できることを特徴とする色収差2重焦点法を提案する。実験では、X線ステッパ用に製作した単純な1次元アライメント装置単体を用いて、X線マスクとウエハの位置を測定した結果について述べる。

2. 2 色収差2重焦点法

2. 2. 1 レンズの軸上色収差

レンズの軸上色収差を、図2. 1 (a) に示す。光の波長($\lambda_1 < \lambda_2$)によりレンズの屈折率が異なるために、2つの焦点 f_1, f_2 を生じており、これを軸上色収差($f_1 - f_2$)と呼んでいる。同図(b)は近軸領域での光線図を表す。ここで、物体を位置 X_1 において、2つの波長の光 λ_1, λ_2 を入射すると、焦点 f_1 と f_2 を通り、B点(波長 λ_1)とC点(波長 λ_2)に像を結ぶ。次に、同図(c)のごとく、C点とB点が一致するように物体を Δx だけ移動させて位置 X_2 におくと、B点には波長 λ_2 の像ができる。そこで、同図(d)のごとく位置 X_1 と位置 X_2 に、2つの物体を置くと、B点には2つの波長の光 λ_1, λ_2 により2つの物体の像が同時できている。従って、位置 X_1 と位置 X_2 にそれぞれウエハとマスクをおけば、B点ではウエハとマスクの像を同時に観察することができる。一方で、C点とD点に集まる光線は、B点に結像するマスクとウエハの像にかぶる有害光となる。次の項では、この有害光を取り除く光学フィルターについて述べる。

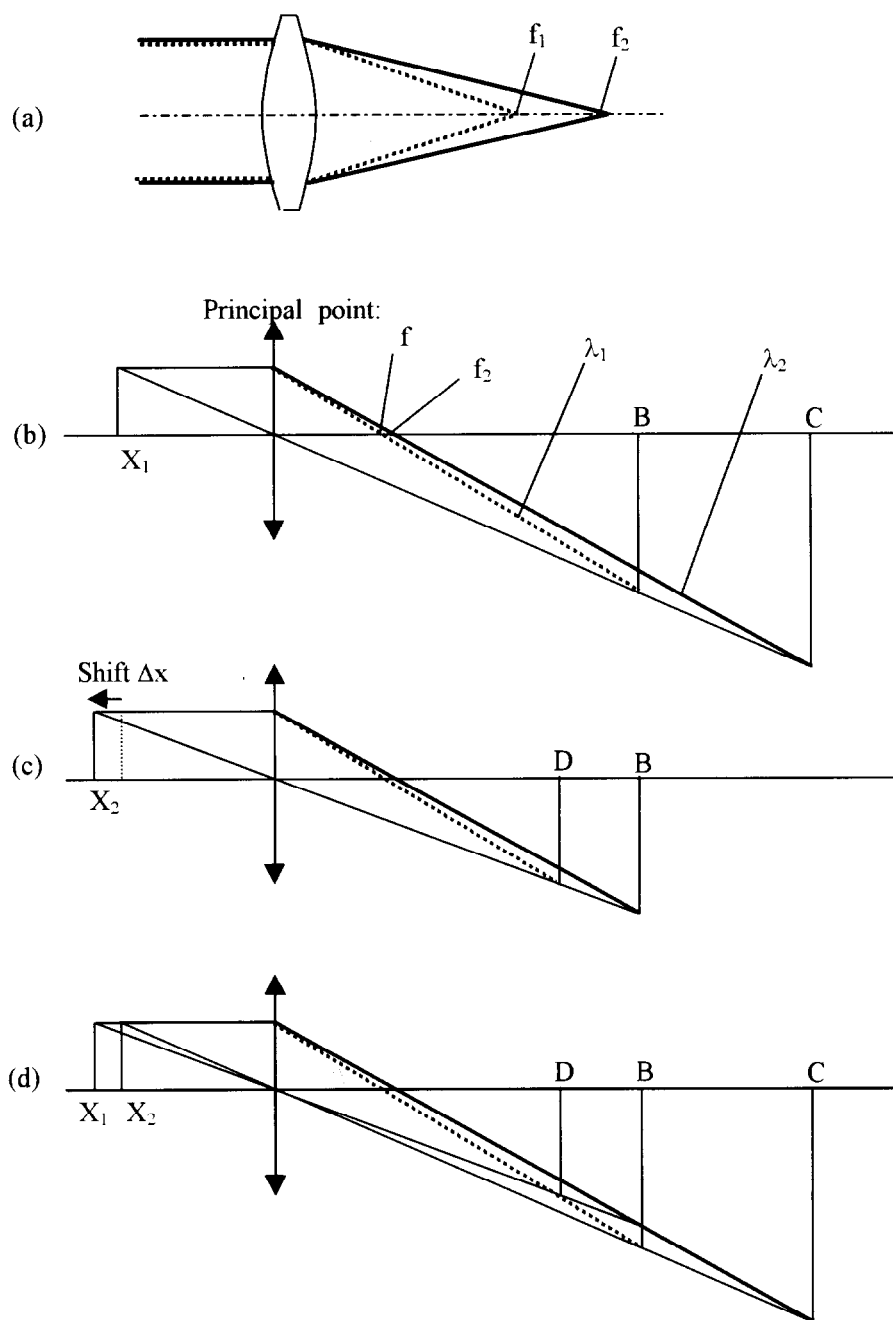


Fig. 2.1 Bifocal lens utilizing lateral chromatic aberration

2. 2. 2 パターンバリアフィルタ

図 2. 2 (a) は、マスクとウエハ間のギャップを、レンズの軸上色収差量（光の波長 λ_1 , λ_2 ）に等しくおいて、マスクマークとウエハマークの像を観察したときの光線図を示す。同図

の右側の結像面には、点線で示す光（波長 λ_1 ）によるマスク像と、実線で示す光（波長 λ_2 ）によるウエハ像が、同時に結像している。一方で、マスク像には実線で示す光が有害光としてかぶり、ウエハ像には点線で示す光が有害光としてかぶっている。

この有害光を取り除く光学フィルタ（以下、パターンバリアフィルタとよぶ）の作用を図 2. 2 (b) に示す。このフィルタの中央部（点線）は、点線で示す光（波長 λ_1 ）だけを透過し、両側の部分（実線）は実線で示す光（波長 λ_2 ）だけの光を透過する。このパターンバリアフィルタを、結像面の手前におくことにより、コントラストを阻害する有害光をすべて取り除くことが可能となる。このパターンバリアフィルタと、所定の軸上色収差をもつ色出しレンズを組み合わる方法を、色収差 2 重焦点法と呼ぶことにする。

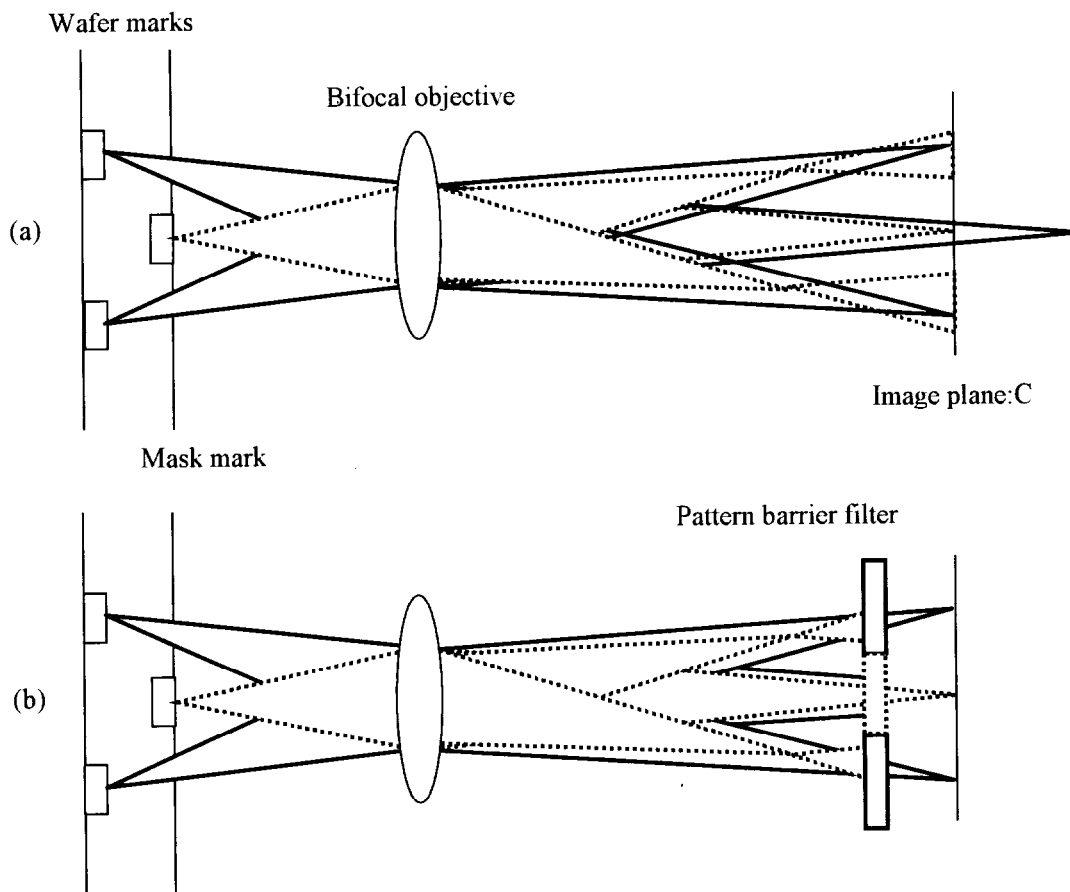


Fig. 2.2 Optical action of a pattern barrier filter to observe sharp images for both mask mark and wafer marks

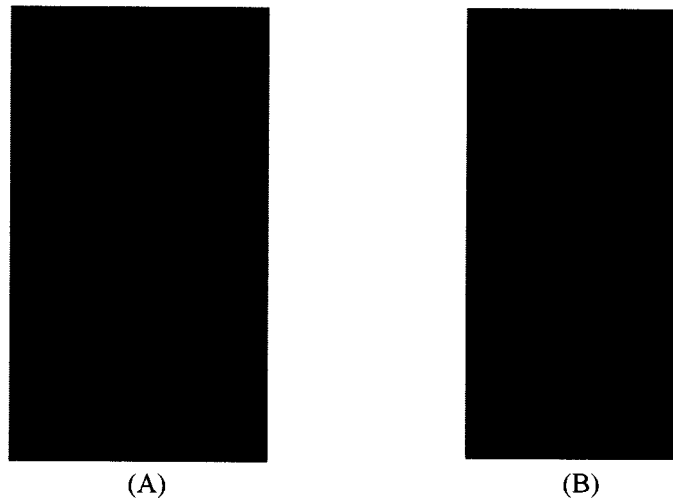


Fig. 2.3 Wafer mark images focused with different two illuminations. (A) Monochrome illumination light with $\lambda=546.07\text{nm}$ in wavelength. (A) Broadband illumination light with $546\text{nm} \leq \lambda \leq 650\text{nm}$ in wavelength.

2. 2. 3 帯域光照明

ウエハ上には、常にフォトリソグが塗布されるため、これを単色光 ($\lambda : 546.07\text{nm}$) で観察した場合、図 2. 3 (A) のように、パターン像が大きく歪められる。これは、レジスト膜中 (厚さ $1.2\mu\text{m}$) で生じた定在波による生じた干渉縞のコントラストが、パターン像に重なり、パターン像を歪めるためである。一方、同図 (B) は、帯域幅 $540\sim 650\text{nm}$ の照明光により観察したパターン像である。帯域幅の平均効果により、干渉縞のコントラストが低下することで、パターン本来の像が鮮明に観察されている。両者の比較から、レジスト膜中で生じる、干渉縞によるパターン像の歪みを低減するには、帯域光による照明が有効であることがわかった。

2. 3 光学系の設計と評価

2. 3. 1 レンズ設計

対物レンズ系では、短波長域において色収差が急激に増加する傾向があるので、マスク結像に用いる単色光は短波長域を採用し、ウエハ結像に用いる帯域光には、長波長域を採用するのが合理的であるといえる。従って、短波長域で色出しレンズの特徴を示し、長波長域では色消しレンズの特徴をもった対物レンズの設計について述べる。

図 2. 4 の実線は、一般的な顕微鏡対物レンズ (OLYMPUS, 0.4NA) において、d 線 ($\lambda_1 : 587.6\text{nm}$) の焦点 f_1 を基準としたときの、軸上色収差 ($f_2 - f_1$) の近似曲線を表わす。この曲線

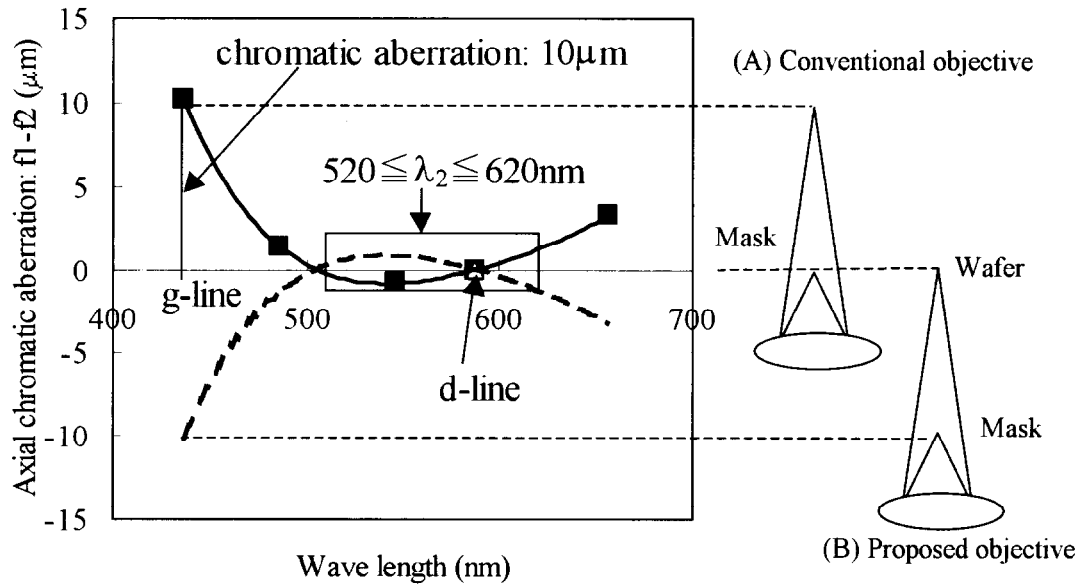


Fig.2.4 Axial chromatic aberration of objective lenses. Real line: conventional microscope objective. Dotted line: proposed microscope objective

から、d 線を含む長波長域 (λ_2 : 520~620nm) では軸上色収差が少なく、短波長域の g 線 (λ : 435.84nm) では、約 10 μm の軸上色収差を発生していることがわかる。ここで、縦軸における正の軸上色収差は、対物レンズから離れる方向を示す。この対物レンズを使って、X線マスクとウエハを観察すれば、図中の右側の対物レンズ (A) Conventional objective で示すように、g 線の単色光でウエハを観察し、長波長域の帯域光 (λ_2 : 520~620nm) でマスクを観察することになる。しかしながら、これでは、1) 2. 2. 3 節で述べた帯域光によるウエハマークの観察が実現できない、2) 本項で提案した短波長域の単色光でマスクを観察し、長波長域の帯域光でウエハを観察することも実現できない。この2つを実現するためには、図中点線で示すように、短波長光 g 線の軸上色収差が、対物レンズに近づくような状態に設計する必要がある。

次に、このような本研究で提案する軸上色収差を実現するための条件について述べる。一般に、近軸理論における軸上色収差の色消し条件は次のように表せる。

$$\left| \frac{\sum \psi_N}{\sum \psi_P} \right| / \left| \frac{\sum (v_d)_N}{\sum (v_d)_P} \right| = 1 \quad (2. 1)$$

ただし、 ψ はレンズ系を構成する各要素レンズの焦点距離の逆数で与えられる単体屈折力、 v_d

は硝材の d 線に対するアッベ数， $\Sigma\psi_p$ は正の単体屈折力の総和， $\Sigma\psi_N$ は負の単体屈折力の総和， $\Sigma(v_d)_p$ は正の単体屈折力のアッベ数の総和， $\Sigma(v_d)_N$ は負の単体屈折力のアッベ数の総和である．

この条件を満足させることによって，2つの波長の合焦点位置を近軸領域で一致させることができるが，一方で，この条件を満足している限り，本研究で提案する軸上色収差を実現することはできない．本研究で提案する軸上色収差を実現させるためには，図中点線で示すように，短波長光 g 線の軸上色収差を，対物レンズに近づけるように変更する必要がある．図中の右側の対物レンズ (B) **Proposed objective** で示すように，短波長域の g 線の単色光にてマスクを観察し，長波長域の帯域光 (λ_2 : 520~620nm) にてウェハを観察することが可能となる．そのためには，式 (2. 2) に変更することが必要となる．つまり，負レンズと正レンズの間のアッベ数の比よりも，屈折力の比の方が 1.5 倍より大きな値を採るようにレンズ全系を構成することが必要条件となる．

$$\left| \frac{\sum \psi_N}{\sum \psi_P} / \frac{\sum (v_d)_N}{\sum (v_d)_P} \right| \geq 1.5 \quad (2. 2)$$

この式 (2. 2) が，本研究で提案する軸上色収差をもった対物レンズを得るための基本的な必要条件となる．実際の光学設計においては，式 (2. 2) に加えて①使用短波長での充分な色出しレンズ性の確保，②使用長波長の全帯域での色消しレンズ性の確保，の2点が重要な課題となる．

2. 3. 2 レンズ仕様と製作

表 2. 1 は，設計・製作した2種類の対物レンズ（軸上色収差：40 μm /27 μm ）の仕様である．色収差 27 μm の対物レンズでは，色収差 40 μm の対物レンズよりも長い波長域の光を採用することにより，X 線マスクメンブレンに対する光透過率を高めた．これにより，高い像コントラストが得やすくなった．対物レンズ (2) では，3. 4. 2 節で述べるプリズム作用による像点移動量と，焦点はずれによる計測誤差を小さくするために，製造公差として像の横ずれ量 (μm) と透過波面収差の標準偏差 (3σ) を指定した．

Table 2.1 Specifications of chromatic bifocal objective lens

Optical specifications	Objective(1)	Objective(2)
Numerical aperture (NA)	0.32	0.37
Magnification	$\times 10$	$\times 10$
Monochromatic light λ_1 for mask image formation	435.8nm	546.1nm
Broadband light λ_2 for wafer image formation	546~656nm	633~750nm
Axial chromatic aberration between λ_1 and λ_2	40 μm	27 μm
Working distance	28mm	28mm
Image shift between λ_1 and λ_2 (prism effect)	None	less than 100 μm
Transmitting wave front aberration	None	$\text{RMS} \leq 0.07\lambda$

表 2. 1 の軸上色収差 (40 μm /27 μm) を発生させるためには、使用する各硝材について屈折率の実測値を使ったレンズの修正設計が必須である。表 2. 2 は硝材 KZFS5 (SHOTT 製) の屈折率の公称値と実測値を比較したものである。同表中 (1) は硝材メーカーの公称値、同表中 (2) は実測値である。 10^{-4} オーダでのわずかな屈折率の違いを無視して製作した対物レンズ (1) では、軸上色収差 $\approx 0\mu\text{m}$ であった。これに対して、同表中 (2) の実測値にて修正設計を行った対物レンズ (1) では、軸上色収差 $\approx 40\mu\text{m}$ が得られた。

Table 2.2 Refractive indices of glass:KZFS5 which is supplied from SHOTT corp.

Refractive indices of KZFS5	Wave length			
	587.56nm	656.28nm	486.13nm	435.84nm
(1) Index by SHOTT	1.65412	1.64921	1.66569	1.67508
(2) Measured index	1.65355	1.64865	1.66507	1.67440
Differences:(1)-(2)	5.7×10^{-4}	5.6×10^{-4}	6.2×10^{-4}	6.8×10^{-4}

2. 3. 3 レンズ評価

試作した 2 種類の対物レンズの色収差を測定した結果を、図 2. 5 に示す。図中プロット (□印) は軸上色収差 40 μm の対物レンズ (1) の特性を表す。マスク像を結ぶ g 線 (λ_1 : 435.8 nm) で、約 39 μm の軸上色収差を発生している。一方、ウエハ像を結ぶ帯域光 (λ_2 : 546 ~ 656 nm) では曲線がほぼフラットになり、色消しレンズ性を示している。製作した 3 個の対物レンズ (1) における軸上色収差の平均値は 38.6 μm 、ばらつきの範囲は 3.5 μm であった。

一方、(◆印) は軸上色収差 27 μm の対物レンズ (2) の特性を表わす。マスク像を結ぶ e 線 (λ_1 : 546.1nm) とウエハ像を結ぶ帯域光 (λ_2 : 633~750nm) の間で、27.3 μm (対物レンズ

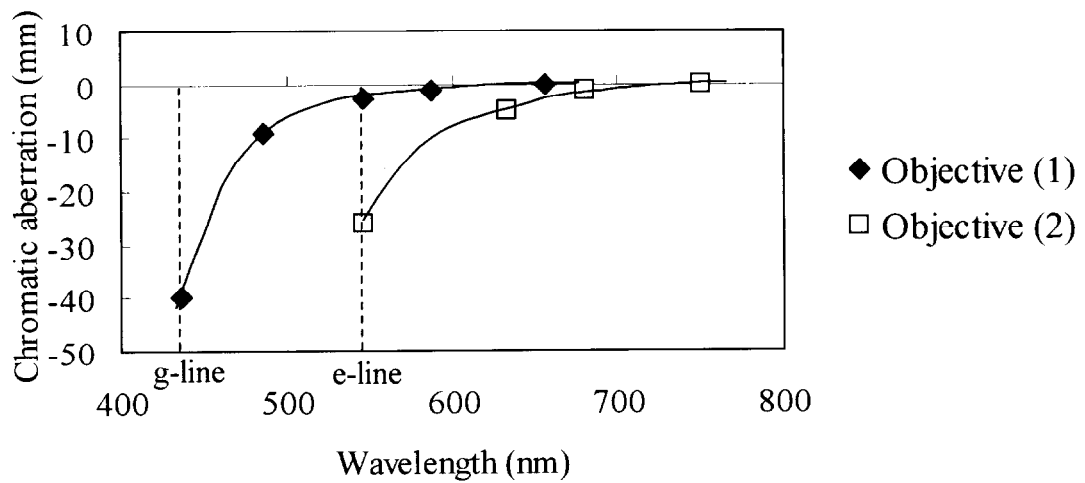
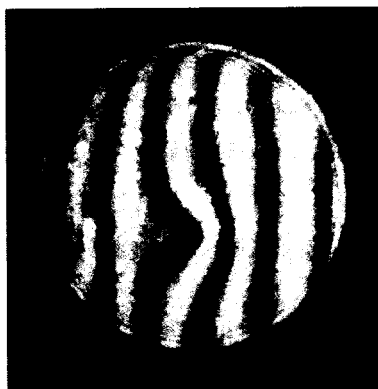


Fig. 2.5 Axial chromatic aberration curve of both objective(1) and objective(2)

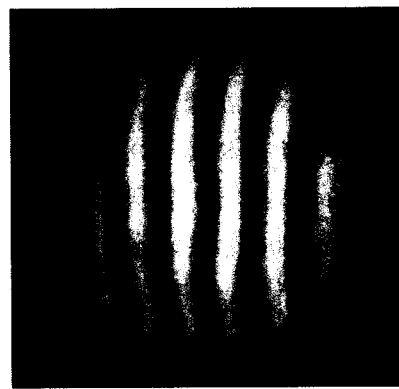
3 台の平均) の軸上色収差を発生している. また, 3 本の対物レンズにおける軸上色収差量のばらつきは $1.5\mu\text{m}$ であった.

図 2. 6 (A) は, レンズ干渉計⁴を使って, 軸上色収差が $40\mu\text{m}$ の対物レンズ (1) の透過波面収差を測定した結果である. 測定光には He-Ne レーザ (波長 λ_3 : 632.8nm) を使用した. レンズの中央付近で, 不自然な干渉縞の蛇行が見られている. これは, 像の鮮明度を低下させる原因となる. この干渉縞から求めた透過波面収差の標準偏差 RMS (root means square) は $\text{RMS} \leq 0.081\lambda_3$ である. 製作した 3 台の対物レンズ (1) では $0.064\lambda_3 \leq \text{RMS} \leq 0.097\lambda_3$ であり, これはマレシャル評価基準 ($\text{RMS} \leq 0.074\lambda_3$)^{5,6} をわずかに上回る値である.

図 2. 6 (B) は, 色収差 $27\mu\text{m}$ の対物レンズ (2) の干渉縞である. 透過波面収差の標準



(A) $\lambda=632.8\text{nm}$, $\text{RMS}=0.070\lambda$



(B) $\lambda=632.8\text{nm}$, $\text{RMS}=0.025\lambda$

Fig. 2.6 Photocopy of transmittance wave front aberration measured with He-Ne laser $\lambda=632.8\text{nm}$. (A) Microscope objective with chromatic aberration of $40\mu\text{m}$. (B) Microscope objective with a chromatic aberration of $27\mu\text{m}$.

偏差は $RMS \leq 0.035 \times \lambda_0$ である。製作した 3 台の対物レンズでは $0.025\lambda_0 \leq RMS \leq 0.051\lambda_0$ であり、これはマレシャル評価基準より小さく、その像は回折限界であるいえる。これは表 3. 1 の仕様 $RMS \leq 0.07 \times \lambda_0$ を満足している。これは、色収差 $40\mu m$ の対物レンズ (1) にくらべて、色収差 $27\mu m$ の対物レンズ (2) では像歪みが少なく、かつ鮮明度の高い像が得られることを示している。一方で、残存する波面収差はゼロでない限り、像の歪みと焦点はずれによる計測誤差の原因となる。これについては、3. 4. 2 節で述べる。

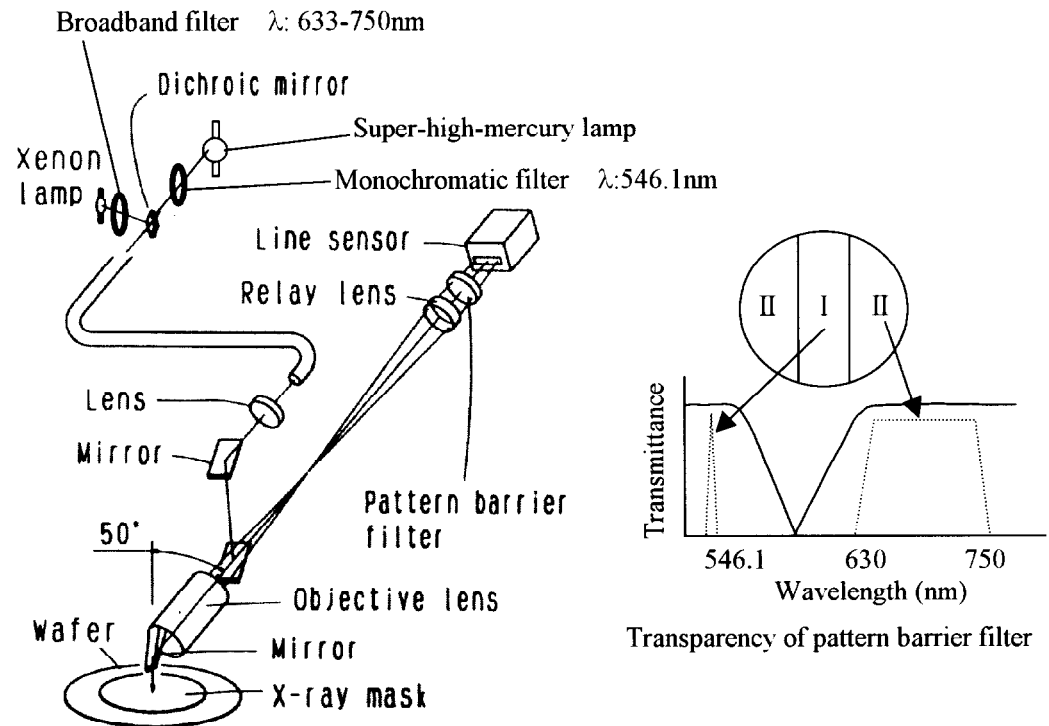
2. 3. 4 光学系の全体構成

試作した色収差 $27\mu m$ の対物レンズ (2) を使った 2 重焦点光学装置の全体構成を、図 2. 7 (A) に示す。ランプ光源には、強い輝線スペクトルを持つ超高压水銀ランプ (OSRAM 製, 100W) を短波長光源とし、キセノンランプ (HOYA 製, 75W) を長波長帯域光源とした。キセノンランプの手前には、帯域光フィルター ($\lambda_2: 633 \sim 750nm$) を置き、ウエハ照明光だけを選択した。超高压水銀ランプの手前には、単色光フィルター ($\lambda_1: 546.1nm$) を置き、マスク照明光だけ選択した。ウエハ照明光とマスク照明光は、ダイクロイックミラーにて同軸上におかれ、石英ライトガイド (長さ 2.5m) にて、2 重焦点光学装置に導いた。

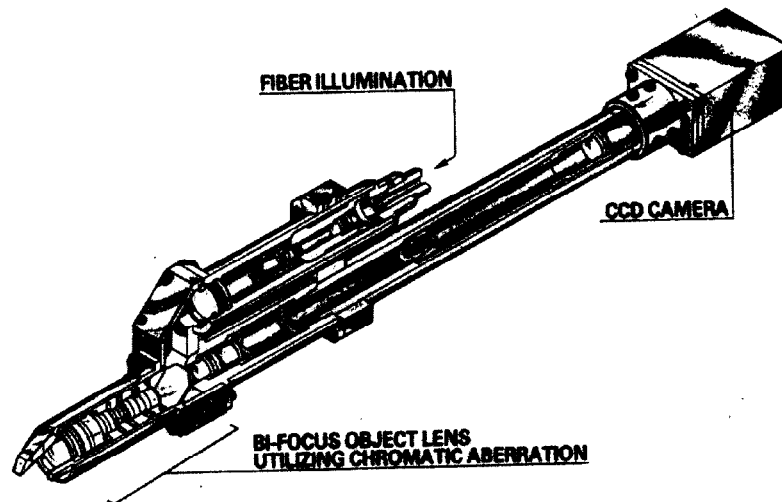
石英ライトガイドからの照明光は、対物レンズを通り、X 線マスクとウエハを照明する。対物レンズ先端の平面ミラーにより、光軸を曲げることで、光学系全体をマスクに対して 50 度傾けた。これにより、露光 X 線と干渉する部分を、先端の小さな平面ミラーだけに限定した。マスクマークとウエハマークは、2 重焦点光学装置により拡大されて、リニア CCD (charge coupled device) イメージセンサ (素子: 東芝製) 上に、100 倍の光学像を結ぶ。

パターンバリアフィルタは、2 種類のカラーガラスフィルター (I, II) を接着したもので、図 2. 7 中のグラフに示す分光透過特性を示す。フィルター I は、単色光 ($\lambda_1: 546.1nm$) だけが透過する領域であり、フィルター II は、帯域光 ($\lambda_2: 633 \sim 750nm$) だけが透過する領域である。なお、色収差 $40\mu m$ の対物レンズ (1) を用いた 2 重焦点光学装置も、図 2. 7 と同じ構成であり、それぞれのフィルターにおける分光特性は、表 2. 1 に準ずる。

同図 (B) は、次の 3 章で述べる X 線ステッパ用に製作した色収差 2 重焦点光学装置である。先端の対物レンズを含む光学系の大きさは直径 30mm × 長さ 500mm、重量は約 1kg である。



(A) Schematic diagram of chromatic bifocal alignment system for x-ray stepper



(B) Three-dimensional cross section of the achromatic bifocal alignment system mounted on a x-ray stepper.

Fig. 2.7 A chromatic bifocal alignment system designed for a x-ray stepper

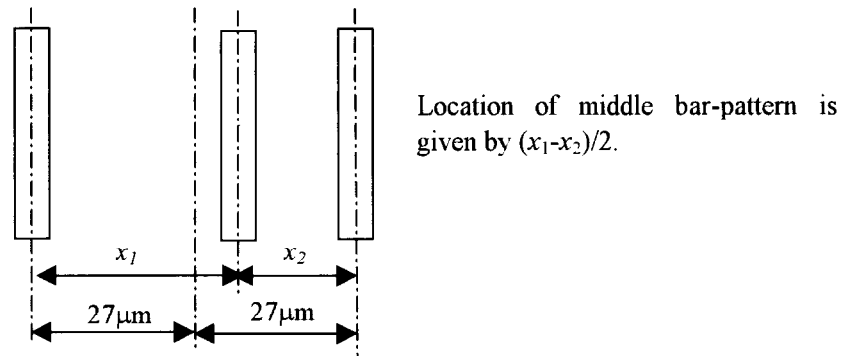


Fig. 2.8 A test pattern used for an experiment of both monochrome light and broadband light illumination.

2. 4 実験結果

2. 4. 1 帯域光照明の効果

実験に用いたウエハテストパターンを、図 2. 8 示す。実験では、 $x_1+x_2=54\mu\text{m}$ とし、 x_0 ($=(x_1-x_2)\div 2$) を 0nm から $20, 40, \dots, 200\text{nm}$ とした 11 個のウエハテストパターンを、単色光 ($\lambda_1: 546.1\text{nm}$) と帯域光 ($\lambda_2: 546\sim 656\text{nm}$) の両方で検出した。これらウエハテストパターンは、光ステッパにより、ウエハ上に露光して製作した。このウエハテストパターンの露光に用いたレティクルを、光干渉座標測定装置 (Nikon 3I) にて測定した結果、レティクルテストパターン上での x_0 の誤差は、 4nm 以下 (ウエハ面上で換算) であった。ウエハテストパターン上には、フォトリソ (SHIPLY FAR EAST 製) を厚さ $1.2\mu\text{m}$ だけ塗布した。測定には、色収差 $40\mu\text{m}$ の 2 重焦点対物レンズを用いた。

測定結果を、図 2. 9 に示す。横軸は Nikon 3I で測定したレティクルテストパターンの位置 x_0 (nm , ウエハ面上で換算), 縦軸は色収差 2 重焦点光学装置による測定値 (nm) である。図中のプロット (□印) は単色光 ($\lambda_1: 546\text{nm}$) による測定値, プロット (●印) は帯域光 ($\lambda_2: 546\sim 656\text{nm}$) による測定値である。各プロットは測定値 8 回の平均値を示す。単色光では、ウエハテストパターン $x_{x0}=120\text{nm}$ において、2. 2. 3 節で述べたパターン像歪みによる誤差 76.5nm を生じている。一方、帯域光では、マーク像歪みによる誤差はほとんど生じておらず、ウエハテストパターン $x_0=60\text{nm}$ で誤差 7.8nm を生じているにすぎない。この実験結果から、2. 2. 3 節で述べた干渉縞による計測誤差は、長波長域が $546\sim 656\text{nm}$ の帯域光を使うことによって、ほとんど無視できる程度まで低減できることがわかった。

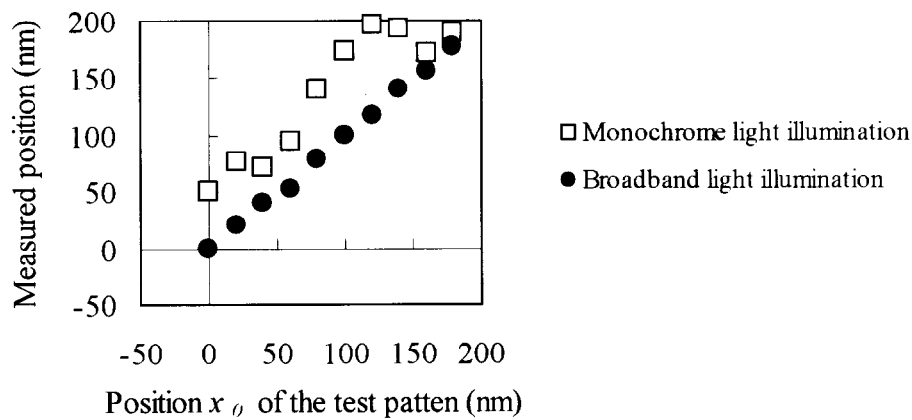


Fig. 2.9 Comparison of measurement error between a monochrome light and broadband light

2. 4. 2 検出再現性と直線性

実験における分解能と直線性の測定方法を、図 2. 10 に示す。X 線マスクには、2 インチウエハ基板を用いた。マスクの中央部は、厚さ $1\mu\text{m}$ の SiN_x メンブレン上に Ta 吸収体パターンが形成されたものである。ウエハ上には、厚さ $0.9\mu\text{m}$ のフォトリソグ（SHIPLY FAR EAST 製）を全面に塗布した。X 線マスクとウエハ間のギャップは、対物レンズの色収差 $27\mu\text{m}$ に等しくなるよう設定した。マスクステージは、機械的駆動部をもたない 1 軸の弾性ヒンジ機構で構成した。X 線マスクの駆動には、圧電アクチュエータを使用し、その変位は静電容量センサにて測定した。一方、ウエハは駆動部をもたない真空チャックに固定した。

マスクとウエハの位置検出には、2. 3. 4 節で述べた X 線ステッパ用の色収差 2 重焦点光学装置（図 2. 12 には、対物レンズのみを図示）を用いた。この光学系に取り付けた、リニア CCD イメージセンサからのビデオ信号を、図 2. 11 に示す。マスクマークとウエハマークともに 300mV 以上の波高値と、高い信号コントラストが得られた。

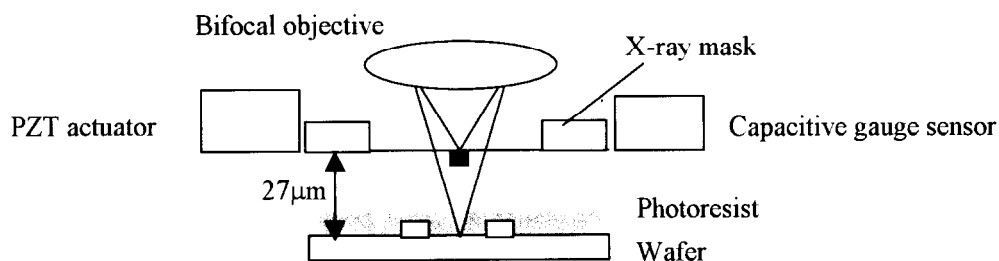


Fig.2.10 Experimental setup for mask-to-wafer alignment measurement

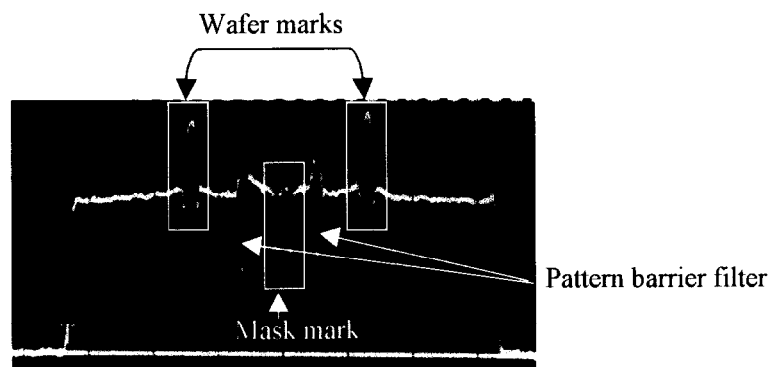


Fig. 2.11 Video signal from one dimensional CCD image sensor

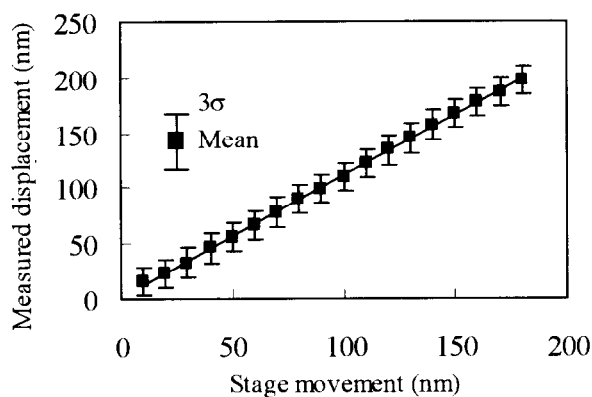


Fig. 2.12 Measurement result by using the chromatic bifocal alignment optics

図2. 1 2は、10nm のピッチで x 方向に移動するマスクの位置を、色収差2重焦点光学装置で測定した結果を示す。横軸は X 線マスクの移動量 (nm) , 縦軸は色収差2重焦点光学装置による測定値 (nm) を示す。プロット (■印) は測定値 45 回の平均値, エラーバ (I 印) は標準偏差 ($\pm 3\sigma$) を表す。これから 10nm のピッチで移動するマスクの位置を、ばらつき 13nm (3σ) 以下の検出再現性と、3 %以下の直線性で測定することができた。

2. 4. 3 焦点はずれによる誤差

焦点はずれによる誤差を、図2. 1 3に示す。横軸は、対物レンズの焦点はずれ： $\pm 3\mu\text{m}$, 縦軸は誤差 (μm) である。実験では、対物レンズを含む光学系を、マスクとウエハに対して垂直方向に移動させた。同図 (A) は軸上色収差 $40\mu\text{m}$ の対物レンズ, (B) は軸上色収差 $27\mu\text{m}$ の対物レンズの測定結果である。プロット ($\triangle$ 印, $\circ$ 印, ■印) は、製作した3台の対

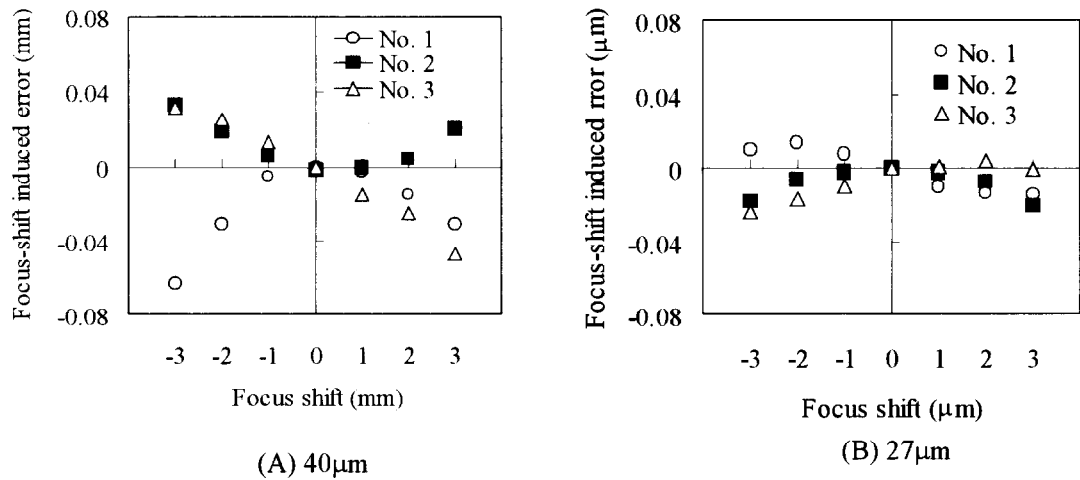


Fig. 2.13 Measurement error induced by focus shift of bifocal objective lenses.

物レンズを示す．この２種類の対物レンズにおいて，焦点はずれ $\pm 3\mu\text{m}$ により生じる誤差の範囲 R を比較すると，色収差 $40\mu\text{m}$ でもっとも大きな誤差を生じた対物レンズ No.3 では $R=0.095\mu\text{m}$ ($-0.063\sim 0.032\mu\text{m}$)，色収差 $27\mu\text{m}$ でもっとも大きな誤差を生じた対物レンズ No.1 では $R=0.038\mu\text{m}$ ($-0.024\sim 0.014\mu\text{m}$)であった．両者を比較すると，色収差 $40\mu\text{m}$ では色収差 $27\mu\text{m}$ に比べて２倍以上の誤差が生じている．これは 2. 3. 3 節で述べた対物レンズの波面収差に起因している．つまり，色収差 $40\mu\text{m}$ の波面収差が，色収差 $27\mu\text{m}$ に比べて約 2 倍の低下を示していることが原因である．この波面収差と焦点はずれによる誤差の関係については，3. 4. 2 節で明らかにする．

2. 5 結言

対物レンズを移動することなく，X 線マスクとウエハの鮮明な像を同時に観察することができる色収差 2 重焦点法を提案し，単純な 1 軸アライメント装置ならびに X 線マスクとウエハを使った実験により，以下の成果を得た．

- 1) (1) 機械的な駆動機構によらず，(2) 像歪みのない，鮮明な X 線マスクとウエハの像を，同時に観察できることを特徴とする色収差 2 重焦点法を提案した．
- 2) 長波長域の帯域光でウエハを照明することが，フォトリソによるマーク像歪み誤差の低減に有効であり，精度向上の上で必要であることを示した．
- 3) 上記 2) を達成するための，色収差 2 重焦点レンズの設計指針を示した．
- 4) 上記 2) を達成するために，屈折率の実測値を使ったレンズの修正設計が必要であることを示した．

- 5) 上記3)と4)の指針に沿って、2種類の対物レンズを設計・試作した。
- 6) 試作した対物レンズを使って、ウエハテストパターンを測定し、長波長の帯域光で照明することにより、マーク像歪み誤差 10nm 以下を実現した。
- 7) 単純な1軸アライメント装置により、検出再現性 13nm (3 σ) と直線性 3%を得た。ただし、焦点はずれにより誤差が生じた。

次章では、本章の色収差2重焦点法を、X線リソグラフィに応用し、X線露光による半導体デバイスの試作に応用した結果について述べる。

参考文献

-
1. R. Emmett Hughlett and Keith A. Cooper: A Video Based Alignment System for X-ray Lithography. Proc. SPIE Vol. 1465.(1991)100-108.
 2. M. Taniguchi, R. Funatsu, A. Inagaki, K. Okamoto, Y. Kenbo, Y. Kato, and I. Ochiai: X-ray exposure system with plasma source for microlithograpy. Proc. SPIE Vol. 1089.(1989)240-251.
 3. 早水良定：光機器の光学I，社団法人日本オプトメカトロニクス協会，p64-86.
 4. 小瀬輝次ほか：光工学ハンドブック，朝倉書店，p383.
 5. 岸川利郎著：光学入門，オプトロニクス社，p198.
 6. 鶴田国夫著：応用光学I，培風館，p223，1990.

第3章 色収差2重焦点法のX線リソグラフィへの応用

3. 1 緒言

本章では、第2章で述べた色収差2重焦点法をX線リソグラフィに応用し、X線露光によるアライメント精度の評価とアライメント精度の改善方法、ならびに光学モデルを使ったアライメント誤差の解析について述べる。

従来、光学顕微鏡を応用したアライメント計測は、X線露光におけるさまざまな半導体デバイスの試作に使用されてきた。光学顕微鏡対物レンズを傾けて、 $15\mu\text{m}$ 離れたマスクとウエハを斜方から同時に観察する方法では、プロセスウエハに対するアライメント誤差のばらつきとして、 $0.15\mu\text{m}$ (3σ) が報告されている¹。また、対物レンズを移動させてマスクとウエハを別々に検出する方法では、512KbitSRAM (Static Random Access Memory) 試作におけるアライメント誤差のばらつきとして、 $0.23\mu\text{m}$ (3σ) が報告されている²。

しかし、これらの精度は、本研究が目標とするX線リソグラフィへの適用には不十分である。そこで、本章では、色収差2重焦点法により試作したアライメント計測装置をX線ステッパに搭載し、レジストパターンのX線2重露光により、色収差2重焦点法のアライメント精度を明らかにする。さらに、X線露光による半導体デバイスの試作を実施し、プロセスウエハにおけるアライメント精度を評価する。さらにアライメント精度の改善方法を示し、X線露光により評価する。

アライメント誤差の要因となる、光学レンズの収差³やマーク断面の非対称性^{4, 5}の解析も報告されているが、解析手法に統一性がなく、精度的に不十分である。そこで、本章では、レンズ収差とマーク断面形状の非対称性とアライメント誤差について詳細なモデルを構築し、誤差を解析する。最後に色収差2重焦点法に残される課題についてまとめる。

X線露光では、住友重機械工業(株)田無製造所内に設置された、超伝導シンクロトロン放射光蓄積リング“AURORA”^{6, 7}とX線ステッパ“SATELLITE600”⁸を使用した。

3. 2 色収差2重焦点法のアライメント精度

3. 2. 1 X線リソグラフィシステム

図3. 1は、X線リソグラフィシステムを全体構成を示す。X線源は、単体の超伝導マグネットからなる電子蓄積リングを使用し、X線を含むシンクロトロン放射光 (Synchrotron radiation) は、その円形軌道の接線方向に放出される。蓄積される電子のエネルギーは650MeV、平均的な蓄積電流は300~400mAである。

蓄積リングから放出されたSR光は、 $10^{-8}\sim 10^{-9}\text{Torr}$ の超高真空が保たれた長さ5.5mのビームラインに入り、途中1.5mの位置にある平面ミラーに1.2度の浅い角度で入射する。入射し

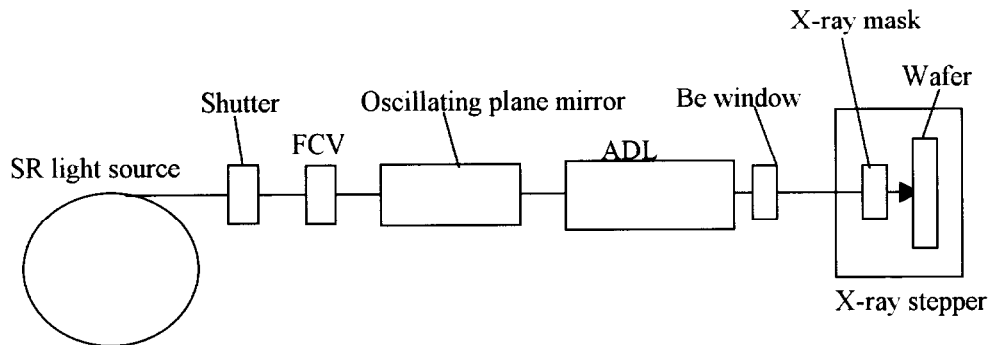


Fig. 3.1 A synchrotron radiation lithography system

た SR 光は、0.5～1Hz で振動する平面ミラーによって上下方向に振られ、ウエハ上で 25mm^2 の領域を照射する。ビームライン終端にあるベリリウム膜（厚さ $25\mu\text{m}$ ）を透過した SR 光は、縦形 X 線ステッパのヘリウムチャンバを通して X 線マスクに到達する。

X 線マスクを透過した SR 光は、 $40\sim 20\mu\text{m}$ のわずかな大気を通りウエハ上に到達する。ウエハ上での SR 光の露光強度は、300mA 蓄積時に約 $15\text{mJ}/\text{cm}^2$ である。ビームラインには、ベリリウム膜の破損から蓄積リングを守るために、アコースティックディレイライン(acoustic delay line, ADL)とファーストクロージングバルブ (fast closing valve, FCV) が取り付けられている。ビームライン上流には露光シャッタがあり、縦形 X 線ステッパにより、その開閉が制御される。

3. 2. 2 X 線ステッパ

図 3. 2 に、試作した縦形 X 線ステッパの構成を示す。水平方向に放射される SR 光を利用する X 線ステッパの特徴は、縦形のマスクステージと縦形のウエハステージを使用することである。マスクステージは 6 自由度をもち (X, Y, Z) 方向と (θ_x , θ_y , θ_z) 軸回りの駆動が可能である。一方、ウエハステージの位置決めを行なう縦形ウエハステージは、3 自由度を持つ粗動ステージと、6 自由度をもつ微動ステージの 2 つのステージから構成されている。この粗動ステージは、その全体重量とほぼ同じ定荷重をもつ定張力バネによって、重力方向の補償がされている。微動ステージの駆動には、すべて圧電アクチュエータが使用され、その変位はレーザ干渉計 (HP 製: HP5510A) と静電容量センサ (ADE 社製: マイクロセンス 3401) により計測される。縦形ウエハステージの手前にはハンドリングロボットが搭載されており、6 インチウエハが自動的に搬入／搬出される。

この X 線ステッパには、第 2 章で述べた色収差 2 重焦点光学装置 3 台 (X, Y1, Y2) と、光学顕微鏡 1 台を搭載した。光学顕微鏡は、X 線マスクとウエハの粗い位置検出 (以下、コースアライメントと呼ぶ) に用いる。色収差 2 重焦点光学装置は、X 線マスクとウエハの正

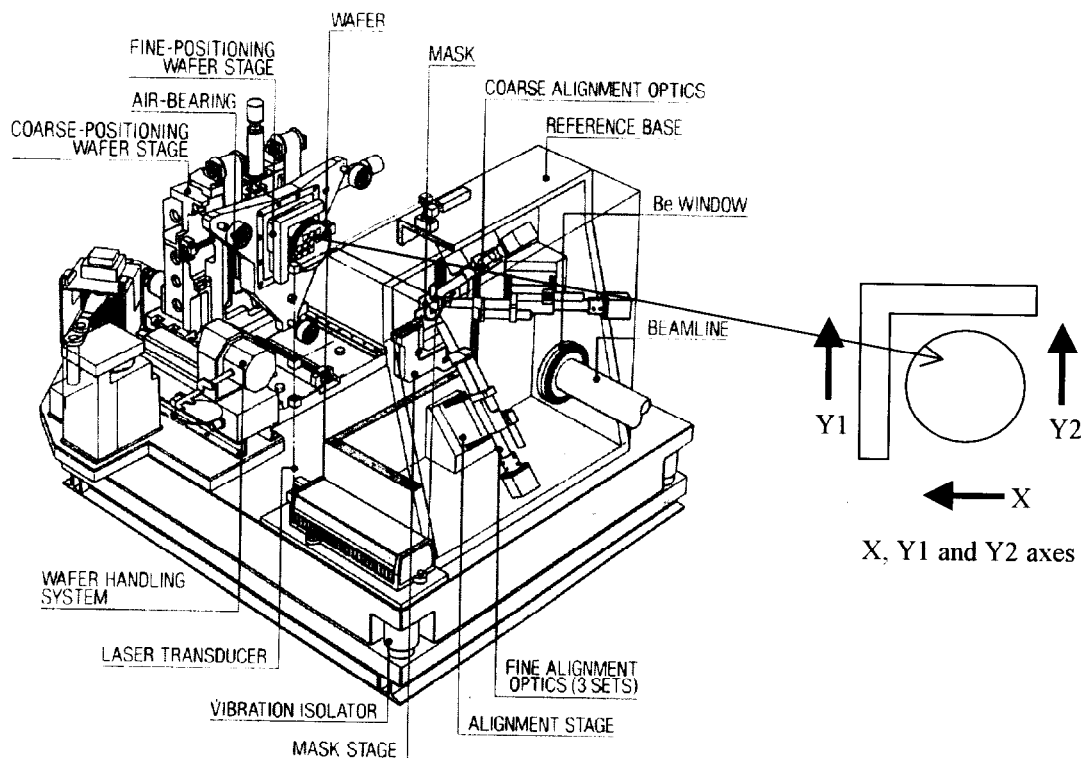


Fig. 3.2 Configuration of x-ray stepper.

確な位置検出（以下、ファインアライメントと呼ぶ）に用いる。色収差 2 重焦点光学装置による位置検出値は、ウエハステージ制御系にフィードバックされ、その値が常に零になるようにウエハステージが制御される。

アライメントフィードバック時の制御誤差を、図 3. 3 に示す。横軸は時間（秒），縦軸は各軸 X, Y1, Y2 に配置されたアライメント装置の計測値（nm）を表わす。アライメントフィードバック制御系のサンプリング周期は、約 200msec である（付録一信号処理参照）。ウエハ微動ステージに、x 方向の初期誤差約 900nm を与えたとき、x 方向に約 150nm 程度の

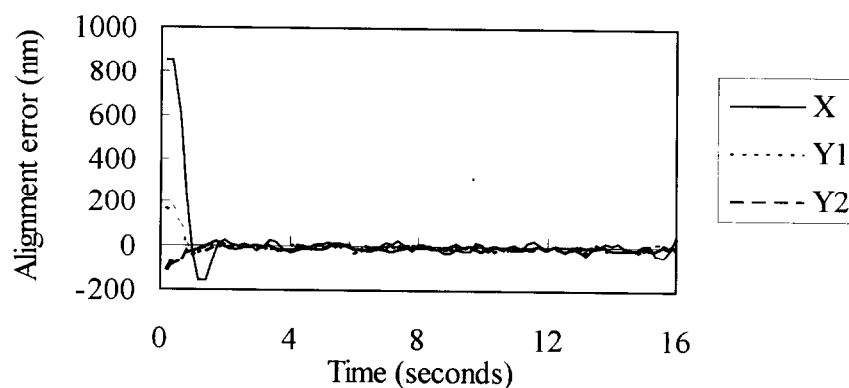


Fig. 3.3 Alignment feedback response of three channel X, Y1 and Y2

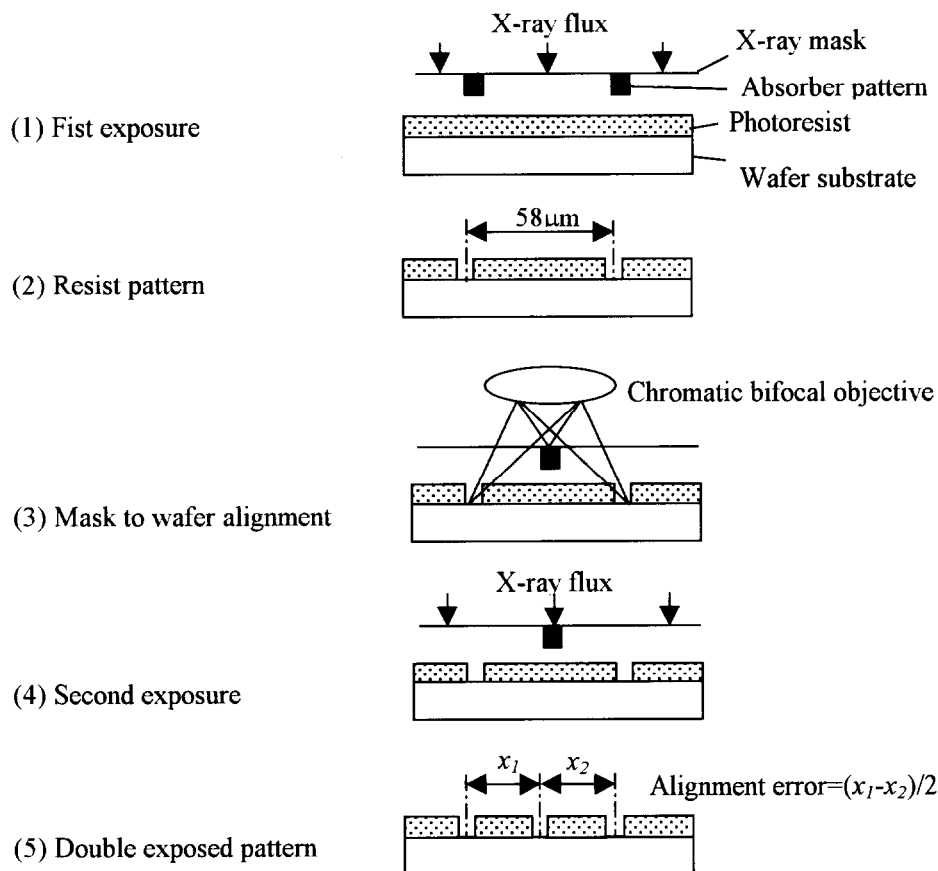


Fig. 3.4 Processing steps of a double exposure test for overlay measurement

オーバーシュートをし、約 2 秒で整定している。整定後の微動ステージの制御精度は約 40nm であり、色収差 2 重焦点法による計測精度 13nm (3 σ) に比べると低く、さらなる改善が望まれる。

3. 2. 3 アライメント精度の評価方法

アライメント精度は、レジストパターンによる X 線 2 重露光により評価した。X 線 2 重露光による評価では、1 枚のマスクを一方方向にずらして 2 回露光することにより、アライメント精度におけるマスクパターンの位置歪をほぼ零とすることが出来る。従って X 線 2 重露光におけるアライメント誤差要因は、1) アライメント計測誤差、2) ウエハステージの位置誤差の 2 種類となる。

レジストパターンによる X 線 2 重露光を図 3. 4 に示す。(1) 1 回目の X 線露光を実施する (2) 現像によりレジストパターン (パターン間隔 58 μ m) をウエハに形成する (3) マスクを一方方向にずらせることによりマスクマークとレジストパターンを重ね合わせて、これ

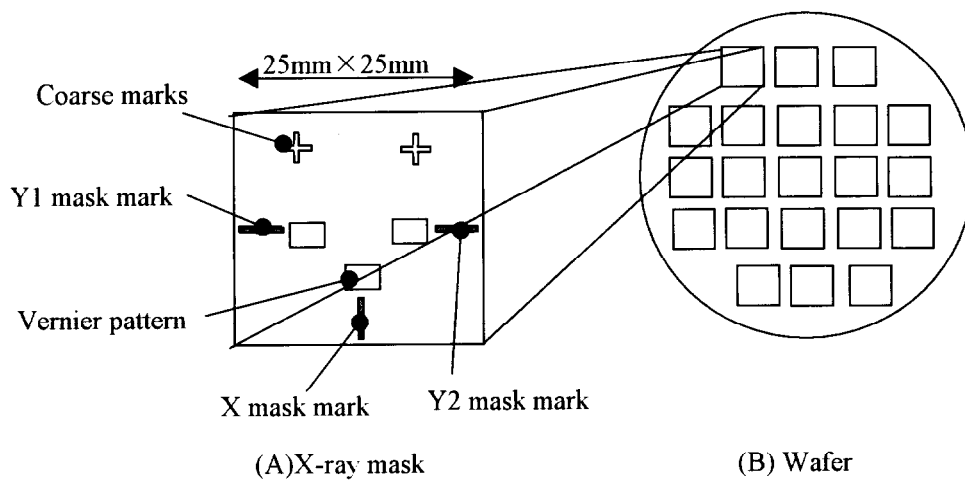


Fig. 3.5 (A) Arrangement of fine alignment marks on a x-ray mask window. (B) Field of twenty on a 6-inch wafer..

を色収差 2 重焦点光学装置により計測する (4) マスクとウエハのアライメント計測値がほぼ零になったあと 2 回目の X 線露光を実施する (5) 現像によりウエハに形成された 3 本のレジストパターン間の距離からアライメント誤差: $\Delta x = (x_1 - x_2)/2$ を測定する。

アライメント精度 ($|\text{Mean}| + 3\sigma$) は, アライメント誤差 Δx の平均値 ($|\text{Mean}|$) と標準偏差 (3σ) により統計的に評価する。

3. 2. 4 アライメント精度

ここでは, 第 2 章で述べた 2 種類の色収差 2 重焦点光学装置 (軸上色収差 $27\mu\text{m}/40\mu\text{m}$) のアライメント精度を比較する。図 3. 5 (A) は, X 線マスクにおけるマスクマークの配置を示す。X 線が透過する領域 $25\text{mm} \times 25\text{mm}$ の周辺 3 ケ所には, X マスクマーク, Y1 マスクマーク, Y2 マスクマークを設けた。マスクマークの大きさは, 幅 $4\mu\text{m}$ × 長さ $100\mu\text{m}$ の棒状パターンの Ta 吸収体である。一方, ウエハマークは, 幅 $4\mu\text{m}$ × 長さ $100\mu\text{m}$ の棒状パターンが間隔 $58\mu\text{m}$ で 2 本並んだものを使用した。各軸マスクマークの近傍には, アライメント誤差 Δx を測定するためにバーニアパターンを配置した。また, 露光領域の上辺には, コースアライメントマークを設けた。X 線露光により X 線マスクパターンを, 図 3. 5 (B) に示す 6 インチウエハ上の 21 個所に転写した。

軸上色収差 $40\mu\text{m}$ の 2 重焦点装置によるアライメント誤差のヒストグラムを, 図 3. 6 に示す。露光に用いた X 線マスクの SiNx メンブレン厚さは $1\mu\text{m}$ である。露光には, ポジ型レジスト (ダイキン工業 (株), FBM-120) を塗布したウエハを使用した。同図は, 4 枚の 6 インチウエハ上に露光された 84 個のバーニアパターンを測定した結果である。アライメント精度として $145\text{nm} \sim 222\text{nm}$ ($|\text{Mean}| + 3\sigma$) を得た。

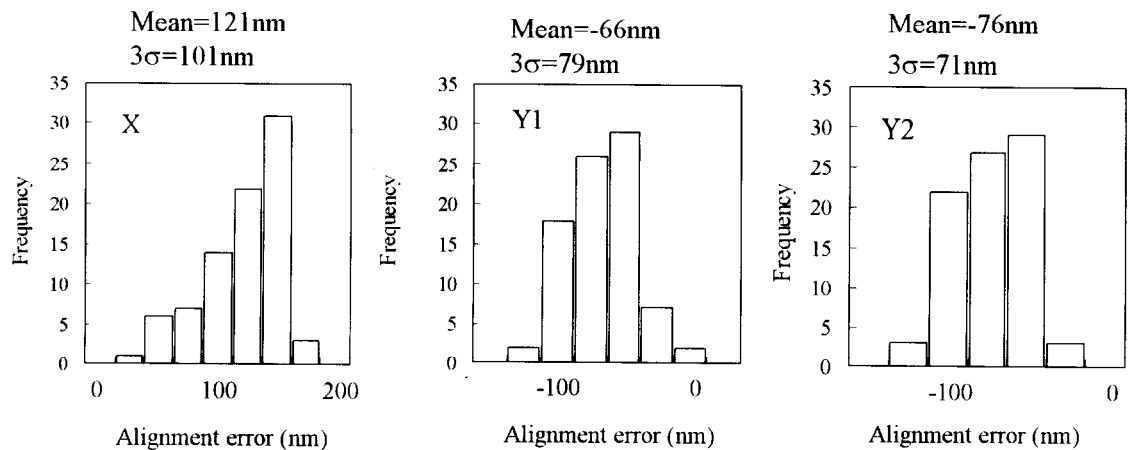


Fig. 3.6 Alignment accuracy of 40μm-chromatic bifocal objective

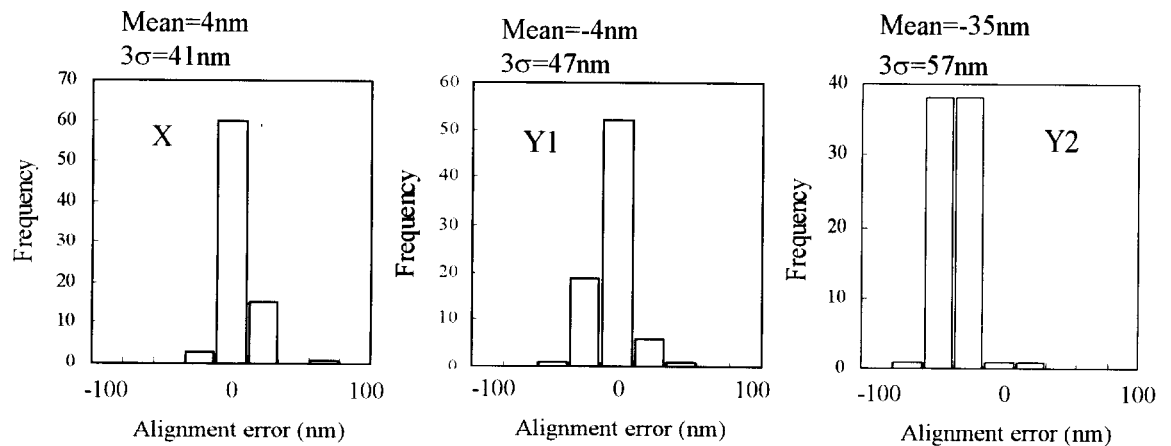


Fig. 3.7 Alignment errors using 27μm-chromatic bifocal objectives

一方、軸上色収差 27μm の 2 重焦点装置によるアライメント誤差のヒストグラムを、図 3. 7 に示す。露光に用いた X 線マスクの SiNx メンブレン厚さは、2μm である。露光には、ネガ型レジスト (SHIPLY FAR EAST 製, SAL601) を塗布したウエハを使用した。同図は 4 枚の 6 インチウエハ上に露光された 84 個のバーニアパターンを測定した結果である。アライメント精度として 44nm~92nm ($|\text{Mean}|+3\sigma$) を得た。図 3. 6 と図 3. 7 を比較すると、色収差 27μm の 2 重焦点装置によるアライメント精度は、色収差 40μm のアライメント精度の約 1/2 に改善できることがわかった。次にその理由を述べる。

上述した 2 種類の色収差 2 重焦点装置によるアライメント精度の評価には、3. 2. 2 節で述べた同一の X 線ステップバを使用している。したがって、2 種類の色収差 2 重焦点装置におけるアライメント誤差のばらつきの優劣は、明らかに対物レンズに起因しているといえる。色収差 40μm と 27μm の対物レンズを比較すると、2. 3. 3 項で述べたとおり、透過波面収

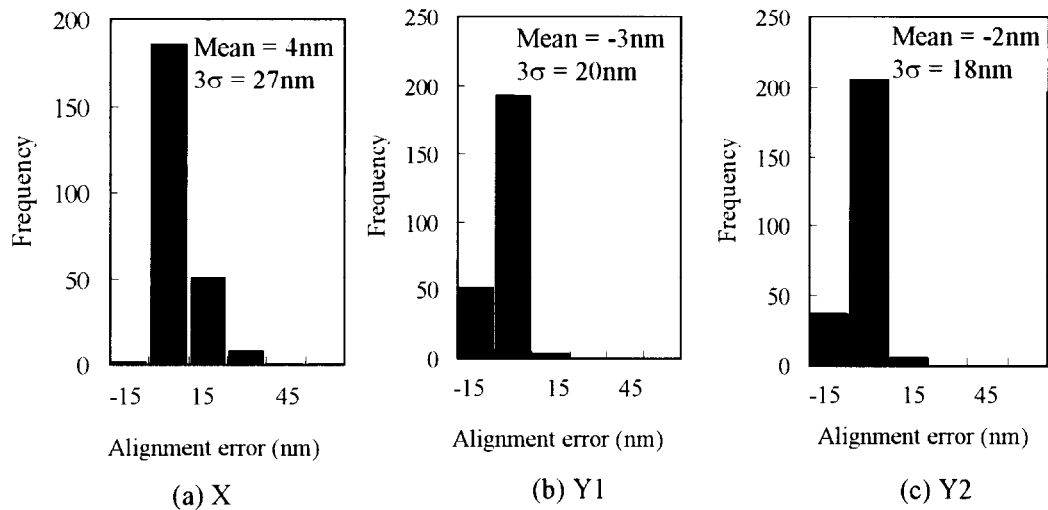


Fig.3.8 Improvement of alignment accuracy by using gap calibration method

差に約2倍の差が生じている。さらに2. 4. 3項では、透過波面収差の大きい色収差 $40\mu\text{m}$ の対物レンズの焦点はずれによる計測誤差が、色収差 $27\mu\text{m}$ の対物レンズに比べて約2倍となることを示した。これらの結果から、色収差 $40\mu\text{m}$ の2重焦点装置のアライメント精度が、色収差 $27\mu\text{m}$ の2重焦点装置に比べて約2倍になった理由として、焦点はずれによる誤差が影響していることが予想される。次の3. 2. 5項では、この焦点はずれを小さくする方法とその効果を述べる。

3. 2. 5 ギャップ補正方式による精度改善

ウエハが対物レンズの焦点位置からずれてしまう要因としては、1) ウエハステージの走り誤差、2) ウエハの個々の平面度が考えられる。前者は機械系の固有誤差、後者は各ウエハの固有誤差と考えられる。従って、露光前にこの二つの固有誤差を精密に測定し、補正すればアライメント計測誤差を小さくすることが可能である。その手順は、1) 露光前にマスクステージ上に設けられた静電容量センサ (ADE 社, マイクロセンス) にてウエハまでの露光ギャップ g を露光ショット毎に計測し、2) 露光中、マスクとウエハ間の露光ギャップが一定 ($27\mu\text{m}$) となるように、この露光ギャップの変化量 $\Delta g (=g - 27\mu\text{m})$ をウエハステージの位置目標値の補正值として、露光ショット毎にウエハステージのギャップ方向の位置を補正した。

以上の方法は、マスクとウエハ間の露光ギャップを計測・補正する方式であることから、これをギャップ補正方式と呼ぶ。この方式を使ってレジストパターンによる X 線2重露光を行い、計測したアライメント誤差のヒストグラムを図3. 8に示す。13 枚のウエハ (合計

249 ショット)におけるギャップ補正量の範囲は $5.03\mu\text{m}$, 所要時間はウエハ 1 枚あたり約 5 分であった. このギャップ補正方式により, アライメント誤差のばらつきとして 22nm ($3\sigma_x$, $3\sigma_{y1}$, $3\sigma_{y2}$ の平均値) が得られた. ギャップ補正方式を用いない 2 重露光におけるアライメント誤差のばらつき 48nm ($3\sigma_x$, $3\sigma_{y1}$, $3\sigma_{y2}$ の平均値) からギャップ補正方式による誤差の低減効果は 26nm ($=48-22$) と見積もれる.

図 3. 8 のアライメント精度 $X: 31\text{nm}$ ($|\text{Mean}|+3\sigma$), $Y1: 23\text{nm}$ ($|\text{Mean}|+3\sigma$), $Y2: 20\text{nm}$ ($|\text{Mean}|+3\sigma$) から, 色収差 2 重焦点法により, 本研究が目標としているアライメント精度 30nm ($|\text{Mean}|+3\sigma$) をほぼ達成できることが明らかとなった.

しかしながら, この露光方法では, 3. 3. 1 項で後述するように, 色収差 2 重焦点装置の一部が X 線を遮るという実用上の問題点を残した. 解決方法は 3. 3. 1 項で述べる.

3. 3 半導体デバイス試作におけるアライメント精度

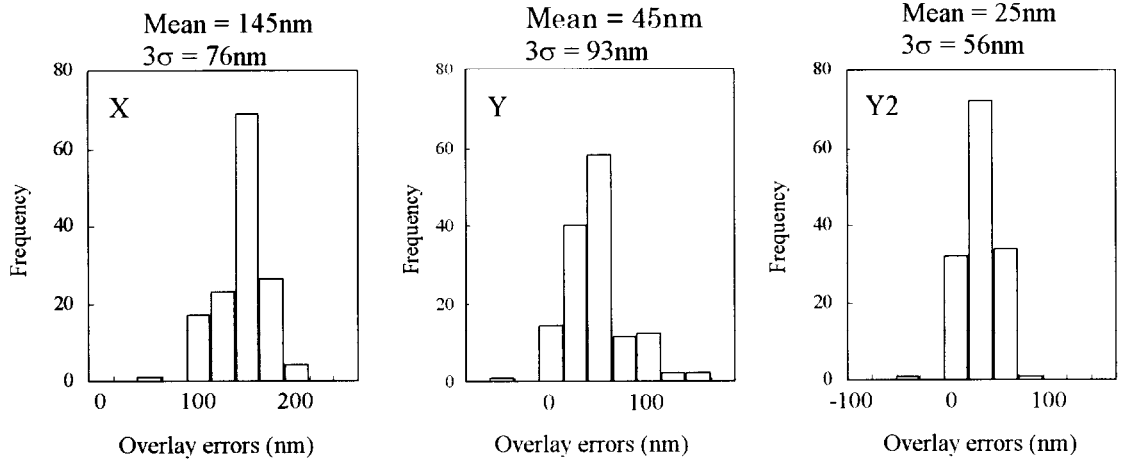
3. 3. 1 NMOSFET 試作

試作した n-channel metal-oxide-semiconductor field-effect transistors (NMOSFETs) の 3 種類のプロセスウエハにおけるアライメント誤差のヒストグラムを図 3. 9 に示す. 同図は, 各プロセスウエハで露光した 9 枚のウエハから得られた 144 個のアライメント誤差の測定結果である. アライメント誤差は, 露光したウエハ上に形成されたバーニアパターンを光学顕微鏡を使って測定した. X 線マスクは, 厚さ $1\mu\text{m}$ の SiN_x メンブレン上に, 厚さ $0.75\mu\text{m}$ の Ta 吸収体パターンが形成されているものを使用した. アライメント計測には, 色収差 $27\mu\text{m}$ の 2 重焦点装置を使用した.

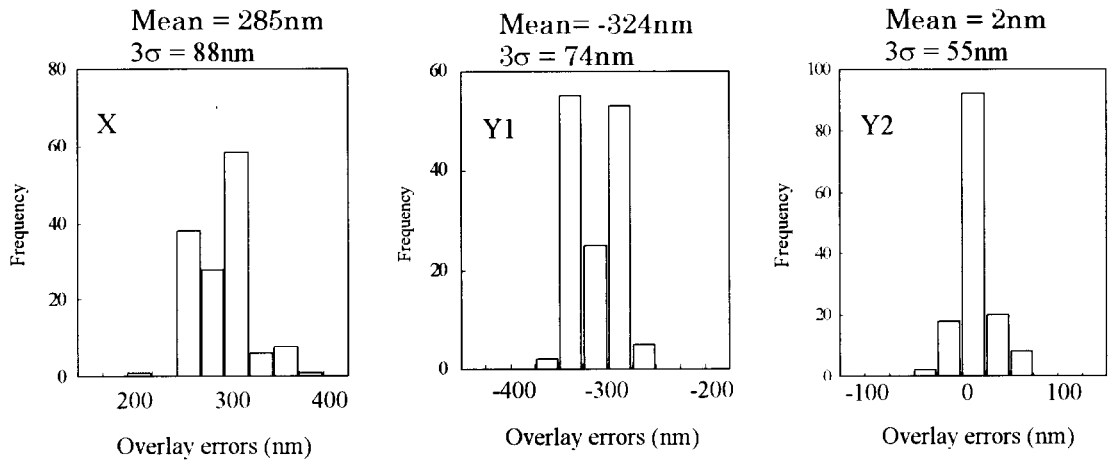
図 3. 9 から 3 種類のプロセスウエハのアライメント精度として $81\text{nm} \sim 407\text{nm}$ ($|\text{Mean}|+3\sigma$) を得た. 2 種類のプロセス Contact/Gate の X と Y1, ならびに Wiring/Gate の X では, 200nm を超える誤差 (平均値 $|\text{Mean}|$ のずれ) を生じた. これは, X 線マスク上で, アライメント精度測定用バーニアパターンと NMOSFETs パターンの間で生じた位置ずれが原因であり, 色収差 2 重焦点装置に起因した誤差ではない.

同図におけるアライメント誤差のばらつき (3σ) としては, Wiring/Gate の X 軸を除くプロセスレベルで, $56\text{nm} \sim 95\text{nm}$ (3σ) が得られた. 一方, Wiring/Gate の X 軸では 193nm (3σ) まで低下した. この低下は, X, Y1, Y2 とともに, 同時に同じ Al-Si 膜がスパッタされていることから, ウエハマークの表面荒さが原因とは考えにくい. これは, ウエハマークが対物レンズの焦点からずれることが原因だと思われる.

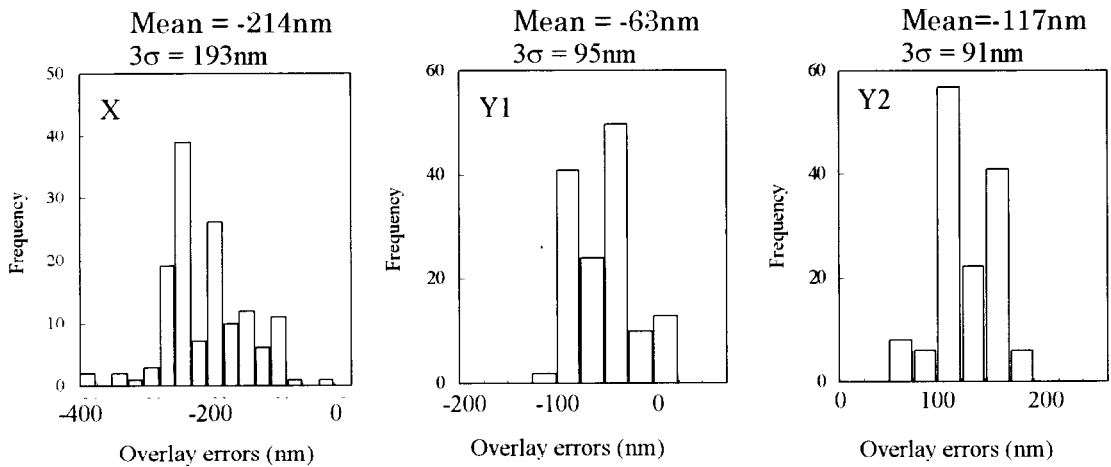
NMOSFET の全プロセスを完了した 6 インチウエハの写真を, 図 3. 10 に示す. 四角い露光領域の周辺 3 ケ所には, 小さな矩形パターンが露光されている. これは, 同図 (B) に示すように色収差 2 重焦点光学装置の先端にある平面ミラーの一部が, X 線と干渉すること



(A) Gate/Locos



(B) Contact/Gate



(C) Wiring/Gate

Fig. 3.9 Overlay errors of individual alignment levels in NMOSFETs fabrication.

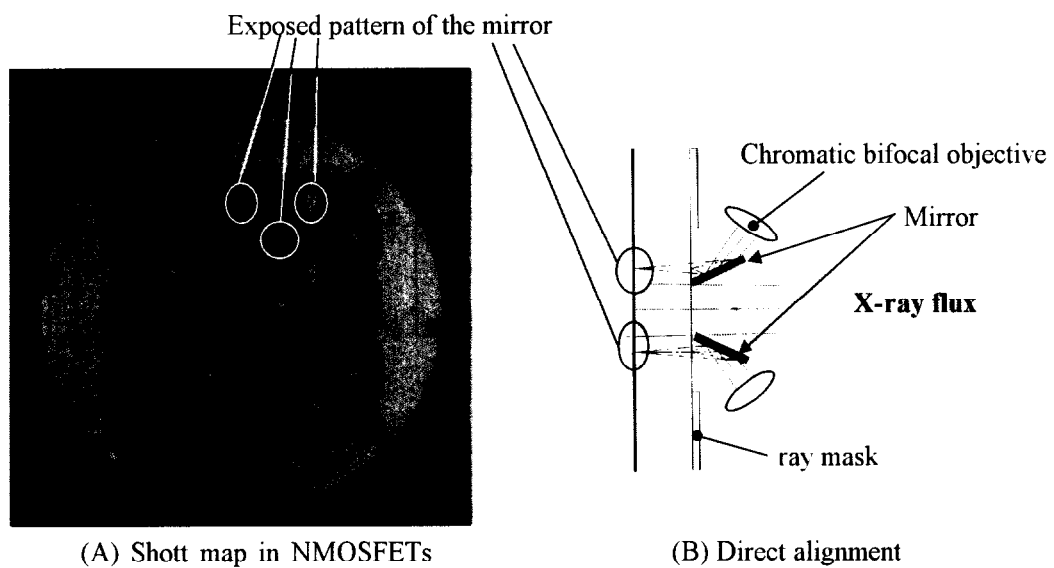


Fig. 3.10 Exposed patterns on wafer when using direct alignment



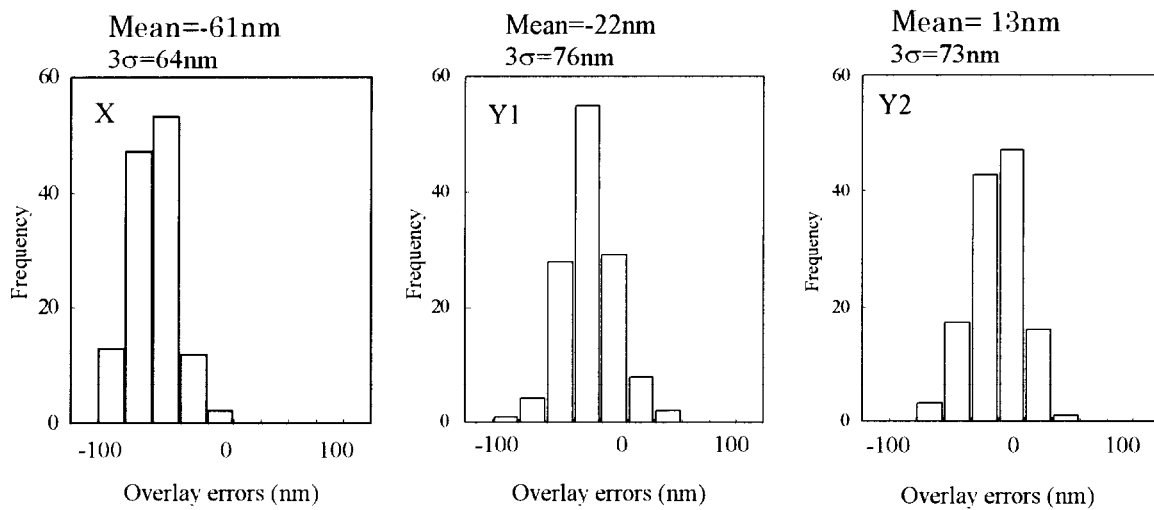
Fig. 3.11 Optical photograph of a finished NMOSFET with 0.2 μm single gate.

が原因である。この問題を解決するために、次の 3. 3. 2 節の 64Mb-DRAM 模擬デバイス試作では、色収差 2 重焦点光学装置を移動することにより、X 線との干渉をさけるようにした。

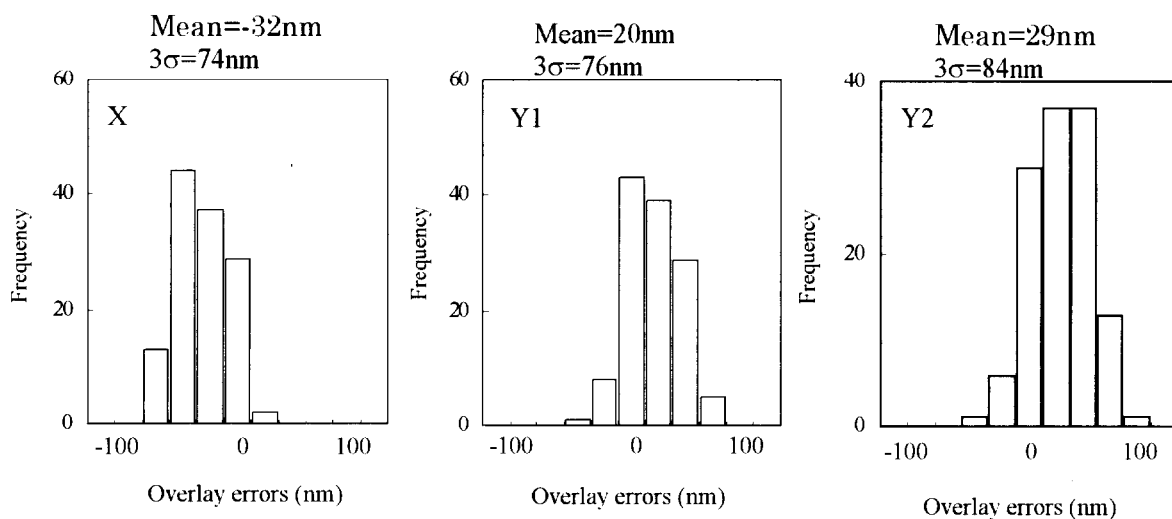
完成した NMOSFET の光学顕微鏡写真を、図 3. 1 1 に示す。この回路特性は、光リソグラフィ (i 線露光) で製作されたものとほぼ同じ特性を持つことが、電気的な測定結果により示されると共に SR 光による照射ダメージも無いことも明らかになっている⁹⁾。

3. 3. 2 64Mb-DRAM 模擬デバイス試作

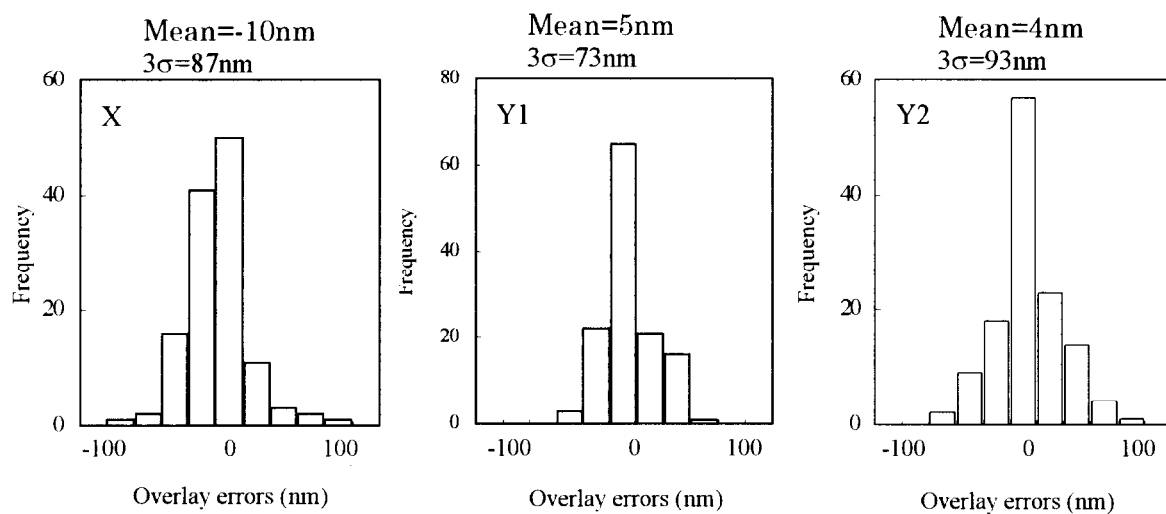
試作した 64Mbit dynamic random access memories (DRAMs) 模擬デバイスの 4 種類のプロセス



(a)Gate/Locos



(b)Contact/Gate



(c)Wsi/Contact

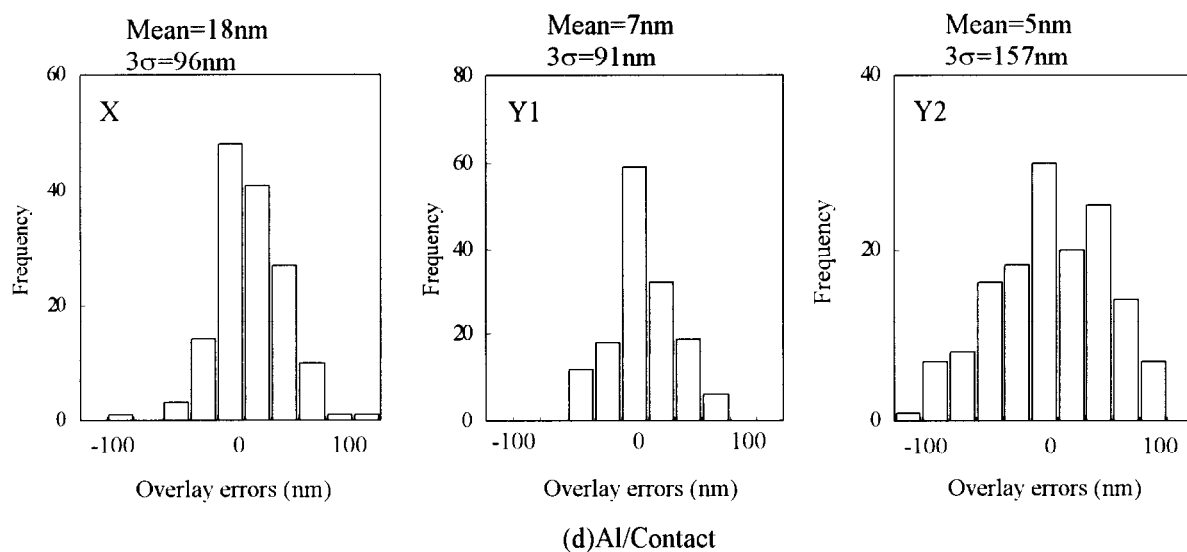


Fig. 3.12 Overlay errors in applicability test of 64Mb-DRAMs fabrication processes

(field, poly-Si transfer gate, bit contact, WSi bit line, Metal-level (Al)) におけるアライメント精度を、図 3. 1 2 に示す。露光には、厚さ $2\mu\text{m}$ の SiN_x メンブレン上に、厚さ $0.75\mu\text{m}$ の Ta 吸収体で回路パターンが形成された X 線マスクを使用した。同図は、露光した 5 枚のウェハから得られた 160 個のアライメント誤差のヒストグラムである。アライメント誤差は、測長 SEM を使って、アライメントマークの近くにあるバーニアを測定した。アライメント精度として $78\text{nm} \sim 162\text{nm}$ ($|\text{Mean}|+3\sigma$) を得た。アライメント誤差のばらつき (3σ) では、アルミ配線工程 (Al/Contact) の Y2 で、もっとも大きな値 157nm (3σ) を示した。

図 3. 1 3 は、アライメント誤差のばらつきが 157nm (3σ) まで大きくなったアルミ配線工程の Y2 のアライメント誤差を、5 枚のウェハで比較したものである。横軸はウェハの通

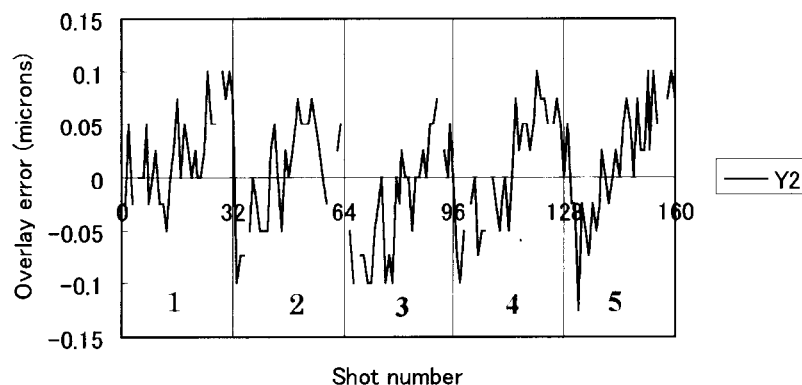


Fig. 3.13 Alignment trends of Y2 channel for Al/Contact level in applicability test of 64Mb-DRAM fabrication processes

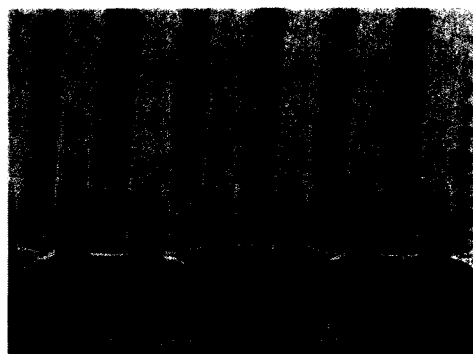


Fig. 3.14 SEM photograph showing bit contact of 64-Mb DRAM fabrication processes

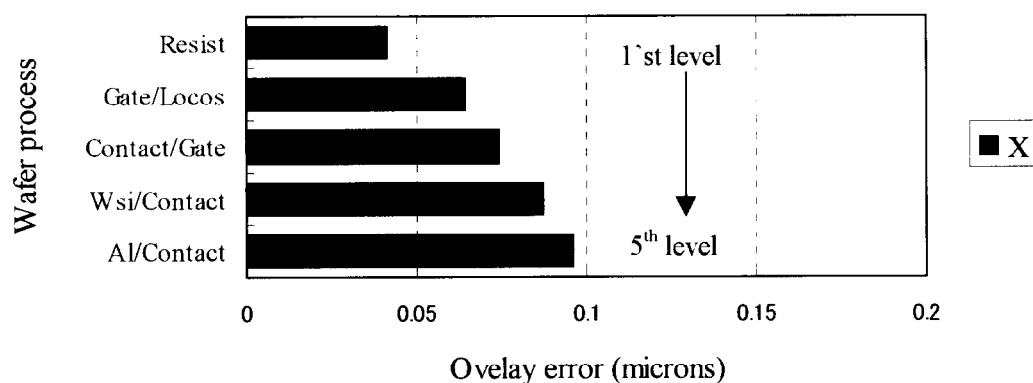


Fig. 3.15 Degradation of alignment accuracy in 64Mb-DRAM fabrication

し番号，縦軸はアライメント誤差（ μm ）を示す．各ウエハともに、アライメント誤差が、マイナスからプラスに転じる傾向を示すことがわかる．これは系統的な誤差であり，その誤差要因として焦点はずれによる像の“ぼけ”が予想される．このための検証実験については，次の3.3.3節に述べる．

エッチングにより形成されたゲートとコンタクトホールのSEM写真（NEC提供）を，図3.14に示す．正確なエッチングパターンが形成されており，近接X露光技術が，64Mb-DRAMの転写能力をもっていることを確認できた．

図3.15は，64Mb-DRAM模擬デバイス試作におけるX軸のアライメント誤差のばらつき（ 3σ ）を，5種類のプロセスで比較したものである．横軸はアライメント誤差のばらつき（ 3σ ），縦軸はレジストを含むプロセスの種類を表す．レジストパターンの精度がもっとも小さい値41nm（ 3σ ）を示し，後工程のプロセスになるほど，誤差のばらつき（ 3σ ）が大きくなることから，積層されるプロセス薄膜の影響が予想されるが，その検証については3.4.3節に示す．

3. 3. 3 焦点はずれ補正方式による精度改善

3. 4. 2 節では、対物レンズの2重焦点位置からマスクとウエハからはずれることによりアライメント計測誤差が発生することを述べた。ここでは、この焦点はずれの存在を前提として、マスクとウエハを微動させ、そのビデオ信号波形からこの焦点はずれを補正する方法（以下、焦点はずれ補正方式とよぶ）と、その効果を、64Mb-DRAM 模擬デバイス試作のアルミ配線層のアライメント精度で評価した結果について述べる。

図3. 16 (a) は、ウエハに対する焦点のずれ量 $x=0.6\mu\text{m}$ において、ウエハマーク信号の平滑化微分値 $V(i)$ を使って式 (3. 1) で定義される正規化自己相関曲線 $Q(n)$ を示す。

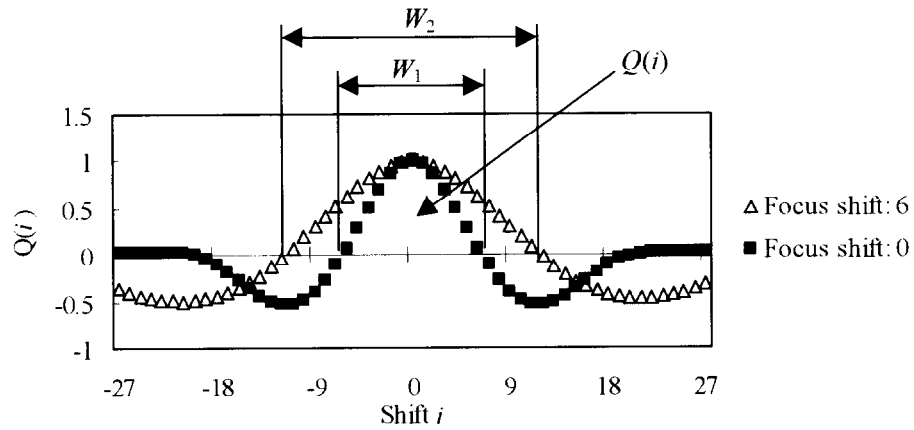
$$Q(i) = \frac{E_j \{ (V'(j) - E_j(V'(j))) \cdot (V'(j+i) - E_j(V'(j+i))) \}}{\sqrt{E_j \{ (V'(j) - E_j(V'(j)))^2 \}} \sqrt{E_j \{ (V'(j+i) - E_j(V'(j+i)))^2 \}}} \quad (3. 1)$$

ここで、 $E_j(V'(j))$ はデータ列 $V'(j)$ の平均値、すなわち

$$\begin{aligned} E_j(V'(j)) &= \frac{1}{2N+1} \sum_{j=-N}^N V'(j) \\ E_j(V'(j+i)) &= \frac{1}{2N+1} \sum_{j=-N}^N V'(j+i) \\ E_j \{ (V'(j) - E_j(V'(j)))^2 \} &= \frac{1}{2N+1} \sum_{j=-N}^N \{ V'(j) - E_j(V'(j)) \}^2 \\ E_j \{ (V'(j+i) - E_j(V'(j+i)))^2 \} &= \frac{1}{2N+1} \sum_{j=-N}^N \{ V'(j+i) - E_j(V'(j+i)) \}^2 \\ E_j \{ (V'(j) - E_j(V'(j))) \cdot (V'(j+i) - E_j(V'(j+i))) \} &= \frac{1}{2N+1} \sum_{j=-N}^N (V'(j) - E_j(V'(j))) \cdot (V'(j+i) - E_j(V'(j+i))) \end{aligned}$$

を表わす。ただし、 i と j はビデオ画素を表し、 i は $-N$ から N をとり、 $2N$ は焦点はずれを評価する一つのエッジ波形だけを含む範囲とする。図3. 27 (a) では、 $N=27$ としている。

曲線 $Q(i)$ と X 軸で囲まれた面積 S に注目すると、もっとも鮮明なウエハが観察される焦点はずれ量 $x=0\mu\text{m}$ では面積 S がもっとも小さくなる。この理由は、図3. 16 (b) 焦点はずれ



(a) Calculated curve defined by eq. 3.13.

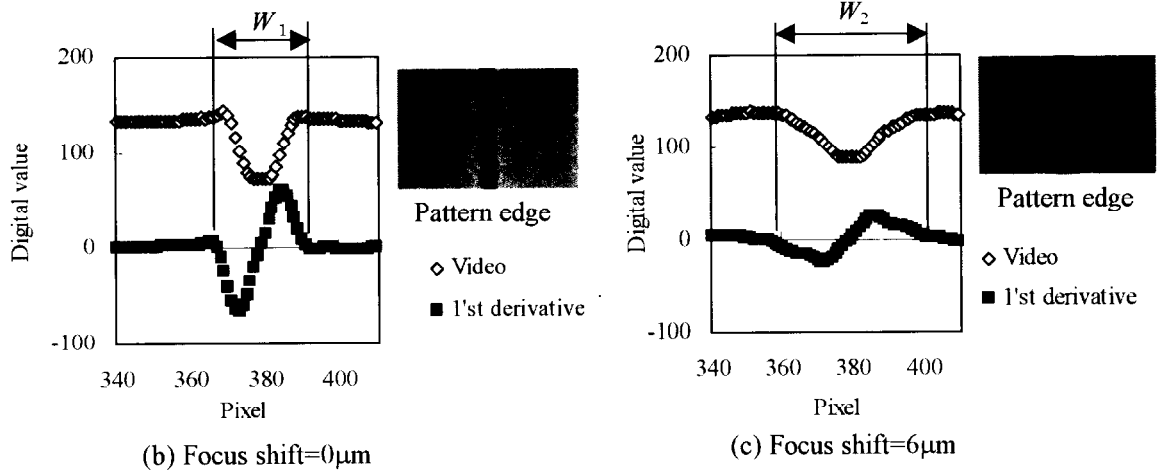


Fig. 3.16 Focus shift calibration method.

量 $x=0\mu\text{m}$ におけるエッジ像の幅 W_1 が狭いのに対して、同図 (c) 焦点はずれ量 $x=6\mu\text{m}$ では、エッジ像がぼやけて太くなる ($W_1 < W_2$) ためである。また、曲線 $Q(i)$ の積算領域（ウインドウ付き）を $2N$ と限定した理由は、焦点はずれの評価を1つのエッジに限定するためである。これにより、曲線 $Q(i) > 0$ となる範囲は、エッジ像の幅 W_1 , W_2 と等しくなる。

ウェハに対する焦点のはずれ量を変化させながら、曲線 $Q(i)$ の面積 S を、次式から計算した結果を図3. 17に示す。

$$S = \sum_{i=-M}^M Q(i) \quad (3. 2)$$

ただし、 $2M$ は $Q(i) \geq 0$ の範囲とする。焦点はずれ $x=0\mu\text{m}$ で、 S が最小となる ($S=6.758$) こと

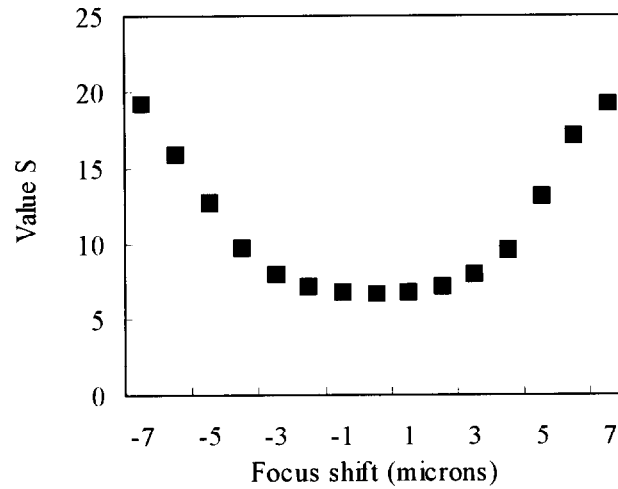


Fig. 3.17 Value S calculated from eq. (3.24)

から、この点が焦点位置であることがわかる。この焦点付近における焦点はずれ量の検出分解能は、約 $1\mu\text{m}$ である。

この焦点はずれ補正方式を、64Mb-DRAM 模擬デバイス試作のアルミ配線層に適用した結果を図 3. 1 8 に示す。同図は、ウエハ 4 枚 (32 ショット/ウエハ) で測定したアライメント誤差のヒストグラムである。アライメント誤差のばらつきとして $3\sigma_x=86\text{nm}$ 、 $3\sigma_{y1}=73\text{nm}$ 、 $3\sigma_{y2}=77\text{nm}$ が得られており、焦点はずれ補正を行わない場合のばらつき $3\sigma_x=96\text{nm}$ 、 $3\sigma_{y1}=91\text{nm}$ 、 $3\sigma_{y2}=157\text{nm}$ [図 3. 1 2 (d)] に比べると、Y2 軸で約 50%改善することができた。

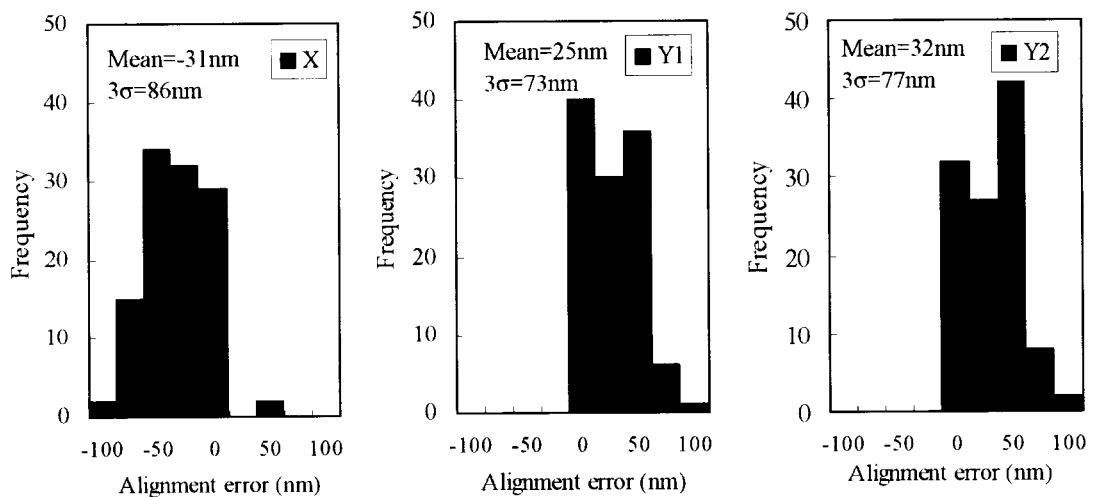


Fig.3.18 Improvement of alignment accuracy by using the focus-shift calibration method.
The histogram shows the alignment error in aluminum layer

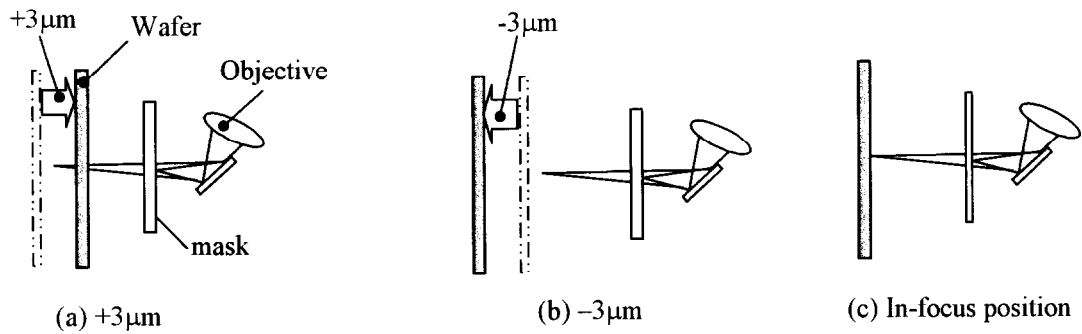


Fig. 3.19 Focus calibration method (a) Movement of +3μm with a step of 1μm (b) Movement of -3μm with a step of 1μm (c) In-focus position of wafer

この焦点はずれ補正方式の手順を、図 3. 19 に示す。まず、(a) ウエハを対物レンズに近づく方向に、ピッチ 1μm ずつ移動させて、式 (3. 14) の S を計算する、つぎに (b) ウエハを対物レンズから遠ざかる方向に、ピッチ 1μm ずつで移動させて、式 (3. 14) の S を計算する、最後に、(c) 計算値 S が、最小となる位置にウエハを移動する。この焦点はずれ補正に要した時間は、色収差 2 重焦点光学装置の移動 (20 秒) も含めて、毎回 1 分を要した。ウエハ一枚あたりのオーバーヘッド時間は、32 分 (露光ショット数 32 回) となり、スループットを低下させる原因となった。

3. 3. 4 SiC-X 線マスクへの適応性

SiC メンブレンは、その優れた機械特性、X 線照射耐性、位置歪みの点で、SiN_x メンブレンよりも優れた性質を持っていることから、量産での使用が見込まれている¹⁰。一方で、SiC メンブレンは、可視光における分光透過率が SiN_x よりも低いため、色収差 2 重焦点法においてウエハマークのコントラストを低下させる要因となる。この理由は、3. 4. 1 項の式 (3. 5) と式 (3. 6) における、ウエハマークのコントラストを低下させる第 2 項 R_λ (マスクメンブレンの強度反射率) が大きくなるためである。ここでは、実験により 2 種類のメンブレン SiC と SiN_x が、ウエハマークの信号コントラストに与える影響を測定した結果を述べる。

図 3. 20 は、同じ厚さ (2μm) の 2 種類のメンブレン SiN_x, SiC を透過したウエハマークのビデオ信号を比較したものである。メンブレンを透過する前のウエハ信号 (A) ではピーク信号がほぼ 0 ボルトの暗いエッジを示すことから、その信号コントラスト C は¹¹、 $C_0=(480-0)/(480+0)=1$ である。一方、SiN_x を透過したウエハ信号 (b) では、メンブレン上面からの反射光 R_λ [式 (3. 4) 参照] が有害光としてウエハ像にかぶるために、その信号コントラストは $C_I=(470-230)/(470+230)=0.34$ まで低下する。さらに透過率の低い SiC を透過し

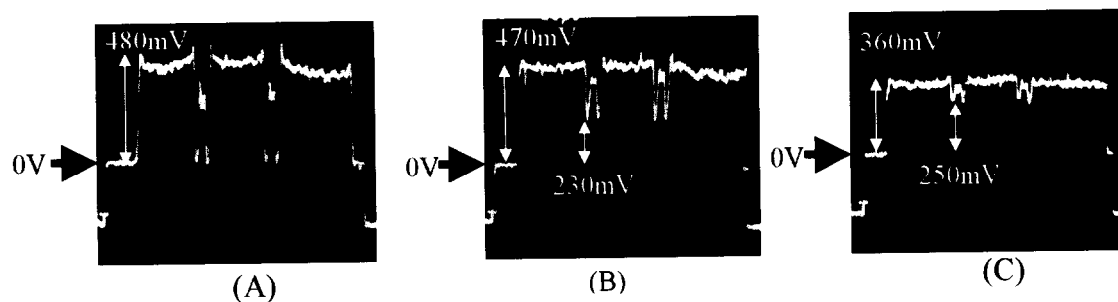


Fig. 3.20 (a) Wafer signal. (b) Wafer signal which is transmitted SiNx membrane. (c) Wafer signal which is transmitted SiC membrane.

たウエハ信号 (c) では、その信号コントラストが $C_2=(360-250)\div(360+250)=0.18$ まで低下している。これから、同じ厚さ $2\mu\text{m}$ で比較すると、SiC メンブレンでは信号コントラストが SiNx メンブレン比べて約 1/2 まで低下することがわかる。これから色収差 2 重焦点法では、SiC メンブレンに対してウエハマークの像コントラストが低下するという課題が明らかとなった。

3. 4 アライメント誤差の解析

3. 4. 1 モデリング

図 3. 2 1 は、色収差 2 重焦点法の 1 次元モデルを示す。このモデルは 1) ウエハマーク、2) マスクマーク、2) 対物レンズ、4) パターンバリアフィルタ、5) リニア CCD カメラ、6) A/D 変換器、7) 信号処理、の 7 つの要素から構成される。マスクマークは波長 $\lambda_1=435.84\text{nm}$ (g 線) のインコヒーレント光で結像し、ウエハマークは 3 つの波長 $\lambda_2=546.07\text{nm}$

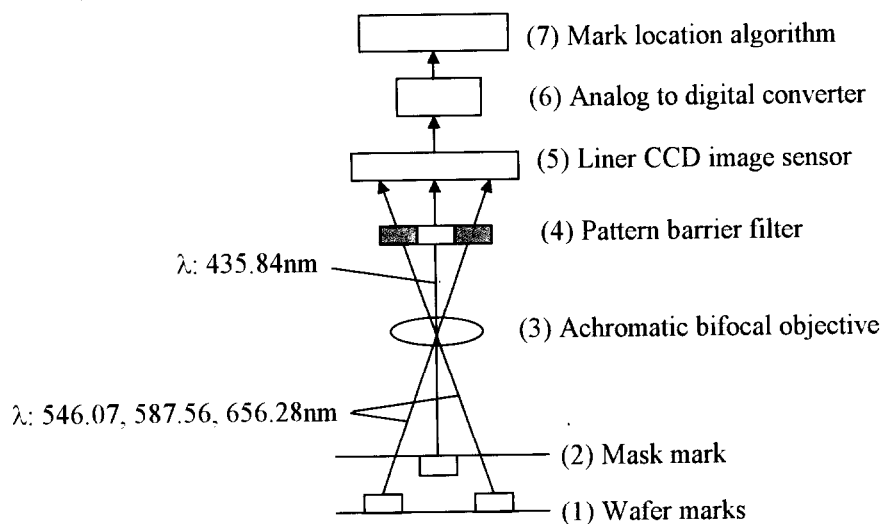


Fig.3.21 Simulation model

(e 線) , $\lambda_3=587.56\text{nm}$ (d 線) , $\lambda_4=656.28\text{nm}$ (C 線) のインコヒーレント光により結像する。マスクマークは対物レンズの光軸の中央に位置し、ウエハマークはその両側に位置する。

対物レンズの軸上色収差は $40\mu\text{m}$ とし、アライメントマークの近傍では、アイソプラナティズムを仮定した。また、モデル座標は、対物レンズの開口数 NA との波長の比 λNA で規格化したウエハ面上の u - v 換算座標上とした。ただし、 u は横方向、 v はマークの長手方向（紙面に垂直な方向）を表わす。モデルを使った計算手順は、図中の番号で示す通り 1) → 2) → 3) → 4) → 5) → 6) → 7) である。

モデルにおける計算方法を以下に示す。

(1) ウエハマーク, (2) マスクマーク

ウエハマークとマスクマークにおける強度反射率は、いずれも単層膜への垂直入射^{1,2}を仮定し、4つの波長毎に計算した。マーク形状等の条件については後述する。

(3) 色収差2重焦点レンズによるマスクマークの結像

光軸に位置するマスクマークの像 $I_1(u)$ は、g 線に対する対物レンズの線像強度分布 (LSF: Line spread function,) $LSF_1(u)$ とマスクマークの反射強度分布 $O_1(u)$ との接合積で表せる。

$$I_1(u) = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} O_1(u') \times LSF_1(u - u' + \Delta u_1) du'}{\int_{-\infty}^{+\infty} LSF_1(u') du'} \quad (3.3)$$

ただし、 Δu_1 は g 線に対する像点移動を示す。これは、レンズの偏心によるプリズム作用^{1,3}が原因である。

(3) 色収差2重焦点レンズによるウエハマークの結像

式 (3.4) は、左右の画角におけるウエハマークの結像を表わす。第1項は、左画角の像 $I_A^L(u)$ ($u < 0$) を表わし、2項は右画角の像 $I_A^R(u)$ ($u \geq 0$) を表わす。式 (3.5) と式 (3.6) における第2項は、メンブレン上面からの反射光を表わし、ウエハマークのコントラストを低下させる有害光となる。

$$I_{\lambda}(u) = I_{\lambda}^L(u) + I_{\lambda}^R(u) \quad (3.4)$$

ここで,

$$I_{\lambda}^R(u) = (T_{\lambda})^2 \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} O_{\lambda}(u') \times LSF_{\lambda}^R(u - u' + \Delta u_{\lambda}^R) du'}{\int_{-\infty}^{+\infty} LSF_{\lambda}^R(u') du'} + R_{\lambda} \quad u < 0 \quad (3.5)$$

$$I_{\lambda}^L(u) = (T_{\lambda})^2 \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} O_{\lambda}(u') \times LSF_{\lambda}^L(u - u' + \Delta u_{\lambda}^L) du'}{\int_{-\infty}^{+\infty} LSF_{\lambda}^L(u') du'} + R_{\lambda} \quad u \geq 0 \quad (3.6)$$

$$T_{\lambda} + R_{\lambda} = 1 \quad (3.7)$$

ただし,

λ : 光の波長

$O_{\lambda}(u)$: ウエハマークの反射率強度分布

$LSF_{\lambda}^L(u)$: 左画角の線像強度分布

$LSF_{\lambda}^R(u)$: 右画角の線像強度分布

Δ_{λ}^L : 左画角における像点移動

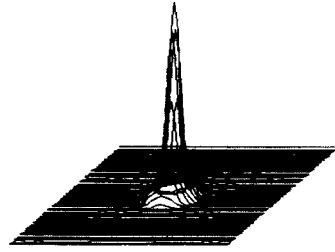
Δ_{λ}^R : 右画角における像点移動

T_{λ} : X線マスクメンブレンの強度透過率

R_{λ} : X線マスクメンブレンの強度反射率

式(3.4)から、波長毎に求めた像 $I_{\lambda_1}(u)$, $I_{\lambda_2}(u)$, $I_{\lambda_3}(u)$ のデータ列を、式(3.8)に代入し、e線、d線、C線の光による像を加算する。ただし、式(3.8)における分光荷重係数 $E(\lambda)=1/3$ として計算した。

$$I_{23}(u) = \int_{\lambda_2}^{\lambda_3} E(\lambda) I_{\lambda}(u) d\lambda \quad (3.8)$$



(A) $PSF(k,l)$ $k \in 0,1,\dots,511$ $l \in 0,1,\dots,511$ (B) $LSF(k)$ $k \in 0,1,\dots,511$

Fig. 3.22 (A) 3D-plots of $PSF(k,l)$ (B) 2D-plots of $LSF(k)$

式 (3.4), 式 (3.5), 式 (3.6) の数値計算で使用した $LSF_l(u)$ を, 図 3.22 (B) に示す. $LSF(u)$ は, 光学設計プログラム OPTAS (サイバネットシステム) が出力する波面収差を, $M^2=2048 \times 2048$ の 2 次元配列に置き換え, それを 2 次元高速フーリエ変換¹⁴⁾により求めた同図 (A) の点像強度分布 (PSF: Point spread function) を, v 方向に積分して求めた¹⁵⁾. また, 像点移動量 Δu は, OPTAS が出力する近軸像点から最良像点までのシフト量を代入した. また, $LSF(u)$ のデータ間隔 ε は, 波長により次のとおりである.

$$\left. \begin{array}{l} \varepsilon_1=10\text{nm (g 線)} \\ \varepsilon_2=14\text{nm (e 線)} \\ \varepsilon_3=14\text{nm (d 線)} \\ \varepsilon_4=16\text{nm (C 線)} \end{array} \right\} \quad (3.9)$$

式 (3.8) のデータ列 $I_\lambda(u)$ は, 波長ごとにデータ間隔 ε が異なるために, 式 (3.10) により, すべてのデータ間隔を $\varepsilon=1\text{nm}$ に変換した.

$$I'(\varepsilon_n \times j + m) = I(j) \quad (3.10)$$

ただし,

ε : データ間隔 $\varepsilon_1=10\text{nm}$, $\varepsilon_2=14\text{nm}$, $\varepsilon_3=14\text{nm}$, $\varepsilon_4=16\text{nm}$

$j=0, 1, 2, 3, \dots$

$m=0, 1, 2, \dots, \varepsilon-1$

(4) パターンバリアフィルタ

色収差2重焦点レンズによる像 $I_{1234}(u)$ は、パターンバリアフィルタ（直径 $b=84000\text{nm}$ ）の中央部分（幅 $a=3000\text{nm}$ ）を透過するマスク像 $I_1(u)$ と、その両側の部分を透過するウェハ像 $I_{123}(u)$ の和で表した。

$$I(u) = \Pi\left(\frac{u}{a}\right)I_1(u) + \left\{\Pi\left(\frac{u}{b}\right) - \Pi\left(\frac{u}{a}\right)\right\}I_{23}(u) \quad (3.11)$$

ただし、右辺はレクタングル関数 (rectangle function) ¹⁶ を表す。

$$\Pi(u) = \begin{cases} 1 & |x| \leq 1/2 \\ 0 & \text{その他の点} \end{cases} \quad (3.12)$$

(5) リニア CCD イメージセンサ

マスクとウェハの像 $I_{1234}(u)$ は、ビデオ画素（幅 c ）内でその照度分布が積分されて、離散的な照度分布をもったビデオ信号 $i(n)$ に光電変換される。¹⁷

$$i(n) = \frac{1}{P} \int_{np-a/2}^{np+a/2} I(u) \Pi\left(\frac{u-np}{c}\right) du \quad (3.13)$$

ただし、

n : ビデオ画素の通し番号 $n \in (0, 1, 2, 3, \dots, 1023)$

p : ビデオ画素ピッチ (140nm)

c : ビデオ画素寸法 (114nm)

$\Pi(u)$: レクタングル関数

(6) A/D 変換器

ビデオ信号 $i(n)$ は、A/D 変換器によって濃淡レベル 2^8 のデジタル画像 P_n に変換される¹⁸。

$$P_n = \frac{2^l}{FSR} i(n), \quad P_n \in \{0, 2, \dots, 255\} \quad (3.14)$$

ただし、 FSR (full scale range) はビデオ信号 $i(n)$ が取りうる範囲を示す。デジタル画像 P_n のデータ列は $V(n) \in \{P_1, P_2, P_3, \dots, P_{1023}\}$ とおける。

(7) 信号処理

1次元の画像データ列 $V(n)$ からマスクマークとウエハマークの位置を求める。具体的な計算方法については「付録ービデオ信号処理」に示す。

3. 4. 2 焦点はずれによるアライメント誤差

対物レンズの焦点はずれによる誤差の原因が、対物レンズの波面収差であることは、2. 3. 3節で指摘した。ここでは、計算機実験により検証する。計算実験の条件としては、図3. 23の色収差 $40\mu\text{m}$ の対物レンズ (2. 3. 2節の表2. 1参照) において、同図 (a) で示す2枚接合レンズに、偏心 $5\mu\text{m}$ と回転20秒を与えた4つのモデルを仮定した。図3. 23 (b) 2枚接合レンズの偏心量 $d_y=5\mu\text{m}$ 、図3. 23 (c) 2枚接合レンズの回転 $\theta_x=20$ 秒を、それぞれ示す。仮定した偏心 $5\mu\text{m}$ と回転20秒は、光学メーカーの製造公差である。また、2枚接合レンズを選んだ理由は、その偏心と回転が、対物レンズの波面収差にもっとも影響を与えるためである。マスクマークとウエハマークには、それぞれの中心位置が一致したモデルを仮定した。

計算結果を図3. 24に示す。横軸は対物レンズの焦点からのずれ量 (μm)、縦軸は焦点はずれによる計測誤差 (μm) を示す。プロット (◇印) は、ウエハマークが対物レンズの焦点からのずれた場合、プロット (□印) は、マスクマークが対物レンズの焦点からずれた場

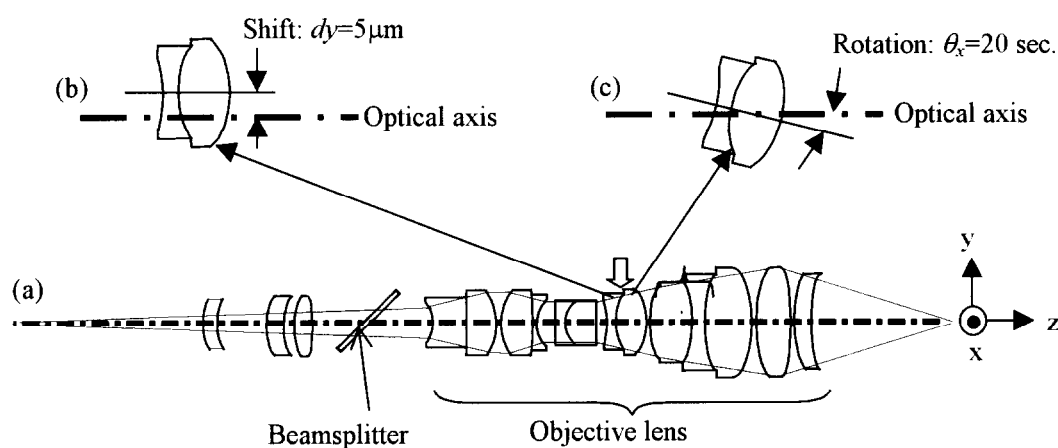


Fig. 3.23 (A) Cross section of a bifocal object lens with a chromatic aberration of $40\mu\text{m}$.

(B) Lens shift $d_y=5\mu\text{m}$. (C) Lens rotation $\theta_x=20$ second.

合、プロット (▲印) はマスクマークとウエハマークが同時に対物レンズの焦点からずれた場合を示す。

偏心も回転もない対物レンズ (A) では、焦点はずれによる計測誤差は生じていない。一方で、偏心あるは回転を与えた対物レンズ (B) , (C) , (D) では、ウエハマークとマスクマークが同時に対物レンズの焦点からずれた場合 (▲) にもっとも大きな誤差を生じており、焦点はずれ $\pm 5\mu\text{m}$ により生じる計測誤差は、それぞれ 104nm (B) , 135nm (C) , 153nm (D) である。また、焦点はずれ量が $0\mu\text{m}$ における像点移動は、それぞれ 145nm (B) , 19nm (C) , 153nm (D) である。これは、レンズの偏心によるプリズム作用¹⁹が原因である。

以上の結果から、焦点はずれによる誤差の原因が、レンズの偏心と回転であることが明らかになった。ここで、色収差 $40\mu\text{m}$ の対物レンズで測定した焦点はずれ $\pm 3\mu\text{m}$ による誤差 95nm

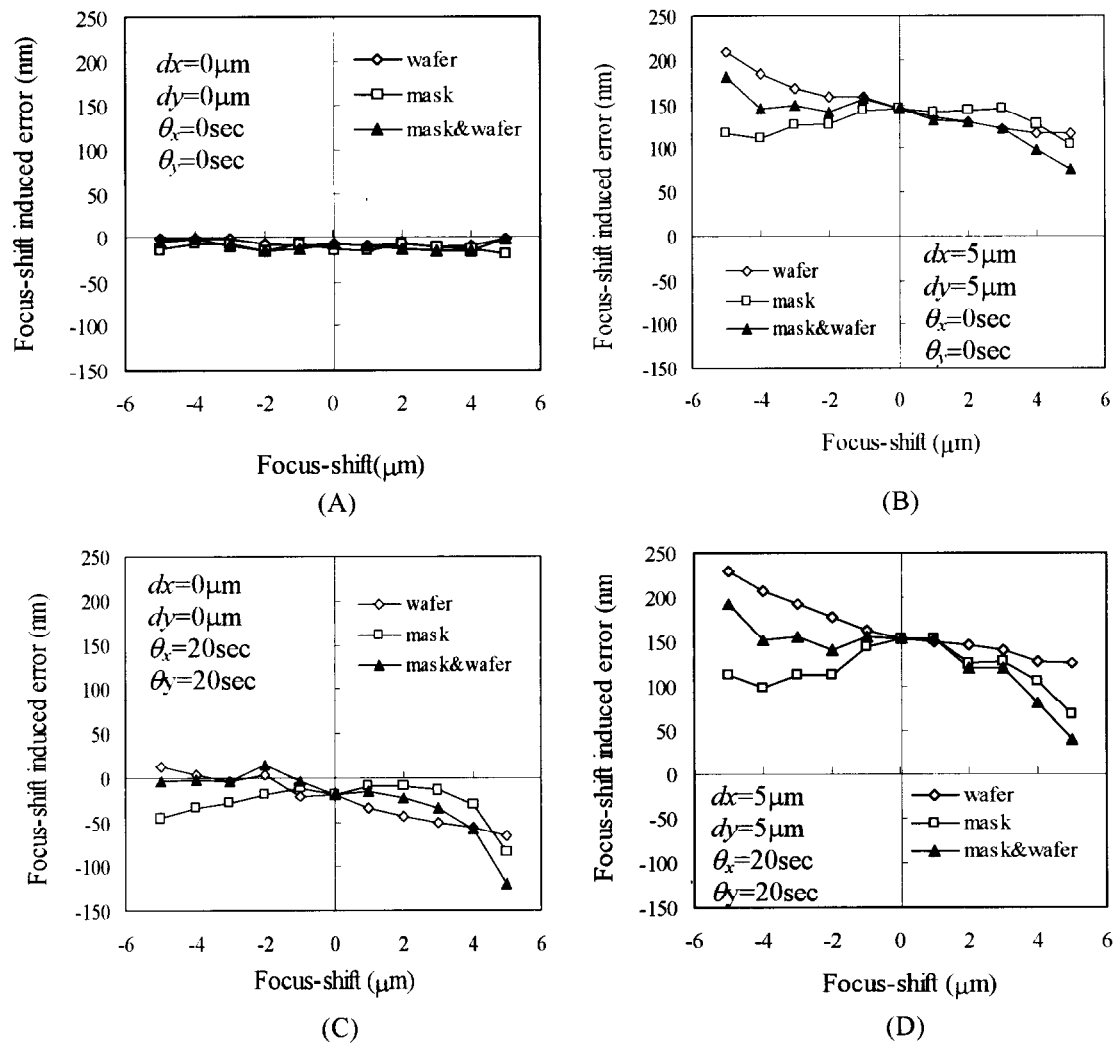


Fig. 3.24 Focus-shift induced error.

[2. 4. 3 節の図2. 15 (A) 参照] を，対物レンズ (D) における焦点はずれ $\pm 3\mu\text{m}$ による誤差 36nm (▲印) と比較すると，実測した誤差 95nm は，計算による誤差 36nm の約 3 分の 1 であることから，色収差 $40\mu\text{m}$ の対物レンズの偏心と回転が，製造公差を大きく越えていることが予想される．

一方で，色収差 $27\mu\text{m}$ の対物レンズにおいてはレンズデータがないために，正確な比較はできない．しかしながら，仮に色収差 $40\mu\text{m}$ の対物レンズとおなじ構成と性質をもつと仮定すれば，色収差 $27\mu\text{m}$ の対物レンズで測定した焦点はずれ $\pm 3\mu\text{m}$ による誤差 38nm [2. 4. 3 節の図2. 15 (B) 参照] は，対物レンズ (D) における誤差 36nm (▲印) とよく一致することから，色収差 $27\mu\text{m}$ の対物レンズの偏心と回転は，ほぼ製造公差内であるということが出来る．

3. 4. 3 ウエハマークの断面形状によるアライメント誤差

64Mb-DRAM 模擬デバイス試作において，アライメント精度がもっとも低下した，アルミ配線層に形成されたウエハマーク断面の SEM 写真 (NEC 提供) を，図3. 25に示す．マーク上には，厚さ $1.8\mu\text{m}$ のフォトリソグが塗布されている．エッジ角度に注目すると，一番左端のエッジだけが 45° の角度を示し，他のエッジ角度 30° である．そこで，この角度差 15° により生じる誤差を計算した．計算におけるウエハマーク各部の寸法は，SEM 写真と同じとし，エッジ斜面からの反射光強度を零と仮定した．対物レンズは偏心と傾きをもつモデル[図3. 24 (D)]を用いた．

4つのモデルで計算した計測誤差 (nm) を，図3. 25に示す．モデル A は，ウエハマークのエッジ角度がすべて 30° の場合，モデル B は，図示する 1箇所のエッジ角度が 45° ，残りがすべて 30° の場合，モデル C は，図示する 2箇所のエッジ角度が 45° ，残りがすべて 30° の場合，モデル D は，図示する 4箇所のエッジ角度が 45° ，残りがすべて 30° の場合である．グラフの横軸はモデル A-D，縦軸は各モデルで生じる計測誤差 (nm) を示す．モデ

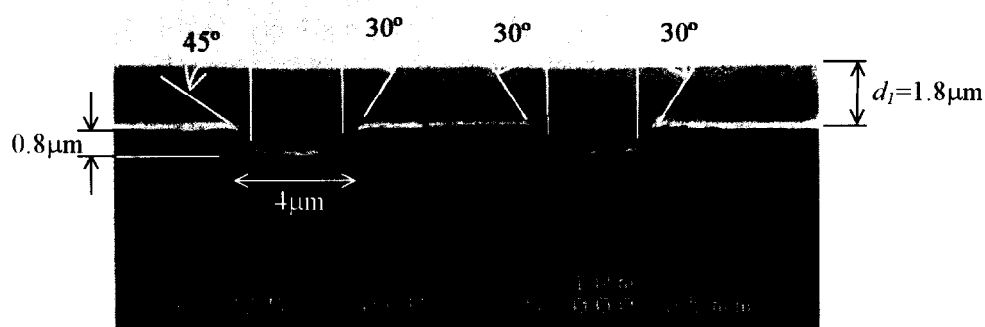


Fig. 3.25 SEM photograph of wafer alignment marks patterned on Al metal film. A photoresist of $1.8\mu\text{m}$ in thickness is coated on the alignment marks.

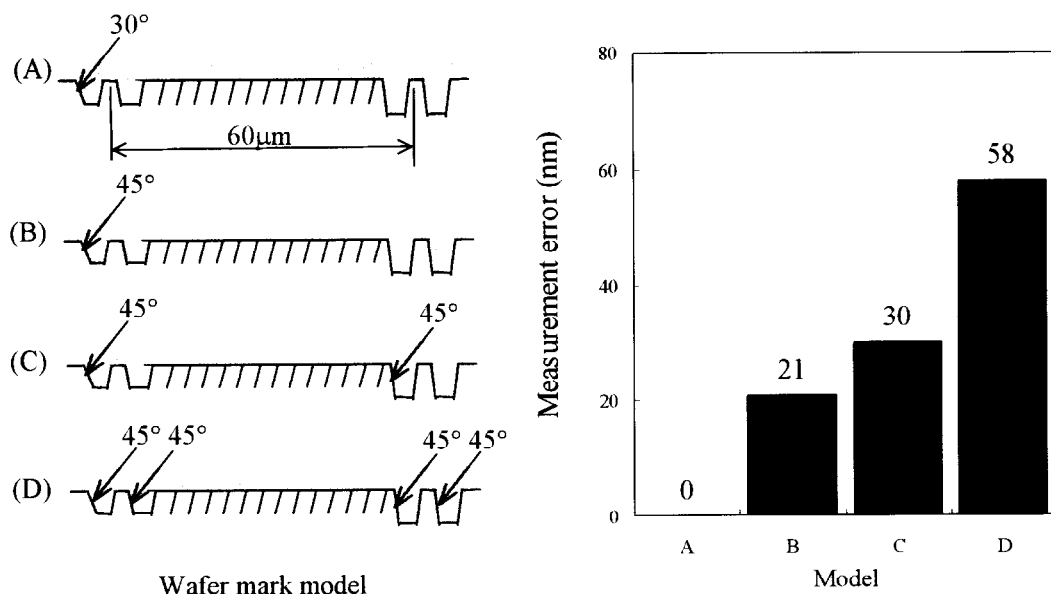


Fig. 3.26 Calculation result in model A, B, C and D

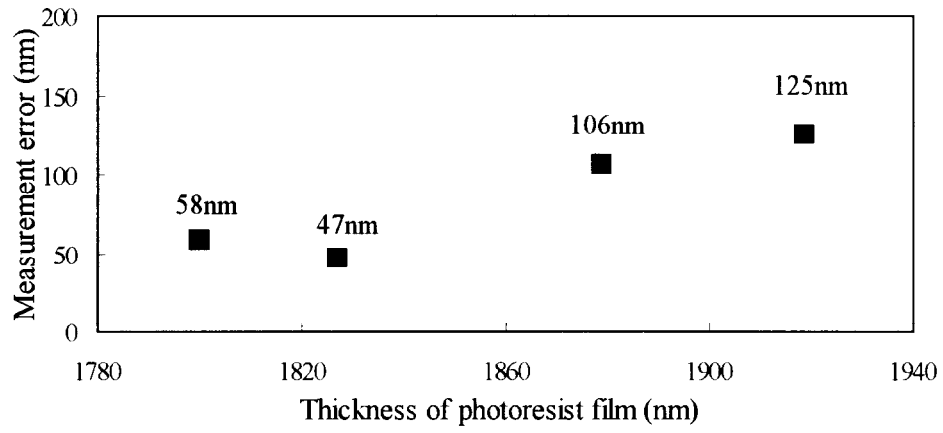
ル A では、レンズ偏心による像点移動 153nm を生じる [図 3. 2 4 (D)] が、エッジ角度がすべて 30° であることから、この像点移動 153nm を零とおいて、モデル B, C, D で生じる誤差を図示した。角度 45° のエッジの数が増えるに従い、誤差が大きくなり、モデル D では、もっとも大きな誤差 58nm を生じている。この誤差 58nm は、Al ウエハマークによるアライメント精度 91nm~157nm [図 3. 1 2 (d)] に比べて小さいことから、露光に用いた Al ウエハマークでは 1) マークのエッジ角度差が 15° より大きい、2) 焦点はずれによる誤差、3) レジスト膜厚変化による誤差、等が加わったことが予想される。

レジストの膜厚変化により生じる誤差を計算した結果を図 3. 2 7 (A) に示す。ウエハマークには、モデル D (図 3. 2 6) を使用し、4 つのレジスト膜厚 $d_f = \{1800, 1827, 1897, 1919\}$ nm について計算した。ウエハ平坦部からの反射光強度が最大となるレジスト膜厚 $d_f=1824$ nm で、誤差は最小値 47nm を示し、反射光強度が最大となる膜厚 $d_f=1919$ nm で、誤差は最大値 125nm を示した。図 3. 2 7 (B) と同図 (C) は、それぞれ膜厚 $d_f=1824$ nm と $d_f=1919$ nm におけるビデオ信号波形と、その一次微分波形を比較したものである。ビデオ信号波形におけるウエハマークのエッジ位置は、図 3. 2 7 (B) と図 3. 2 7 (C) で同じである。ビデオ信号波形を比較すると、波形全体のレベルと、ウエハマークのエッジの内側と外側のコントラストが変化していることがわかる。

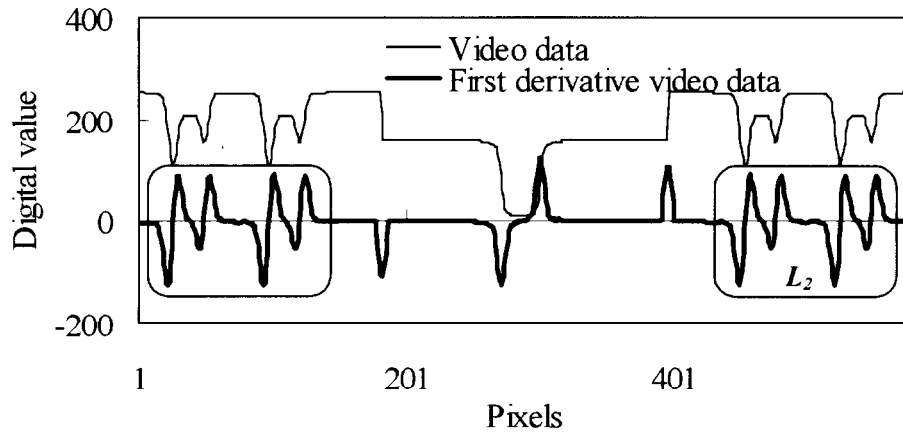
ウエハマークの一次微分波形を比較すると、図 3. 2 7 (B) と同図 (C) では、それぞれ非対称な波形を示している。ウエハマークの中心位置は、図 3. 2 7 (B) の四角 (□印) で囲んだ一次微分波形 L_1 と L_2 を、中心位置付近で折り返し、その相関値 [付録：ビデオ信号波

形の式（４）］より求めることから、この非対称性は誤差要因となる。この場合、レジストの膜厚変化によるウエハマーク中心位置の誤差は **78nm** であった。

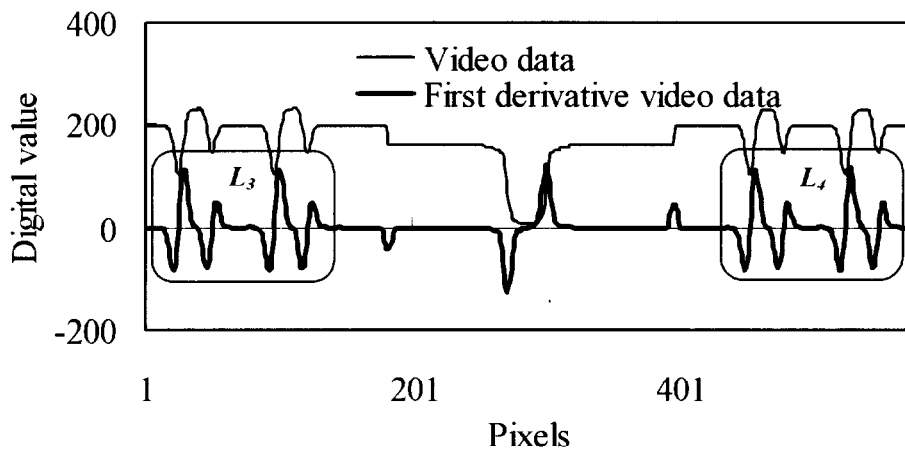
以上の結果から、ウエハマークの断面形状に変化がなくても、その上に塗布されるレジストの膜厚が変化することによって、アライメント誤差が生じることが予想される。64Mb-DRAM 模擬デバイス試作中は、ウエハマークのコントラストが変化していたことから、ここで示したレジスト膜厚の変化による誤差も生じていたと思われる。



(A) Calculated error in four different wafer models.



(B) Thickness 1824nm



(C) Thickness 1919nm

Fig. 3.27 Measurement error induced by thickness-variation of photoresist-film.

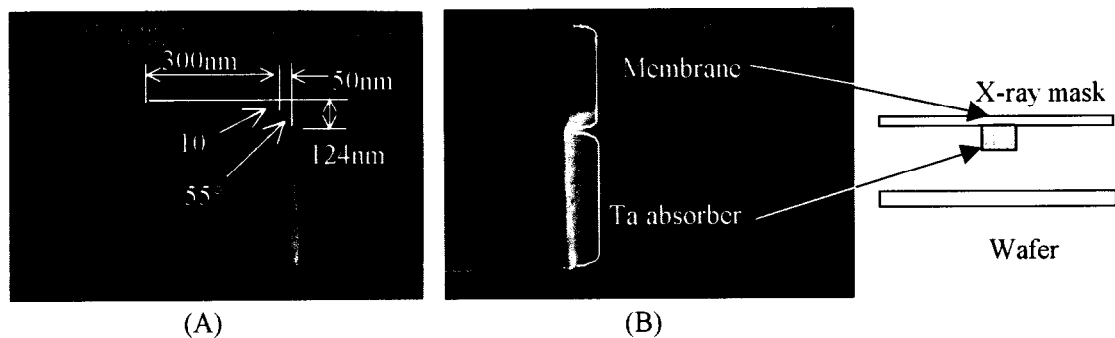


Fig. 3.28 SEM photographs of mask mark. (A) Left edge of Ta absorber pattern. (B) Right edge of Ta absorber pattern.

3. 4. 4 マスクマークの断面形状によるアライメント誤差

図3. 28は、マスクマーク [図3. 21の(4) X線マスクに相当] を形成する Ta 吸収体の断面の SEM 写真 (NEC 提供) である。Ta 吸収体の側壁に接したメンブレンの部分に2段の斜面ができています。この斜面の角度が、マークの左右 (A), (B) でともに $\alpha=10^\circ$ と $\beta=55^\circ$ と仮定し、左の斜面 (B) の長さ $a=50\text{nm}$, $b=300\text{nm}$ から、この高さを $L=124\text{nm}$ ($=a\tan\alpha+b\tan\beta$) とした。

ここで、Ta 吸収体に近接した斜面の長さ $a=50\text{nm}$ ($\beta=55^\circ$) に注目し、図3. 29 (a) に示す3つのモデルを仮定した。モデル A は左右の斜面が等しい場合 $a_1=50\text{nm}$, $a_2=50\text{nm}$, モデル B は右の斜面が短い場合 $a_1=50\text{nm}$, $a_2=30\text{nm}$, モデル C は右の斜面が長い場合 $a_1=50\text{nm}$, $a_2=70\text{nm}$ である。各モデルにおける斜面での反射光の強度は、次の3つの仮定からとめた。

- (1) メンブレン厚みは、マスク照明光 g 線に対する反射強度が最小となる $t=2004.9\text{nm}$ とする。
- (2) 角度 55° の斜面では、大気/メンブレンの境界面で反射した光だけが対物レンズに入射するものとする。
- (3) 角度 10° の斜面では、大気/メンブレン/大気の単層膜での反射光が対物レンズに入射するものとする。

モデル A, モデル B, モデル C で生じる計測誤差を、図3. 29 (b) に示す。斜面の断面形状が対称なモデル A の誤差を零とすると、モデル B では 82nm の誤差、モデル C では -10nm の誤差を示した。あきらかに、これはメンブレン斜面の左右断面形状の違いが原因である。次にこの断面形状によるビデオ信号波形の変化を比較し、アライメント誤差の原因について述べる。

図3. 29 (c) と (d) は、モデル A とモデル B のビデオ信号 (◇印) とその一次微分値 (■印) を比較したものである。モデル A では Ta 吸収体のエッジである2つのピーク波形を

比較するとは，左ピーク [-28, -32, -33, -31, -28] と右ピーク [28, 31, 33, 32, 28] では符号を反転させると対称な波形となっている．一方，モデル B では Ta 吸収体に近接するメンブレン斜面の断面形状の非対称性により，左ピーク [-28, -32, -33, -31, -26] と右ピーク [25, 30, 33, 32, 28] は非対称になっている．この非対称性によりマスクマークの中心位置が 82nm だけシフトし，アライメント誤差になったと思われる．

以上の結果から，マスクの断面形状に依存したアライメント誤差が生じることが予想される．64Mb-DRAM 模擬デバイスの露光中は，各プロセスで使用したマスク毎に，このようなアライメント誤差を数回測定し，その平均値を補正量としてウエハの移動量に加えた．

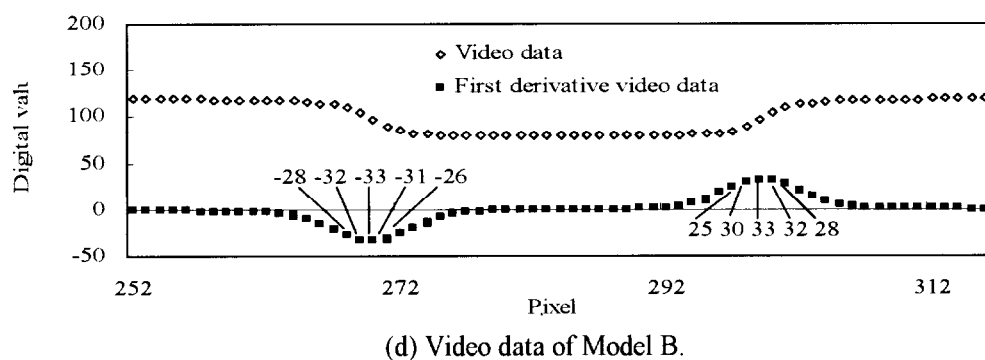
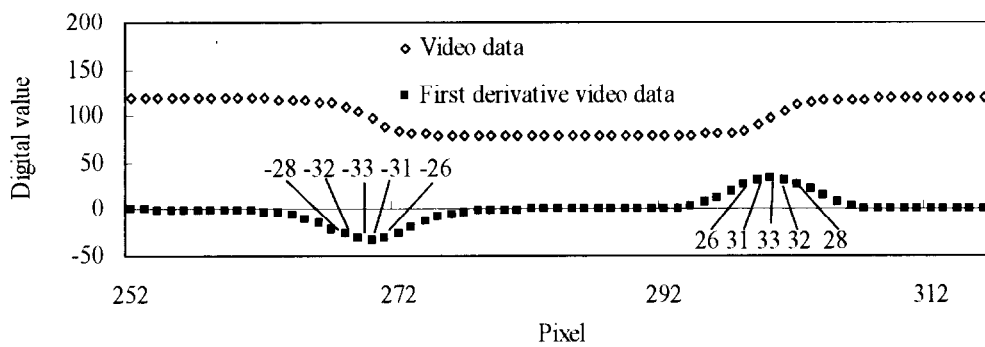
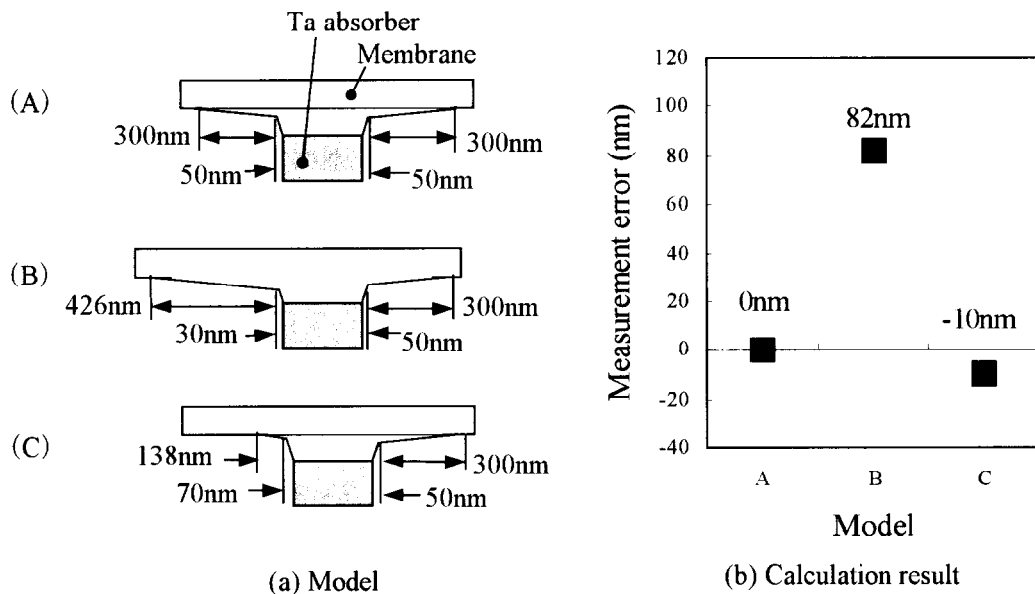


Fig. 3.29 Simulation results of mask marks.

3. 5 結言

色収差2重焦点法を，X線リソグラフィにおけるアライメント計測に応用し，X線露光による露光評価を行った．さらに，半導体デバイス試作におけるアライメント精度の評価を行ない，アライメント誤差の原因を，計算機実験により解析した．以下に得られた結果を要約する．

- 1) レジストパターンのX線2重露光により，44nm～92nm ($|\text{Mean}|+3\sigma$) のアライメント精度を得た．このアライメント誤差の原因として，ギャップ変動による対物レンズの焦点はずれを指摘した．
- 2) 上記1) に新たに提案したギャップ補正方式を適用した結果，レジストパターンのX線2重露光により 20nm～31nm ($|\text{Mean}|+3\sigma$) のアライメント精度を得た．これは，本研究が目標としているアライメント精度 30nm ($|\text{Mean}|+3\sigma$) をほぼ満足するものである．
- 3) X線露光による NMOSFET 試作では，3種類のプロセスウエハで 81nm～407nm ($|\text{Mean}|+3\sigma$) のアライメント精度を得た．このアライメント精度の平均値 ($|\text{Mean}|$) の原因として，200nmを超えるマスクパターンの位置歪があったことを指摘した．
- 4) X線露光による 64Mb-模擬 DRAM 試作では，4種類のプロセスウエハに対して 78nm～125nm ($|\text{Mean}|+3\sigma$) のアライメント精度を得た．ただし，アルミ薄膜付きウエハの Y2 では 162nm ($|\text{Mean}|+3\sigma$) まで低下した．誤差の原因として焦点はずれを指摘した．
- 5) 上記4) のアルミ薄膜付きウエハに，新たに提案した焦点はずれ補正方式を適用した結果，アライメント精度 162nm ($|\text{Mean}|+3\sigma$) を 109nm ($|\text{Mean}|+3\sigma$) まで改善できることを示した．ただし，焦点はずれ補正のオーバーヘッド時間として約1分／1回を要することから，課題としてオーバーヘッド時間の短縮が必要であることを明らかにした．
- 6) X線マスクの SiC メンブレンでは，ウエハマークの信号コントラストが1／2以下に低下することを示した．これから課題として，SiC メンブレンでのコントラスト低下の改善が必要であることを明らかにした．
- 7) モデルを使った計算機実験により，(1) 像が“ぼけ”る焦点はずれによる誤差の原因が，レンズの偏心と回転であること (2) ウエハマークのエッジ角度の変化によりアライメント誤差が生じること (3) レジスト厚さの変化によりアライメント誤差が生じること (4) マスクマークと接するメンブレン断面形状の変化によりアライメント誤差が生じること示した．

以上の結果は，色収差2重焦点法により，本研究が目的とする 30nm (3σ) 以下のアライメント精度をレジストパターンのX線2重露光によりほぼ達成できることを明らかにした．一方

で、課題として（１）焦点はずれによる誤差の低減、（２）オーバヘッド時間の短縮、（３）SiC メンブレンでのコントラスト低下の改善、（４）プロセスウエハでの精度低下の改善が必要であることが明らかとなった。次の４章では、（１）焦点はずれによる誤差の低減と（２）オーバヘッド時間の短縮を目的として、新たにフレネル回折を利用したアライメント計測を提案する。

参考文献

-
1. M. Taniguchi, R. Funatsu, A. Inagaki, K. Okamoto, Y. Kenbo, Y. Kato and I. Ochiai: X-ray exposure system with plasma source for microlithography. Proc. SPIE 1089. (1989)240-251.
 2. R. Viswanathan, D. Seeger, A. Bright, T. Bucelot, A. Pomerene, K. Petrillo, P. Blauner, P. Agnello, and J. Warlaumont: Fabrication of high performance 512K static-random access memories in 0.25 μm complementary metal-oxide semiconductor technology using x-ray lithography. J. Vac Sci. Technol. B 11, 6 (1993) 2910.
 3. Chris P. Kirk: Theoretical Models for the optical Alignment of Wafer steppers. Proc. SPIE 772.(1987)134-141.
 4. Alexander Starikov, Daniel J. Coleman, Alexander D. Lopata, William A. Muth.: Accuracy of overlay measurements: tool and mark asymmetry effects. Optical Engineering, June 1992, Vol. 31, No.6.
 5. James R. Sheats and Bruce W. Smith: *Microlithography-Science and Technology*. Marcel Dekker, New York (1998).
 6. N. Takahashi et al.: Proc. SPIE 923. 47 (1998).
 7. H. Nakabushi: Proc. EPAC 206 (1992).
 8. F. Sato., K. Ito, T. Miyatake, K. Yamazaki, S. Hamada, and Y. Tomita: Synchrotron radiation stepper with new alignment system". J. Vac Sci. Technol. B 10, 6 (1992) 3235-3238.
 9. Y. Tanaka, A. Tanabe, K. Suzuki, T. Miyatake, and M. Hirose: Synchrotron x-ray irradiation effects on the device characteristics and the resistance to hot-carrier damage of MOSFETs with 4 nm thick gate oxides. Journal of Electronic Materials, Vol. 27, No. 8, 1998.

-
- 1 0. T. Shoki, R. Ohkubo, H. Kosuga, and Y. Yamaguchi: Accelerated radiation damage studies of antireflection materials on SiC x-ray mask membrane, J. Vac. Sci. Technol. B 12, 3995 (1994).
 - 1 1. 久保田広, 他編集: 光学技術ハンドブック, 朝倉書店, p152.
 - 1 2. 吉田貞史: 薄膜, 培風館, 5 章, 1990.
 - 1 3. 松居吉哉著: 結像光学入門, 啓学出版, p80, 1988.
 - 1 4. 安居院 猛, 中島正之共著: FFT の使い方, 秋葉出版, 4 章.
 - 1 5. 小瀬輝次: フーリエ結像論, 共立出版, 2 章, 1979.
 - 1 6. 飯塚啓吾著: 光工学, 共立出版, p13.
 - 1 7. L. Levi: Applied Optics 2. Wiley, p727, 1890.
 - 1 8. 南茂夫編著: 科学計測のための波形データ処理, C Q 出版, 1986.
 - 1 9. 松居吉哉著: 結像光学入門, 啓学出版, p80, 1990.

第4章 セクタフレネルゾーンプレートによるアライメント計測

4. 1 緒言

高い信号強度が得られるフレネルゾーンプレートは、マスクとウエハのアライメント計測に広く応用されている。M. Feldman らは円形フレネルゾーンプレートを使った画像処理アライメント法¹を提案し、X線ステッパに搭載されたそのシステムは、 $0.1\mu\text{m}(2\sigma)$ の重ね合わせ精度を達成している²。また、B. Fay らはリニアフレネルゾーンプレートと回折格子を組み合わせたアライメント計測法³を提案し、 $\pm 0.01\mu\text{m}$ の分解能を得ている。さらに千徳らは⁴、マスクに設けた透過型ゾーンプレートで集光したビーム（以下、集光ビームと称す）を、ウエハ上の反射型ゾーンプレートに入射することで検出感度を向上させる方法を提案している。

これらの方式は、いずれもマスクとウエハを斜め方向から検出することによって露光中もサーボを稼動できることから、高いスループットを実現することが可能となる。さらに、光学系の移動がないために、焦点はずれによるアライメント誤差が生じにくいという長所がある。

そこで本章では、2章と3章で提案した色収差2重焦点法の課題となった（1）焦点はずれによる誤差の低減、（2）オーバーヘッド時間の短縮を実現するために、ゾーンプレートを扇型に変形したセクタフレネルゾーンプレート（Sector Fresnel Zone Plate, 以下 SFZP と称す）を提案する。SFZP を用いたアライメント計測法は、斜め方向からレーザ光を入射し、マスクとウエハ上に設けた反射型セクタ FZP で回折した集光ビームを、顕微鏡対物レンズにより拡大し、その拡大した画像からマスクとウエハの相対変位量を計算する。

実験では、Dynamic Random Access Memory（DRAM）半導体デバイス製造の代表的な4つのプロセスウエハを用い、各プロセス層における集光ビームの基本的な結像特性を評価する。次に、X線マスクとウエハを使った実験結果について述べ、最後に SFZP 方式を実用化するための課題を明らかにする。

4. 2 アライメント計測方法

4. 2. 1 セクタフレネルゾーンプレート

一般に入射光（波長 λ ）に対するゾーンプレートの主焦点距離 f と m 番目の輪帯半径 r_m の関係は次式で与えられる⁵。

$$r_m^2 = mf\lambda + m^2(\lambda^2/4) \quad (4. 1)$$

図4. 1 (a) の SFZP では、輪帯半径 r_m を上から下に向かって狭くすることにより、集光ビームの焦点距離 f を連続的に短くしている。ここで、同図 (b) のごとく SFZP の上端から距離 y だけ離れた位置での焦点距離を f_y とおくと、式 (4. 1) から、この位置における輪帯半径 r_{my} は式 (4. 2) で与えられる。

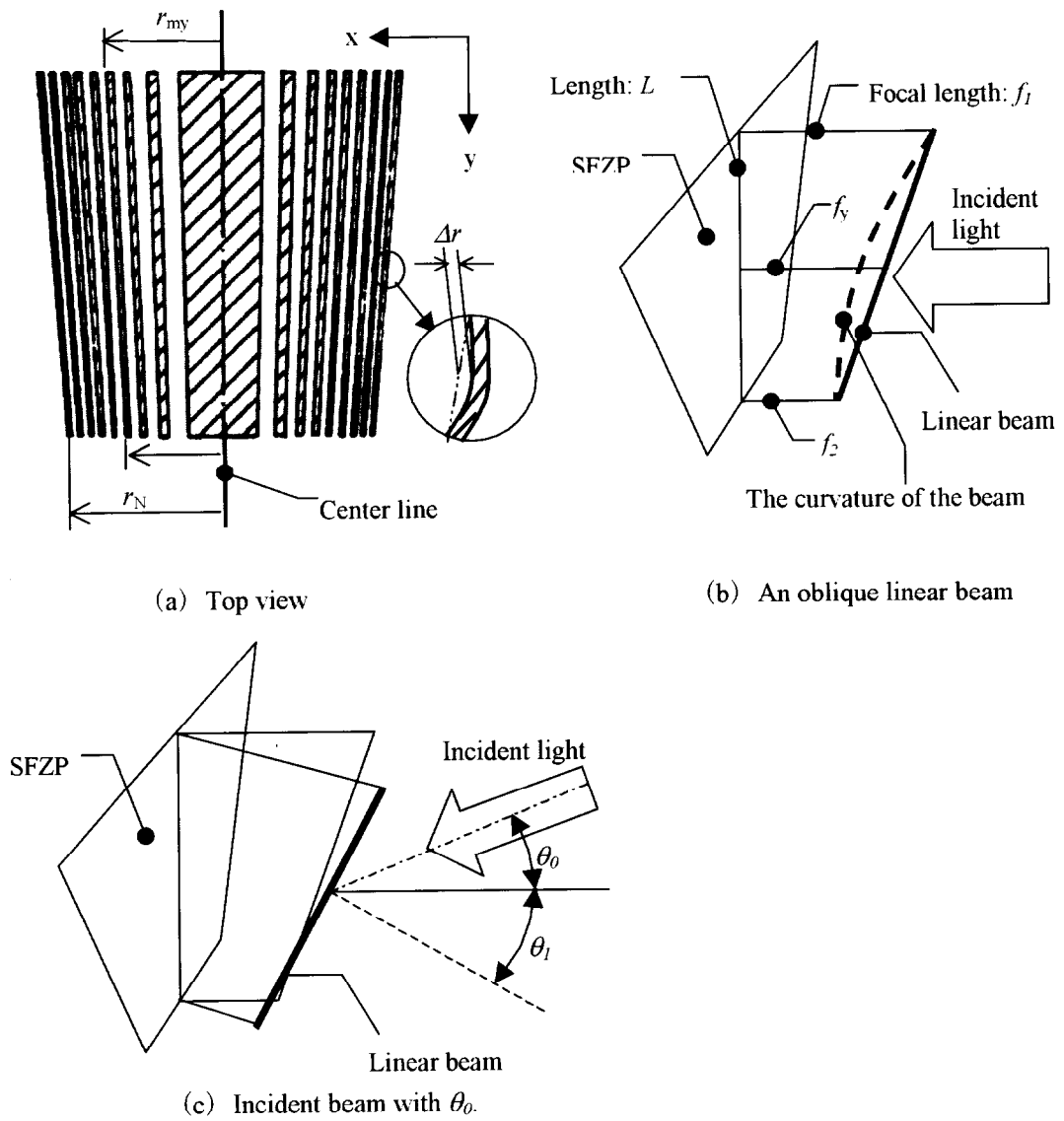


Fig. 4.1 Proposed sector fresnel zone plate

$$r_{my} = mf_y\lambda + m^2\left(\frac{\lambda^2}{4}\right) \quad (4.2)$$

ここで,

$$f_y = f_1 + \frac{f_2 - f_1}{L} y \quad (4.3)$$

ただし、 f_1 と f_2 はそれぞれ SFZP 上端と下端の焦点距離、 L は y 方向の SFZP 全長である。

式 (4. 3) による輪帯は直線とはならず、図 4. 1 (a) の右下丸で囲んだ拡大図で示すように外側にわずかに膨らんだ曲線 (直線との差 Δr) となる。この差 Δr がなければ集光ビームは直線とはならず、図 4. 1 (b) の点線で示す湾曲した曲線となる。同図 (c) において入射光の角度 θ_0 と集光ビームの角度 θ_l が等しい ($\theta_0=\theta_l$) と仮定すれば、次の関係が成立する。

$$f_2 = f_1 - L \sin \theta \quad (4. 4)$$

最外周の輪帯半径 r_N であるゾーンプレート上のビーム直径 (1/e) $2w$ は近似的に式 (4. 5) で表される⁶。

$$2w \approx \frac{2f\lambda}{\pi r_N} \quad (4. 5)$$

式 (4. 5) では、ビーム直径が最小となる SFZP 下端の焦点距離 f_2 を使う。

この集光ビームを拡大する顕微鏡対物レンズ (開口数, Numerical Aperture: NA) の分解能は Airy disk の半径 r_0 ($=0.61\lambda/NA$) で与えられる⁷。ビーム直径 $2w$ を、この分解能以下にすれば $2r_0 \geq 2w$ となる。これより下端における最外周の輪帯半径 r_N ($2r_0 \geq 2w$) は式 (4. 6) で与えられる。

$$r_N \geq \frac{f \cdot NA}{0.61\pi} \quad (4. 6)$$

4. 2. 2 斜方検出

SFZP (表 4. 1) の配置と結像光学系の構成を、図 4. 2 に示す。ウエハ上には、2つのペアになった反射型 SFZP を配置し、その中央にマスクの反射型 SFZP を配置する。マスクとウエハに対して、レーザ平行光を斜め方向 θ_0 から入射し、SFZP で反射した集光ビームを顕微鏡対物レンズにより拡大し、その像をイメージセンサーにて受像する。イメージセンサーは、対物レンズの光軸上に固定されている。この時、集光ビームができる主焦点面と対物レンズの焦点面は、一致させる必要がある。

斜め方向からの検出では、結像光学系の移動が不要となるために、2章と3章で提案した色収差2重焦点法の課題となったオーバーヘッド時間を零とできる。また、対物レンズの移動がないために、対物レンズの焦点はずれによる誤差を生じない。

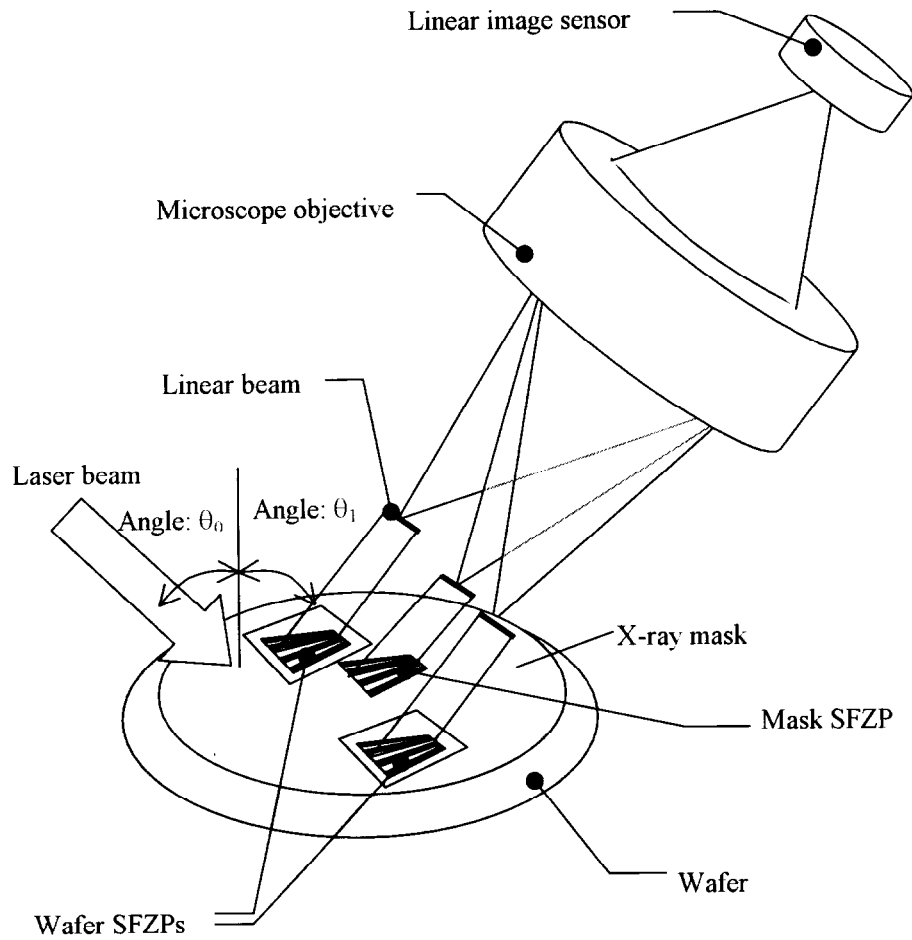


Fig. 4.2 Schematic of x-ray alignment system using sector fresnel-zone-plates (not to scale).

試作した SFZP の仕様を表 4. 1 示す. 射光の波長 $\lambda=0.633 \mu\text{m}$ (He-Ne レーザ), 対物レンズの開口数 $NA=0.35$ (SLWD, ニコン) とした. また X 線マスクとウエハ間のギャップ $g=33\mu\text{m}$ として, 式 (4. 7) によりマスクの焦点距離 f_3 を求めた.

$$f_1 - f_3 = \frac{g}{\cos \theta_0} \quad (4. 7)$$

ただし, f_1 はウエハ SFZP の上端の焦点距離, θ_0 は入射角度 30° である.

Table 4.1 Specification of SFZPs. (μm)

Specification	Wafer	Mask
Wave length: λ	0.633	←
Incident angle: θ_0 (degree)	30	←
Angle of linear beam: θ_1 (degree)	22.5	←
Zone number: m	12	13
Length L of SFZP	60	←
Focal length f on the upper end	77 (f_1)	41 (f_3)
Focal length f on the lower end	54 (f_2)	18 (f_4)
Spot size 2w on the upper end	1.27	0.89
Spot size 2w on the lower end	1.06	0.58
Radius r_N on the upper end	24.4	18.7
Radius r_N on the lower end	20.5	12.7

4. 2. 3 ビデオ信号処理

SFZP からの集光ビームを受像したリニアイメージセンサからは、図 4. 3 (a) のビデオ信号（濃淡レベル 256）が出力される．中央のピーク信号がマスクマークからの集光ビーム，両側のピーク信号がウエハマークからの集光ビームである．ビデオ信号処理の目的は，3 つのピーク間の距離 x_1 と x_2 から，マスクとウエハの位置ずれ量 $\Delta x = (x_1 - x_2)/2$ を求めることである．以下に，ピーク間の距離 x_1 を求める手順を述べる．

まず，ビデオ信号の一次微分波形 $V'(x)$ に対して，式 (4. 8) の相関演算を求め，相関値 A が最大となる x_1 と 2 番目に高い相関値を示す x_3 を求める．

$$A(x_0, x) = \sum_{j=0}^{j=R} V'(x_0 + j) \cdot V'(x_0 + x + j) \quad (4. 8)$$

ただし， x_0 : ピーク信号の左側のある画素番号（図 4. 3 (a) ）， R : ピーク信号を含む x の範囲， x : 2 つのピーク信号間の画素数である．離散データの間隔が $0.25\mu\text{m}/\text{pixel}$ である．

つぎに，測定精度を向上させるために，式 (4. 8) の相関値 A による曲線が 2 次の関数で近似できると仮定し，接線の傾きが零になる距離 x_4 を求める．具体的には，式 (4. 8) で求めた x_1 と x_3 を式 (4. 9) に代入し，距離 x_4 を求め，これを距離 x_1 （図 4. 3 (a) ）とおく ($x_1 = x_4$) ．距離 x_2 についても同様にして計算し，マスクとウエハの位置ずれ量 Δx を計算する．

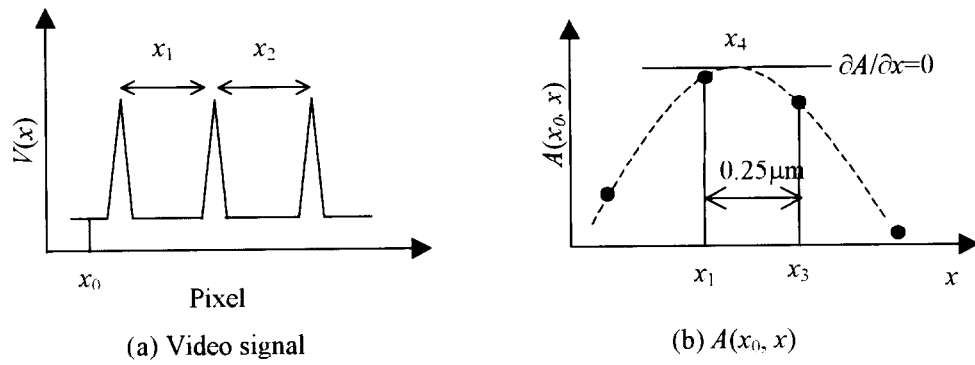


Fig. 4.3 Video signal processing in SFZP alignment.

$$x_4 = \frac{x_3 \frac{\partial A}{\partial x_1} - x_1 \frac{\partial A}{\partial x_3}}{\frac{\partial A}{\partial x_1} - \frac{\partial A}{\partial x_3}} \quad (4.9)$$

4. 3 実験

4. 3. 1 実験条件

実験で用いたウェハ上の SFZP の顕微鏡写真を図 4. 4 に示す. これらは, 光学ステップによりパターンニングした. (a) フィールド層と (c) コンタクト層のアライメントマークは, いずれもシャープなエッジを示した. (b) ゲート層ではパターンエッジに若干の荒れが見られた. (d) アルミ層では, スパッタリングによる粒状パターンとパターンエッジの荒れが目立ち, Al-Cu のスパッタリングにより生じる結晶粒径パターンが見られた.

X 線マスク上の SFZP は, 厚さ $0.75\mu\text{m}$ の Ta 吸収体で形成され, メンブレンには厚さ $2\mu\text{m}$ の窒化膜 SiN_x を使用した. メンブレンの両面にはシリコン酸化膜 (SiO_2) を全面につけて, 反射防止膜として He-Ne レーザ光に対する無反射条件をほぼ満足している. 集光ビームの検出に用いた, 対物レンズを含む結像光学系の総合倍率は 100 倍, 受像素子には PCD (Plasma-

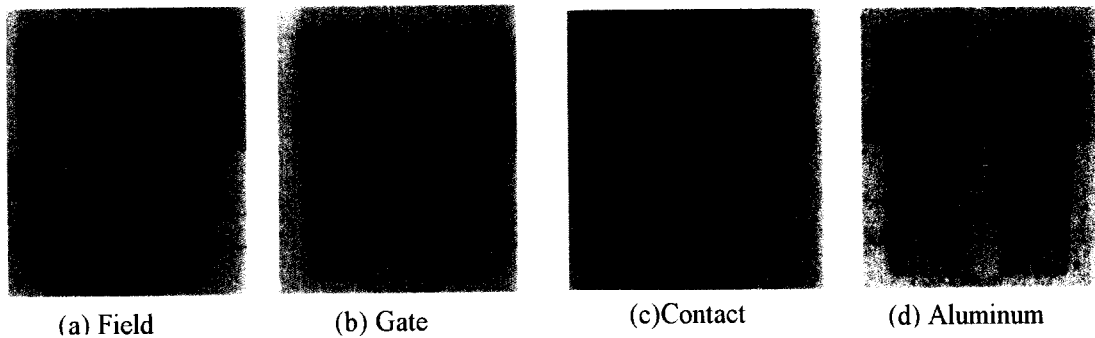


Fig. 4.4 Microscopic photograph of SFZPs patterned on processed wafers.

coupled Device) リニアイメージセンサ (S2304, 浜松ホトニクス製) を用いた。このセンサはフォトダイオードのサイズが $25\mu\text{m}(\text{x}) \times 2500\mu\text{m}(\text{y})$ と縦方向に長く、計測性能に及ぼす影響については 4. 3. 3 節で述べる。

4. 3. 2 集光ビームの結像特性

実験に用いたウエハマークからの集光ビームのビデオ信号波形、結像写真、プロセス断面の構造を、図 4. 5 に示す。シリコンに形成されたゾーンプレートの高さは 830nm 、すべてのウエハ上面には厚さ $1.2\mu\text{m}$ のフォトレジストを塗布した。ビットコンタクトでは、リンガラス (Phosphosilicate Glass: PSG) が絶縁膜としてつけられている。いずれのプロセスにおいても、鮮明な集光ビームの像が得られていることから、SFZP の実用性が確認された。アルミ層では、4. 3. 1 節で述べた Al-Cu のスパッタリングで生じた結晶粒径パターンによる表面荒さ⁸にも関わらず、直線性のよい集光ビームが得られた。

ノイズレベル (Noise) は、アルミ層で 150mV 前後ともっとも高く、フィールド層で 80mV 前後の低い値を示した。ピーク信号 (Peak) は、いずれのサンプルも 700mV 以上を示したことから、ピーク信号とノイズレベルの比 $[20 \times \log(\text{Peak}/\text{Noise})]$ は、11 から 15dB の間であった。

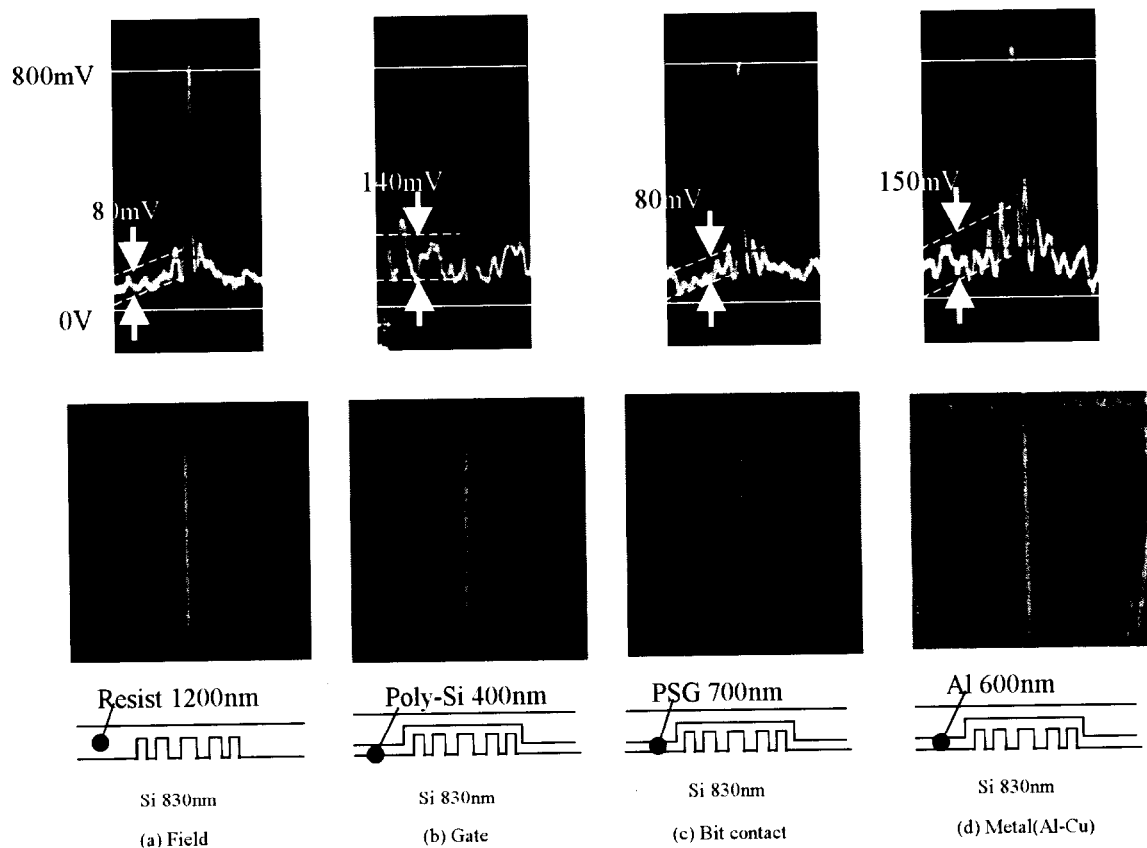


Fig. 4.5 Microscope photographs of linear beam reflected on wafer SFZPs with different processed wafers.

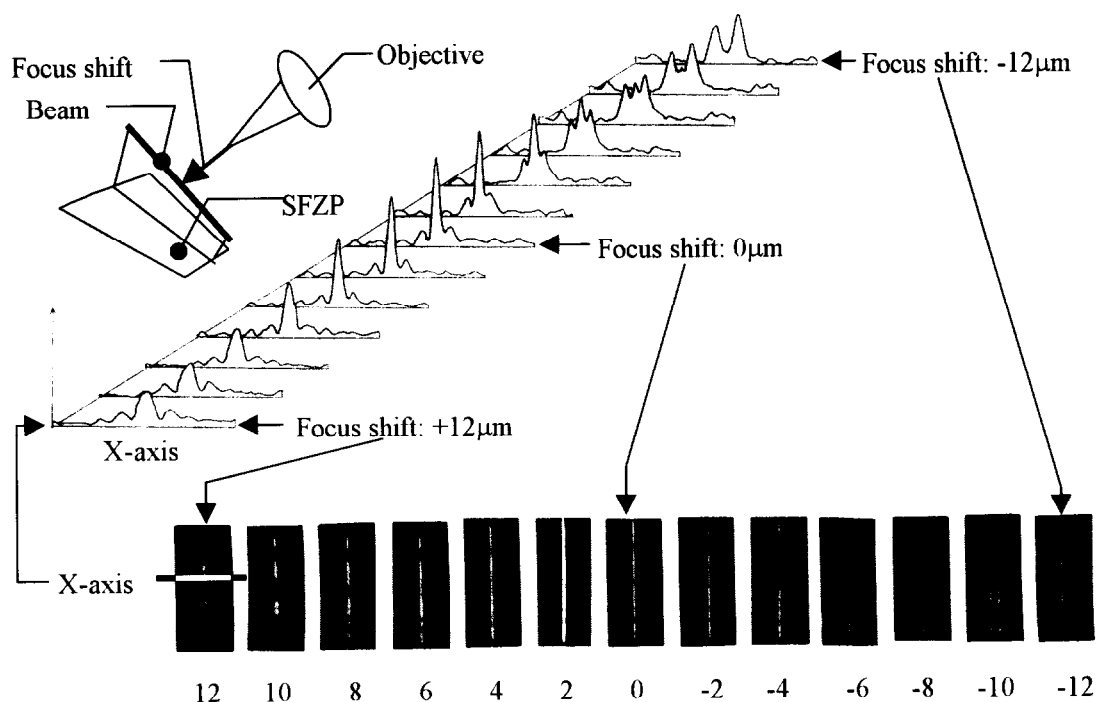


Fig. 4.6 Variation of linear-beam caused by focus-shift of the microscope objective.

SFZP を使ったアライメント計測において、対物レンズの焦点はずれにより生じる集光ビームの変化を測定した。実験方法は、図 4. 6 の左上に示す集光ビームを検出する対物レンズを、光軸方向に $-12\mu\text{m}$ から $+12\mu\text{m}$ の範囲で移動させた。ウェハサンプルにはフィールド層に形成された SFZP を用いた。図 4. 6 下の写真は、焦点はずれにより変化する集光ビームの像を示す。また、図中央のピーク信号波形は、集光ビームのほぼ中央にリニアイメージセンサにおいて、受光した時のビデオ信号波形である。この結果から、1) 焦点はずれ $-6\mu\text{m}$ で、集光ビームのピーク強度が低下し、焦点はずれ $-10\mu\text{m}$ では、集光ビームの数が 2 個となる、2) 対物レンズの焦点が、集光ビームから $-12\mu\text{m}$ と $+12\mu\text{m}$ はずれた場合でも、集光ビームは $1/3$ 以上のピーク強度を示した。これは、フレネルゾーンプレートの集光ビームを、光学レンズで結像したときの特徴である⁹。この焦点はずれによる集光ビームの像の変化が、計測誤差に与える影響については、4. 3. 3 節で述べる。

4. 3. 3 アライメント計測性能の評価

X 線マスクとウェハ上の SFZP で反射した集光ビームを、対物レンズにより拡大した像を、図 4. 7 (a) に示す。中央のスリット状に見られる像が、マスク SFZP からの集光ビーム、両側にあるスリット状の像が、ウェハ SFZP (ゲート層) からの集光ビームである。対物レンズの焦点面と、SFZP の主焦点面 f_0 が一致することにより、鮮明な像が得られている。集光ビームの両側に見えている複数のスリット像は、SFZP の焦点距離 $\pm f_0/3, f_0/5, \dots$ に集光した回折光である¹⁰。

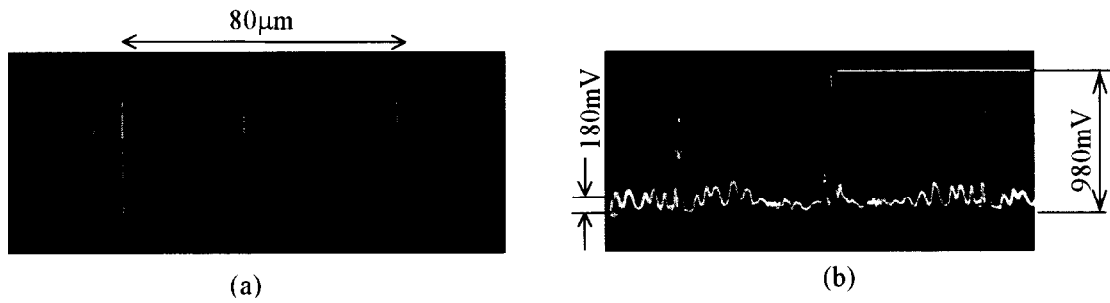


Fig. 4.7 (a) A microscope photograph of alignment video images and (b) an alignment video signal of SFZPs

図4. 7 (b) は、リニアイメージセンサからのビデオ信号波形を示す。中央のマスキマークからのピーク信号は 920mV、両側のウエハマークからのピーク信号は 630mV である。ノイズレベルは約 180mV である。両者の S/N 比は、マスキ信号で 14dB、ウエハ信号で 11dB であった。

SFZP の計測精度を評価するために、マスクステージに相対変位を与え、その変位量を SFZP により測定することで検証した。測定結果を図4. 8に示す。グラフの横軸はマスクステージの移動量 (nm) を表わす。マスクステージの駆動には piezo 圧電素子を用い、その変位は静電容量センサにて測定した。図中四角のプロット (■印) は計測値 45 回の平均値を表わす。これから約 4% (測定範囲 180nm での誤差 8nm より) の直線性が得られている。図中三角のプロット (△印) は検出値のばらつき (3σ, n=45) を表わし、これから、8nm (3σ) 以下の検出再現性が得られた。同様な実験を 4 種類のプロセスウエハに対して行なった結果、7nm~9nm (3σ) の検出再現性と 4%~6% の直線性を得た。

対物レンズの焦点はずれにより生じるアライメント誤差を評価するために、本来は一致しているはずの対物レンズの焦点面を、SFZP の主焦点面の位置からずらせることにより測定を行った。実験方法は、図4. 9の右に示す対物レンズを、光軸方向に -6μm から +6μm まで移動させ、集光ビームの像ぼけを発生させた。測定結果を左側のグラフに示す。グラフの横軸は、対物レンズ

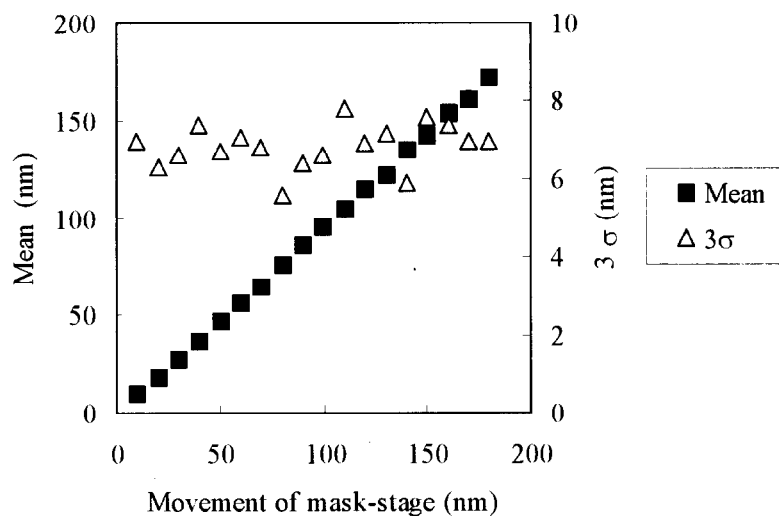


Fig. 4.8 Measured displacement between mask and wafer by using SFZP

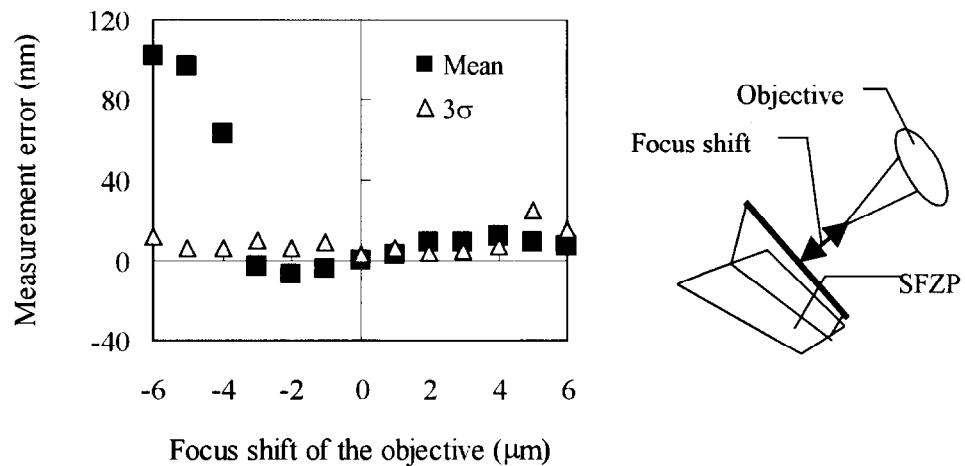


Fig. 4.9 Measurement error caused by focus-shift of the objective.

の焦点はずれ量(μm), 縦軸は焦点はずれによる計測誤差 (nm) である。負の焦点はずれでは、焦点はずれ-4μm から急に大きな誤差を生じ、焦点はずれ-6mm では 102nm の誤差を生じている。一方、正の焦点はずれでは、0μm から+6μm の間で生じた誤差は 13nm 以下と小さい。負の焦点はずれで大きな誤差を生じた原因は、4. 3. 2 節で述べた負の焦点はずれにより、集光ビームの数が 2 個に増えたことだと思われる。

集光ビームの直線性を評価するために、本来は集光ビームの中央に合わせている対物レンズの焦点を、図 4. 10 の右に示すように集光ビームの上から下にずらせながら測定した。この測定を、図 4. 7 のビデオ画像に対して行った結果を、図 4. 10 の左のグラフに示す。横軸は、対物レンズを集光ビームの長手方向にそって移動させた量 $y=0, 5, 10, 15, 20 \mu\text{m}$ である。縦軸は、移動により生じた計測誤差である。対物レンズを $20\mu\text{m}$ 移動させた場合、検出値は、 $-16 \text{ nm} \sim +17 \text{ nm}$ の範囲で変化した。これは比較的良好な直線性だといえる。この理由は、集光ビーム自体の直線

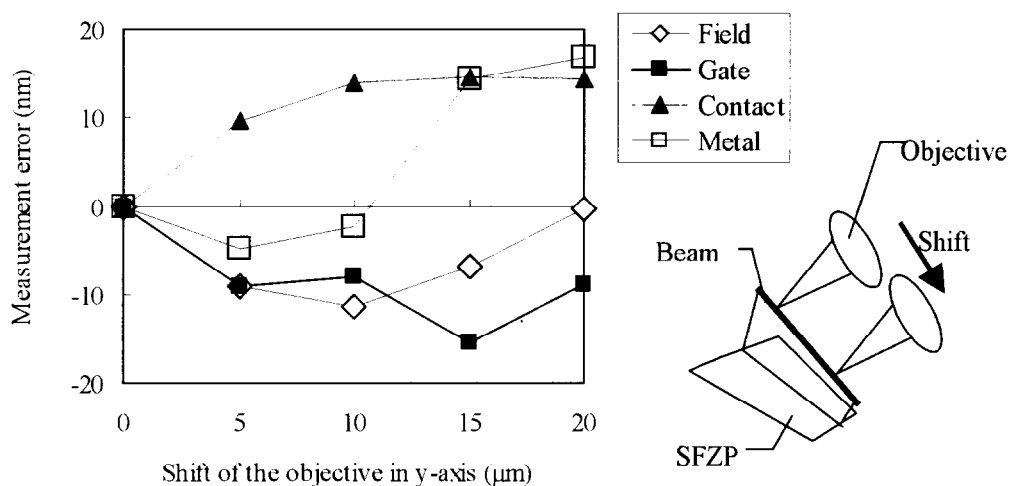


Fig. 4.10 Measurement error caused by beam-linearity of SFZP

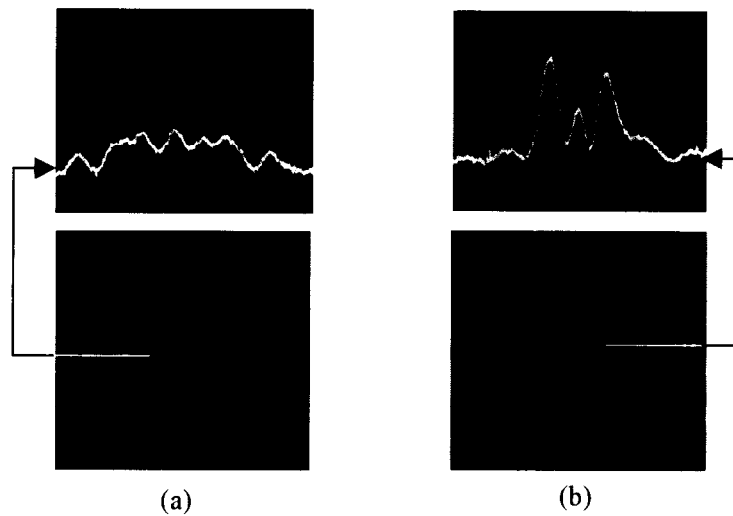


Fig.4.11 (a) Split beam in Aluminum layer. (b) Split beam in field layer.

性の良さに加えて、集光ビームを受光するリニアイメージセンサの長手方向の画素サイズが、 $25\mu\text{m}$ と長いため、その平均効果も貢献していると思われる。

4. 4 考察

4. 4. 1 プロセス薄膜が集光ビームに与える影響

ウエハ上に形成される反射型 SFZP では、反射光に位相分布を与えて回折を起こしているために、ゾーンプレート段差の高さやレジスト膜厚が回折効率¹¹を変化させる。図 4. 11 (a) は、ゾーンプレート段差の高さの変化により集光ビームの数が 2 本になった場合（フィールド層）である。中央に集光していたビームの強度は、ほぼ零となった。図 4. 11 (b) は、レジスト厚さの変化 ($1\mu\text{m}$) により、集光ビームが 3 本になった場合（アルミ薄膜付きウエハ）である。

この問題を解決する手段として、波長の異なる複数のレーザ入射光を切り替える使用する方法が提案されている。千徳らは⁴、ゾーンプレートに入射するレーザ光として、2 種類の波長 $\lambda_1=488\text{nm}$ 、 $\lambda_2=633\text{nm}$ を準備し、プロセス薄膜に応じて切り替えることにより、安定した集光ビームの強度を得ている。この方法は、本研究で提案した SFZP を使ったアライメント計測においても有効だと思われる。今後は、この方法を SFZP に適用し、プロセス薄膜の変化に対する余裕度を、実用的なレベルまで拡大することが課題である。

4. 4. 2 反射防止膜と遮光膜の効果

SFZP を使ったアライメント計測では、可干渉性の高いレーザ光（波長 λ ）を、斜め方向 θ_0 から X 線マスクとウエハに同時に入射すると、図 4. 11 (a) の多重干渉を生じる。マスクとウエハ間で 3 回反射した光①と、ウエハ上で反射した光②が干渉するため、わずかなギャップ変化により、集光ビームのピーク強度は増減を繰り返す。この増減の 1 周期に相当するギャップ変化 $4g_0$

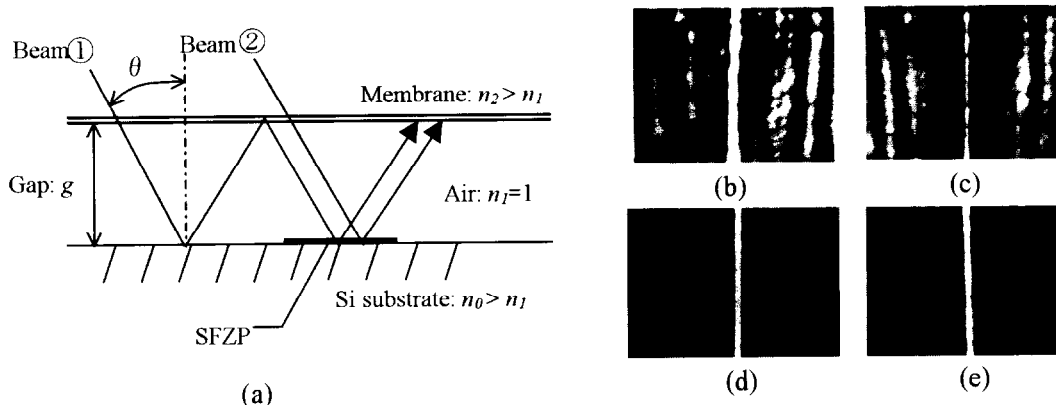


Fig. 4.11 (a) An optical interference between beam① and beam②. Refractive index: n_0, n_1, n_2 . (b) Gap change $\Delta g_0 = 0 \mu\text{m}$ without Anti-reflection coating(ARC). (c) $\Delta g_0 \approx 0.1 \mu\text{m}$ without ARC. (d) $\Delta g_0 = 0 \mu\text{m}$ with ARC. (e) $\Delta g_0 \approx 0.1 \mu\text{m}$ with ARC.

は、次式 (4. 1 0) で与えられる.

$$\Delta g_0 = \frac{\lambda \cos \theta_0}{3} \quad (4. 1 0)$$

これに、実験条件 $\theta_0 = 30^\circ$, $\lambda = 0.633 \mu\text{m}$ を代入すると、 $\Delta g_0 = 0.18 \mu\text{m}$ の周期でビーム強度が、増減を繰り返すことがわかる.

図 4. 1 1 (b) と同図 (c) は、反射防止膜をつけていない X 線マスクの場合に、ウエハとマスクのギャップを、基準値 ($33 \mu\text{m}$) と基準値に対して、 $0.1 \mu\text{m}$ だけ広くした場合のウエハ SFZP からの集光ビームの像である. ギャップ $\Delta g_0/2 \approx 0.1 \mu\text{m}$ の変化により、集光ビームの像の強度と幅が変化している. 一方、図 4. 1 1 (d) と同図 (e) は反射防止膜をつけた X 線マスクの場合に、ウエハとマスクのギャップを、基準値 ($33 \mu\text{m}$) と基準値に対して $0.1 \mu\text{m}$ だけ広くした時の、ウエハ SFZP からの集光ビームの像である. ギャップ変化による集光ビームの像の強度と幅の変化はほとんど見られない.

反射防止膜をつけていない図 4. 1 1 (b) と同図 (c) では、ギャップが変化することにより、集光ビームの像の直線性が変化している. 一方、反射防止膜をつけた同図 (d) と (e) では、ギャップが変化しても、集光ビームの像の直線性はほとんど変化しない. これから、多重反射による集光ビームの像の強度、幅、直線性の変化に対しては、無反射条件を満足する反射防止膜が有効な手段となることがわかった.

X 線マスクでは、図 4. 1 2 (a) のごとく反射光①と透過光②が干渉するため、ギャップ変化より集光ビームの強度が、増減を繰り返す. この増減の 1 周期に相当するギャップ変化 Δg_1 は次式で与えられる.

$$\Delta g_1 = \frac{\lambda \cos \theta_0}{2} \quad (4. 1 1)$$

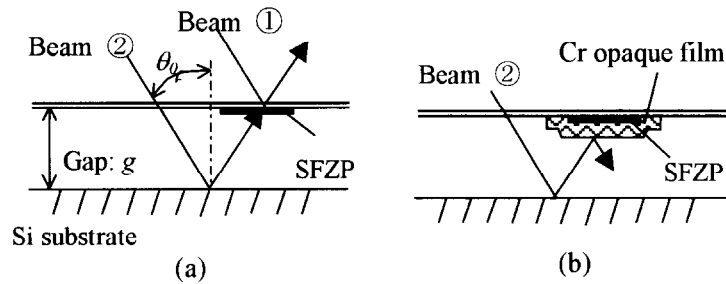


Fig.4.12 (a) Optical interference between transmitted beam ① and reflective beam ②.
(b) Cr opaque film.

これに、実験条件 $\theta_0=30^\circ$, $\lambda=0.633\mu\text{m}$ を代入すると、 $\Delta g_I=0.27\mu\text{m}$ の周期でビーム強度が増減を繰り返すことがわかる。この光干渉を避けるためには、透過光②を完全に遮断する同図 (b) の Cr などの遮光膜が有効である^{1,2}。

4. 4. 3 SFZP によるアライメント精度の考察

4. 3. 3 項では、SFZP の計測性能として、1) 検出再現性：7nm～9nm (3σ)，2) 焦点はずれによる誤差の最大値：102nm (焦点はずれ-6 μm ～6 μm の範囲において)，集光ビームの直線性による誤差の最大値：17nm を得た。ここでは、焦点はずれの範囲を $\pm 3\mu\text{m}$ と仮定し、SFZP により期待できるアライメント精度を予想する。

$\pm 3\mu\text{m}$ の焦点はずれによる誤差の最大値：9nm (図 4. 9 における焦点はずれ+3 μm での検出誤差) から、予想されるアライメント誤差は、9nm (検出再現性) +9nm (焦点はずれによる誤差) +17nm (直線性による誤差) =35nm となる。アライメント精度 ($|\text{Mean}|+3\sigma$) は、1. 2. 1 節で述べたように最少線幅の 1/3～1/5 が要求されることから、アライメント精度 35nm は、最少線幅 $35 \times 5 = 175\text{nm}$ から $35 \times 3 = 105\text{nm}$ に相当する。集積度の上では、256 メガビットから 4 ギガビットの DRAM 製造に対応できる可能性がある。

4. 5 結言

本章では、2 章で提案した色収差 2 重焦点法の課題となった (1) 焦点はずれによる誤差、(2) オーバヘッド時間の短縮を解決するために、セクタフレネルゾーンプレートを提案した。試作した 1 軸のアライメント装置を使って、X 線マスクとウエハの位置を精密に計測できることを明らかにした。得られた結果を以下にまとめる。

- 1) フレネル回折による集光ビームの角度を、自由に設定することが可能なセクタフレネルゾーンプレート (SFZP) を提案し、その設計指針を示した。
- 2) X 線マスクとウエハに反射型 SFZP を配置し、斜め方向からレーザー光を入射し、SFZP で反射

回折した集光ビームの光学像からマスクとウエハの位置を検出する方法を明らかにした。

- 3) 上記2) で試作したアライメント装置を使って、4種類のプロセスウエハ上に形成した SFZP からの集光ビームを検出した結果、700mV 以上のピーク強度とノイズレベルに対する強度比として 11-15dB を得た。
- 4) 試作した 1 軸のアライメント装置を使って、X 線マスクと 4 種類のウエハの位置を繰り返し測定した結果、7~9nm (3 σ) の検出再現性と 4~6%の直線性を得た。ただし、対物レンズの焦点面と集光ビームの主焦点面がはずれた場合は誤差を生じる。
- 5) ウエハに配置した SFZP からの集光ビームの光学像は、レジストの厚さの変化により、その強度が零になることを示し、レジストを含むプロセス薄膜の変化に対する適応性を改善する必要があることを明らかにした。
- 6) X 線マスクとウエハ間のギャップ変動により、ウエハに配置した SFZP からの集光ビームの強度が、周期的に変化することを示した。対策として反射防止膜が有効であることを述べた。
- 7) X 線マスクとウエハ間のギャップ変動により、マスクに配置した SFZP からの集光ビームの強度が、周期的に変化することを示した。対策として遮光膜が有効であることを述べた。

以上の結果は、セクタフレネルゾーンプレートを使ったアライメント計測により、2章で提案した色収差2重焦点法の課題となった(1)焦点はずれによる誤差の低減、(2)オーバヘッド時間の短縮を解決できることを明らかにした。課題としては、あらたに(5)プロセス薄膜の変化に対する適応性を改善する必要があることを示した。次の5章では、色収差2重焦点法とセクタフレネルゾーンプレート法に残された5種類の課題を解決するために、エッジ散乱光によるアライメント計測を提案する。

参考文献

-
1. M. Feldman, A. D. White, D. L. White: Application of zone plates to alignment in microlithography", J. Vac. Sci. Technol., Vol. 19 (4), 1224 (1981).
 2. B. Fay, W. T. Novak: Automatic x-ray alignment system for submicron VLSI lithography. Solid State Tehnology/May 175(1985).
 3. B. Fay, J. Trostel, and A. Frichet: Optical alignment system for submicron x-ray lithography. J. Vac. Sci. Technol., Vol. 16 (6), 1954 (1979).
 4. Koichi Sentoku and Takahiro Matsumoto: Advanced synchrotron radiation stepper alignment system performance, J. Vac. Sci. Technol., Vol. 16 (6), 3466 (1998).
 5. M. Feldman, A. D. White, and D. L. White: Application of zone plates to alignment in microlithography, J. Vac. Sci. Technol., Vol. 16(4), 1224 (1981).
 6. K. Kodate, T. Kamiya, Y. Okada, and H. Takenaka: Focusing Characteristics of high-efficiency fresnel zone plate fabricated by deep ultraviolet lithography, Japanese Journal of Applied Physics, Vol. 25 (2), 223(1986).
 7. 村田和美著, 光学, サイエンス社, p178, 1991.
 8. 原徹編, 超 LSI プロセスデータハンドブック, サイエンスフォーラム, p316, 1982.

-
9. R. G. Wenzel, J. M. Telle, and J. L. Carlsten: Fresnel diffraction in an optical system containing lenses. *Journal of Optical Society of America*. Vol. 3, No.6. 838 (1986).
10. 辻内順平著, 光学概論Ⅱ, 朝倉書店, p109
11. レーザ学会編, レーザハンドブック, オーム社, p622, 1982.
12. M. Fukuda, M. Suzuki, and A. Shibayama: Improvement of alignment accuracy of an SR stepper, *Microelectronic Engineering*, vol. 23, p. 189, 1993.

第5章 エッジ散乱光によるアライメント計測

5. 1 緒言

第2章で提案した色収差2重焦点法により、 31nm ($|\text{Mean}|+3\sigma$) 以下のアライメント精度を達成できることを明らかにしたが、課題として、(1) 焦点はずれによる誤差の低減、(2) オーバヘッド時間の短縮、(3) SiC メンブレンでのコントラスト低下の改善、(4) プロセスウエハでの精度低下の改善が必要であることを述べた。

第4章ではセクタフレネルゾーンプレートによるアライメント計測方法を提案し、これにより色収差2重焦点法の課題となった上記(1)と(2)を解決できることを述べた。あらたな課題として(5) プロセス薄膜の変化に対する適応性の改善が必要であることを述べた。

本章では、色収差2重焦点法とセクタフレネルゾーン法に残された(1)から(5)の課題を解決するために、新たにエッジ散乱光によるアライメント計測法を提案し、その基本的な計測性能を評価する。提案するアライメント計測法では、アライメントマークとして2次元配列パターンを用い、パターンエッジからの後方散乱光を光学的に拡大した像から、マスクとウエハの相対位置を計測する。エッジ散乱光の照明として白色光を用いることにより、プロセス薄膜の変化に対する高い適応性を実現することが可能である。これは、マスク照明に単色光を用いる色収差2重焦点法、可干渉性の高いレーザ光を用いるセクタフレネルゾーンプレートに比べて優れた特徴である。

実験では、SR 照射耐性とヤング率の高さから、X 線マスクのメンブレンの材料として最適だと考えられている SiC メンブレンを用いる。SiC メンブレンの分光透過率は、SiNx メンブレンに比べて低いため、アライメント信号波形の低下や検出分解能の低下の原因となることが報告されている^{1, 2}。マスクパターンの位置精度を向上させるために、メンブレン厚さを増やしたり³ (例えば、 $2\mu\text{m}$ から $5\mu\text{m}$)、薄膜エッチングストップ (例えば、Cr) が研究されているが、これらの対策は、分光透過率を低下させる要因となる。そこで本章では、厚さ $2\sim 5\mu\text{m}$ の SiC メンブレンとエッチングストップとして Cr をつけた SiC メンブレンを準備し、それらに対する計測精度を詳しく述べる。

ウエハマークでは、DRAM の代表的な4つのプロセス薄膜で形成されたサンプルを用いた。特に、アルミ配線層におけるアライメント精度の低下が報告^{4, 5, 6, 7}されていることから、5種類のアルミ薄膜付きウエハを準備し、それぞれに対する計測精度について詳しく述べる。

5. 2 エッジ散乱光によるアライメント計測

5. 2. 1 アライメントマークと結像光学系

図5. 1 (a) は、アライメントマークとして X 線マスクとウエハに配する2次元配列パタ

ーンを示す。ウエハマーク（□印）を構成する2次元配列パターンは3列^(x)×14行^(y)、マスクマーク（■印）を構成する2次元配列パターンは3列^(x)×5行^(y)である。また、配列を構成する矩形パターンの大きさは1^(x)×2^(y) μm、また矩形パターン間の距離は4^(x)×4^(y) μmであり、これら寸法はマスクマークとウエハマークで共通である。

この2次元配列パターンにより、ウエハ薄膜プロセスとマスク製造プロセスにより生じるアライメント計測誤差を、平均効果によって低減することができる。同図（b）に示すようにマスクマークを構成する矩形パターンは、回路パターンと同時にX線吸収体で形成される。ウエハマークを構成する矩形パターンは、レジスト膜あるいはシリコンウエハ上に形成される。

両方の矩形パターンのX方向のエッジ（幅1 μm）で反射する後方散乱光を、同図（c）に示す。顕微鏡対物レンズにて集光し、その像を拡大している。ここで、対物レンズを通して照明光を入射することによって、光軸ずれによる計測誤差を生じない構成としている。また、対物レンズを30°傾けることにより、図3.13のような露光X線とアライメント計測系の干渉を回避でき、露光中も光学系を移動することなくマスクのウエハの位置計測が可能である。

マスクとウエハに入射した光は、パターンエッジで反射し、後方散乱光だけが対物レンズに入射し、エッジ像を結ぶ。一方、ウエハマークのコントラストを阻害する正反射光は、マスク表面で全反射するため、対物レンズには戻ってこない。従って、正反射光によるウエハマークのコントラスト低下を改善することが可能である。これは、反射率が高くなるSiCメンブレンでのコントラスト低下の改善に有効である。この点については、5.4節で述べる。

マスクとウエハ間のギャップ変動により、同図（d）のごとくウエハがマスクに近づいた場合、焦点はずれによりA（同図(c)）のエッジ像は、“ぼけ”るが、焦点位置がBに移動することによりBのエッジ像が鮮明に結像する。従って、Bのエッジ像により精密な位置計測が可能である。これは、像が“ぼけ”る焦点はずれによる誤差の低減が可能であることを示している。この特徴については、後の節5.2.3節で述べる。

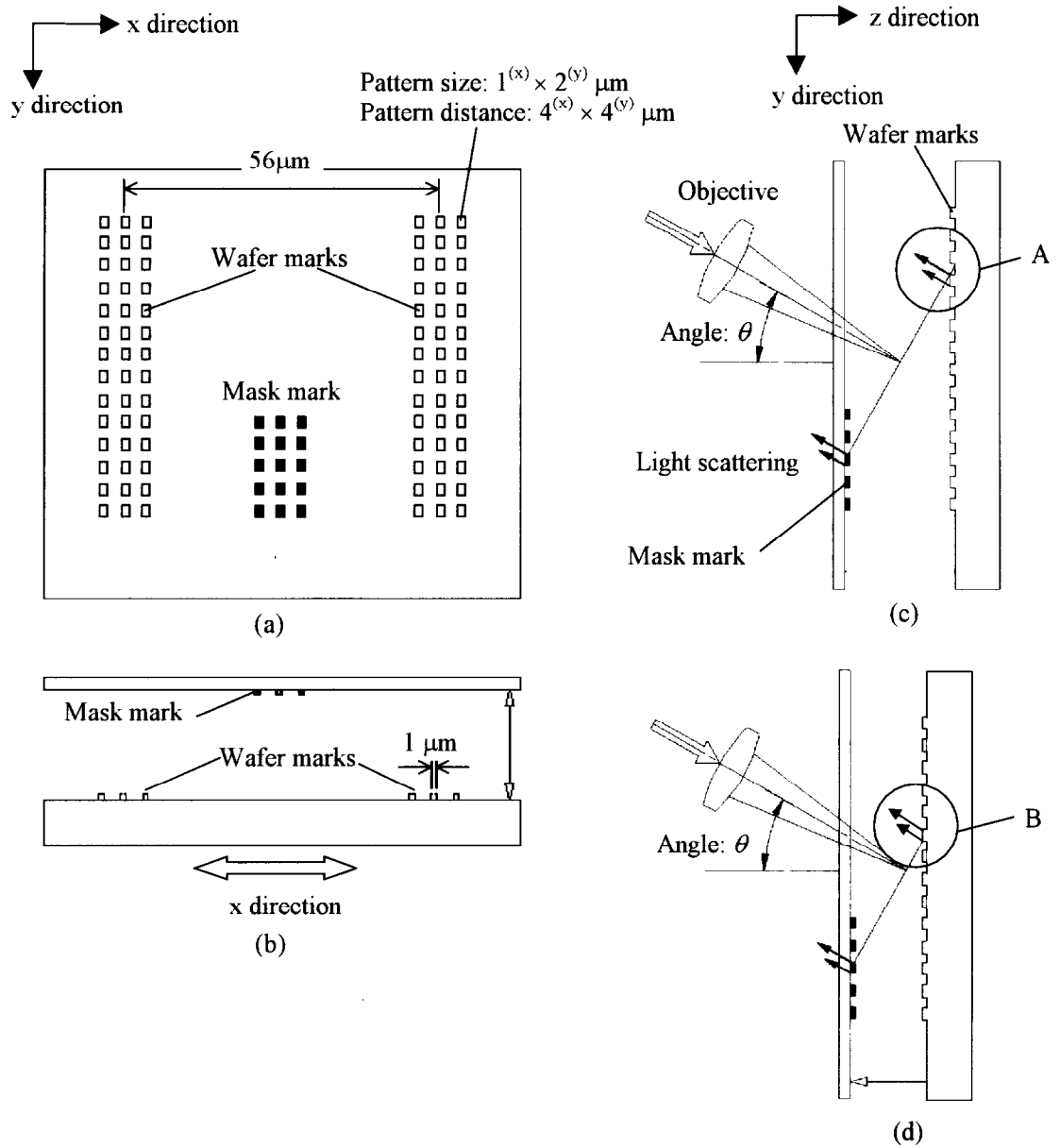


Fig. 5.1 (a) Matrix array patterns for both mask mark (illustrated with black rectangular) and wafer marks (illustrated with white rectangular). (b) Proximity gap between x-ray mask and wafer. (c) Light scattering reflected on edges of matrix array patterns and microscope objective with oblique axis. (d) Movement of edge-scattering in y direction.

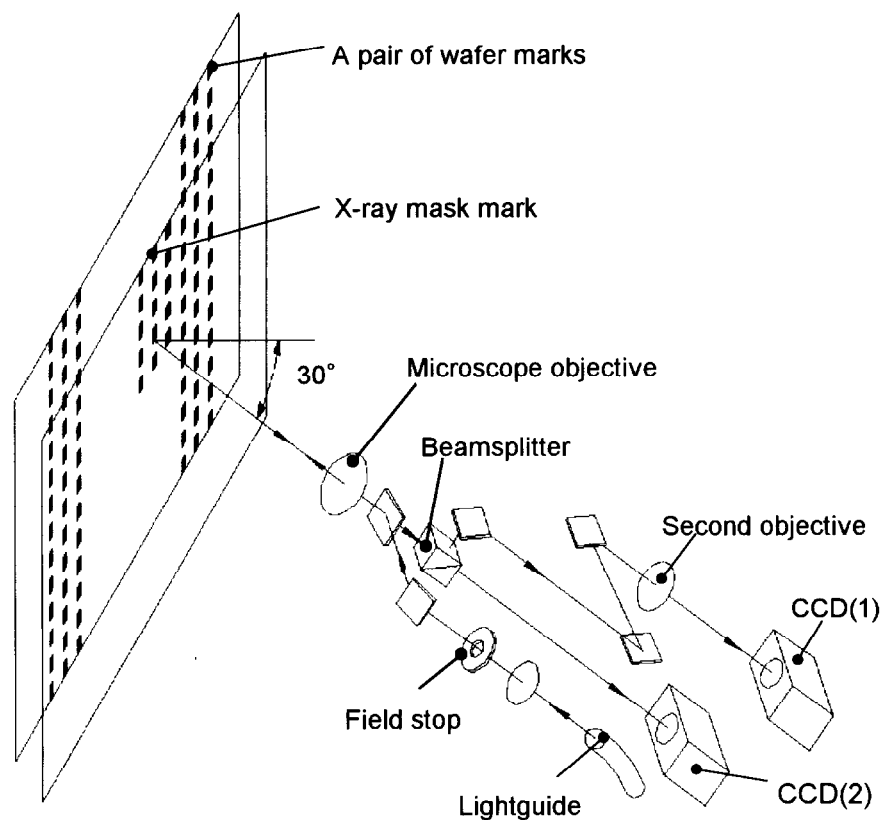


Fig. 5.2 Schematic of a microscope objective based optical system

結像光学系の構成を図5. 2に示す. 光学系の光軸をマスク面に対して 30° 傾けることによりX線と光学系との干渉を避けるとともに, 露光中もX線マスクとウエハの位置検出ができる配置とした. 対物レンズ(ニコン製, $NA=0.35$, 20倍)の実像は, ビームスプリッタにより2つに分かれ, 2台ある CCD カメラ上に同時に結像する. 対物レンズの実像を結ぶ CCD カメラ(2)の画像は, その視野が約 $670\ \mu\text{m} \times 500\ \mu\text{m}$ と広いことから, マスクとウエハの粗い位置決め使用する.

第二対物レンズ(5倍)でさらに拡大した像は, CCDカメラ(1)に結像し, その画像はマスクとウエハの精密なアライメント計測のために使用する. 照明光は, 光源ランプ(metal halide lamp)から光ライトガイドにより, この観察光学系に導く.

対物レンズに入射した照明光は, 対物レンズの表面や鏡枠面に当たって反射し, 迷光(フレア)⁸となって, 像のコントラストを低下させる要因となる. この有害反射光を低減するために, 視野絞り(field stop)を照明光学系の光路に設けた.

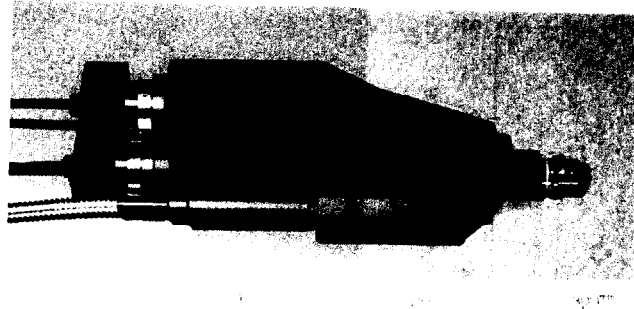


Fig. 5.3 The optical system for an x-ray aligner. Two CCD cameras are mounted on the optical system. An optical lightguide connects a remotely located light source to this optical system.

試作したアライメント顕微鏡の写真を図 5. 3 に示す。寸法は、長さ 300 mm×幅 70 mm×高さ 90mm である。重量は約 1kg である。アライメント顕微鏡の左端には、CCD カメラ 2 台を装着した。アライメント顕微鏡の右端には、対物レンズ（ニコン製、 $NA=0.35$ 、20 倍）を装着した。アライメント顕微鏡の手前左側の部分には、照明光を導くために光ライトガイドを取り付けた。本章の実験には、このアライメント顕微鏡を使用した。

5. 2. 2 ビデオ信号処理

アライメント顕微鏡に取り付けた 2/3 インチ白黒 CCD カメラ（東京電子製）に結像した、エッジ散乱光の光学拡大像（光学倍率 $m=100$ ）を、図 5. 4 (a) に示す。画面上方にある 2 組の点像配列は、ウエハマークのパターンエッジ（幅 $1\mu\text{m}$ ）で反射し、厚さ $2\mu\text{m}$ の SiC メンブレンを透過してきた後方散乱光の像である。画面下方の中央にある点像配列は、マスクマークのパターンエッジ（幅 $1\mu\text{m}$ ）で反射した後方散乱光の像である。この時のマスクとウエハのギャップは $20\mu\text{m}$ である。

ビデオ信号処理では、図中四角（□）で囲んだ画像情報を垂直方向に加算する（投影分布処理⁹⁾）ことにより、同図 (b) の 1 次元のデータ列 $V(n)$ 、（ n は水平方向のピクセル番号）に変換する。加算する a 本の水平走査線は、対物レンズ（開口数： b ）の焦点深度（ λ/b^2 、ただし、 λ は照明光の波長）にほぼ含まれる必要があることから式 (5. 1) で与えられる。

$$a \approx \frac{m\lambda}{cb^2 \tan \theta} + 1 \quad (5. 1)$$

ただし、 c は CCD カメラの y 方向の画素サイズ、 m は光学倍率、 θ はマスク面に対するアラ

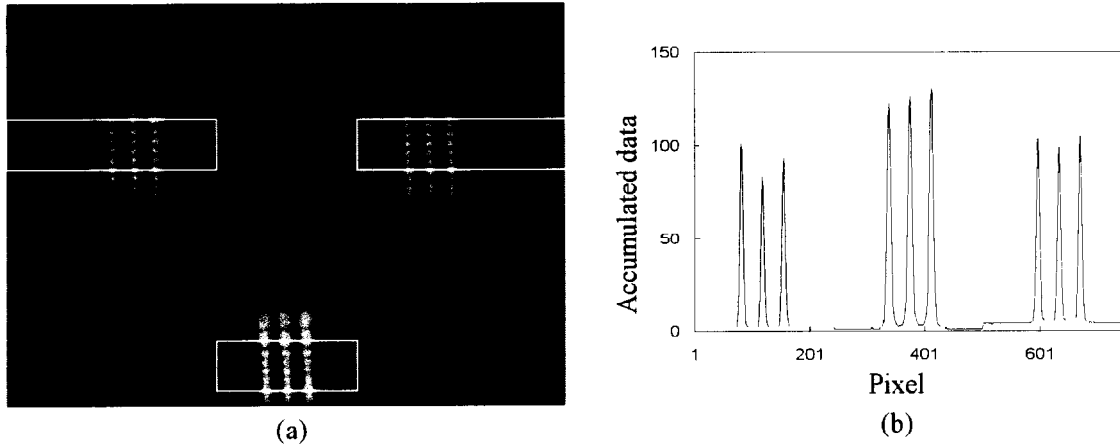


Fig. 5.4 (a) Alignment video images focused on CCD camera. The spot images on the top show the scattering reflected on the pattern edges of wafer marks, which transmitted a 2 μm -thick polished SiC membrane. The spot images on the bottom show the scattering reflected on the pattern edges of mask mark. (b) Accumulated video data.

イメント顕微鏡の傾きである。式 (5. 1) に、照明光の中心波長 $\lambda=0.587\mu\text{m}$ 、 $\theta=30^\circ$ 、 $b=0.35$ 、 $c=14\mu\text{m}$ 、 $m=100$ を代入すると $a=60.2$ となり、加算する水平走査線数は 60 本となる。

データ列 $V(x)$ の間隔は、CCD カメラの x 方向の画素サイズ $d=11\mu\text{m}$ を光学倍率 100 で除した $0.11\mu\text{m}$ である。このデータ列 $V(x)$ を使ってマスクマークとウエハマークの中心位置から、マスクとウエハの相対位置を求めるアルゴリズムは付録 [ビデオ信号処理] に記す。

5. 2. 3 ギャップ可変機能

マスクとウエハ間のギャップ g を、 $g=15\mu\text{m}$ から $g=25\mu\text{m}$ まで変化させた場合のビデオ画像を図 5. 5 に示す。鮮明な散乱光の像が並ぶ図中四角 (□印) は、ビデオ信号処理において投影分布処理を行う範囲である。ウエハを移動させることにより、マスクとウエハ間のギャップを $g=15\mu\text{m}$ (同図 (a)) から $g=20\mu\text{m}$ (同図 (b))、 $g=25\mu\text{m}$ (同図 (c)) に変化させた場合、鮮明なエッジ像を示す四画で囲んだ範囲は、上方方向に移動するが、マスクとウエハ

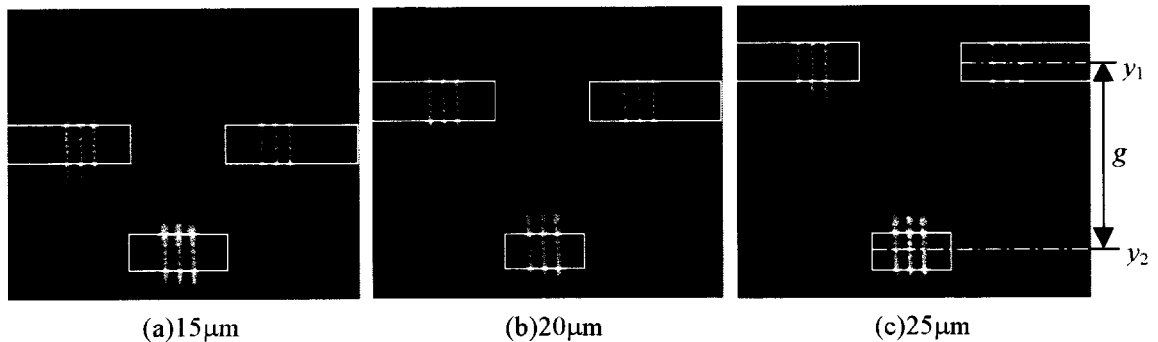


Fig. 5.5 Alignment video images with three different gaps

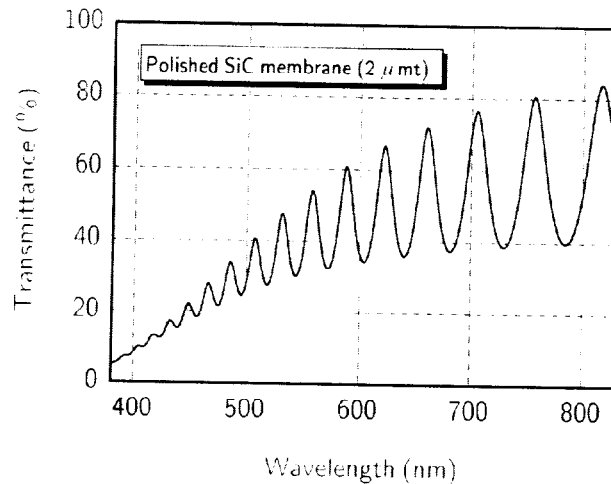


Fig. 5.6 Optical transmittance of 2μm-thick polished SiC membrane of x-ray mask.

の水平方向の精密な位置計測は可能である。これを、ギャップ可変機能と呼ぶ。

ギャップ可変機構は、マスクを移動させた場合も有効である。つまり、マスクマークの鮮明なエッジ像が、垂直方向に移動するが、水平方向の精密な位置計測は可能である。さらにマスクとウエハのギャップを一定とした場合、アライメント顕微鏡が移動した場合も、ギャップ可変機能は有効である。つまり、マスクとウエハのエッジ像が同時に移動するが、この場合も、水平方向の精密な位置計測は可能である。

ギャップ可変機能により、マスクとウエハに対する精密な焦点合せは不要となる。先に述べた色収差方式あるいはセクタフレネル方式では、いずれも精密な焦点合せが必要であったことから、このギャップ可変機能は本方式の特徴だといえる。

また、ギャップ可変機能によれば、式（5. 2）からマスクとウエハ間のギャップ g を同時に測定する事ができる。

$$g = (y_2 - y_1) \sin \theta \quad (5. 2)$$

ただし、 y_1 は図5. 5のウエハマークで最も明るいエッジ像の y 方向の位置、 y_2 は図5. 5のマスクマークで最も明るいエッジ像の y 方向の位置、 θ はマスク面に対する結像光学系の角度である。

5. 2. 4 実験結果

実験に用いたX線マスクのSiCメンブレン（厚さ2μm）の分光透過率（%）を、図5. 6に示す。反射防止膜¹⁰がコートされていないため、膜中の多重反射により、分光透過率は10-

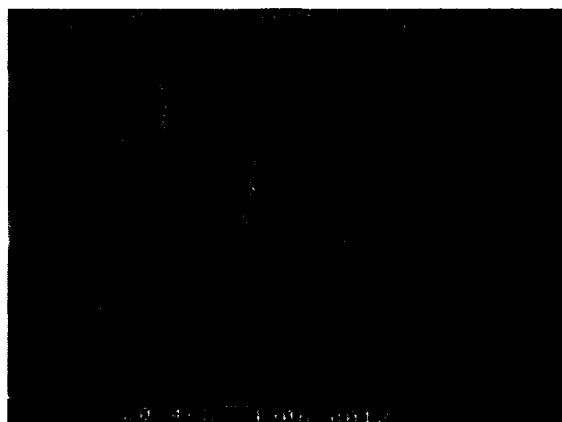


Fig. 5.7 A SEM picture of pattern edges of mask mark. Ta₄B absorber patterns are printed on polished SiC membrane.

80%の間ではほぼ周期的な変化を示している。図5.7のSEM写真は、厚さ0.5 μm のTa₄B吸収体パターンである。メンブレン表面は、研磨により0.5nm（測定装置DI-3000、米国D I社製）の滑らかな表面あらさを示した。エッジ散乱光を発する水平方向のパターンエッジ（幅1 μm ）は、直線とはならず、緩やかな円弧状になっている。ウエハマークには、厚さ1 μm のレジスト（SAL601-SR7）を塗布した、エッジ段差0.2 μm の窒化膜付きパターンを用いた。

静止させたマスクとウエハの位置を、200回連続して計測した値のヒストグラムを図5.8に示す。4.8nm (3 σ)の高い計測再現性（JIS計測用語の定義：指示値の最大差とは異なる）を得ることができた。

次に、X方向にピッチ10nmで移動させたX線マスクの位置を、連続して計測した結果を図5.9に示す。5.6nm (3 σ , n=20)の検出再現性とマスクの移動量（100nm）を基準とし

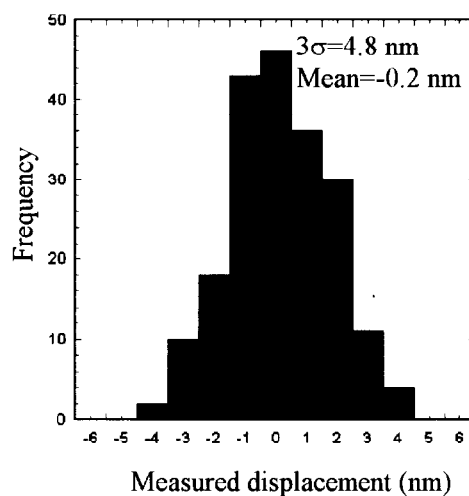


Fig. 5.8 Position sensing repeatability of the alignment system for 200 alignment runs.

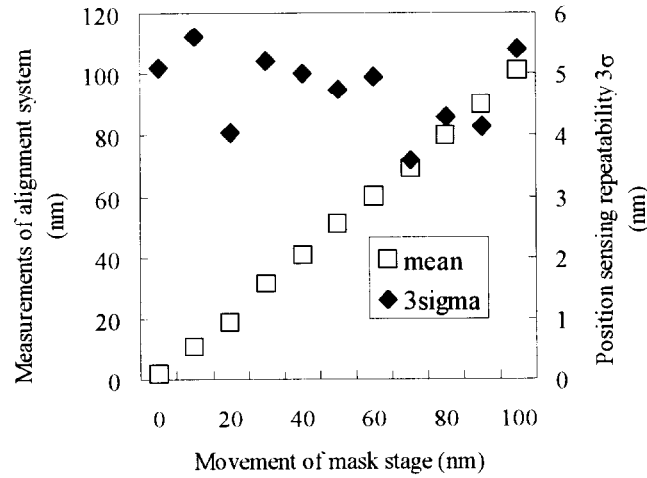


Fig. 5.9 Measurement results of the scattered-light alignment system

て 2%の直線性を得た。

5. 2. 5 エッジ像の形状についての考察

図 5. 4 又は図 5. 5 では、エッジ像は線ではなく、円形の像となっている。この理由について以下に考察する。

図 5. 10 は、マスクマークからの散乱光のうち、鮮明なエッジ像を結んだ、5 個のエッジからの散乱光のビデオ信号強度を、3 次元表示したものである。グラフの横軸は、CCD カメラの X 方向と Y 方向の画素番号、縦軸は 256 階調に量子化されたビデオ信号強度である。同図 (a) の 5 つのピーク信号 $\{S_1, S_2, S_3, S_4, S_5\}$ は、同図 (b) に示すマスクマークとメンブレンの境界にある 5 つのエッジ $\{E_1, E_2, E_3, E_4, E_5\}$ から反射した散乱光である。奇数のエッジ $\{E_1, E_3, E_5\}$ は、照明光と対向しているため、高いピーク強度 $\{S_1, S_3, S_5\}$ を示した。中央のエッジ E_3 は、対物レンズの焦点位置にあるため、もっとも高いピーク強度 S_3 を示した。この散乱光が、幅 $1\mu\text{m}$ (図 5. 7) のエッジ上の 1 点から発したものと仮定し、この点からの反射強度分布 $O(u, v)$ をデルタ関数¹¹としてみる。

$$O(u, v) = \delta(u)\delta(v) \quad (5. 3)$$

ここで、

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \delta(u) \cdot \delta(v) du dv = 1 \quad (5. 4)$$

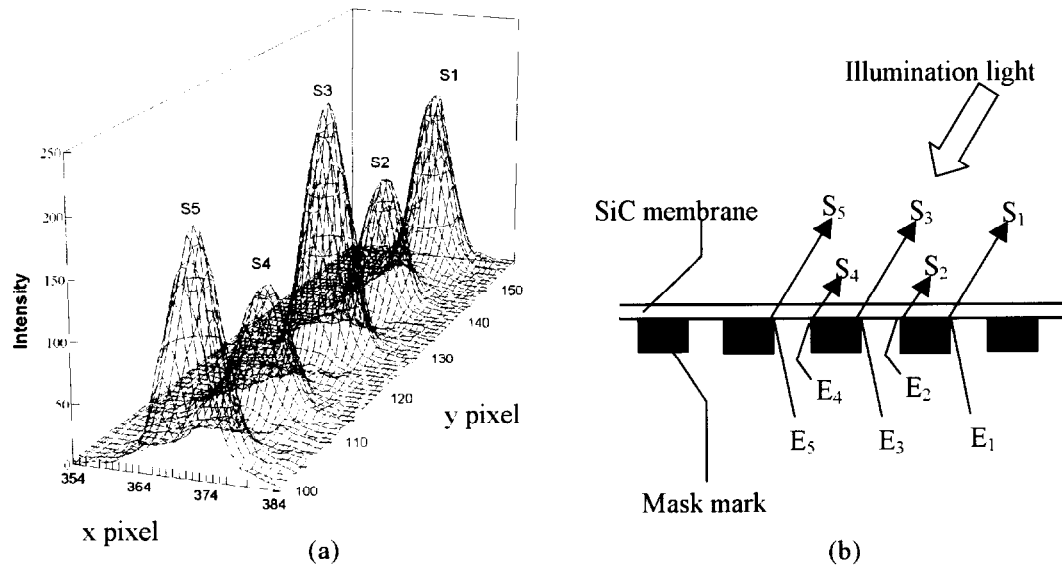


Fig. 5.10 (a) Three dimensional video signal intensity of scattered-light spots from mask mark. (b) Cross section of mask marks printed on SiC membrane.

ただし、 u, v は入射光の波長 λ と対物レンズの開口数 NA との比 λ/NA で規格化したウェハ面上の換算座標である。従って、式 (5. 3) の反射強度分布 $O(u, v)$ と対物レンズの点像強度分布 $PSF(u, v)$ からピーク S_3 の強度分布は、式 (5. 5) で表わされる。

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \delta(u') \delta(v') PSF(u - u', v - v') du' dv' = PSF(u, v) \quad (5. 5)$$

図 5. 11 は、実験におけるピーク S_3 と、計算により求めた対物レンズ ($NA=0.35$) の点像強度分布 $PSF(u, v)$ を、それぞれ y 方向に投影分布処理 (詳細は付録に示す) した結果を比較したものである。データの表示範囲は $3.41\mu\text{m}$, X 軸のデータ間隔は $0.11\mu\text{m}$, Y 軸はピークの最大高さで正規化している。2つの曲線は比較的よく一致していることから、この対物レンズは、幅 $1\mu\text{m}$ のエッジを、先に述べた仮定のように点光源として像を結んでいることがわかる。また、この仮定が成立する理由は、エッジ幅 $1\mu\text{m}$ が、ちょうど対物レンズの解像限界に近いところにあることだと思われる。

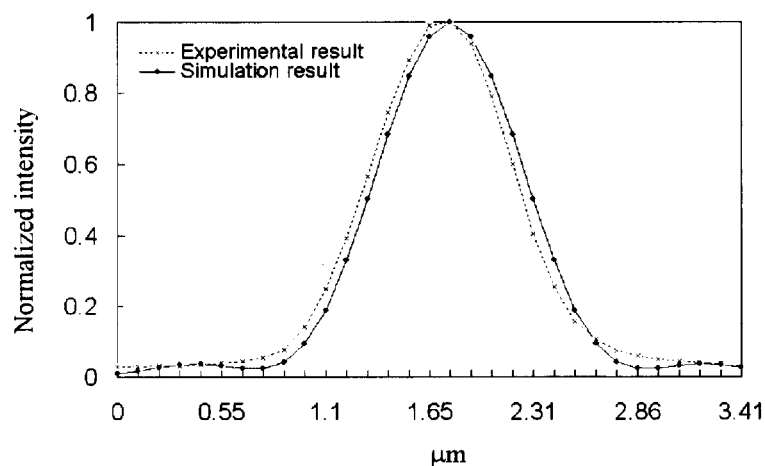


Fig.5.11 Comparison between measured intensity profiles and theoretical curve

5. 3 検出精度の評価

5. 3. 1 実験方法

ここでは、プロセス薄膜の変化に対する適応性、ウエハプロセスでの検出精度、SiC メンブレンに対するコントラストを評価するために、つぎの3つの実験を行った。

- 1) プロセスウエハでの検出再現性
- 2) プロセスウエハでの検出精度
- 3) SiC メンブレン厚さの影響

上記1)と2)の実験では、窒化膜付きウエハ（パターン段差 $0.2\mu\text{m}$ ）、ポリシリコン膜付きウエハ（パターン段差 $0.6\mu\text{m}$ ）、酸化膜付きウエハ（パターン段差 $0.05\mu\text{m}$ ）、アルミ薄膜付きウエハ（パターン段差 $1\mu\text{m}$ ）を用いた。ウエハには、厚さ $1\mu\text{m}$ のレジスト（SAL601-SR7）を塗布した。ウエハマークからの散乱光は、厚さ $2\mu\text{m}$ のSiC メンブレンを通して検出した。

上記3)の実験では、X線マスクとして、SiC メンブレン厚さが2, 3, 4, 5 μm の4種類を準備し、メンブレン厚さの影響を評価した。SiC メンブレンには反射防止膜もCr 遮光膜のいずれも適用していない。メンブレン表面での光の散乱を最小限化するために、SiC メンブレンは研磨により表面荒さ 0.5nm とした。

実験に用いたX線マスクは、図5. 12に示す直径125 mmの円形サポートリングに4インチのシリコンウエハを接着した構造で、中央に $20\times 20\text{mm}$ の露光窓を設けた。マスクマークは、厚さ $0.5\mu\text{m}$ の Ta_4B 吸収体で形成されている。X線マスクとウエハは、6章で述べるX線ステップに取り付けて、実験を行った。

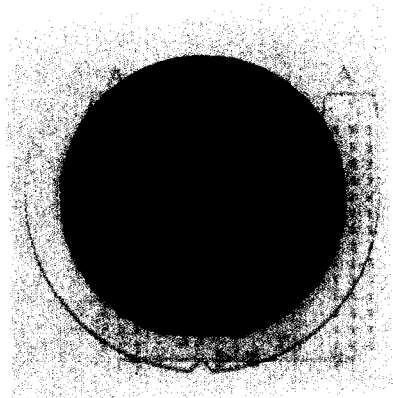


Fig. 5.12 Front side of finished SiC x-ray mask

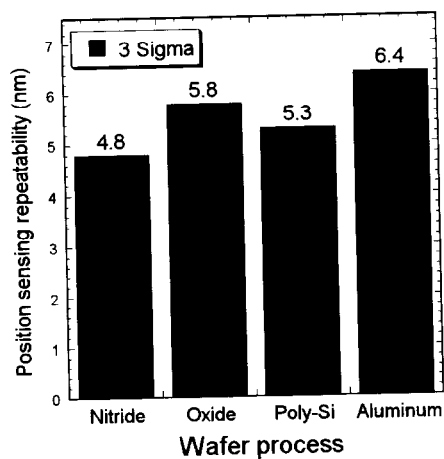


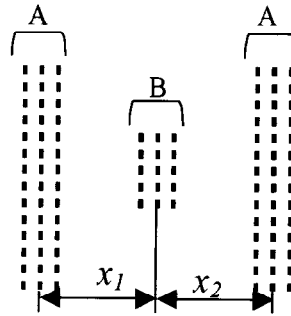
Fig. 5.13 Position sensing repeatability comparison with the four processed wafers.

5. 3. 2 実験結果

5. 3. 2. 1 検出再現性

図5. 1 3は、20 μm のギャップで相対する X 線マスクとウエハの位置を連続して 200 回測定したときの検出値の再現性 (3σ) を 4 種類のプロセスウエハで比較したものである。測定中は、ウエハステージの位置制御システムの電源を落とし、マスクとウエハを静止させた状態でエッジ散乱光アライメントによる計測を行った。

4 種類のプロセスウエハと SiC-X 線マスクの位置を計測した結果、検出値のばらつきとして 4.8 nm $\sim$ 6.4 nm (3σ) を得た。ポリシリコン膜付きウエハで得た結果 5.3nm (3σ) から、パターン段差が低い (0.05 μm) 場合でも、よい検出再現性が得られることが分かった。



$$(x_1 - x_2)/2 = \{0, 10, 20, 30, 40, \dots, 100\} \text{ nm}$$

Fig. 5.14 Test pattern used for evaluating the alignment accuracy. (A) Wafer mark. (B) Mark for evaluating alignment accuracy.

5. 3. 2. 2 プロセスウエハの検出精度

次に、プロセスウエハに対する検出精度を評価するために、あらかじめプロセスウエハ上に、図 5. 1 4 に示すウエハマーク (A) および検出精度評価用マーク (B) を 1 枚のプロセスウエハ上に作りこみ、これにより検出精度の評価を行った。各部の寸法は図 5. 1 と同じである。検出精度評価用マーク (B) は、全部で 11 種類 ($i=11$) あり、その位置が 10 nm ずつ一方向にシフトしている。シフト量は、 $(x_1 - x_2)/2 = \{0, 10, 20, \dots, 100 \text{ nm}\}$ である。2 つのマーク (A) と (B) は、光ステッパによりプロセスウエハ上、16 箇所 ($k=16$) に露光した。

図 5. 1 5 は、プロセスウエハ上に形成した検出精度評価用マーク (B) のシフト量をエッジ散乱光法により測定した結果である。グラフの横軸は、5 倍レティクル (ウエハ露光に用いた光マスク) に形成した検出精度評価用マーク (B) のシフト量を、光干渉座標測定装置 (Nikon 3I) を使って測定した値である。▲印は、エッジ散乱光による測定値 x_{ij} である。エッジ散乱光による検出誤差 e_{ijk} は、図中 45 度の直線 (光干渉座標測定装置の測定値 a_i) に対する誤差により定義した。

$$e_{ijk} = x_{ijk} - \frac{a_i}{5} \quad (5. 6)$$

ここで、

$$a_i = \frac{X_1 - X_2}{2}; \quad a_i = 0, 50, 100, 150, \dots, 500 \text{ nm}$$

$$x_i = \frac{X_1 - X_2}{2}; \quad x_i = 0, 10, 20, \dots, 100 \text{ nm}$$

ただし,

$i=1\sim11$, 検出精度評価用マーク (B) の種類.

$j=1\sim10$, シフト量の測定回数.

$k=1\sim16$, プロセスウエハ上での検出精度評価用マーク (B) の位置.

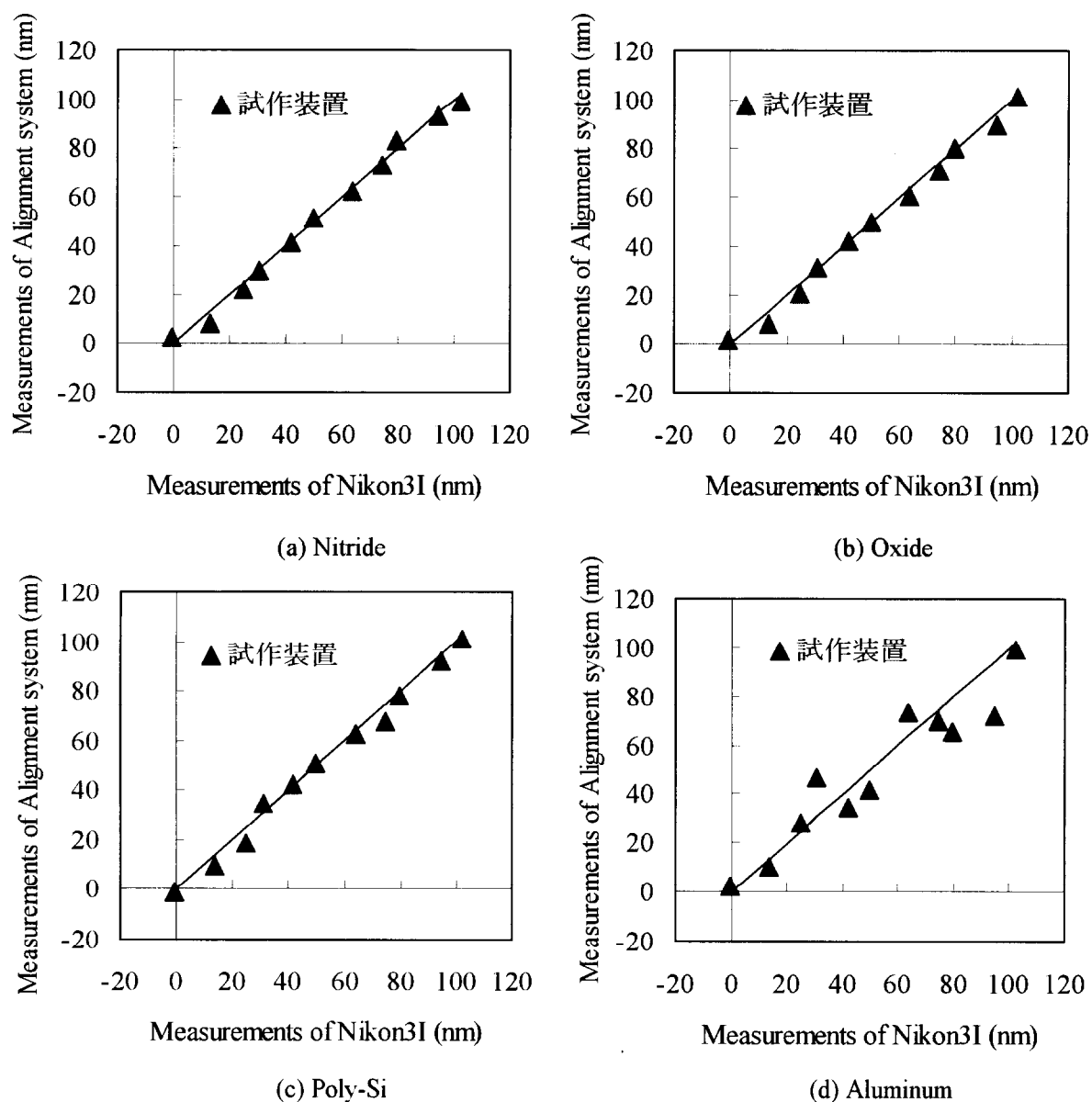


Fig. 5.15 Measurement comparison between the alignment system and a Nikon 31

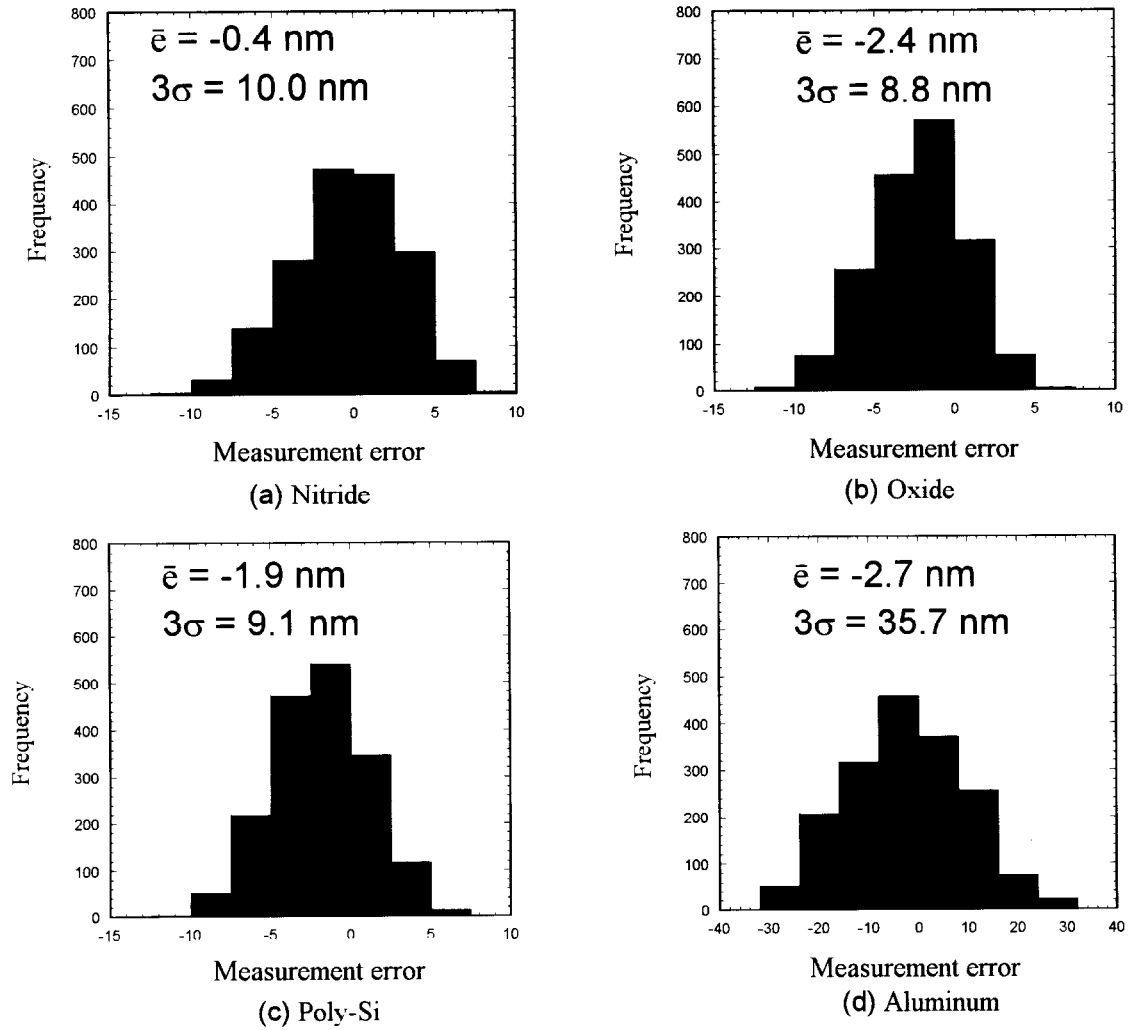


Fig. 5.16 Histograms of measurement errors ($\bar{e}+3\sigma$) in four processed wafers

図5. 16は、式(5. 6)で定義した検出誤差 e_{ijk} のヒストグラムである。このヒストグラムは1枚のウェハで16箇所($k=16$)に露光されたテストパターン($i=11$)を測定した結果($i \times j \times k=1760$)である。検出精度は、式(5. 7)により求めた。

$$\bar{e} = \frac{\sum_{i=1}^{11} \sum_{j=1}^{10} \sum_{k=1}^{16} e_{ijk}}{1760}; \quad \sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{11} \sum_{j=1}^{10} \sum_{k=1}^{16} e_{ijk}^2}{1760}} \quad (5. 7)$$

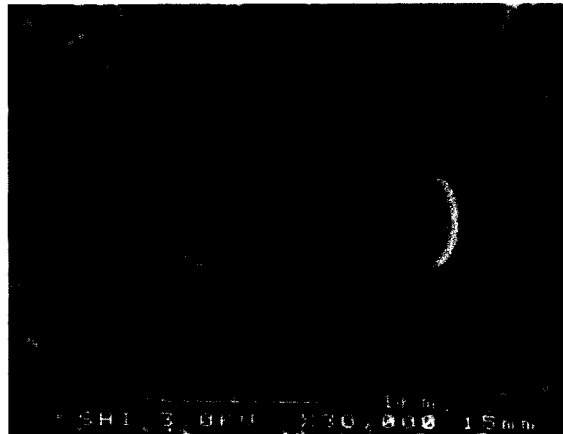


Fig. 5.17 Scanning electron microscopy micrograph of a pattern edge (1 μm wide $\times$ 2 μm high) of the aluminum wafer marks

ただし、

$i=1\sim 11$, アライメント検出精度評価用マーク (B) の種類. $(X_1-X_2)/2=0\sim 100\text{nm}$

$j=1\sim 10$, 測定回数.

$k=1\sim 16$, ウエハ上でのアライメント検出精度評価用マーク (B) の位置.

検出精度のばらつきとして (a) 窒化膜付きウエハ : 10.0nm (3σ) , (b) 酸化膜付きウエハ : 8.8nm (3σ) , (c) ポリシリコン膜付きウエハ : 9.1nm (3σ) を得た. 平均値 ($|\bar{e}|$) は, 2.7 nm 以下となった. 一方, (d) アルミ薄膜付きウエハでは, 検出精度のばらつきが, 35.7 nm (3σ) まで大きくなった. これはアルミマークのエッチング形状のばらつきが大きく, 表面の荒さ (図 5. 1 7) が原因していると思われる. このアルミ薄膜付きウエハにおける検出精度のばらつきの改善については, この後考察する.

5. 3. 2. 3 SiC メンブレン厚さの影響

厚さ 2, 3, 4, 5 μm の研磨した SiC メンブレンを用いて, メンブレン厚さによる検出精度の変化を評価した. 図 5. 1 8 は, 窒化処理した検出精度評価用マーク (図 5. 1 4) からのエッジ散乱光を, 厚さの異なる 4 種類のメンブレンを通して検出した結果である. グラフは, ウエハ上 1 箇所 ($k=1$) に露光された検出精度評価用マーク ($i=11$) を測定した結果 : $|\bar{e}|+3\sigma$ ($i\times j\times k=110$) である. これから, 3 μm 以下のメンブレン厚さは, 検出精度に影響を与えないことが分かった. 一方, 4 μm 以上のメンブレン厚さは, 検出精度の低下を引き起こすことが明らかになった. この検出精度の改善については 4 節で述べる.

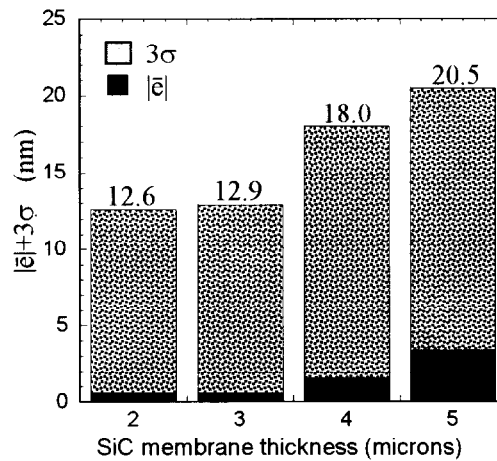


Fig. 5.18 Dependence of $|\bar{\epsilon}|+3\sigma$ on thickness of SiC membrane

5. 3. 3 考察

アルミ薄膜付きウエハの検出精度 ($|\bar{\epsilon}|+3\sigma$) の低下を改善するために、エッジ像の数が検出精度に与える影響を評価した。ウエハ上 5 箇所 ($k=5$) に露光した 11 種類のア検出精度評価用マーク ($i=11$) を測定した。図 5. 19 は、エッジ像の数を 3 個から 6 個、9 個に増やした場合の検出精度 ($|\bar{\epsilon}|+3\sigma$) を比較した結果である。エッジ像の数を増やす平均効果によって、59.5 nm ($|\bar{\epsilon}|+3\sigma$) から 37.7 nm ($|\bar{\epsilon}|+3\sigma$) まで改善することができた。さらに、エッジ像の数を 15 個程度まで増やすことによって、検出精度を 25nm ($|\bar{\epsilon}|+3\sigma$) 程度まで改善できることが予想される。しかしながら、エッジ像の数を 15 個以上増やした場合、平均効果は期待できない。アルミ薄膜の厚さや表面あらさが、検出誤差に与える影響については、5. 5 節で詳しく述べる。

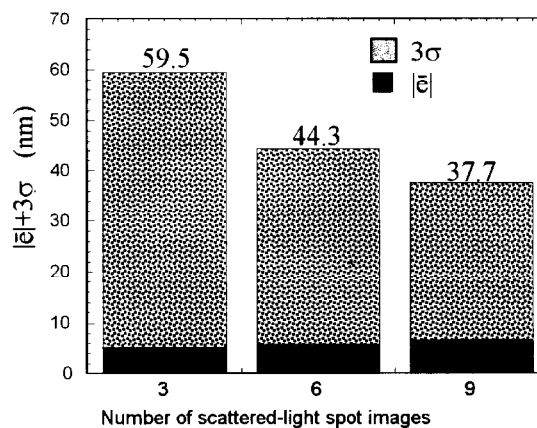


Fig. 5.19 Effect of number of scattered-light spot images on $|\bar{\epsilon}|+3\sigma$

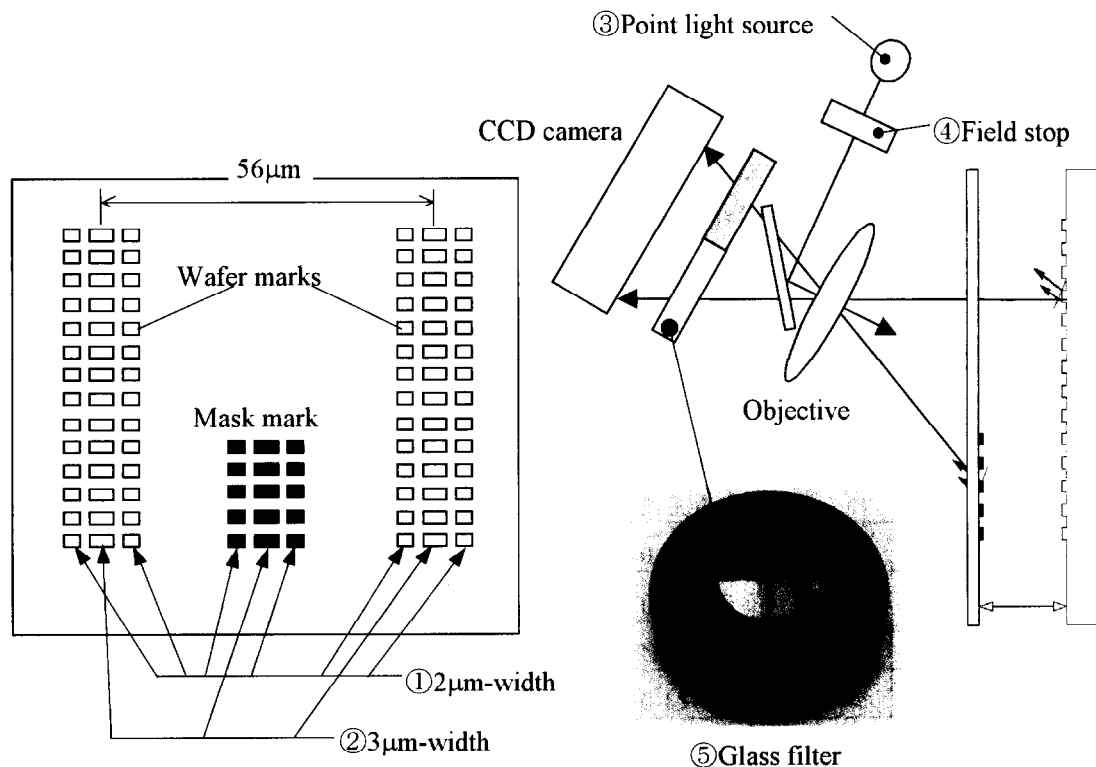


Fig. 5.20 Pattern width: ①2 μ m and ②3 μ m in alignment marks. Optical elements: ③Point light source, ④Field stop and ⑤Glass filter in the alignment system.

5. 4 分光透過率が低い SiC-X 線マスクに対する計測性能

5. 4. 1 アライメントマークと結像光学系の改良

5. 3. 2. 3 節で述べた分光透過率の低い SiC メンブレンマスクに対するエッジ散乱光の強度を上げるために行った改良を図 5. 20 に示す. アライメントマークを構成する配列パターンでは, 矩形パターンの長さを, 従来の 1 μ m (図 5. 1) から①2 μ m と②3 μ m に長くした. 散乱光の強度は, パターンのエッジ段差の高さとパターン幅の長さにより変化することが分かっている. エッジ段差の高さは半導体デバイスの LSI プロセスにより決定されるのに対して, パターン幅は LSI プロセスの制約条件を受けず, 容易に変更が可能なことから, パターン幅の寸法を変更した.

パターン幅として①2 μ m と②3 μ m を選択した理由は, 5. 4. 2 節で述べる. 照明では, ライトガイド (図 5. 2) を使用せずランプハウスからの③照明光を直接入射する方式に変更した. この変更により, ライトガイドによる光損失が低減され, 分光透過率の低い SiC メンブレンに対しても, 高いピーク強度を有するエッジ散乱光が得られるようになった.

一方, 入射した照明光の一部は, 対物レンズ表面で反射し, 迷光 (フレア) となってエッ

ジ散乱光の像コントラストを大幅に低下させる原因となる。これを防ぐ為に、照明光学系に④可変視野絞り（field stop）を新たに設けた。この視野絞りによる像コントラストの改善については5. 4. 2節で述べる。さらに、CCDカメラの手前に、⑤直径13mmのガラスフィルタ（図中右下の写真）を置いた。ガラスフィルタの上半分は、金属膜NDフィルタ（Metallic Neutral Density Filter, 略NDフィルタ）で、マスクマークからの散乱光が透過する領域である。

一方、⑤ガラスフィルタの下半分は透過ガラス（transparent glass）で、ウエハマークからの散乱光が透過する領域である。このガラスフィルタの効果については、5. 4. 2節で実験結果を述べる。なお、表5. 1に実験に使用したマスクとウエハの条件を示す。

Table 5.1 Experimental condition of X-ray mask and wafer

X-ray mask	SiC-membrane thickness (μm)	2, 3, 4, 5			
	Cr-film thickness (nm)	0, 3, 5			
	Step-height of mask pattern (μm)	0.5			
Wafer	Wafer processes	Nitride	oxide	poly-Si	aluminum
	Step-height of wafer pattern (μm)	0.15	0.6	0.05	0.1
	Resist thickness (μm)	0.5 (SAL601-ER4)			

実験に用いたX線マスクの分光透過率を図5. 21に示す。Cr膜なしの場合には、633nmの波長に対し60%以上の透過率があるのに対して、厚さ3nmのCr膜では38%，厚さ5nmのCr膜では18%まで透過率が低下している。

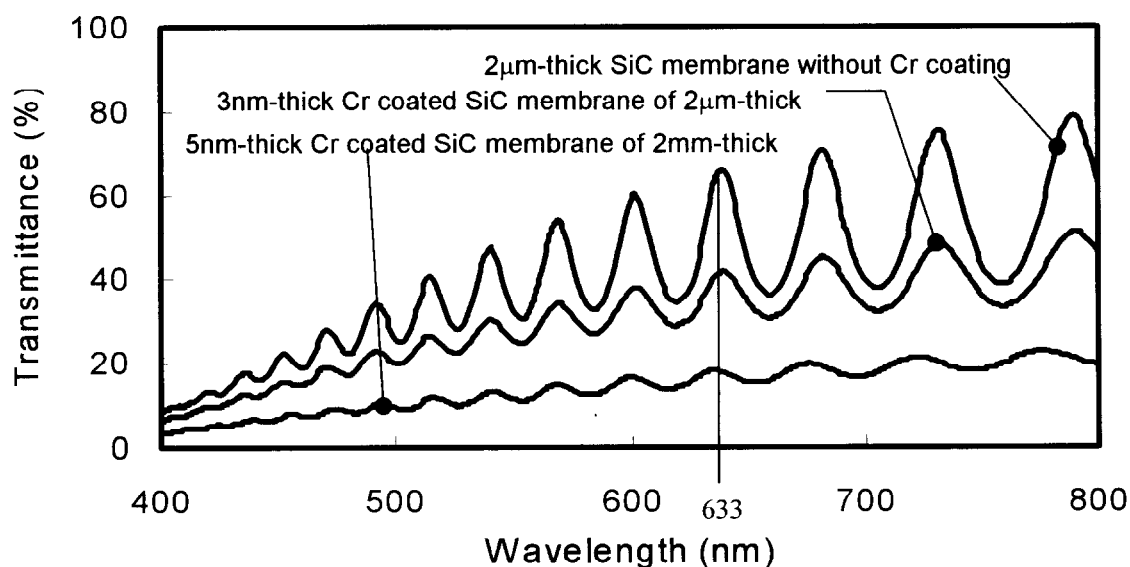


Fig. 5.21 Optical transmission spectra of three different SiC-membranes

5. 4. 2 エッジ散乱光強度の評価

図5. 2 2 (a) は、パターン幅 $0.11\mu\text{m}$ と $3.08\mu\text{m}$ とした場合に、エッジ散乱光の像 $I(x, y)$ を、対物レンズの開口数 $\text{NA}=0.35$ として、式 (5. 8) の計算により求めた結果である。式 (5. 8) を数値積分する場合、像面 $I(x, y)$ および物面 $\text{rect}(x_i/a)$ は、 $0.11\mu\text{m}$ 間隔で分割した。なお、波長 $\lambda=0.616\mu\text{m}$ とした。なお、図の縦軸は最大値で正規化したピーク強度を示す。

$$I(x, y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \text{rect}\left(\frac{x_i}{a}\right) \cdot h(x - x_i, y - y_i) dx_i dy_i \quad (5. 8)$$

ここで、

$$\text{rect}(x) = \begin{cases} 1 & |x| \leq 1/2 \\ 0 & \text{その他の点} \end{cases} \quad (5. 9)$$

図5. 2 2 (a) におけるパターン幅 $0.11\mu\text{m}$ と $3.08\mu\text{m}$ の場合を比較すると、散乱光のピーク強度が約3倍違うことがわかる。同図 (b) はパターン $a=\{0.11, 0.22, \dots, 4.07\mu\text{m}\}$ と散乱光のピーク強度の関係を式 (5. 9) と実験により求めた結果である。図の縦軸は最大値で正規化している。この図の計算結果 (◇印) では、パターン幅が増えるにつれて、ピーク強度は高くなるが、 $2\mu\text{m}$ 以上のパターン幅では一定値となる。

一方、図5. 2 2 (a) の黒色のプロット (■印, ▲印, ×印, ●印) は、各プロセスウエハで測定した結果である。 $2\mu\text{m}$ 以下のパターン幅では、各プロセス間でばらつきが大きい、 $2\mu\text{m}$ 以上のパターン幅ではすべてのプロセスウエハで一定値となる。以上の計算結果と実験結果から、パターン幅として $2\mu\text{m}$ と $3\mu\text{m}$ を選択した。

改造した結像光学系 (図5. 2 0) のガラスフィルタの効果を、図5. 2 2 (c) に示す。ウエハは Poly-Si、マスクは厚さ 3nm の Cr 膜をコートした SiC メンブレン (透過率 38%) を使用して測定した。縦軸は2値化 (8ビット) したビデオ信号強度、横軸は、ビデオの画素番号である。ガラスフィルタを用いない場合 (点線---), マスクとウエハの信号強度は大きく異なる。一方、ガラスフィルタを用いた場合 (実線—), 中央の3つのマスクマークからの散乱光を ND フィルタ (分光透過率 50%) を透過させることにより、その強度を低くし、両側ウエハマークからの散乱光強度と同じレベルとした。全体の信号レベルは、照明強度を上げることにより高くした。

改造した結像光学系 (図5. 2 0) の可変視野絞りの効果を図5. 2 2 に示す。横軸は最大絞り径 8mm で正規化した視野絞りの直径、縦軸はビデオ信号強度 (Volts) である。絞り径

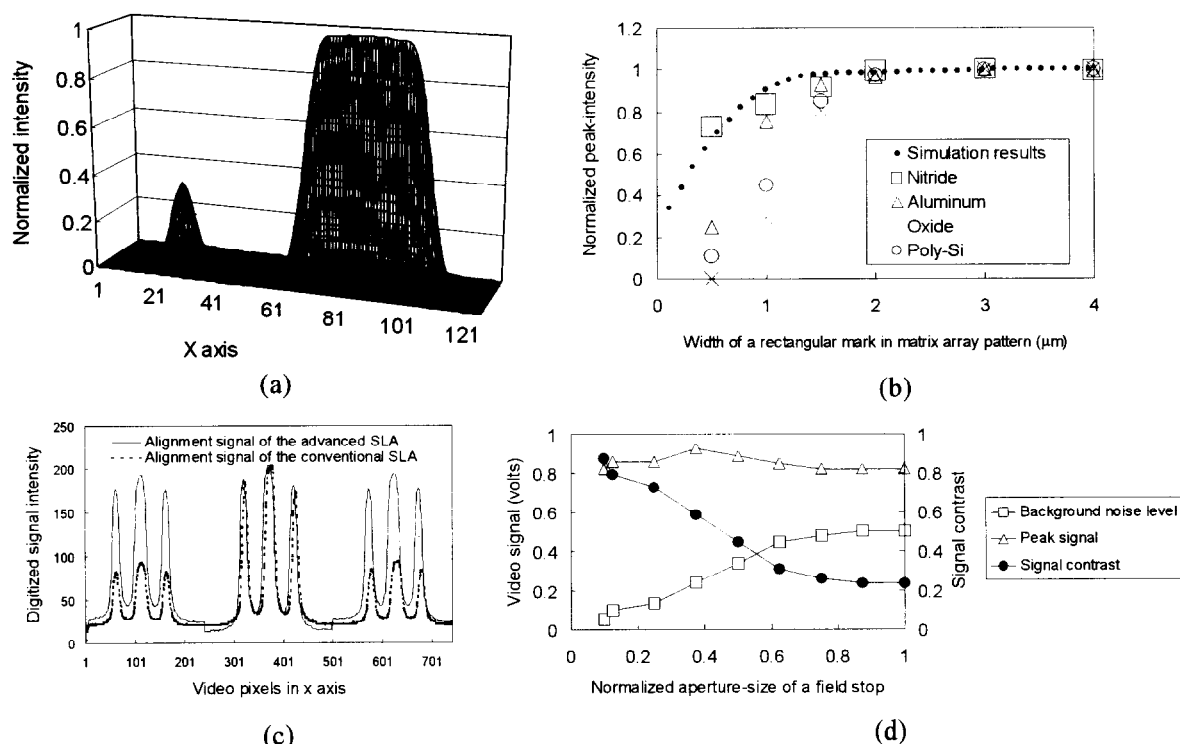


Fig. 5.22 (a) Comparison edge-scattering between an edge of $0.11\ \mu\text{m}$ -width and an edge of $3.08\ \mu\text{m}$ -width. (b) Effect of wider mark-width on peak-intensity of edge scattering that reflected on wafer marks. (c) Comparison of alignment signal between the conventional SLA and advanced SLA. (d) Effect of a field stop on signal contrast.

D : $0.1 \sim 1.0$ に対して、散乱光のピーク強度 P (△印) が $0.82 \sim 0.92\ \text{V}$ の一定したレベルを示すのに対して、バックグラウンドレベル B (□印) は絞り径が小さくなるほど低下し、最少絞り径 0.1 で $B=0.05\ \text{V}$ を示している。

このバックグラウンドレベル B (□印) は、対物レンズ表面で反射する照明光の強度により変化する。視野絞りの径を小さくすることにより、この強度を低くできるため、信号コントラスト (●印) $C=(P-B)/(P+B)$ は、 $C=0.23$ (絞り径 $D=1.0$) から $C=0.87$ (絞り径 $D=0.1$) まで改善した。

5. 4. 3 検出精度の評価

図 5. 23 (a) は、厚さ 3nm の Cr をコートした SiC メンブレン (透過率 38%) の X 線マスクと酸化膜ウエハを、 $20\ \mu\text{m}$ のギャップに設定したときのビデオ画像である。画面上にある両側のエッジ像は、 SiC メンブレンを透過したウエハマークからのエッジ散乱光である。画面

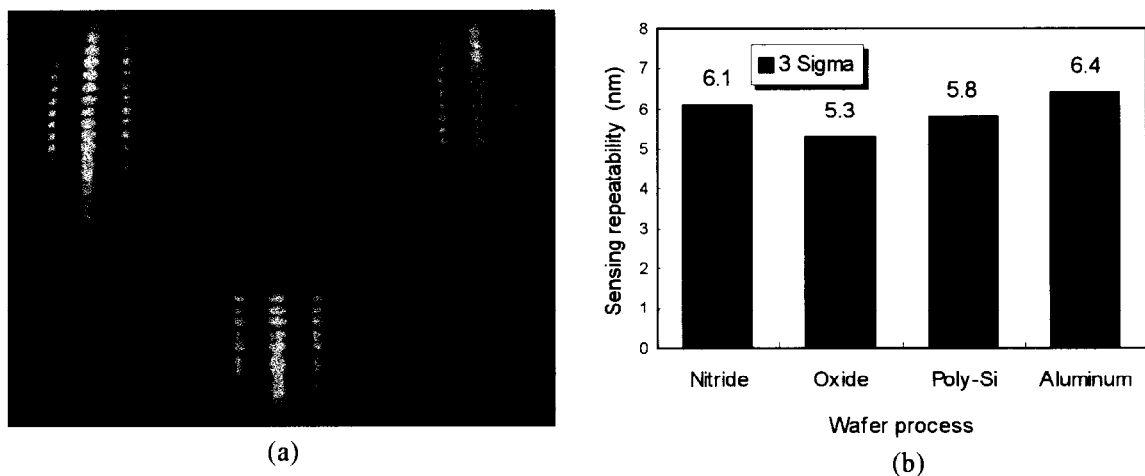


Fig. 5.23 (a) Alignment video image of advanced SLA system. (b) Mark recognition repeatability for a x-ray mask of 38 %-optical-transparency with four processed wafers.

の下，中央にあるエッジ像は ND フィルタ（透過率 70%）を透過したマスクマークからの散乱光である。

ガラスフィルタの減光作用によりエッジ散乱光のピーク強度は，マスクもウエハも 0.64 V 以上になるように最適化されたことを確認している．エッジ散乱光は，パターン幅を $1\mu\text{m}$ から $2\mu\text{m}$ と $3\mu\text{m}$ に長くしたために点像（図 5. 4）から線像に変化している．同図（b）は，厚さ 3nm の Cr をつけた SiC メンブレンの X 線マスク（透過率 38%）とウエハの位置を連続して 200 回測定したときの検出値のヒストグラムである．ばらつきとして 5.3～6.4 nm (3σ) を得た．

厚さ 5nm の Cr をつけた SiC メンブレン（分光透過率 18%）が検出精度に与える影響を，図 5. 24 (a) のウエハマーク (A) と検出精度評価用マーク (B) を用いて，図 5. 24 (b) の構成で評価した．ウエハマーク (A) と検出精度評価用マーク (B) の構成は，図 5. 14 と同じである．ただし，エッジ幅を図 5. 20 と同じ $2\mu\text{m}$ と $3\mu\text{m}$ にした．アライメント検出精度の測定は，5. 3. 2. 2 節で述べた方法と同じである．すなわち，5 倍レティクル上にある検出精度評価用マーク (B) の測定値 a_i ($i=1\sim11$) を基準値として，ウエハ上の検出精度評価用マーク (B) からのエッジ散乱光を測定した値 x_{ijk} ($j=1\sim10, k=1\sim9$) との差を，検出誤差 $e_{ijk}=x_{ijk}-a_i/5$ と定義し，式 (5. 10) により評価した．

$$\bar{e} = \frac{\sum_{i=1}^{11} \sum_{j=1}^{10} \sum_{k=1}^9 e_{ijk}}{990}; \quad \sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{11} \sum_{j=1}^{10} \sum_{k=1}^9 e_{ijk}^2}{990}}, \quad (5. 10)$$

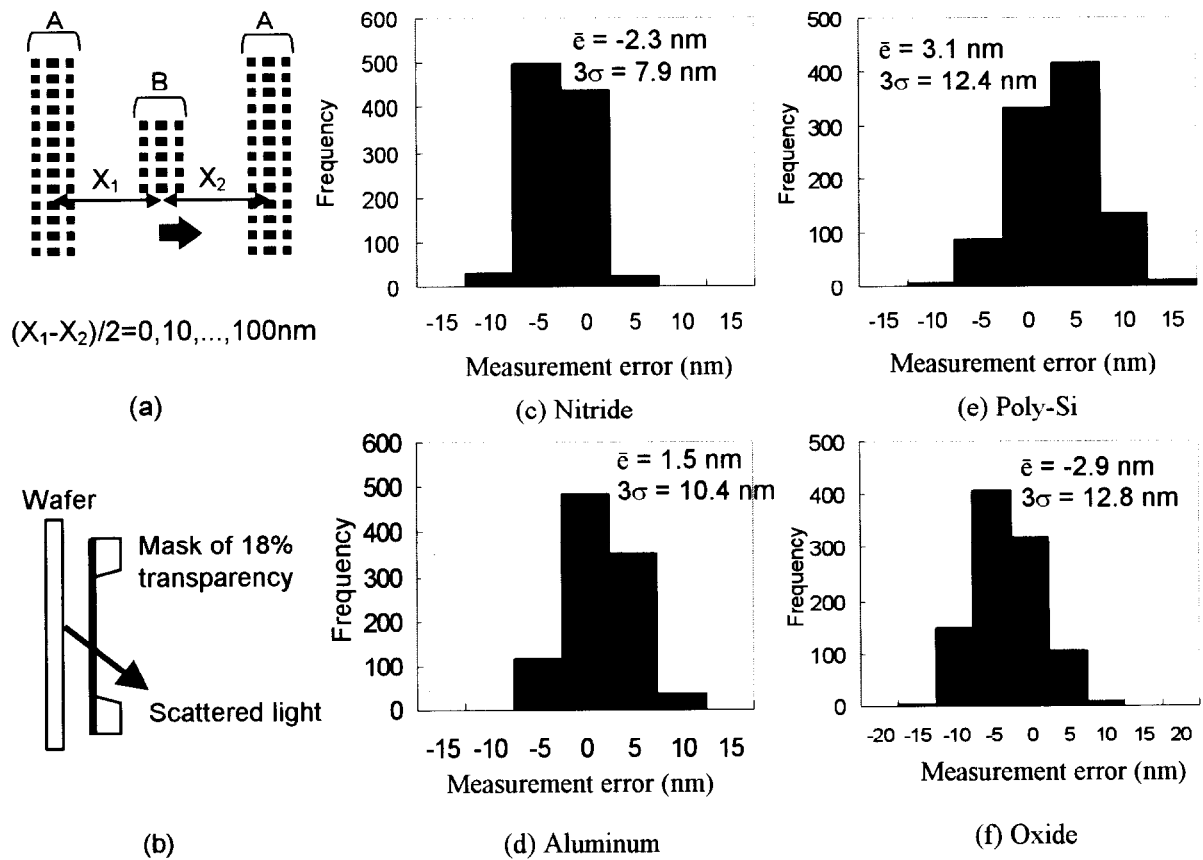


Fig. 5.24 (a) Wafer mark used to evaluate $|\bar{e}|+3\sigma$, (b) Scattered-light transmitted a SiC membrane of 18 %-optical-transparency, (c)-(f) Histogram of measurement error $|\bar{e}|+3\sigma$.

ただし

$i=1\sim 11$, 検出精度評価用マーク (B) の種類. $(X_1-X_2)/2=0\sim 100\text{nm}$

$j=1\sim 10$, 測定回数.

$k=1\sim 9$, ウエハ上のマーク (A) とマーク (B) の位置.

測定結果を図 5. 24 に示す. 同図 (c) から同図 (f) は, 4 種類のプロセスウエハにおける測定値 990 回のヒストグラムである. 検出精度 ($|\bar{e}|+3\sigma$) として, (c) 窒化膜付きウエハ: 10.2nm, (d) アルミ薄膜付きウエハ: 11.9nm, (e) ポリシリコン膜付きウエハ: 15.5nm, (f) 酸化膜付きウエハ: 15.7nm を得た.

SiC メンブレン厚さが, 検出精度に与える影響を評価する実験では, 図 5. 25 (a) のウエハマーク (A) と検出精度評価用マーク (B) を用いて, 図 5. 25 (b) の構成で評価した. サンプルとして, 窒化膜付きウエハを使用し, 厚さ 2~5 μm の SiC メンブレンを通して

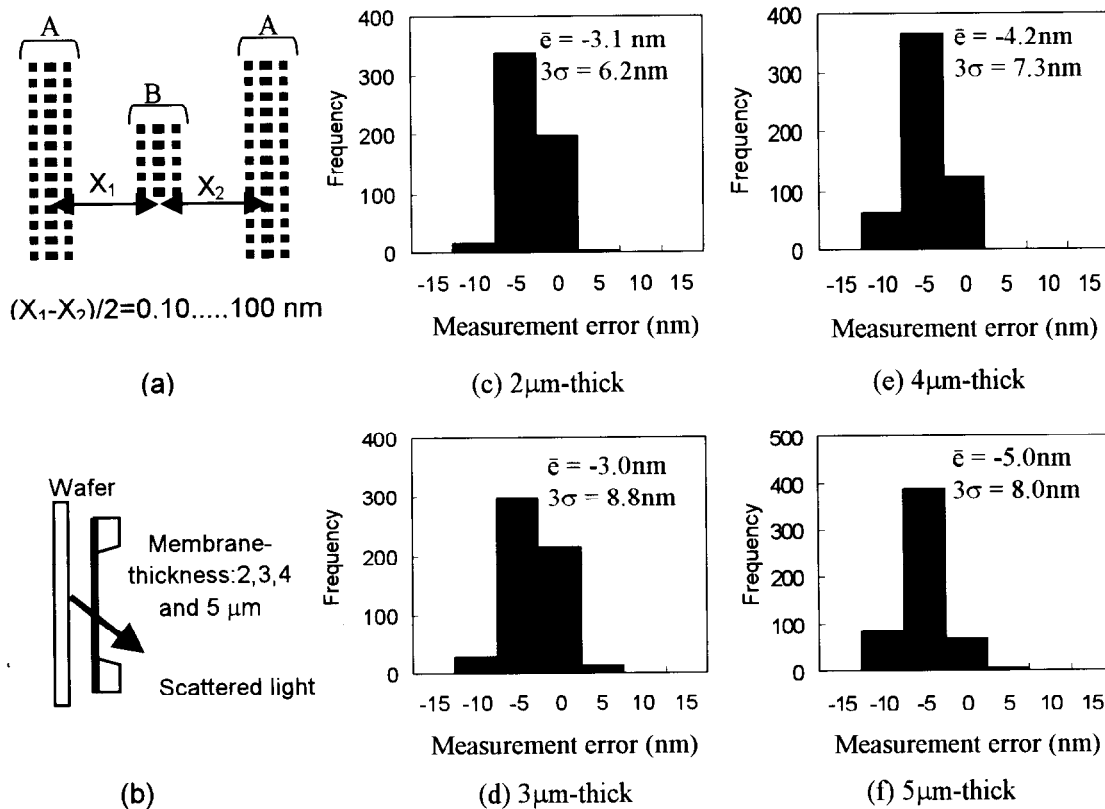


Fig. 5.25 Wafer mark used to evaluate $|\bar{e}|+3\sigma$, (b) Scattered-light transmitted a SiC membrane
(c)-(f) Histogram of measurement error for $|\bar{e}|+3\sigma$.

エッジ散乱光を検出した。検出精度の測定は、5.3.2.2節で述べた方法と同じである。すなわち、5倍レティクル上にある検出精度評価用マーク (B) の測定値 a_i ($i=1\sim11$) を基準値として、ウエハ上の検出精度評価用マーク (B) からのエッジ散乱光による測定値 x_{ijk} と ($j=1\sim10, k=1\sim5$) の差を検出誤差 $e_{ijk}=x_{ijk}-a_i/5$ と定義し、式 (5.11) により評価した。

$$\bar{e} = \frac{\sum_{i=1}^{11} \sum_{j=1}^{10} \sum_{k=1}^5 e_{ijk}}{550}; \quad \sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{11} \sum_{j=1}^{10} \sum_{k=1}^5 e_{ijk}^2}{550}}, \quad (5.11)$$

ただし

$i=1\sim11$, 検出精度評価用マーク (B) の種類. $(X_1-X_2)/2=0\sim100\text{nm}$

$j=1\sim10$, 測定回数.

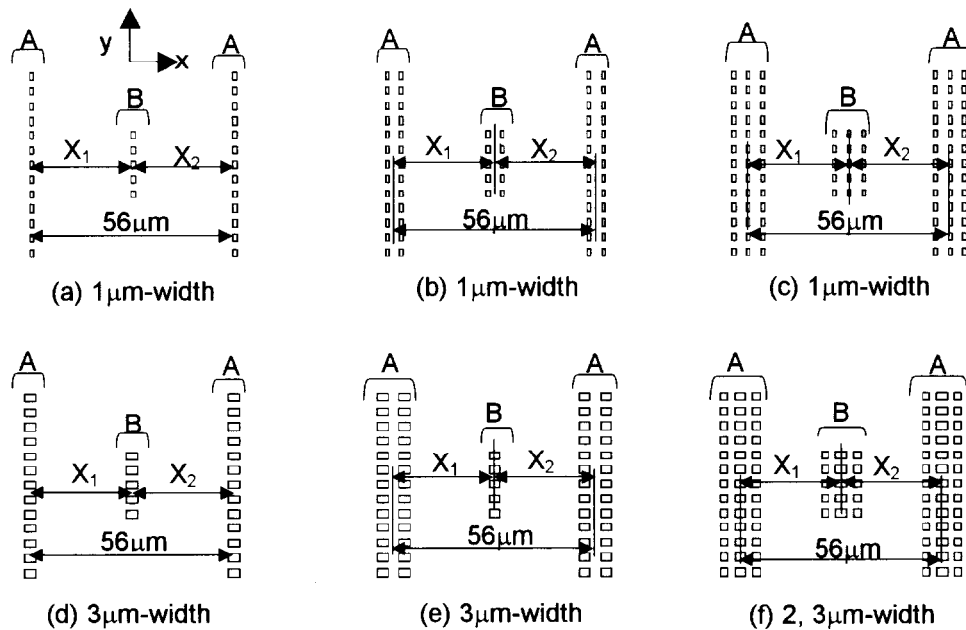


Fig. 5.26 Six types of test pattern to evaluate the alignment accuracy in aluminum metallization process.

$k=1\sim5$, ウエハ上でアライメント検出精度評価用マーク (B) が置かれる位置.

結果を図 5. 2 5 に示す. 同図 (c) から同図 (f) は, メンブレン厚さ $2\mu\text{m}$ から $5\mu\text{m}$ を透過した, エッジ散乱光の測定値 $11(i) \times 10(j) \times 5(k) = 550$ 回のヒストグラムである. この実験結果から, 図 5. 2 0 の改良を加えたアライメント装置により, 厚さ $5\mu\text{m}$ 以下の SiC メンブレンに対する検出精度として, $9.3\text{nm} \sim 13.0\text{nm}$ ($|\sigma|+3\sigma$) を得た. 図 5. 2 4 に比較して, 図 5. 2 5 の検出精度が高い理由は, 厚さ $5\mu\text{m}$ の SiC メンブレンの分光透過率の方が, 厚さ 5nm の Cr 膜がついた SiC メンブレンによりも高いためだと考えられる.

5. 5 アルミ薄膜が計測性能に与える影響

5. 5. 1 実験方法

アルミ薄膜付きウエハにおける検出精度 ($|\sigma|+3\sigma$) の低下を, 5. 3. 2. 2 節 (図 5. 1 6) で示し, 検出精度の向上を, 5. 4. 3 節 (図 5. 2 4) で示した. しかしながら, 検出精度が改善された理由については明らかにされていない. そこで本節では, 図 5. 2 6 に示す 6 種類の基本パターンを提案し, これによりエッジ幅, エッジの個数, アルミ薄膜の厚さが, 検出精度に与える影響を測定した. 実験では, 次に示す 6 種類 $\times$ 1 1 種類 $\times$ 5 種類 = 330 種類の評価を行った. 条件は, 以下の通りである.

6 種類: 図 5. 2 6 に示す (a) から (f) までの基本パターンの種類である. (a) から (c)

における矩形パターンのエッジの長さ（x 方向）は $1\mu\text{m}$ ，（d）と（e）では $3\mu\text{m}$ ，（f）では $2\mu\text{m}$ と $3\mu\text{m}$ である．

1.1 種類：アライメント検出精度評価用マーク（B）のシフト量： $(x_1-x_2)/2 = \{0, 10, 20, \dots, 100 \text{ nm}\}$ である．

5 種類：PVD（physical vapor deposition）工程^{1,2}により被着したアルミ薄膜の厚さ $\{0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 1.0 \mu\text{m}\}$ である．

図 5. 26 におけるウエハマーク（A）と検出精度評価用マーク（B）の高さは $0.5\mu\text{m}$ ，ウエハ上には厚さ $0.5\mu\text{m}$ のホトレジストを塗布した．また，エッジ散乱光は，厚さ $2 \mu\text{m}$ の SiC メンブレンを通して検出した．なお SiC メンブレンには，反射防止膜をつけていない．基本パターンによる検出精度（ $|\bar{e}|+3\sigma$ ）の測定は，5. 3. 2. 2 節で述べた方法と同じである．すなわち，ウエハ上に形成された図 5. 26 の検出精度評価用マーク（B）のシフト量を，エッジ散乱光にて測定した結果 x_{ijk} と，5 倍レティクル（ウエハ露光に用いた光マスク）上に形成した検出精度評価用マーク（B）のシフト量を，光干渉座標測定装置（Nikon 3I）を使って測定した結果 a_i から，式（5. 12）で定義した検出誤差 e_{ijk} を求めた．

$$e_{ijk} = x_{ijk} - \frac{a_i}{5} \quad (5. 12)$$

ここで，

$$a_i = \frac{X_1 - X_2}{2}; \quad \frac{X_1 - X_2}{2} = 0.5, 100, 150, \dots, 500 \text{ nm}$$

$$x_i = \frac{X_1 - X_2}{2}; \quad \frac{X_1 - X_2}{2} = 0, 10, 20, \dots, 100 \text{ nm}$$

ただし

$i=1\sim 11$ ，検出精度評価用マーク（B）の種類．

$j=1\sim 10$ ，シフト量の測定回数．

$k=1\sim 5$ ，ウエハ上での検出精度評価用マーク（B）の位置．

5. 5. 2 実験結果

図 5. 27（a）に示すウエハ上 5 ヶ所（Field, $k=5$ ）にある基本パターン（図 5. 26（b））を測定したときのアライメント検出誤差 e_{ijk} を図 5. 27（b）に示す．ヒストグラムは，11 種類（ $i=11$ ）ある検出精度評価マーク（B）のシフト量を，10 回（ $j=10$ ）ずつ測定

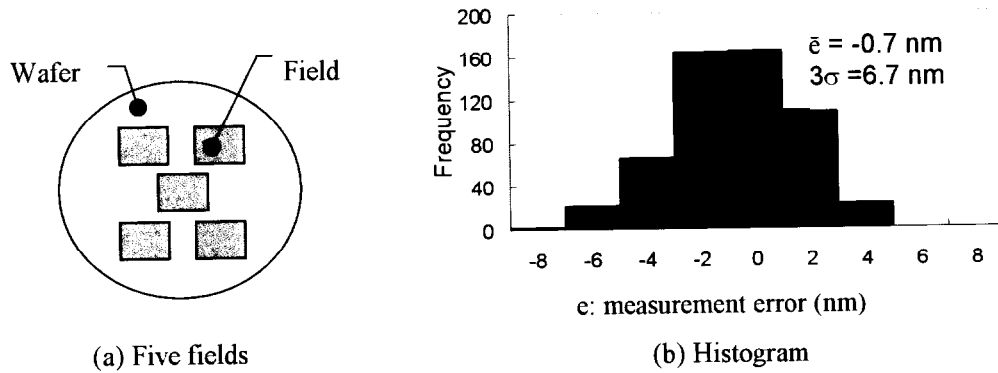


Fig. 5.27 Measurement error for test pattern that is covered with 0.1- μm -thick Al metallization films.

した結果 $(11(i) \times 10(j) \times 5(k) = 550)$ である。これを式 (5. 1 3) で定義した検出精度で評価すると、7.4nm ($|\bar{e}| + 3\sigma$) を得た。

$$\bar{e} = \frac{\sum_{i=1}^{11} \sum_{j=1}^{10} \sum_{k=1}^5 e_{ijk}}{550}; \quad \sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{11} \sum_{j=1}^{10} \sum_{k=1}^5 e_{ijk}^2}{550}}, \quad (5. 1 3)$$

ただし

$i=1 \sim 11$, 検出精度評価用マーク (B) の種類.

$j=1 \sim 10$, シフト量の測定回数.

$k=1 \sim 5$, ウエハ上での検出精度評価用マーク (B) の位置.

これは、これまで評価したアルミ薄膜付きウエハ (5. 3. 2. 2 項, 5. 4. 3 項) では、もっともよい精度である。誤差要因には、アルミ薄膜の厚さ、表面荒さ、パターン形状の非対称性、レジスト膜厚の不均一性があるが、このように高い精度が得られた理由は後述する。

次に、図 5. 2 6 (b) におけるアルミ薄膜の厚さが $\{0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 1.0 \mu\text{m}\}$ であるものを測定した結果を、図 5. 2 8 に示す。グラフの横軸はアルミ薄膜の厚さ (μm)、縦軸は、式 (5. 1 4) より求めた平均値 ($|\bar{e}|$) とばらつき (3σ) の合計 $|\bar{e}| + 3\sigma$ (nm) である。アルミ薄膜の厚さが $0.1 \mu\text{m} \sim 0.4 \mu\text{m}$ では、10.1 nm ($|\bar{e}| \pm 3\sigma$) 以下であるのに対して、アルミ薄膜の厚さ $1 \mu\text{m}$ では、44.4 nm ($|\bar{e}| + 3\sigma$) まで誤差が大きくなった。これから、アルミ薄膜の厚さが、誤差要因のひとつであることがわかった。検出誤差が大きくなった原因は、5. 5. 3 項で考察する。

最後に、図 5. 2 6 (a) から (f) までの基本パターンを測定した結果を、図 5. 2 9 に示す。横軸は基本パターン (a) から (f)、縦軸は $|\bar{e}| + 3\sigma$ (nm) である。これから、6 つの基本パターンで、誤差のばらつき (3σ) の傾向には差はないが、平均値 ($|\bar{e}|$) には明

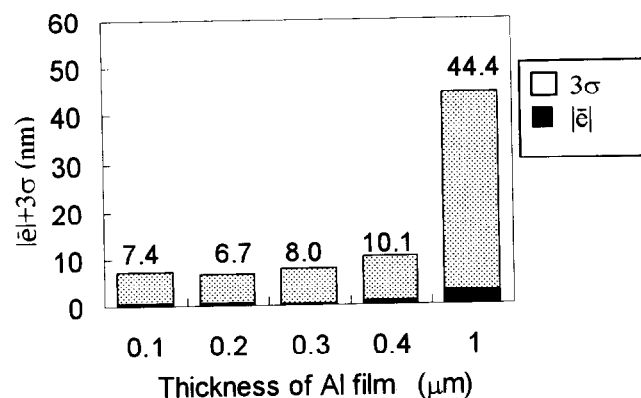


Fig. 5.28 A Comparison of $|e|+3\sigma$ in five wafers. Each wafer is covered with aluminum metallization film of 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, and 1.0 μm in thickness, respectively.

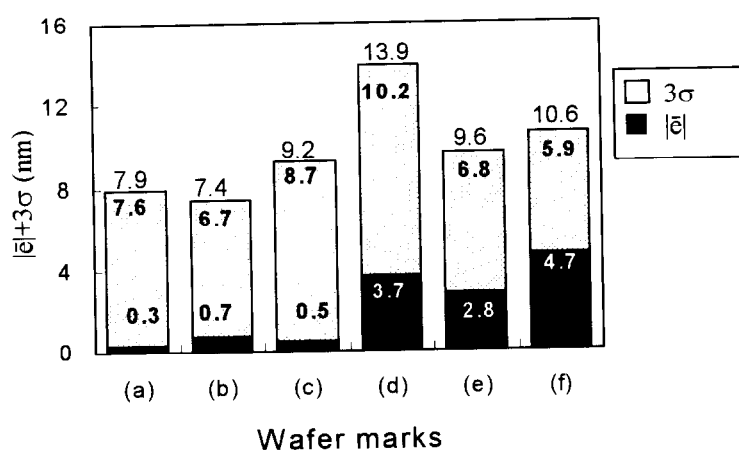


Fig. 5.29 Comparison of $|e|+3\sigma$ among the six test patterns illustrated in Fig. 5.28. (a)-(f), respectively.

らかに差があることが分かる。これから、エッジが長くなると平均値 ($|e|$) が大きくなることが分かった。

5. 5. 3 考察

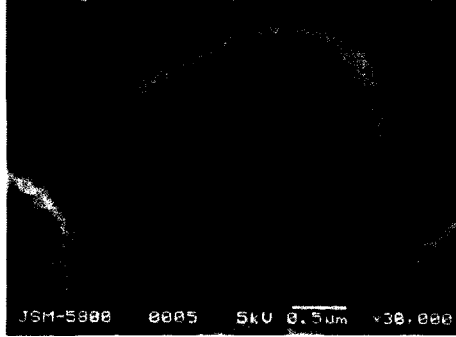
ここでは、図 5. 2 8 の実験結果で、厚さ $1\mu\text{m}$ のアルミ薄膜付きウエハで検出精度が 44.4nm ($|e|+3\sigma$) まで低下した原因について考察する。図 5. 3 0 (a) と (b) の SEM 写真は、アルミ薄膜の厚さが、それぞれ $0.1\mu\text{m}$ と $1.0\mu\text{m}$ である幅 $1\mu\text{m}$ × 長さ $2\mu\text{m}$ の矩形パターンである。大きな検出誤差 44.4nm ($|e|+3\sigma$) を生じた同図 (a) 厚さ $1\mu\text{m}$ のアルミ薄膜の表面

は、直径 20~40 nm の大きな粒状を示し、エッジ散乱光を反射する幅 1 μm のパターンエッジは丸まった形をしている。パターンサイズも全体的に大きく膨らんだ格好をしている。

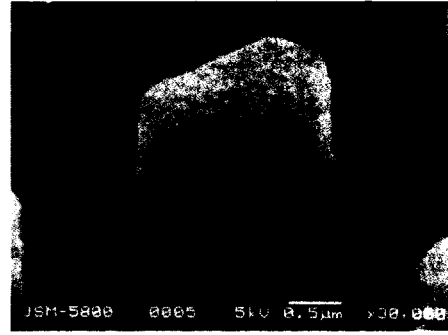
一方、検出誤差が 7.4 nm ($|\bar{e}|+3\sigma$) であった、同図 (b) 厚さ 0.1 μm のアルミ薄膜の表面は滑らかで、幅 1 μm のパターンエッジは直角に尖った形状をしている。これから、アルミ薄膜の表面粗さとパターンエッジの形状の劣化が、誤差要因になっていることが予想される。

図 5. 30 (c) と (d) は、それぞれ同図 (a) と (b) のパターンで反射したエッジ散乱光のビデオ信号強度である。検出誤差が大きい同図 (a) パターンからのエッジ像のビデオ信号 (c) は、ピーク強度が低く、その変化が緩やかである。

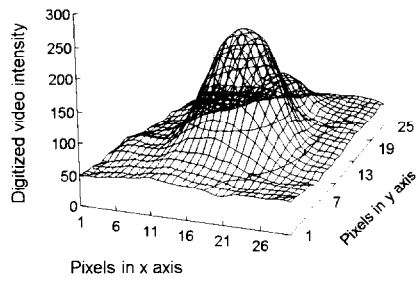
図 5. 30 (e) と (f) は、それぞれ同図 (c) と (d) のエッジ像のビデオ信号の強度変化を、等高線で表したものである。検出誤差が大きい同図 (e) の等高線は、楕円に近く、わずかに非対称な形状を示す。一方、検出誤差が小さい同図 (f) では、円形に近い対称な形状を示した。このことから、検出誤差の要因として、エッジ像のビデオ信号強度に見られる非対称性が予想される。



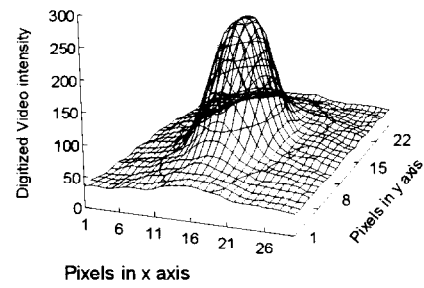
(a) SEM image of 1.0-μm-thick Al surface



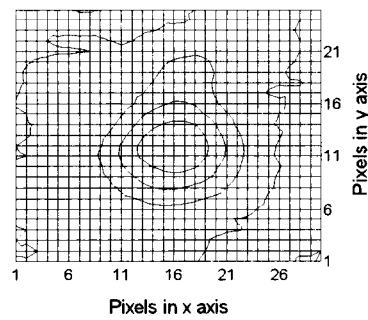
(b) SEM image of 0.1-μm-thick Al surface



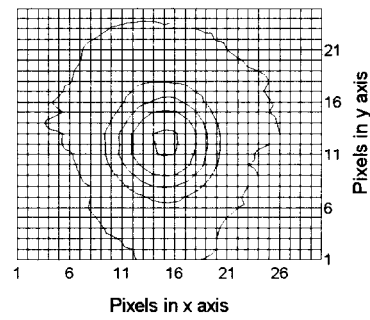
(c) 3-D video profiles of edge scattering from mark (a)



(d) 3-D video profiles of edge scattering from mark (b)



(e) Contour-line plots of (c)



(f) Contour-line plots of (d)

Fig. 5.30 Impact of Al-film thickness on both surface roughness and video-signal intensity

5. 6 結言

先の章で提案した色収差2重焦点法とセクタフレネルゾーンプレート法に残された課題を解決するために、2次元配列パターンからのエッジ散乱光を利用したアライメント計測を新たに提案した。試作装置により、SiC メンブレンの X 線マスクとプロセスウエハマークを計測し、基本的な性能を評価した。得られた結果を以下にまとめる。

- 1) マスクとウエハ間のギャップが $15\mu\text{m}$ から $25\mu\text{m}$ まで変動した場合に、鮮明なエッジ像の観察が可能であることを示し、マスクとウエハに対する精密な焦点合わせが不要であることを明らかにした。
- 2) SiC メンブレンの X 線マスクと 4 種類のプロセスウエハ（窒化膜付き、酸化膜付き、ポリシリコン膜付き、アルミ薄膜付き）の位置を繰り返し測定した結果、 $4.8\sim 6.4\text{ nm}$ (3σ) の検出再現性を得た。
- 3) プロセスウエハに作りこんだ検出精度評価用マークを測定した結果、 $10.4\text{nm}\sim 11.2\text{nm}$ ($|\bar{e}|+3\sigma$) の検出精度を得た。ただし、アルミ薄膜付きウエハでは、 38.4 nm ($|\bar{e}|+3\sigma$) まで低下した。低下する原因について考察を加えた。
- 4) 分光透過率が低い SiC メンブレンに対して高い検出再現性を得るための改良方法を明らかにした。
- 5) 上記 4) の改良を実施した試作装置により、厚さ 3nm の Cr 膜（分光透過率 38%）をつけた SiC メンブレンの X 線マスクとウエハの位置を繰り返し測定した結果、4 種類のプロセスウエハで $5.3\text{nm}\sim 6.4\text{nm}$ (3σ) の検出再現性を得た。
- 6) 上記 4) の改良を実施した試作装置により、厚さ 5nm の Cr 膜（分光透過率 18%）の SiC メンブレンを通して、プロセスウエハに作り込んだ検出精度評価用マークを測定した結果、4 種類のプロセス薄膜付きウエハで $10.2\text{nm}\sim 15.7\text{nm}$ ($|\text{Mean}|+3\sigma$) の検出精度を得た。
- 7) 上記 4) で改良を実施した試作装置により、厚さ $2\mu\text{m}\sim 5\mu\text{m}$ の SiC メンブレンを通して、ウエハに作り込んだ検出精度評価用マークを測定した結果、 $9.3\text{nm}\sim 13.0\text{nm}$ ($|\bar{e}|+3\sigma$) の検出精度を得た。
- 8) 厚さが異なるアルミ薄膜を付けた精度評価用マークを測定した結果、厚さ $0.4\mu\text{m}$ 以下のアルミ薄膜付きウエハでは、 10.1nm ($|\bar{e}|+3\sigma$) 以下の検出精度を得た。厚さ $1\mu\text{m}$ のアルミ薄膜付きウエハでは 44.4nm ($|\bar{e}|+3\sigma$) まで検出精度が低下した。さらに検出精度が低下した原因について考察を加えた。

上記の結果は、本章で提案したエッジ散乱光によるアライメント計測により、2章で提案した色収差2重焦点法の課題となった（1）焦点はずれによる誤差の低減、（2）オーバハ

ッド時間の短縮 (3) SiC メンブレンでのコントラスト低下の改善 (4) プロセスウエハでの精度低下の改善, 4 章で提案したセクタフレネルゾーン法の課題となった (5) プロセス薄膜の変化に対する適応性の改善が可能であることを明かにした. ただし, 厚さ $1\mu\text{m}$ のアルミ薄膜付きウエハでは, さらなる精度改善が必要であることを示した. 次の 6 章では, 5 章で試作したエッジ散乱光によるアライメント計測装置を X 線露光装置に搭載し, X 線露光によりその性能を評価する.

参考文献

1. R. I. Fuentes, C. Progler, S. Bukofsky and K. Kimmel: J. Vac. Sci. Technol. B 10, 3204 (1992).
2. M. Reilly, Q. Leonard, G. Wells, C. Capasso, P. Anderson, J. Taylor, W. Waldo, K. Yamazaki, G. Chen, K. Simon and F. Cerrina: Jpn. J. Appl. Phys., Part 1 33, 6899 (1994).
3. K. R. Kimmel and P. J. Hughes. Proc. SPIE 2793, 176 (1996).
4. R. Viswanathan, D. Seeger, A. Bright, T. Bucelot, A. Pomerene, K. Petrillo, P. Blauner, P. Agnello, and J. Warlaumont: Fabrication of high performance 512K static-random access memories in $0.25\mu\text{m}$ complementary metal-oxide semiconductor technology using x-ray lithography. J. Vac. Sci. Technol. B 11, 6 (1993) 2910.
5. R. Hirano, T. Higashiki, H. Nomura, O. Kuwabara, T. Nishizaki and N. Uchida: J. Vac. Sci. Technol. B. 12 (1994) 3247.
6. N. Magome, K. Ota and K. Nishi: Jpn. J. Appl. Phys. 29, (1990) 2597.
7. K. Fujii, T. Yoshihara, Y. Tanaka, K. Suzuki, T. Nakajima, T. Miyatake, E. Orita and K. Ito: J. Vac. Sci. Technol. B 12 (1994) 3949.
8. 早水良定: Olympus Microscope Review, オリンパス光学工業 (株) OMR 編集部発行, No. 9, pp. 10-19, 1985.
9. 江尻正員他: 画像処理産業応用総観 上巻 (基礎・システム技術編), フジ・テクノシステム, p436, 1994.
10. T. Shoki, R. Ohkubo, H. Kosuga, Y. Yamaguchi, N. Annaka, G. M. Wells, K. Yamazaki, and F. Cerrina: Accelerated radiation damage studies of antireflection materials on SiC x-ray mask membrane, J. Vac. Sci. Technol. B 12, 3995 (1994).
11. 飯塚啓吾: 光工学, 共立出版, p17, 1985.
12. 右高正俊編著: LSI プロセス工学, オーム社, p124, 1987.

第6章 エッジ散乱光によるアライメント計測の X 線リソグラフィへの応用

6. 1 緒言

本章では、第5章で述べたエッジ散乱光によるアライメント計測を X 線リソグラフィに応用し、X 線露光によりアライメント精度を評価する。

第5章では、エッジ散乱光によるアライメント計測法により、第2章で提案した色収差2重焦点法の課題（1）焦点はずれによる誤差の低減、（2）オーバヘッド時間の短縮、（3）SiC メンブレンでのコントラスト低下の改善、（4）プロセスウエハでの精度低下の改善、4章で提案したセクタフレネルゾーンプレート法の課題（5）プロセス薄膜の変化に対する適応性の改善が可能であることを示した。しかしながら、X 線露光による実証までは至っていない。

本章では、試作したエッジ散乱光によるアライメント計測装置を X 線露光装置に搭載し、アライメント精度の評価を行う。ここで、アライメント精度とは、マスクマークとウエハマークを位置合わせし、X 線露光により評価した値である。まず、実験に用いた X 線リソグラフィシステムを構成する常伝導 SR リング、ビームライン、縦型 X 線ステッパについて述べる。次に、アライメント誤差の原因と対策方法を述べる。最後に、X 線露光により得られたアライメント精度を述べ、エッジ散乱光によるアライメント計測により、本研究が目標とするアライメント精度、スループット、プロセス適応性を達成できることを明らかにする。

X 線露光では、住友重機械工業（株）田無製造所内に設置された、常伝導 SR リング“AURORA-2S”^{1, 2}と X 線リソグラフィ用に開発した X 線ビームラインを使用する。

6. 2 X 線リソグラフィへの応用

6. 2. 1 X 線リソグラフィシステム

図6. 1 (a) に、実験に用いた X 線リソグラフィシステムの全体構成を示す。X 線光源は、2つの常伝導マグネットからなるレーストラック型のシンクロトロン放射光（Synchrotron Radiation, SR）リングである。ビームラインは、0.2~2nm の波長領域の X 線を露光装置に導き、ビームライン終端のベリリウム窓までは超高真空である。ベリリウム窓は、超高真空と 1 気圧の差圧に耐える強度もつ。ここから出射した光は X 線露光装置へと導かれる。

図6. 1 (b) は、常伝導 SR リング“AURORA-2S”の全形写真である。蓄積される電子のエネルギーは 700MeV、平均的な蓄積電流は 500mA、電子寿命は 19 時間 (1/e) である。SR リング本体は、 γ 線と中性子を遮断する自己シールド（白色の部分、材質ポリスチレン、その内側には鉛ブロック）により囲まれている。自己シールドを含む本体の大きさは、長さ 7m×幅 4m×高さ 2m である。

同図6. 1 (c) は、ビームラインの外形写真である。ビームラインは、1 枚の振動ミ

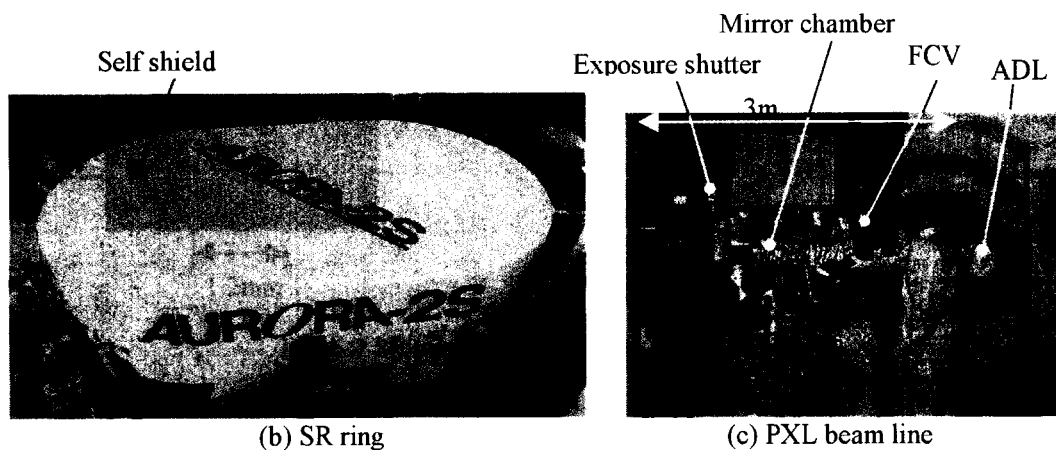
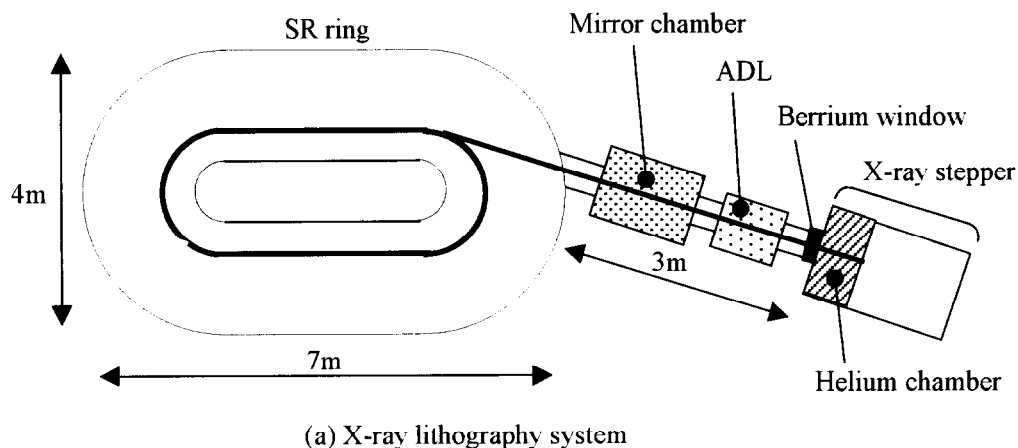


Fig. 6.1 A compact SR lithography system for 100nm device fabrication

ラーシステム、衝撃波遅延管(acoustic delay line, ADL)、光の取り出し口であるベリリウム窓から構成されている。ビームラインの全長は 3m である。ビームライン上流には露光シャッター (Exposure shutter) を配置し、X 線ステッパ側よりその開閉を制御する。

6. 2. 2 X線ビームライン

ビームラインの特徴は、光源点から終端まで長さ 5m と短く、1 枚のトロイダルミラーで集光と振動を同時に行い、高輝度の光を得ていることである。図 6. 2 は、反射ミラーの振動方式を模式的に表している。反射ミラーの振動中心は、光源点近くにある (Swing point)、この点を中心にして反射ミラーを振動させる。反射ミラーは、トロイダル形状(トロイダル半径 286m、円筒半径 110mm)であり、その有効反射面のサイズは、長さ 800mm×幅 70mm である。Si 基板の表面を Pt で蒸着された反射ミラーは、約 5×10^{-8} Pa 超高真空中に置かれる。SR 光線とミラーのなす角度が 1.2° の時 (図 6. 2 の中央に示す)、反射光が露光面の中心にくるように、SR 光源点から 2.9m 離れた所に反射ミラーを、さらに 2.7m 離れた所にウエハを配置した。反射ミラーは、発散する

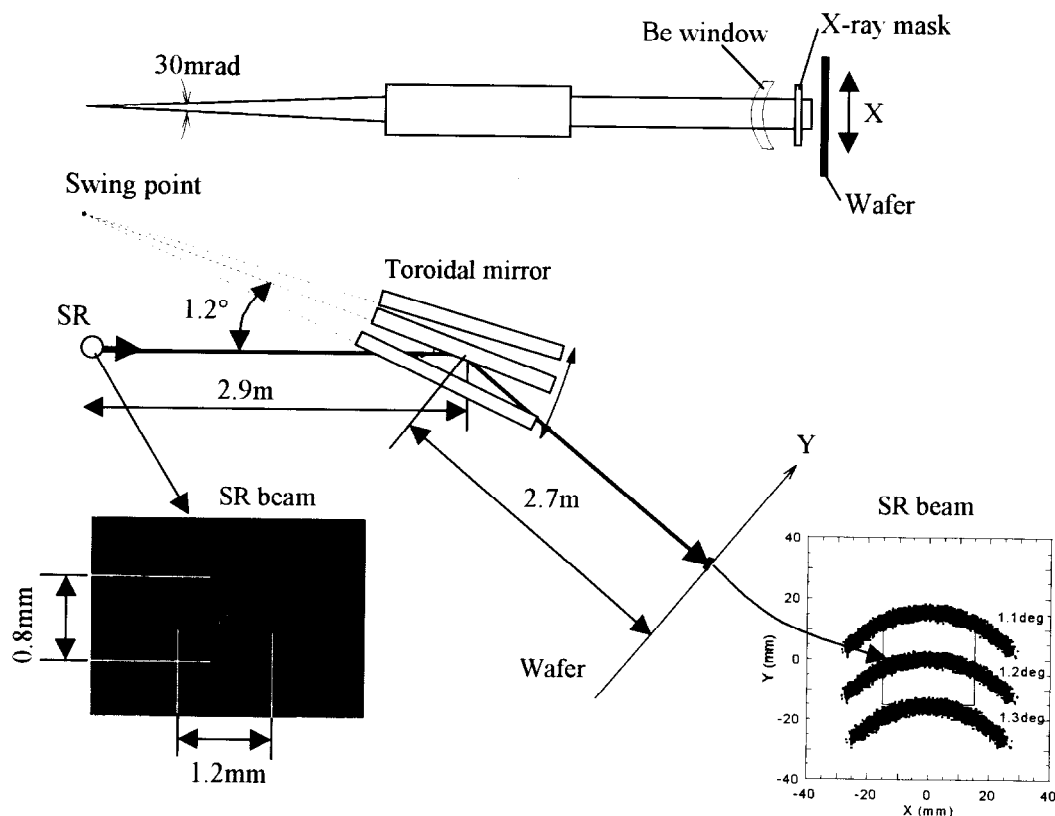


Fig. 6.2 SR beam reflected on a toroidal mirror

SR 光のうち水平方向に 30mrad、垂直方向に 2mrad 取り込み、ミラー反射後、平行光にしてウエハに入射させている。同図の左下は、CCD カメラにより観察した SR ビームの強度分布である。SR ビームの寸法は、1.2mm ($3\sigma_x$) $\times$ 0.8mm ($3\sigma_y$) の楕円形状である

図 6. 2 の右下に示すスポットダイアグラムは、レイトレースプログラム SHADOW⁴⁾によって計算した、SR 光とミラのなす角度が 1.07°、1.2°、1.3° におけるウエハ露光面上の SR ビーム形状を示している。上述した振動方式により、反射ミラーの振動角度によって露光面上のビーム形状が変化しないことがわかる。

図 6. 3 (a) は、露光したウエハ上 30mm $\times$ 30mm の領域で、SR ビーム強度の均一性を測定した結果である。図中の等高線と数値 (%) は、露光後にウエハ上に残ったフォトリソ resist SAL601 (SHIPLAY FAR EAST 製) の厚さから換算した露光ドーズ量である。換算は、図 6. 3 (b) に示す露光ドーズ量 (mA) とレジスト残膜率 (%) の関係から求めた。図 6. 3 (a) から、30mm $\times$ 30mm の範囲で、 $\pm 3.9\%$ の露光ドーズの均一性が得られた。これから半導体デバイス製造で要求される $\pm 3\%$ を満足する範囲は 26mm $\times$ 26mm ($\pm 2.8\%$) であることがわかった。

最後に、本ビームラインの露光強度を測定するために、フォトリソ resist TDUR-N908 を用いて、最適ドーズ量を測定した。露光結果から、蓄積電流値 500mA の場合、露光時間 2.6 秒で、最適ドーズ量 1300mAsec を得た。露光に用いたフォトリソ resist TDUR-

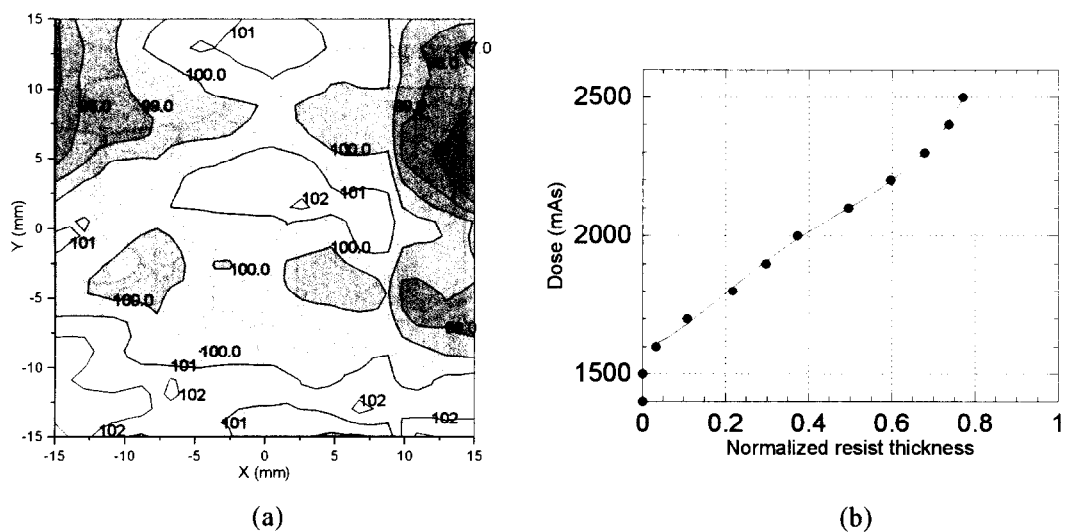


Fig. 6.3 Exposure dose of PXL beamline (a) Contour map of exposure dose uniformity. Dose uniformity is $\pm 2.8\%$ in 26 mm square and $\pm 3.9\%$ in 30 mm square. (b) Exposure dose vs normalized resist thickness of SAL601.

N908 の露光感度 $110\text{mJ}/\text{cm}^2$ ⁵⁾とすると、露光時間 2.6 秒から、SR ビームの露光強度として $43\text{mW}/\text{cm}^2/500\text{mA}$ を得た。この露光強度は、報告されている X 線リソグラフィ用ビームラインとしては^{3,4,5,6}、もっとも高い値である。本装置では、発散する SR 光源点の近くに反射ミラーを配置し、この 1 枚の反射ミラーだけで集光することにより、高い強度が得られたものと思われる。さらに露光感度の高い化学増幅型レジスト（たとえば、NEB-033、東京応化製）を使えば、1 秒台でのパターン転写が可能である。TDUR-N908 を使った微細パターンの転写については、6.4.4 節で述べる。

6.2.3 X 線ステッパ

100nm 以下の微細パターン転写を目的として、試作した X 線ステッパの構成を、図 6.4 に示す。X 線ステッパは 3.2.2 項で述べたように水平方向に放射される SR 光を利用するために、ステージは縦型となる。X 線ステッパは 1) アライメント計測装置、2) 縦型マスクステージ、3) 縦型ウエハステージ、4) ウエハハンドリング装置、5) マスクハンドリング装置から構成される。Z 軸は、水平方向から放射される SR 光の方向を示す。

X 線ステッパ側面の写真を図 6.5 に示す。X 線ステッパ本体の寸法は、幅 1m×長さ 1.5m×高さ 1.7m である。SR 光は、矢印で示した方向より 1 気圧のヘリウムで満たされたステッパチャンバー (Stepper chamber) に入射する。

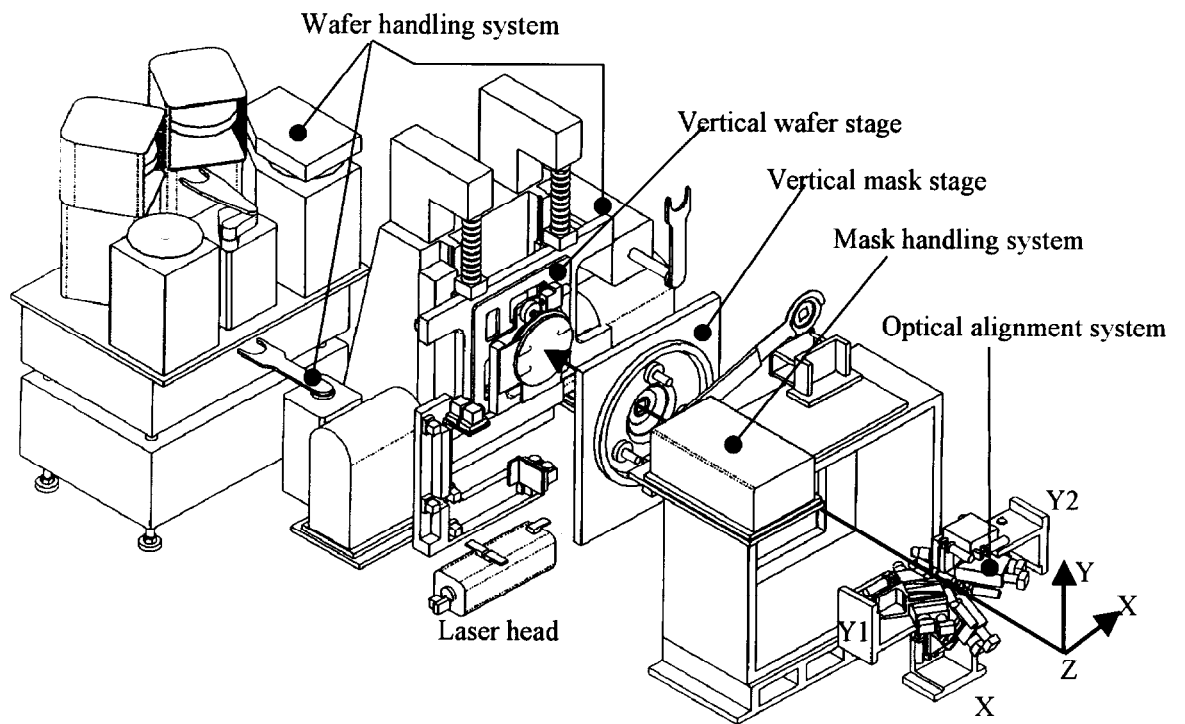


Fig. 6.4 An x-ray stepper

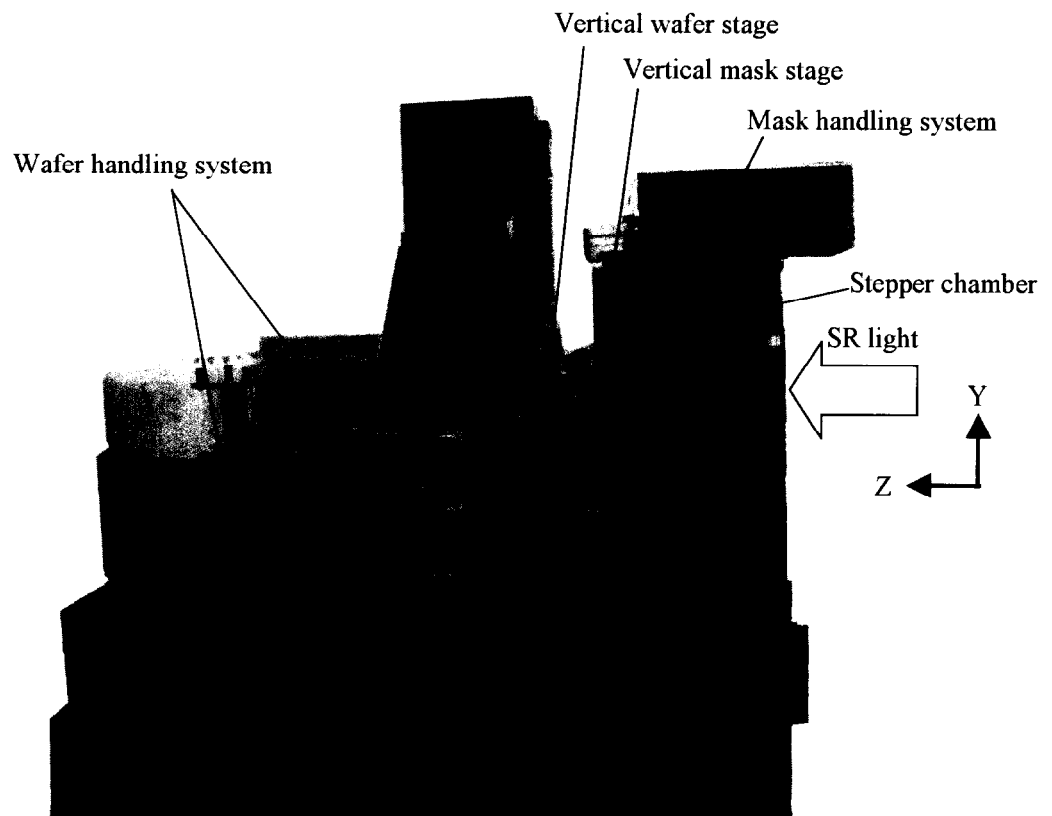


Fig. 6.5 Side view of an x-ray stepper

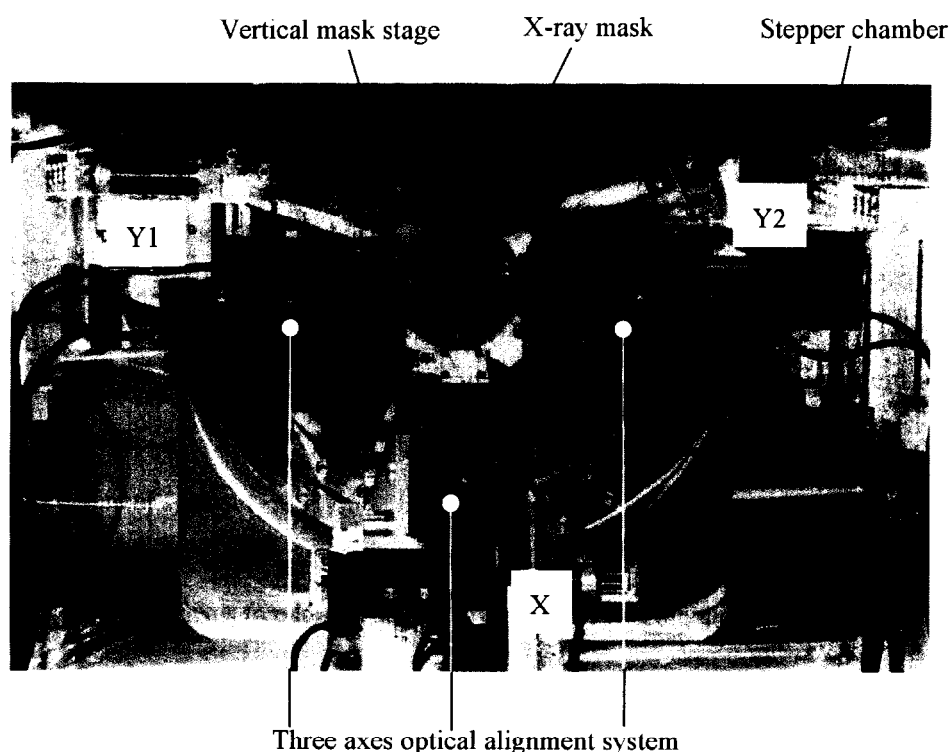


Fig. 6.6 Three axes optical alignment system installed in x-ray stepper

ステッパーチャンバーには、第5章で試作したエッジ散乱光によるアライメント計測装置（図5. 3）を、図6. 6に示すように3台（X, Y1, Y2）搭載した。アライメント装置は、縦型マスクステージの中央に固定されたX線マスクの左側（Y1）、右側（Y2）、下側（X）に設置した。3台のアライメント計測装置で計測したマスクとウエハの位置ずれ x , y_1 , y_2 は、式（6. 1）によりマスクステージのZ軸回りの回転量 θ_z (rad)、ならびにウエハステージのX, Y方向の駆動量 Δx , Δy (nm) としてフィードバックし（図6. 7）、その値が常に零になるよう制御した。

$\Delta x : x$

$\Delta y : (y_1 + y_2)/2$ (6. 1)

$\theta_z : \arctan [(y_1 - y_2)/d]$

ただし、 d はアライメントマークY1とY2の間隔 (nm) である。

アライメント照明の光源には、高いピーク輝度が得られるキセノンランプ（商品名：コンパクトキセノンランプ、定格消費電力 300W, ORC 社オーストラリア）を使用した。このランプ光源からの光は、波長 450-800nm の可視光に対し 80%以上の高い透過率をもつ液体リキッドガイド（0.59NA, コア径 $\Phi 5\text{mm}$, オーストラリア ROFIN 社）により、ヘリウムチャンバ内に設置されたアライメント計測装置に入射した。

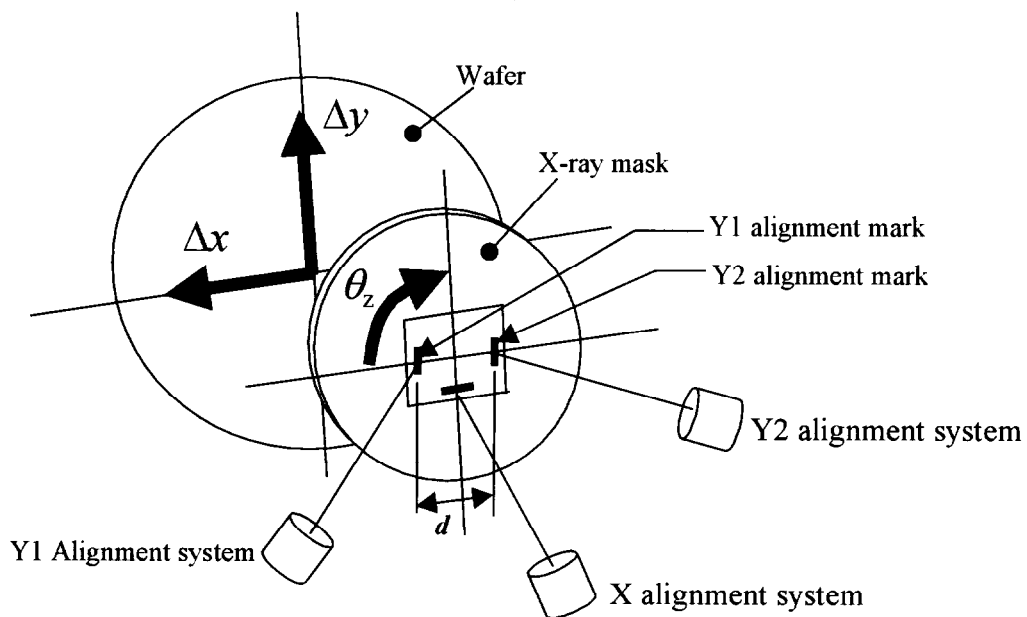


Fig.6.7 Three axes freedom of stage-movement for fine alignment

6. 3 X線露光によるアライメント精度の評価

6. 3. 1 アライメント精度の評価方法

アライメント精度は、レジストパターンによる X 線 2 重露光により評価した。X 線 2 重露光による評価では、1 枚のマスクを一方向にずらせて 2 回露光することにより、アライメント精度におけるマスクパターンの位置歪をほぼ零とするすることができる。従って X 線 2 重露光におけるアライメント誤差要因は、1) アライメント計測誤差と 2) ウエハステージとマスクステージの位置誤差の 2 種類になる。X 線 2 重露光で使用した X 線マ

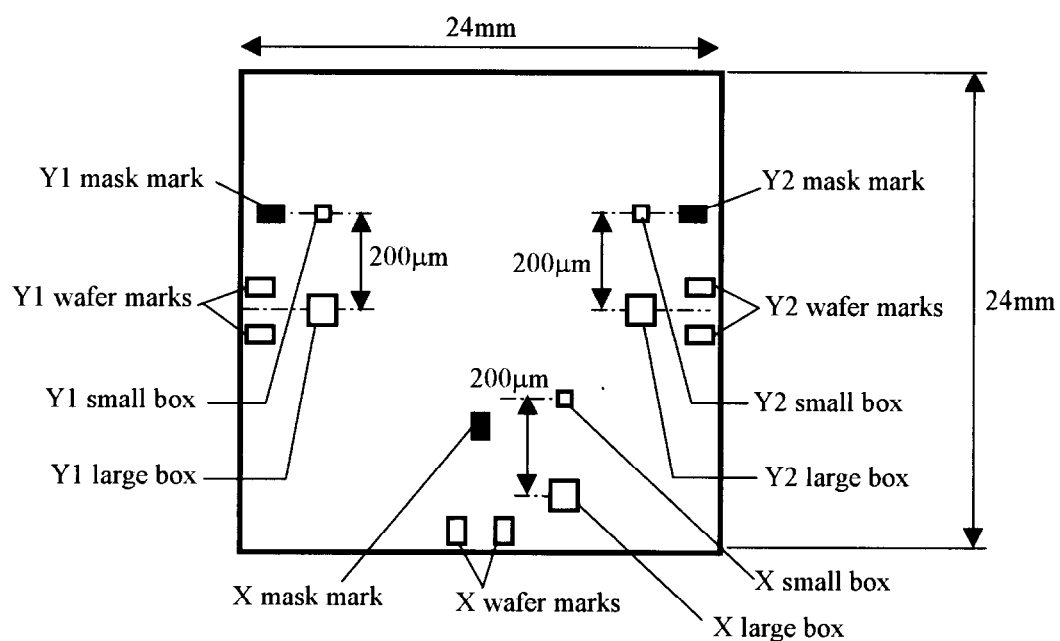


Fig. 6.8 Mask pattern arrangement

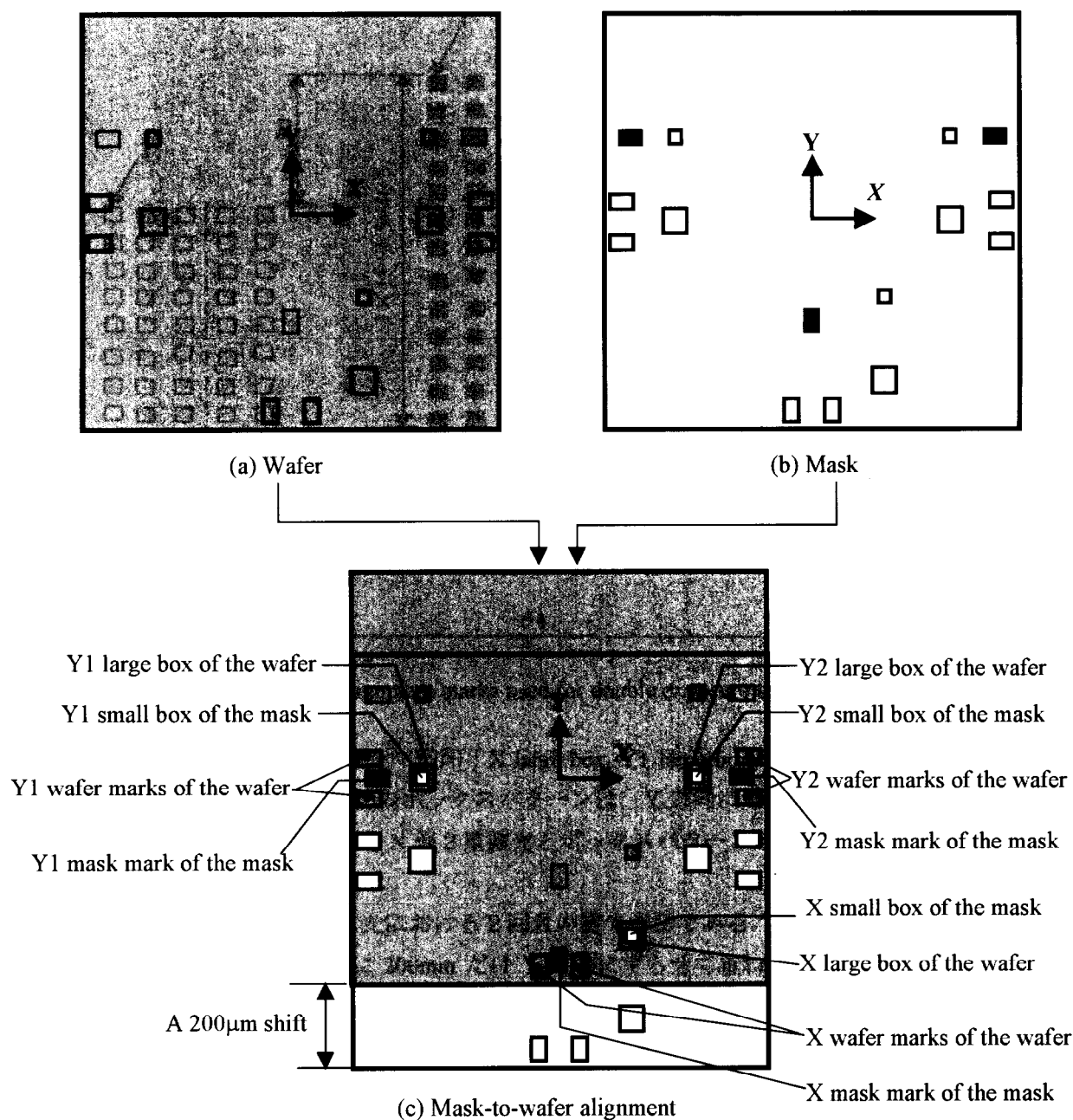


Fig. 6.9 Mask-to-wafer alignment

クを，図 6. 8 に示す．24mm $\times$ 24mm の露光領域内 3 個所に，マスクマーク（X mask mark, Y1 mask mark, Y2 mask mark）とウエハマーク（X wafer marks, Y1 wafer marks, Y2 wafer marks）を配置した．マスクマークとウエハマークは Y 方向に 200 μ m 離して配置した．この 200 μ m は，X 線 2 重露光においてマスクを一方方向にずらす量である．

図 6. 9 のマスクを使ってアライメント精度を測定するために，20 $\times$ 20 μ m のボックスパターン（ $\square$ 印：X small box, Y1 small box, Y2 small box）をマスクマークの近傍に配置し，

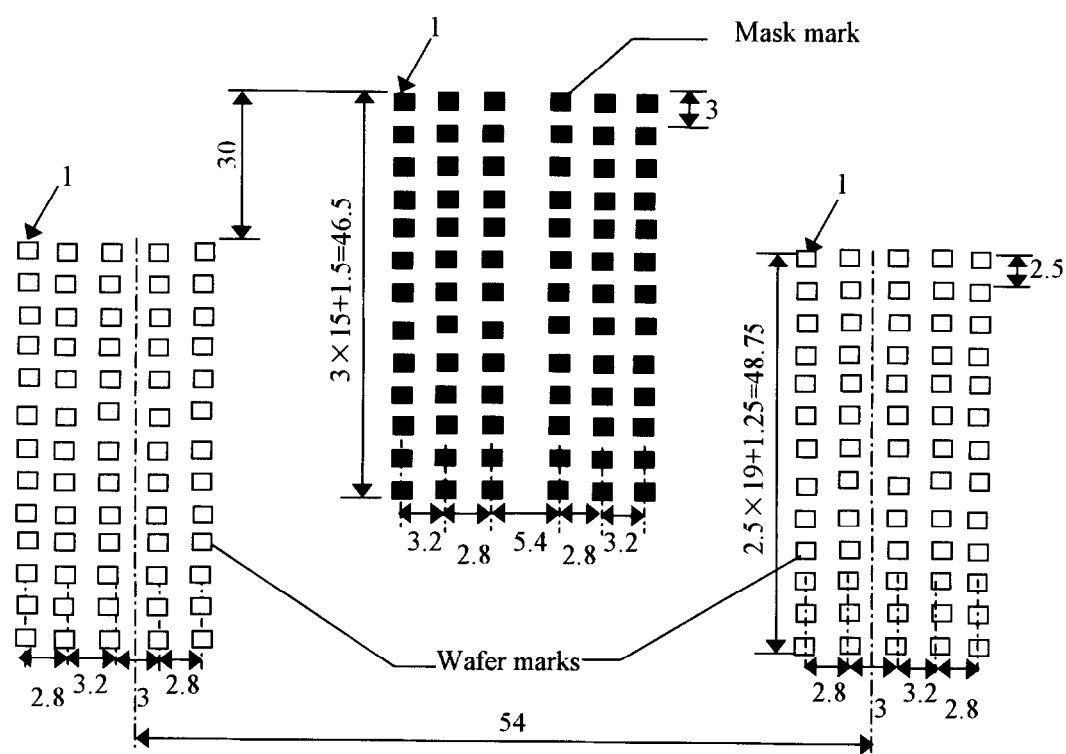


Fig. 6.10 Alignment marks used for double exposure test

40×40μm のボックスパターン（□印：X large box, Y1 large box, Y2 large box）をウエハマークの近傍に配置した。互いのボックスパターンは、Y 方向に 200μm 離して配置した。次に、この X 線マスクを使った X 線 2 重露光とボックスパターンによるライメント精度の測定方法を述べる。

図 6. 9 は、X 線 2 重露光における 2 回目の露光方法である。1 回目に転写したウエハ（a）とマスク（b）を互いに 200mm だけ Y 方向にずらせて重ね合わせた状態（c）で、2 回目の露光を行う。この場合、ウエハに転写したウエハマーク（□印：X wafer marks of the wafer, Y1 wafer marks of the wafer, Y2 wafer marks of the wafer）の中央に、マスク上のマスクマーク（■印：X mask mark of the mask, Y1 mask mark of the mask, Y2 mask mark of the mask）が入り込んだ配置となるため、これを使ってマスクとウエハの精密なアライメント計測を実施する。

アライメント精度は、図 6. 9（c）で重なる 2 種類のボックスパターンから測定する。ウエハ上の 40×40μm のボックスパターン（□印：X large box of the wafer, Y1 large box of the wafer, Y2 large box of the wafer）の中に、マスク上の 20×20μm のボックスパターン（■印：X small box of the mask, Y1 small box of the mask, Y2 small box of the mask）が入り込んだ配置となる。

X 線 2 重露光で使ったマスクマーク（黒色■印）とウエハマーク（白色□印）の寸法を図 6. 10（単位μm）に示す。マスクマークは、小さな矩形パターン（■印 1 個：幅

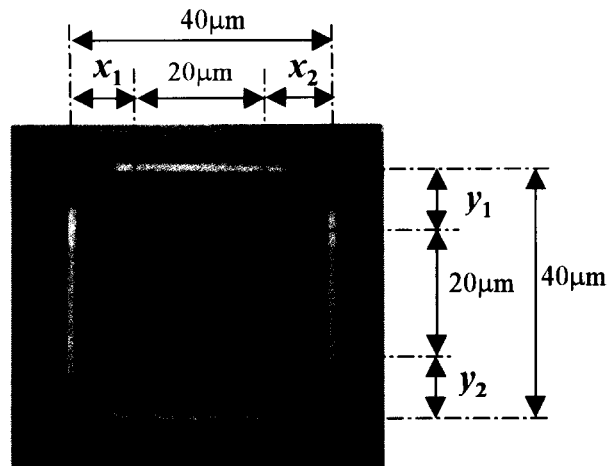


Fig. 6.11 Box-in-box pattern used for the measurement of alignment error.
Alignment error is defined by $(x_1 - x_2)/2$.

1μm×長さ 1.25μm) が $6^{(x)} \times 13^{(y)} = 78$ 個だけ並んだものである。ウエハマークは、矩形パターン (□印 1 個 : 幅 1μm×長さ 1.5μm) が $5^{(x)} \times 13^{(y)} = 78$ 個だけ並んだものである。

図 6. 1 1 は、X 線 2 重露光後、現像したウエハに形成された 2 種類のボックスパターンの光学顕微鏡写真である。このボックスパターンは、光リソグラフィの分野で標準的に使われるアライメント精度測定装置 (Coherence probe misregistration system KLA5100, 米国 KLA-Tencor 社) 専用のパターンである。アライメント誤差は、2 つのボックスパターン間のずれ量 ($\Delta x, \Delta y$) で定義される。

$$\begin{aligned}\Delta x &= (x_1 - x_2)/2 \\ \Delta y &= (y_1 - y_2)/2\end{aligned}\tag{6. 2}$$

ただし、 x_1 と x_2 は x 方向の距離、 y_1 と y_2 は y 方向の距離である。

X 線露光におけるアライメント精度は、式 (6. 2) で定義されるアライメント誤差 ($\Delta x, \Delta y$) の偏差 (3σ) と平均値 (Mean) により評価する。

6. 3. 2 露光条件

表 6. 1 に露光条件を示す。X 線露光には、8 インチのウエハ上にポジ型レジスト UV2-HS (Shipley 製) を厚さ 0.4μm だけ塗布したものを使用する。X 線マスクには、SiC メンブレンを使用する。マスクパターンは、Ta 合金である。露光におけるマスクとウエハ間のギャップは 20μm とする。

Table 6.1 Exposure condition for mask-to-wafer alignment test

Item	Exposure condition
Positive photoresist	UV2-HS(Shipley)
Wafer size	8 inches
X-ray mask	SiC membrane Amorphous Ta alloy absorber

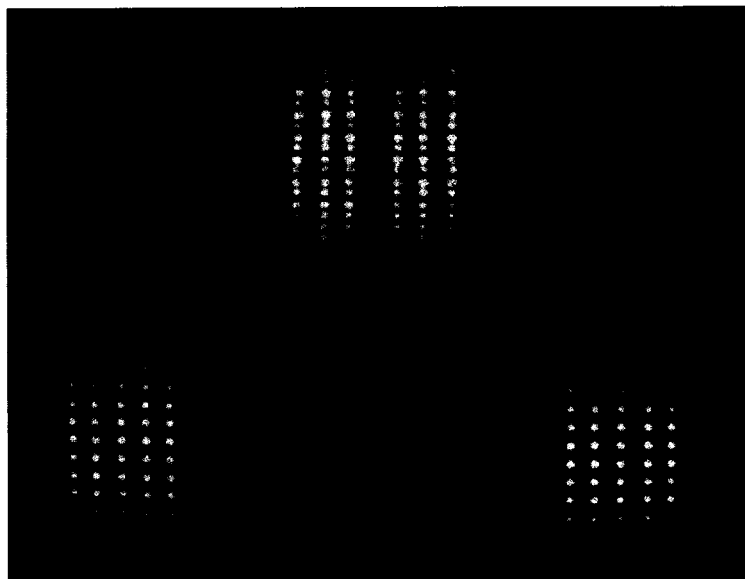


Fig. 6.12 Multi-spot alignment video image of X-ray aligner

6. 3. 3 初期の露光結果

アライメント計測に使用したマスクマークとウエハマーク（図6. 1 0）からのエッジ散乱光のビデオ画像を図6. 1 2に示す．画面の中央の上にあるエッジ像は，マスクマークからのエッジ散乱光である．画面の両側にあるエッジ像は，ウエハマークからのエッジ散乱光である．いずれも鮮明に結像していることがわかる．このびでお画像から，マスクマークとウエハマークの水平方向の位置を精密に計測した．

初期の露光結果を，図6. 1 3に示す．同図は連続して露光した4枚のウエハで測定したアライメント誤差（単位 nm）のヒストグラムである．アライメント精度として，X: 52nm ($|\text{Mean}|+3\sigma$)，Y1: 199nm ($|\text{Mean}|+3\sigma$)，Y2: 220nm ($|\text{Mean}|+3\sigma$)であった．この精度は，本研究が目標とするアライメント精度 30nm ($|\text{Mean}|+3\sigma$)を満足していない．次の節では，初期の露光結果におけるアライメント誤差の原因を述べ，アライメント誤差の低減方法を示す．

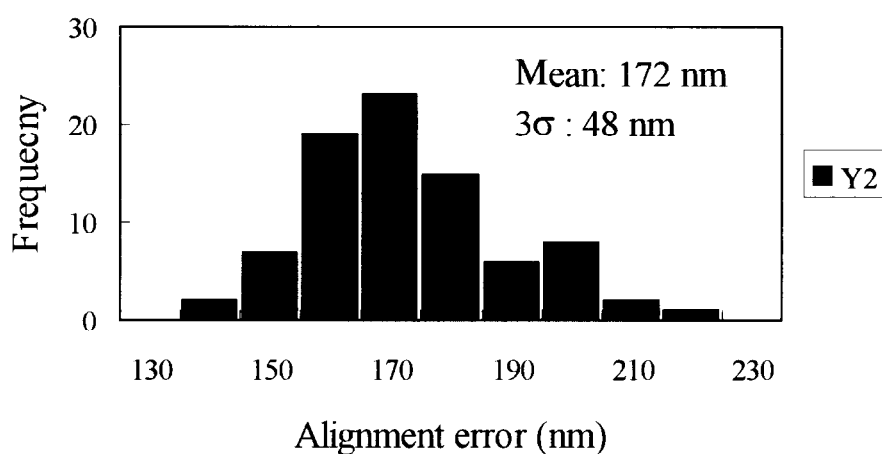
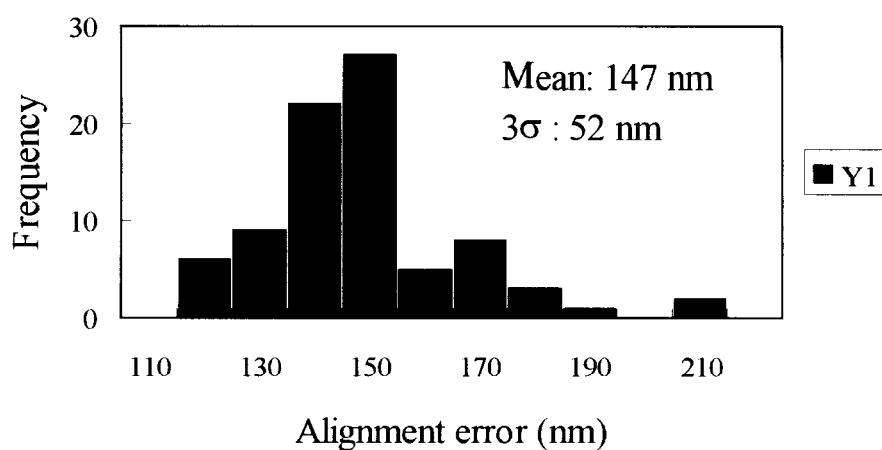
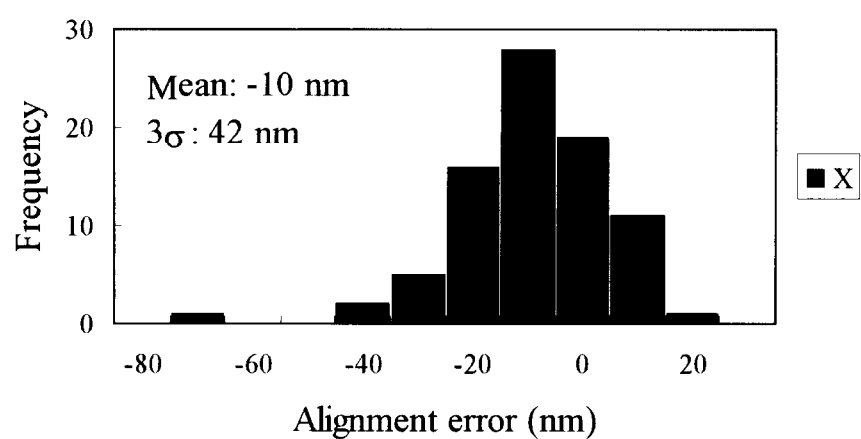


Fig. 6.13 Alignment error measured from four wafers with 21 field per wafer

6. 4 アライメント誤差の原因と改善

6. 4. 1 アライメント検出光軸と X 線の角度補正

ここでは、アライメント精度 ($|\text{Mean}|+3\sigma$) の平均値 (Mean) の原因について述べる。図 6. 14 (a) は、Y 軸 (図 6. 9 (c)) におけるウェハマーク (Y1) とマスクマーク (Y1) を検出するアライメント検出光軸 (Optical axis) と、X 線 (X-ray beam axis) の間に生じる角度差 θ を示す。ここで、アライメント検出光軸は、アライメント計測装置 (図 6. 6) の検出光軸を指し、マスクとウェハに対して垂直に入射する。ここで、X 線ステップ (図 6. 5) の姿勢が角度 θ だけ傾くと、アライメント検出光軸と X 線との間に角度差 θ が生じる。この角度差 θ は、ウェハ全面の露光で保持されるため、マスクマークの位置は、常に a だけずれてウェハに転写される。このため、この角度差 θ は、アライメント誤差の平均値の原因となる。

$$a = b \cdot \sin \theta \quad (6. 3)$$

ただし、 b はマスクとウェハ間のギャップである。

図 6. 14 (b) は、X 線ステップの姿勢を、時計回りに角度 θ だけ傾けた場合である。アライメント検出光軸と X 線の角度差が零 ($\theta=0$) となり、アライメント誤差は零となる。この角度 θ は、露光によるアライメント誤差の平均値 a と露光ギャップ b を式 (6. 3) に代入して求めればよい。

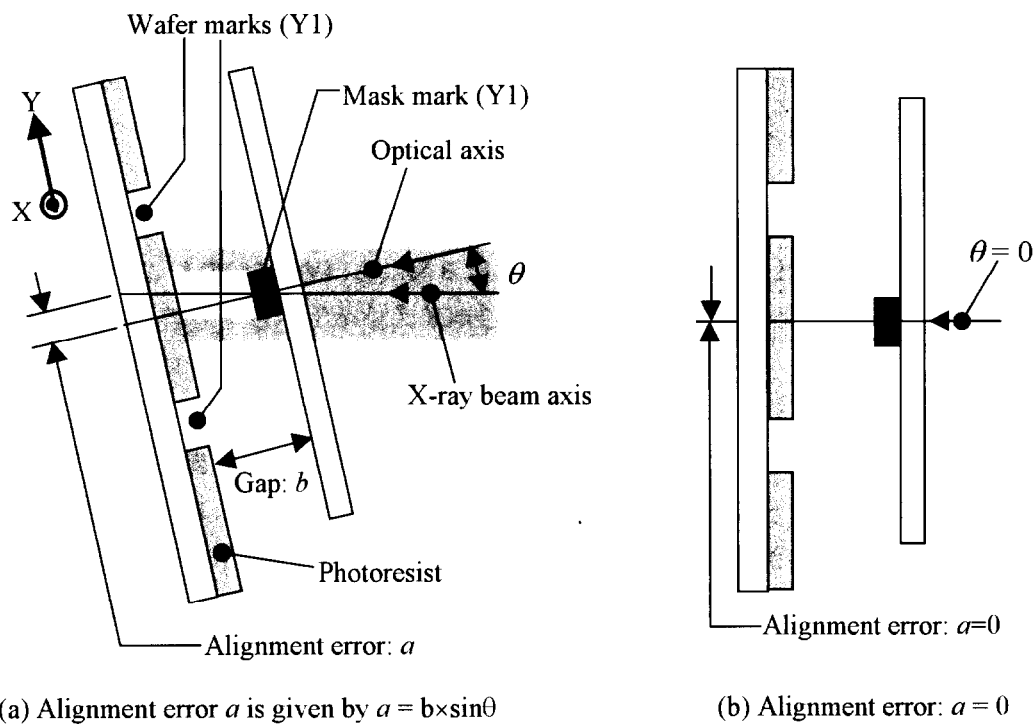


Fig. 6.14 Alignment error induced by the angle θ between an X-ray beam axis and an optical axis of the alignment system

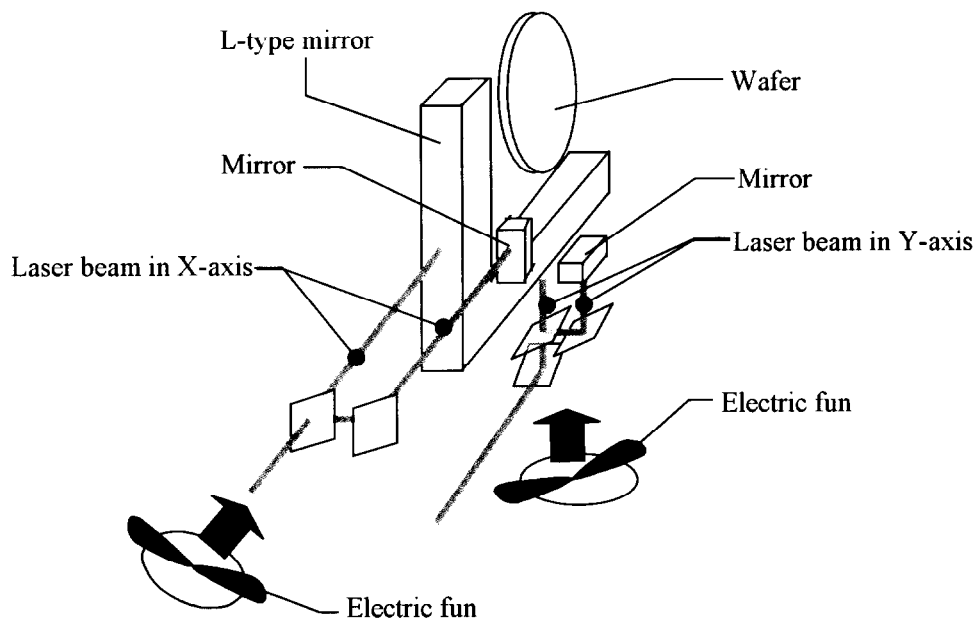


Fig. 6.15 Electric fans installed on both x-axis and y-axis of laser positioning system

6. 4. 2 レーザ干渉計における大気ゆらぎの低減

ここでは、アライメント精度 ($|\text{Mean}|+3\sigma$) のばらつき (3σ) の原因と対策について述べる。ウエハステージの XY 方向の位置は、レーザ干渉計 (HP5517A, Hewlett Packard) で計測され、その位置が制御される。レーザ干渉計のレーザ光路中に存在するわずかな大気ゆらぎは、温度むら⁷と大気密度むらとなつてレーザ光の波長 ($\lambda=633\text{nm}$) を変化させる。これは、ウエハステージの位置誤差の原因となつて、アライメント誤差のばらつき (3σ) を低下させる。

この大気ゆらぎを低減するために、レーザ光路に追加した2基の送風機 (電動ファン, 日本ブローア製, MF602-12V) を、図6. 15に示す。X軸方向とY軸方向の送風により、レーザ光路中に存在するわずかな大気ゆらぎを平均化⁸することができる。これにより、ウエハステージの位置誤差を低減することができる。

6. 4. 3 多重露光によるステージ位置誤差の低減

ここでは、6. 4. 2項で述べたウエハステージの位置誤差をさらに低減し、アライメント精度 ($|\text{Mean}|+3\sigma$) のばらつき (3σ) を小さくできる多重露光について述べる。

図6. 16は、X線2重露光の1回目の露光で生じる2種類のボックスパターン間の位置ずれを示す。(a) X線が上のボックスパターン (寸法 $40\times 40\mu\text{m}$) を照射したあと、(B) . X線が下に移動し、下のボックスパターン (寸法 $20\times 20\mu\text{m}$) を照射する。X線が(a) から (b) に移動する間のウエハステージの位置誤差 (Position error) により、ウエハ

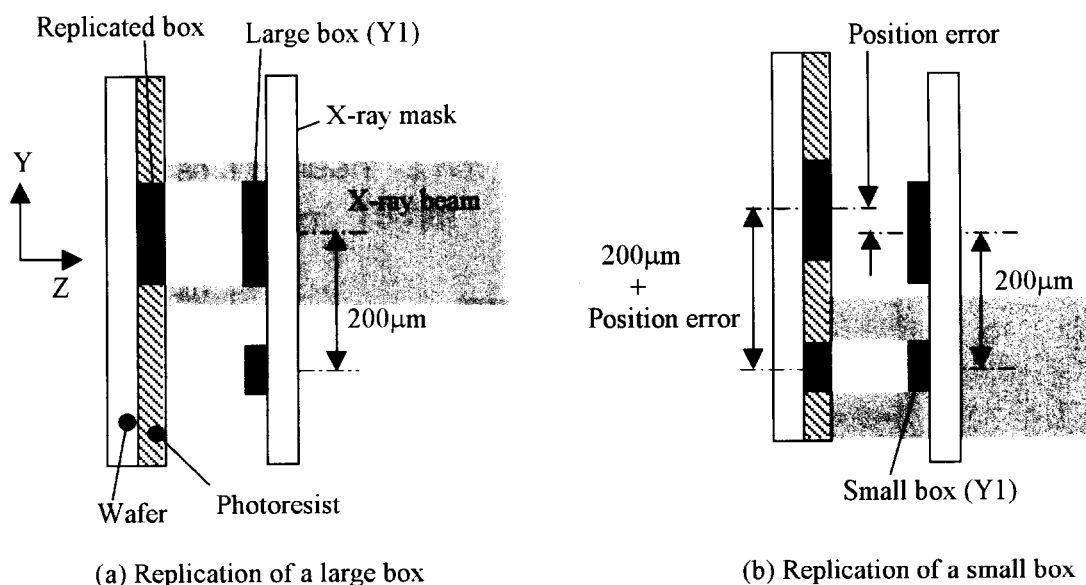


Fig. 6.16 Multiple exposure to improve alignment accuracy of 3σ

に転写される2種類のボックスパターン間の距離は $200\mu\text{m} + (\text{Position error})$ だけにずれ。このずれ量は、アライメント誤差のばらつき (3σ) の原因となる。

このステージの位置誤差は、複数回のパターン転写（以下、多重露光とよぶ）による平均効果によって小さくすることが可能である。

6. 5 X線露光による総合評価

6. 5. 1 アライメント精度

ここでは、6. 4節の対策を実施した結果を述べる。露光条件を、表6. 2に示す。多重露光 (Multiple exposure) の回数を8回とした以外は、6. 2. 2項の初期の露光と同じである。X線露光の結果を図6. 17に示す。ヒストグラムは、露光した6枚のウエハ（データ数 126, 21 データ/ウエハ）で測定したアライメント誤差である。アライメント精度として X : 18nm ($|\text{Mean}| + 3\sigma$) , Y1 : 14nm ($|\text{Mean}| + 3\sigma$) , Y2 : 15nm ($|\text{Mean}| + 3\sigma$) を得た。この結果は、本研究が目標とする最小線幅 100nm 以下の半導体デバイスで要求されるアライメント精度 30nm ($|\text{Mean}| + 3\sigma$) を十分満足する値である。

Table 6.2 Exposure condition for mask-to-wafer alignment test

Item	Exposure condition
Positive photoresist	UV2-HS (Shipley)
Wafer size	8 inches
X-ray mask	SiC membrane Amorphous Ta alloy absorber
Multiple exposure	8 times

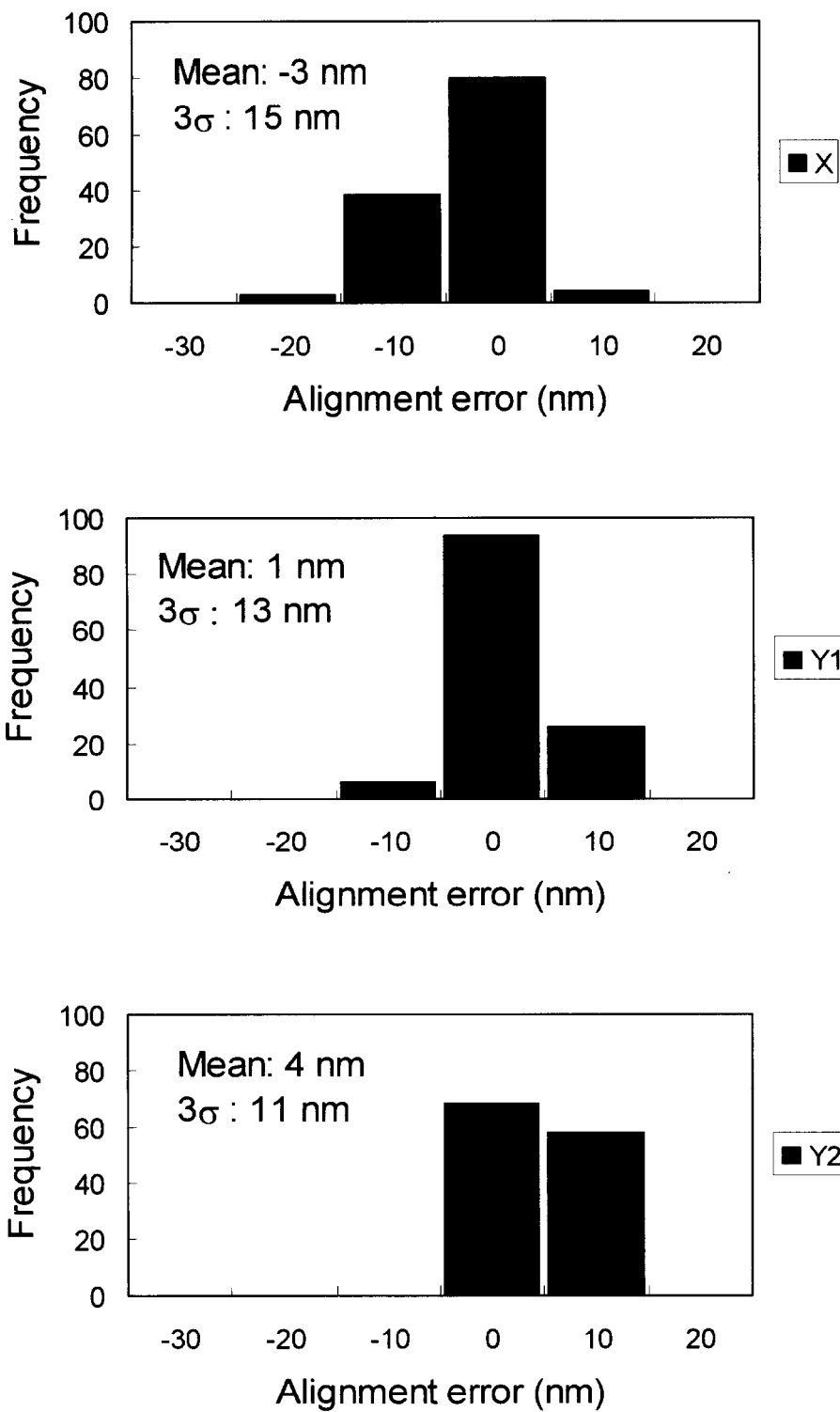


Fig. 6.17 Alignment accuracy (mean+3 σ) measured from six wafers with 21 fields.

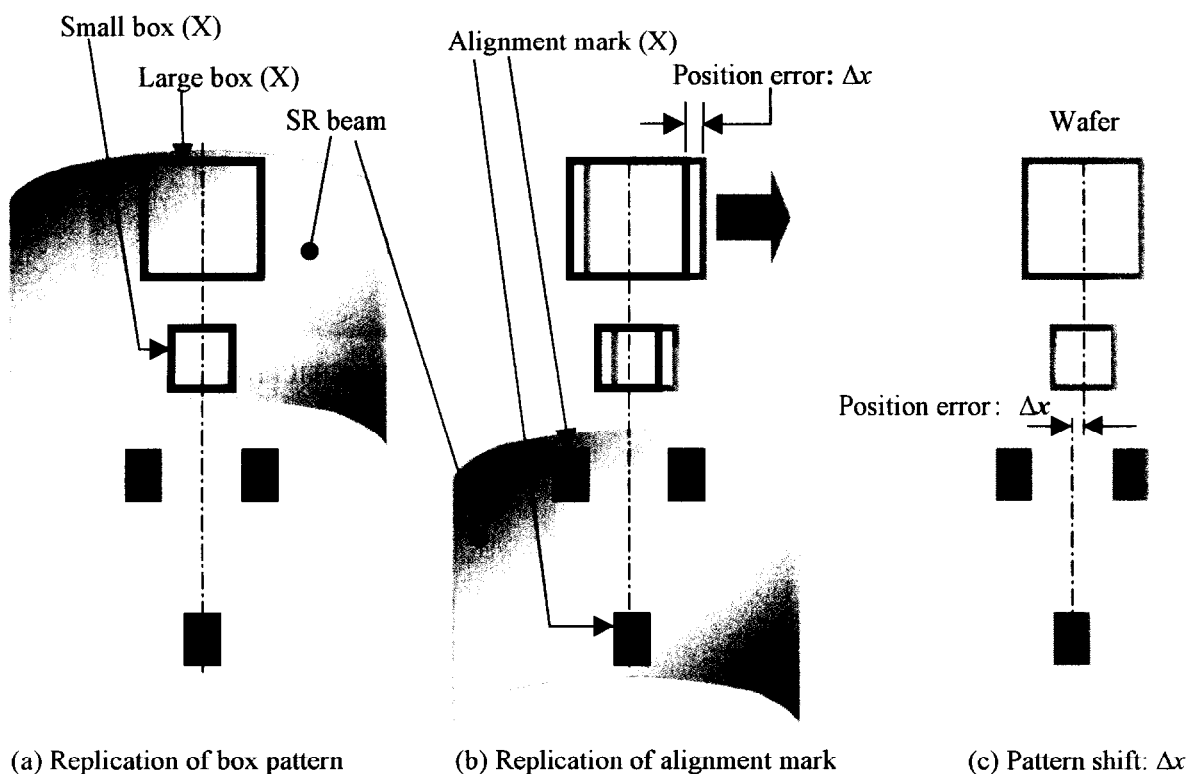


Fig. 6.18 Pattern shift Δx in X-axis

6. 5. 2 精度改善に関する考察

6. 5. 1 項で述べたアライメント精度のばらつき (3σ) に着目すると、Y に比べて X の精度が低下していることがわかる。この原因と改善方法について考察する。

X 線露光に用いたマスク (図 6. 8) におけるボックスパターン (X) とアライメントマーク (X) は垂直方向に離れた位置に配置したために、ボックスパターンの転写 (図 6. 18 (a)) と、アライメントマーク (X) の転写 (図 6. 18 (b)) は別々に実施される。従って、(a) と (b) の間に生じたウエハステージの位置誤差 (Position error: Δx) だけ、(c) ボックスパターンとアライメントマークの X 方向の位置がずれることが予想される。

改善方法としては、ボックスパターン (X) とアライメントマーク (Y) を同じ高さに配置することにより、両方のパターンが同時に転写することが考えられる。

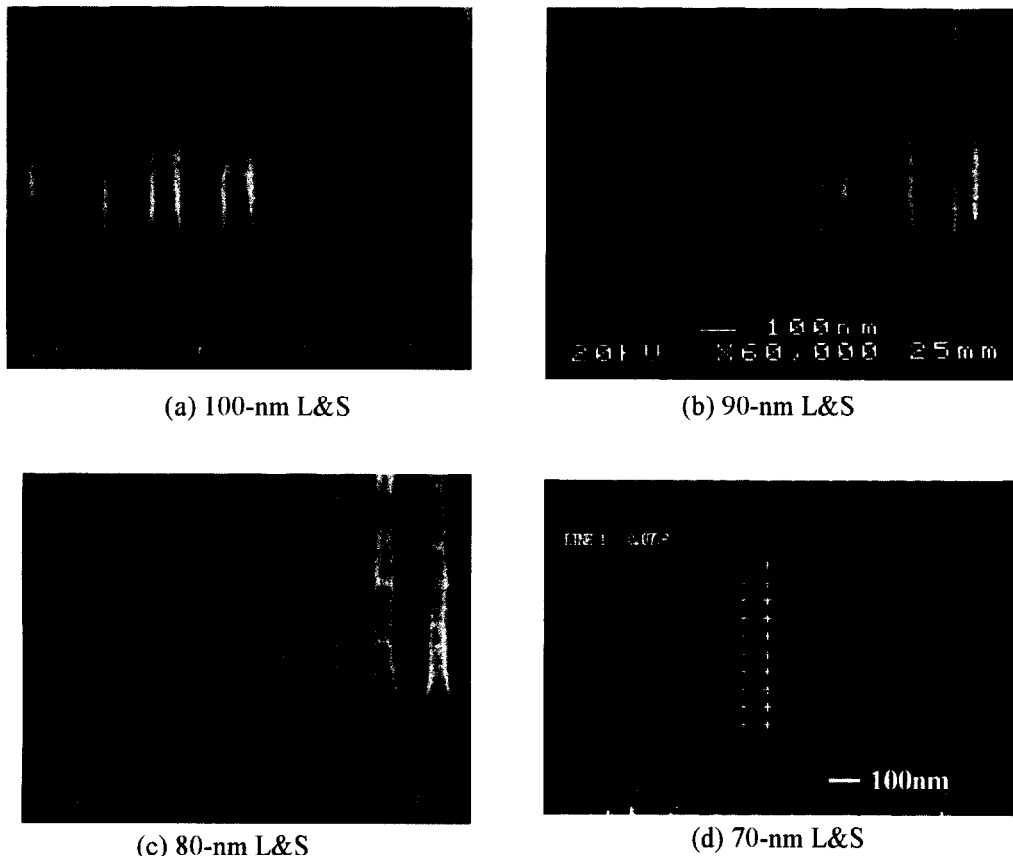


Fig. 6.19 SEM photographs of 100-nm L&S, 90-nm L&S, 80-nm L&S, and 70-nm L&S

6. 5. 3 微細パターンの転写特性

試作した X 線ステッパにより転写した微細パターンを，図 6. 1 9 に示す．X 線マスクとウエハの露光ギャップは $15\mu\text{m}$ に設定した．線幅 100nm から 80nm の微細パターン転写では，化学増幅型レジスト（TDUR-N908，東京応化製）を厚さ $0.4\mu\text{m}$ 塗布したウエハを使用した．線幅 70nm の微細パターン転写では，化学増幅型レジスト（UV6，Shipley 製レジスト）を厚さ $0.2\mu\text{m}$ 塗布したウエハを使用した．100nm～70nm の微細パターン蚊等アスペクト比が 1：4（線幅 100nm）から 1：5（線幅 80nm）の微細パターンを転写することができた．線幅 70nm では，エッジ部分にわずかな劣化が見られるが，これはマスクパターン形状の劣化，あるいはウエハステージの位置誤差が原因だと思われる．

以上の露光結果から，試作した X 線ステッパにより，本研究が目標とする最小線幅 100nm 以下の微細パターンを転写できることが明らかとなった．

6. 6 結言

エッジ散乱光を利用したアライメント計測法を X 線リソグラフィに応用し、X 線露光により、本研究が目的とするアライメント精度、スループット、プロセス適応性（1. 2 節、表 1. 1）を評価した。以下に得られた結論を要約する。

- 1) 実験に用いた X 線リソグラフィシステムの構成を示し、露光に用いた X 線の露光強度が $43\text{mW/cm}^2/500\text{mA}$ 、露光強度の均一性が $\pm 2.8\%$ （露光領域 $26\text{mm} \times 26\text{mm}$ ）であることを示した。
- 2) X 線露光装置の構成と試作したアライメント計測装置による X 線マスクとウエハの位置合わせ方法を明らかにした。
- 3) レジストパターンによる X 線 2 重露光では、初期の露光結果として $52\text{nm} \sim 230\text{nm}$ ($|\text{Mean}|+3\sigma$) のアライメント精度を得たが、これは本研究が目的とするアライメント精度 30nm ($|\text{Mean}|+3\sigma$) を満足するものではない。
- 4) 上記 3) におけるアライメント誤差の原因と改善について、①アライメント検出光軸と X 線の角度差がアライメント誤差の平均値の原因となること、ならびにその角度を求める方法、②レーザ干渉計における大気ゆらぎの影響を低減する方法、③多重露光によるステージ位置誤差を低減する方法を明らかにした。
- 5) 上記 4) の改善方法を実施した結果、レジストパターンによる X 線 2 重露光により $14\text{nm} \sim 18\text{nm}$ ($|\text{Mean}|+3\sigma$) のアライメント精度を得た。これは本研究が目的とするアライメント精度 30nm ($|\text{Mean}|+3\sigma$) を十分満足するものである。

以上で得られた結果は、エッジ散乱光によるアライメント計測法により、本研究が目的とするアライメント精度 30nm ($|\text{Mean}|+3\sigma$) を十分満足できることを明らかにした。スループットでは、2 章で提案した色収差 2 重焦点法の課題となったオーバヘッド時間をゼロとすることから、高いスループットが予想できる。本研究の課題として、X 線露光によるプロセスウエハでのアライメント精度の評価が必要である。

参考文献

-
1. N. Takahashi et al.: Proc. SPIE 923, 47 (1998).
 2. H. Nakabushi: Proc. EPAC 206 (1992).
 3. J. P. Silverman, R. P. Rippstein, and J. M. Oberschmidt: IBM J. Res. Dev. 37, 395 (1993).
 4. T. Kaneko, Y. Saitoh, S. Itabashi, and H. Yoshihara: J. Vac. Sci. Technol. B 9, 3214 (1991).
 5. H. Shimano, T. Hifumi, and Y. Ozaki: Jpn. J. Appl. Phys., Part 1 31, 4185 (1992).

-
6. Y. Watanabe, S. Hara, N. Mizusawa, Y. Fukuda, and S. Uzawa: J. Vac. Sci. Technol B 15, 2503 (1997).
 7. 応用物理学会編：超微細加工技術，オーム社出版局，p24, 1997.
 8. 大塚二郎，坂戸啓一郎共著：精密位置決め機構設計，工業調査会，p240.

第7章 結論

7. 1 本研究のまとめ

本研究は、X線リソグラフィが要求するアライメント性能を達成することを目的として、光の反射・回折・散乱を利用した3種類のアライメント計測法の研究と、それらをX線リソグラフィへ応用した結果について述べた。光の反射を利用した色収差2重焦点法では、マスクとウエハの計測方法から半導体デバイス試作までを扱った。光の回折を利用したセクターフレネルゾーンプレート法では、基礎的な性能評価と実用化に向けた課題までを扱った。光の散乱を利用したエッジ散乱光によるアライメント計測法では、SiCメンブレンによるX線マスクとプロセスウエハを使った基礎的な性能評価から、X線露光によるアライメント精度の評価までを扱い、その結果、最小線幅100nm以下の半導体デバイス製造において、X線リソグラフィが要求するアライメント性能を達成できることを実証するに至った。各章において得られた結論を以下に要約する。

第2章「色収差2重焦点法によるアライメント計測」で得られた結論

- 1) レンズの軸上色収差とパターンバリアフィルタを組み合わせた色収差2重焦点法により、X線マスクとウエハの鮮明な像を同時に観察できることを実証した。具体的には、実用的なレンズ設計条件を明らかにしたうえで、試作した色収差27 μm の対物レンズによる像が回折限界であることを示した。また、ウエハマークの帯域光照明により、レジスト膜中で生じる干渉縞によるマーク像歪み誤差を10nm以下にできることを示した。
- 2) 色収差2重焦点法により、X線マスクとウエハの位置を繰り返し測定した結果、13nm (3σ) 以下の検出再現性を得た。一方で、色収差2重焦点法における誤差の主要因として像“ぼけ”となる焦点はずれを指摘し、対物レンズの波面収差との関連を示した。

第3章「色収差2重焦点法のX線リソグラフィへの応用」で得られた結論

- 3) 第2章で試作した色収差2重焦点装置をX線露光装置に搭載し、X線露光によりアライメント精度を評価した。レジストパターンによるX線2重露光では、ギャップ変動による焦点はずれを補正した結果、20nm～31nm ($|\text{Mean}|+3\sigma$) のアライメント精度を得た。これは、本研究が目標とするアライメント精度30nm ($|\text{Mean}|+3\sigma$) をほぼ満足するものである。
- 4) X線露光によるNMOSFET試作では、3種類のプロセスウエハで81nm～407nm ($|\text{Mean}|+3\sigma$) のアライメント精度を得た。200nmを越える平均値 ($|\text{Mean}|$) の誤差要因としてマスクパターンの位置歪を指摘した。ばらつき (3σ) の要因として焦点はずれを指摘した。
- 5) X線露光による64Mb-模擬DRAM試作では、4種類のプロセスウエハで78nm～

125nm ($|\text{Mean}|+3\sigma$) のアライメント精度を得た。この精度は、明らかに上記 3) のレジストパターンに比べて大きいことから、課題としてプロセスウエハでの精度改善が必要であることが明らかとなった。さらに焦点はずれを補正するオーバヘッド時間の短縮が必要であることを指摘した。

- 6) X 線マスクの SiC メンブレンでは、ウエハマークのコントラストが 1/2 以下に低下するため、これを改善する必要があることを示した。
- 7) 計算機実験により、マーク像が“ぼけ”る焦点はずれによるアライメント誤差の原因がレンズの偏心と回転であることを示した。さらに、ウエハマークのエッジ角度やレジスト厚さの変化によりアライメント誤差が生じることを示した。
- 8) 得られた結果 3) - 7) から、色収差 2 重焦点法により、本研究が目標とするアライメント精度 30nm ($|\text{Mean}|+3\sigma$) をレジストパターンによる X 線 2 重露光により達成できることを明かにした。課題として、(1) 焦点はずれによる誤差の低減、(2) オーバヘッド時間の短縮、(3) SiC メンブレンでのコントラスト低下の改善、(4) プロセスウエハでの精度改善が必要であることが明らかとなった。

第 4 章「セクタフレネルゾーンプレートによるアライメント計測」で得られた結論

- 9) セクタフレネルゾーンプレート (SFZP) 提案し、その設計条件を明らかにした上で、SFZP をマスクとウエハに配置し、斜め方向から入射したレーザ光により反射・回折した集光ビームを検出するアライメント計測方法を示した。
- 10) 上記 9) により試作したアライメント計測装置により、X 線マスクと 4 種類のプロセスウエハを繰り返し測定した結果、7nm~9nm (3σ) の検出再現性を得た。
- 11) ウエハに配置した SFZP からの集光ビームの光学像は、レジストの厚さの変化により強度が零になることを示し、レジストを含むプロセス薄膜の変化に対する適応性を改善する必要性があることを示した。
- 12) マスクとウエハ間のギャップ変動により、ウエハとマスクに配置した SFZP からの集光ビームの強度が、周期的に変化することを示し、対策として反射防止膜と遮光膜が有効であることを述べた。
- 13) 得られた結果 9) - 12) から、セクタフレネルゾーンプレート法により、2 章で提案した色収差 2 焦点法の課題 (1) 焦点はずれによる誤差の低減と (2) オーバヘッド時間の短縮が可能であることを明かにした。課題として、(5) プロセス薄膜の変化に対する適応性の改善が必要であることを示した。

第 5 章「エッジ散乱光によるアライメント計測」で得られた結論

- 14) 2 次元配列パターンをマスクとウエハに配置し、斜め方向から対物レンズを通して照明光を入射し、パターンエッジで反射・散乱した光を検出するアライメント計測を提案した。

- 1 5) 上記 1 4) により試作したアライメント計測装置を用いて、SiC メンブレンの X 線マスクと 4 種類のプロセスウエハを繰り返して測定した結果、4.8nm～6.4nm (3σ) の検出再現性を得た。
- 1 6) マスクとウエハ間のギャップが 15 μ m から 25 μ m まで変動した場合、鮮明なエッジ像の観察が可能であることを示し、マスクとウエハに対する精密な焦点合わせが不要であることを示した。
- 1 7) プロセスウエハに作りこんだ検出精度評価用マークを測定した結果、3 種類のプロセスウエハで 10.4nm～11.2nm の検出精度 ($|\bar{e}|+3\sigma$) を得た。アルミ薄膜付きウエハでは厚さ 0.4 μ m 以下で 10.1nm ($|\bar{e}|+3\sigma$) を得たが、厚さ 1 μ m では 44.4nm ($|\bar{e}|+3\sigma$) まで低下した。
- 1 8) 分光透過率が低い SiC メンブレンに対して高い検出再現性を得るための改良方法を示し、厚さ 3nm の Cr 膜 (分光透過率 38%) と厚さ 5nm の Cr 膜 (分光透過率 18%) をつけた SiC メンブレンの X 線マスクを使った実験結果として、5.3nm～6.4nm (3σ) の検出再現性と 10.2nm～15.7nm ($|\text{Mean}|+3\sigma$) の検出精度を得た。
- 1 9) 得られた結果 1 4) ～ 1 8) から、エッジ散乱光によるアライメント計測により、2 章で提案した色収差 2 重焦点法の課題 (1) 焦点はずれによる誤差の低減、(2) オーバヘッド時間の短縮、(3) SiC メンブレンでのコントラスト低下の改善、(4) プロセスウエハでの精度低下の改善、4 章で提案したセクタフレネルゾーンプレート法の課題 (5) プロセス薄膜の変化に対する適応性の改善が可能であることを明らかにした。

第 6 章「エッジ散乱光によるアライメント計測法の X 線リソグラフィへの応用」で得られた結論

- 2 0) 第 5 章で試作したアライメント計測装置を X 線露光装置に搭載し、レジストパターンによる X 線 2 重露光により、アライメント精度を評価した。
- 2 1) レジストパターンによる X 線 2 重露光では、初期の露光結果として 52nm～230nm ($|\text{Mean}|+3\sigma$) のアライメント精度であったが、このアライメント誤差の原因と改善方法として①アライメント光軸と X 線の角度差、ならびにその角度を求める方法、②レーザ干渉計における大気ゆらぎの影響を低減する方法、③多重露によるステージ位置誤差を低減する方法を明らかにした。
- 2 2) 上記 2 1) の改善を実施した結果、レジストパターンによる X 線 2 重露光により 14nm～18nm ($|\text{Mean}|+3\sigma$) のアライメント精度を得た。これは本研究が目的とするアライメント精度 30nm ($|\text{Mean}|+3\sigma$) を十分満足するものである。
- 2 3) 得られた結果 2 0) ～ 2 2) から、エッジ散乱光によるアライメント計測法により、本研究が目的とするアライメント精度 30nm ($|\text{Mean}|+3\sigma$) を満足できることを明らかにした。スループットでは、2 章で提案した色収差 2 重焦点法の課題となった

オーバーヘッド時間を零とできることから、高いスループットが予想できる。本研究の課題として、X 線露光によるプロセスウエハでのアライメント精度の評価が必要である。

7. 2 今後の課題

本研究の目的である 20nm ($|\text{Mean}|+3\sigma$) 以下のアライメント精度を達成したエッジ散乱光によるアライメント計測法 (5 章と 6 章) には、次の 2 つの課題が残されている。

1 番目の課題は、6 章の結言で述べたとおり、X 線露光によるプロセスウエハでのアライメント精度の評価である。そのためには、最小線幅 100nm 以下の微細な電子回路パターンを描画した X 線マスク (たとえば 4 Gbit-DRAM) とプロセスウエハ (たとえば, Gate level, Field level, Bit contact level, Metal level) を用いたアライメント精度の評価が必要である。またここ数年、ウエハ表面の平坦化を行う CMP (Chemical-Mechanical Polishing)¹ が、光リソグラフィの解像度向上のために使われており、この CMP に対するアライメント精度の評価も必要である。

2 番目の課題は、X 線リソグラフィの拡張性を視野に入れたアライメント精度の改善である。最近の報告では、X 線リソグラフィを使った最小線幅 50nm 以下のパターン転写^{2, 3, 4}が議論されており、その領域では 10nm ($|\text{Mean}|+3\sigma$) 以下のアライメント精度が要求される。そのためには、6. 4 節で検討されていない誤差要因 (例えば、アライメント照明光の強度変化など) を明かにし、対策を実施することによりアライメント精度を改善する必要がある。

7. 3 本研究の将来展望

本研究の将来展望として、X 線リソグラフィ以外の分野への応用が考えられる。2000 年から 2001 年にかけて、電子ビームを使った等倍マスクによる近接露光技術⁵や、等倍マスクをウエハに近接する新しい概念に基づくイオン注入装置⁶が提案されており、これらの分野にも本研究によるアライメント計測方法を応用することが可能である。

これまで、半導体デバイスの製造に広く使われてきた光リソグラフィ技術は、2010 年頃に新しいリソグラフィ技術に移行することが予想されている。本研究によるアライメント計測法は、新しいリソグラフィの候補の一つである X 線リソグラフィへの応用を目的としたものであり、今後は X 線リソグラフィ分野、あるいは、それ以外の分野で応用されることを期待する。

参考文献

1. 柏木正弘編：CMP のサイエンス，サイエンスフォーラム，1997.
2. T. Kitayama, K. Itoga, Y. Watanabe, and S. Uzawa: Proposal for a 50 nm proximity x-ray lithography system and extension to 35 nm by resist material selection, J. Vac. Sci. Technol., B 18(6),

2950 (2000).

3. M. Khan, G. Han, T. Kitayama, J. Maldonado and F. Cerrina: Can PXL print 35 nm features ?, J. Vac. Sci. Technol. (To be published).

4. E. Toyota, T. Hori, M. Khan and F. Cerrina: A new technique for 25nm X-ray nanolithography, J. Vac. Sci. Technol. (To be published).

5 Semiconductor FPD World: リーブル微細回路製造用転写装置の技術確立, プレスジャーナル, 1月号, p86, 2001.

6. Semiconductor FPD World : ファブ前処理ラインからリソ工程が消える, プレスジャーナル, 1月号, p32, 2001.

付録 ビデオ信号処理

1 緒言

本章では、本研究で提案したアライメント計測におけるマスクマークとウエハマークの位置の計算方法について述べる。

一般に、ビデオ画像を使ったパターン位置の計算方法は、（１）パターンの中心位置を計算する方法^{1,2}と、（２）２つのパターン間の距離を計算する方法³に大別される。さらにパターン位置を正確に求めるために、ビデオ画素（ピクセル）間に存在する波形ピーク位置を、適当な関数にフィッティングする計算方法（以下、サブピクセル計算）が報告されている^{4,5}。

第４章では、（２）に分類される計算方法を提案し、セクターフレネルゾーンプレートの集光スポットの位置を、7~9nm (3 σ) の検出再現性で検出できることを述べた。一方で、第２章で提案した色収差２重焦点法と第５章で提案したエッジ散乱光によるアライメント計測におけるビデオ信号処理方法については述べていない。

そこで本章では、色収差２重焦点法とエッジ散乱光によるアライメント計測におけるアライメントマーク位置の計算方法について述べる。この計算方法は、上述した（１）のパターン位置の計算方法に分類されるものである。最後に、本研究で試作した計算機のハードウェアの構成について述べる。

2 パターン位置の計算方法

2. 1 アルゴリズム

ここでは、マスクマークとウエハマークの相対位置ずれを計算するためのアルゴリズムについて述べる。アルゴリズムは、以下の１）から５）の計算手順からなる。

1) ビデオ信号のディジタル化

本論文の計測における量子化数は 8 ビット、画像の濃淡レベルは 256 である。ビデオ画素スケール Δ ($\mu\text{m}/\text{pixel}$) は次のとおりである。

$$\left. \begin{array}{ll} \text{色収差２重焦点法（第２章，第３章）} & : \Delta_1=0.110\mu\text{m}/\text{pixel} \\ \text{セクタ FZP 法（第４章）} & : \Delta_2=0.250\mu\text{m}/\text{pixel} \\ \text{エッジ散乱光計測法（第５章，第６章）} & : \Delta_3=0.110\mu\text{m}/\text{pixel} \end{array} \right\} \quad (1)$$

2) 投影分布処理

式（２）は、図 1 (a) のウエハマークからのビデオ信号（図 1 (b)）を Y 方向に加算

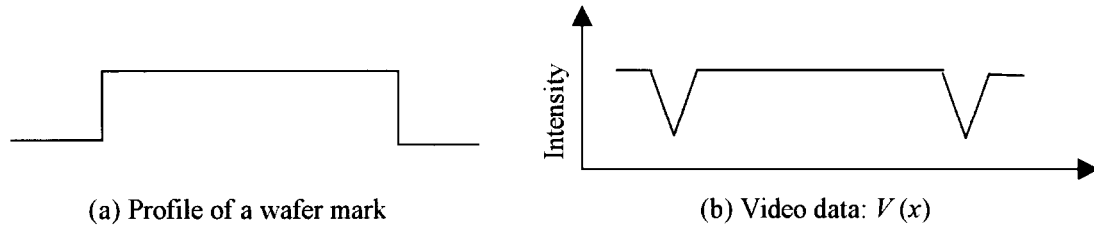


Fig.1 Video signal of a wafer mark

(投影分布処理⁶⁾する計算であり，これによりビデオ信号の S/N 比を改善し，1次元ビデオデータ列 $V(x)$ を求める．この処理は，アルミ配線層の粒状表面で見られる散乱光によるスパークノイズなど，白色雑音性の誤差低減に有効であることが報告されている⁷．ただし，色収差2重焦点法（2章，3章）とセクタフ FZP 法（4章）では，1次元リニア CCD イメージセンサを使用することから，式（2）の計算は不要である．また，エッジ散乱光によるアライメント計測では，式（2）で加算するラスタ走査線の本数（ $b-a-1$ ）を，式（5. 1）により求めた．

$$V(x) = \frac{1}{b-a+1} \sum_{y=a}^{y=b} V(x, y) \quad (2)$$

ここで，

$$\begin{aligned} x &\in \{1, 2, \dots, 768\} \\ y &\in \{1, 2, \dots, 480\} \end{aligned} \quad (3)$$

ただし， (x, y) はビデオ画素の通し番号， $V(x, y)$ はビデオ画像の濃淡値を表す．

3) 相関演算

1次元ビデオデータ列を一次微分することにより求めたデータ列 $V'(x)$ （図2（a））に，式（4）を適用し，ウエハマークの中心位置（図2（b））を求める．ここでは，相関値 $A(x, w)$ が最大となる点を，ウエハマークの中心位置と定義する．

$$A(x, w) = \sum_{j=0}^{j=R} -V' \left(x - \frac{w+R}{2} + j \right) \times V' \left(x + \frac{w+R}{2} - j \right) \quad (4)$$

ただし， R はパターンエッジの幅， x はマークの中心位置， w はマークの幅である．

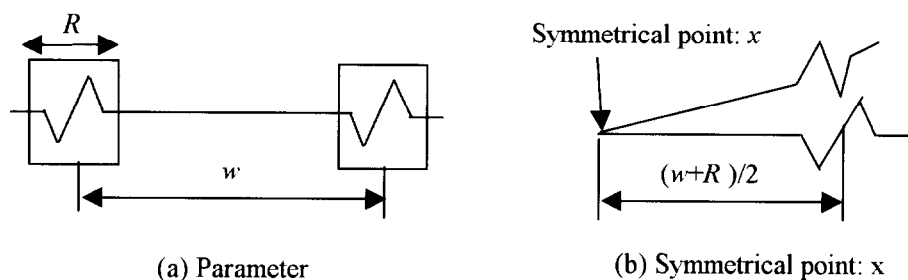


Fig.2 A symmetrical point of wafer mark

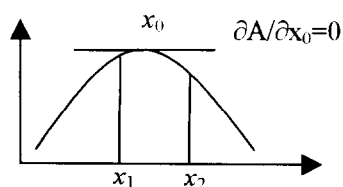


Fig. 3 Peak position x_0 between x_1 and x_2

$A(x, w)$ は、中心位置 x に対して敏感に変化する関数である。また、 R はエッジの幅から予想される値をあらかじめ与える。

4) サブピクセル計算 (Sub-pixel estimation)

式 (4) から求めたピーク位置をさらに精度よく推定するために、式 (5) からピクセル間 ($\Delta=0.11\mu\text{m}/\text{pixel}$) に存在する真のピーク位置 x_0 を求める。式 (5) は、 $A(x, w_2)$ の曲線を x の 2 次関数と仮定して、接線の傾きがゼロになる位置 $\partial A(x, w_2) / \partial x = 0$ (図 3) を求める。

$$x_0 = \frac{x_2 \frac{\partial A}{\partial x_1} - x_1 \frac{\partial A}{\partial x_2}}{\frac{\partial A}{\partial x_1} - \frac{\partial A}{\partial x_2}} \quad (5)$$

ただし、 x_1 は $A(x, w)$ が最大となる点 x_1 、 x_2 は $A(x, w)$ が 2 番目に大きな値をとる点である。 x_0 は、ウエハマーク (図 1 (a)) の中心位置である。

5) 中心位置のずれ

マスクマークについても、1) から5) により中心位置 x_3 を計算し、マスクマークの中心位置とウエハマークの中心位置のずれ量 Δx を、式 (6) より求める。

$$\Delta x = x_3 - x_0 \quad (6)$$

ただし、 Δx はマスクとウエハの位置ずれ、 x_0 はウエハマークの中心位置、 x_3 はマスクマークの中心位置である。

2. 2 ハードウェアの構成

図2は、ビデオ信号処理のハードウェア構成である。CCD カメラからのビデオ信号は、フレームバッファに入り、デジタル画像 (2. 1 節の1)) に変換される。マスクとウエハの位置ずれは、デジタル画像を使って、3 台の CPU ボード (CPU1, CPU2, CPU3) で同時に計算される。計算値は、バス・アダプタ (図中左上の Bus to bus adaptor) を経由し、ステージ制御系に送られる。CPU1 は、主にファイル管理を行う。CCD カメラからのビデオ入力から演算を完了するまでの所要時間は、約 200msec である。

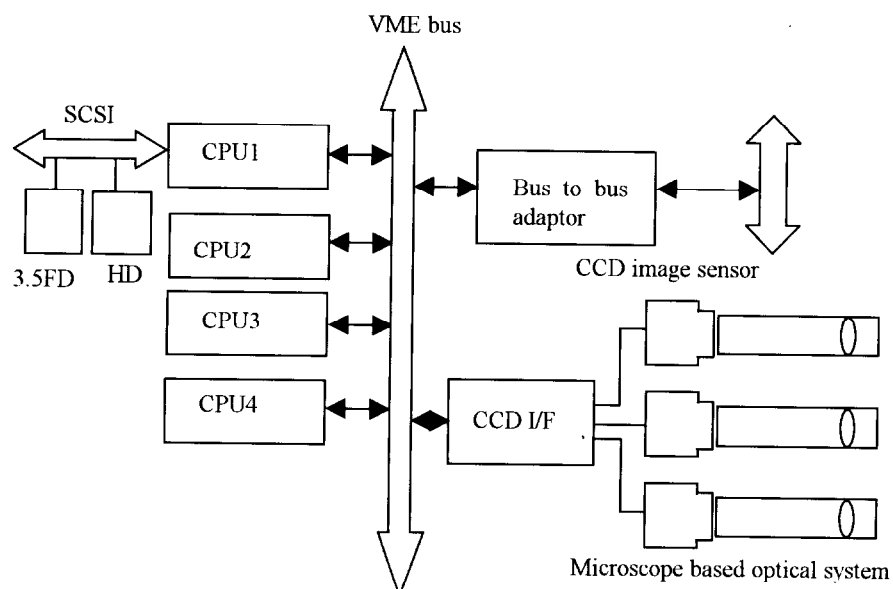


Fig. 5 Video signal processing hardware for mask to wafer alignment

3 結言

本研究のアライメント計測における信号処理方法とハードウェアの構成について述べた。以下に得られた結論を要約する。

- 1) 本研究で提案したアライメント計測におけるマスクマークとウエハマークの位置の計算方法を明らかにした。計算手順は、1) ビデオ画像のデジタル化、2) 投影分布処理、3) 相関演算、4) サブピクセル計算、5) 位置ずれ計算である。
- 2) 試作したビデオ信号処理装置の構成を示した。

ここで述べたパターン位置の計算方法は、本論文で述べたアライメントマークの位置計測に限らず、その他のパターン位置の計測（例えば、6. 3. 1 項のボックスパターン位置の計算）にも応用できるものである。

参考文献

-
1. 谷口素也，稲垣晃，見坊行雄，岡本啓一，船津隆一：斜方結像光学系を用いたX線露光装置用アライメントパターン検出法，精密工学会誌，55, 9(1989), 139
 2. F. Gabeli, H.-L. Huber, A. Kucinski, H.-U. Scheunemann, K. Simon, E. Cullmann: Alignment and Overlay Accuracy of an Advanced X-ray Stepper Using an improved Alignment System, Proc. SPIE 1671,(1992)401-410.
 3. 長谷川順一，奥水大和，中山晶，横井茂樹：画像処理の基本技法，技術評論社，p25-40
 4. P.D. Hyde and L.S. Davis: Subpixel edge estimation, Pattern Recognition 16, 413-420 (1983).
 5. Q. Tian and M. N. Huhns: Algorithms for subpixel registration, Comp. Vision Graph. Image Proc. 35, (1986) 220-233.
 6. 江尻正員他：画像処理産業応用総観 上巻（基礎・システム技術編），フジ・テクノシステム，1994, p436.
 7. R. Emmett Hughlett, Keith A. Cooper: A Video Based Alignment System for X-ray Lithography, Proc. SPIE 1465,(1991)100-108.

謝辞

本研究をまとめるに当たり、主査として終始懇切なるご指導を頂きました東京工業大学大学院総合理工学研究科精密機械システム専攻 下河辺明教授に深く感謝の意を表します。また、副査として論文を査読頂き、貴重なご教示を頂いた東京工業大学大学院総合理工学研究科精密機械システム専攻 北條春夫教授、香川利春教授、佐藤海二助教授、進士忠彦助教授に心からお礼申し上げます。さらに、論文執筆のきっかけを作って頂いた、住友重機械工業株式会社 富田良幸博士に感謝致します。

本研究は、著者が住友重機械工業株式会社技術開発センター（元総合技術研究所）で行った X 線リソグラフィのアライメント計測に関する研究をまとめたものであり、多くの方々のご指導、ご協力を頂きました。特に、本研究をはじめてからこれまで、暖かいご指導と多くの激励を頂いた住友重機械工業株式会社 広瀬正起主席研究員に心より感謝致します。

入社以来、ご指導と激励を頂いた住友重機械工業株式会社 内藤篤特別顧問、豊田英二郎氏（前量子技術研究所長）、高橋直樹精密事業部長、飯倉督夫氏（現財団法人エンジニアリング振興協会）、吉井明彦技術開発センター長、川端隆司研究開発部長、鷲尾方一博士（現早稲田大学）に心からお礼申し上げます。

本論文の緒言に関して有益な議論とご助言を頂きました NTT アドバンステクノロジー株式会社 福田真博士に心より感謝致します。

色収差 2 重焦点法によるアライメント計測では、浜田史郎主席研究員、瀬戸口節男氏（現住友イートンノバ株式会社）、佐藤文昭氏（現住友イートンノバ株式会社）、伊藤一博氏（現信越エンジニアリング株式会社）、山崎和則技師、折田栄作研究員にご協力を頂きました。心から感謝致します。また、半導体デバイスの試作は、住友重機械工業株式会社と日本電気株式会社との間で行った共同露光の成果であり、ご協力頂きました日本電気株式会社 鈴木克美博士、藤井清氏、田中雄介氏に深く感謝の意を表します。

エッジ散乱光によるアライメント計測では、マスク作製をして頂いた HOYA 株式会社 笑喜勉氏、プロセスウエハを作製して頂いた日本モトローラ株式会社 山崎邦明氏（現キヤノン株式会社）に深く感謝の意を表します。また、露光評価で協力して頂いた李軒博士、広瀬サユミ博士、門前俊夫研究員ならびに技術開発センター研究員の方々に心から感謝致します。皆様の協力無くしては、本研究の目的とするアライメント精度の達成はありえなかったと思います。さらに、精度評価に関する有用なアドバイスを頂いた通産省プロジェクト「超先端電子技術開発機構 超微細 SR 露光技術研究室」松井安次博士（現三菱電機株式会社）ならびに三井壮一郎氏（現株式会社東芝）に深く感謝の意を表します。

最後に、いつも健康に気づかい、心の支えとなってくれた妻奈美に感謝します。