平成 29 年度
戦略的基盤技術高度化・連携支援事業
戦略的基盤技術高度化支援事業

「微小立体構造からなるセンサーの試作開発期間短縮と多品種少量生産を可能とする、世界初の両面アライメント機能付きミニマルマスクレス露光装置の研究開発」

研究開発成果等報告書

平成 30 年　5 月

担当局　九州経済産業局
補助事業者　（公財）福岡県産業・科学技術振興財団
間接補助事業者　株式会社ピーエムティー
国立大学法人　九州工業大学
一般社団法人　ミニマルファブ推進機構

目　次

第１章 研究開発の概要

１.１ 研究開発の背景・研究目的及び目標 03

１.２ 研究体制 07

１.３ 成果概要 07

１.４ 当該研究開発の連絡窓口 08

第２章 研究開発の高度化目標及び技術的目標値

2.1 両面アライメント機能の実現 09

2.2 描画品質向上 10

2.3 スループット向上 12

2.4 両面アライメントが必要なセンサーデバイスの設計とその構造評価 13

第３章 研究開発の具体的内容と実施スケジュール

3.1 両面アライメント機能の実現 14

3.2 描画品質向上 15

3.3 スループット向上 17

3.4 両面アライメントが必要なセンサーデバイスの設計とその構造評価 19

第４章 全体総括

4.1 研究開発成果 23

4.2 研究開発成果の効果（波及効果） 23

4.3 事業化展開 23

4.4 研究開発後の課題 25

専門用語の解説 26

第１章 研究開発の概要

１.１ 研究開発の背景・研究目的及び目標

（三）精密加工に係る技術に関する事項
１　精密加工に係る技術において達成すべき高度化目標
（３）川下分野横断的な共通の事項
②高度化目標
ア.当該技術が持つ物理的な諸特性の向上
精密加工において求められる加工精度（露光精度）の向上、生産性の向上とともに、マスクレス露光と両面アライメント機能を併せ持つ複合化として、両面アライメントマスクレス露光装置を開発する。
カ.生産性・効率化の向上、低コスト化
生産性・効率化の向上として、加工速度（露光速度）の向上を実現する。

1.1.1 研究開発の背景

IoT など、あらゆるモノをインターネットに接続する時代が到来すると、加速度センサー、温度センサー、流量センサー等々のセンサー市場が伸びる（図 1.1）。これらのセンサーは、複雑な微小立体構造を持っており、センサーの研究開発を行うメーカは次の課題を抱えている。半導体設計ではシミュレーションを駆使して、試作回数を極限まで減らすことが可能であるが、センサーはセンシング対象により構造が千差万別かつ複雑で、図 1.2 に示すような微小立体構造からなり、シミュレーションで適切な設計を導き出すのは難易度が高い。そこで、必然的に試作を複数回繰り返すことになるが、ウェハ[1)]（⇒「専門用語の解説」参照）に複雑な微小立体構造を作るフォトリソグラフィ[2)]工程で使用する露光装置[3)]は高額なマスク[4)]を使用するので、試作回数が多くなると開発コストが高くなる。

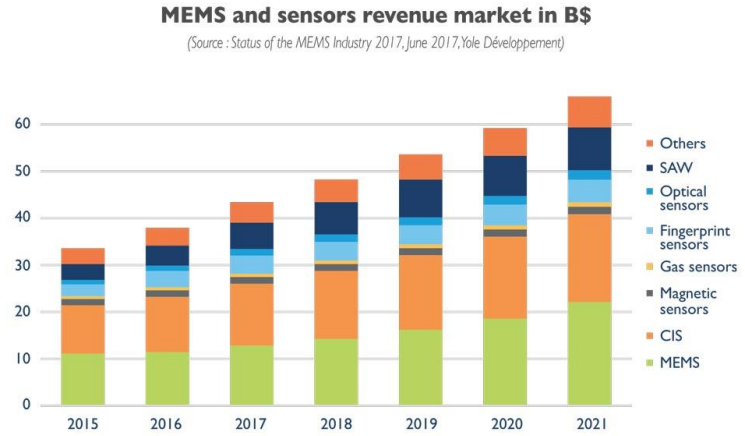

図 1.1 センサー市場予測

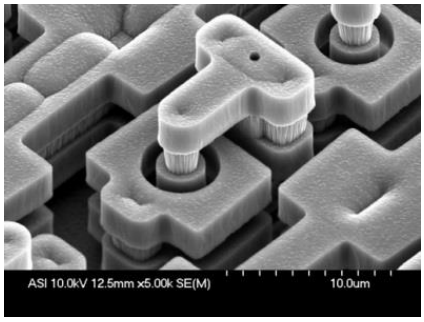

図 1.2 センサー構造の例

試作品は量産工場で製造するが、量産品を優先して生産しているため、試作品は製造する優先順位が低くなっている。さらに、マスクメーカによる試作品のマスク製造には、数日から数週間の納期を要する。このため１回の試作に数ヵ月以上を要することとなり、これを複数回繰り返していると、開発期間が 1～2 年以上にも及んでしまう。

加えて、センサーの量産時の課題も同様であり、多品種少量生産品の納期は長くなるとともに、マスクコストの負担も重い。

顧客ニーズとその課題として、次の２つがある。
① ムダのない試作、国際競争力のある短期間試作、及び量産は短納期
試作品は数十個で十分である。しかし、ウェハが大面積なので１枚のウェハで数百個、数千個でき、残りは破棄している。試作品のマスク製造に日数を要し、量産工場では量産品製造を優先するため１回の試作に数ヵ月を要し、商品開発まで２年以上かかる。
② 開発費用と量産製造ランニングコスト低減
センサーの三次元精密加工はトライ＆エラーの試作を何度も繰り返すので、その都度立体構造の型となる高額なマスクが必要となる。製造には高額の設備投資が必要な上に、維持費も高いクリーンルームが必要である。

これら顧客ニーズと課題に対する解決方法として、ミニマル生産システム[5)]と両面アライメント[6)] 機能付きミニマルマスクレス露光装置を適用した。

1.1.2 研究目的及び目標

センサーは半導体とは異なり、図 1.2 に示したような微小立体構造からなる。このために高度な精密加工技術が必要となり、既存の半導体製造用途のミニマルマスクレス露光装置にはない、下記のような技術的要素が必要である。

・ウェハの両面加工を可能とする両面アライメント露光機能
・高アスペクト比[7)] 露光や段差露光
・三次元精密高速加工

本事業では、これらの機能を持った図 1.3 に示す両面アライメント機能付きミニマルマスクレス露光装置の新規開発を行った。

図 1.3 両面 アライメント機能付きミニマルマスクレス露光装置

・開発期間の短縮、開発コスト低減
ミニマル生産システムでは図 1.4 に示すように、本事業で開発する両面アライメント機能付きミニマルマスクレス露光装置を駆使することでマスク製造が不要となり、数日で試作～評価～改善が可能となる。これを繰り返すことで、試作から量産までを数ヵ月で行うことが可能となり、開発試作の生産性・効率向上、低コスト化を実現できる。

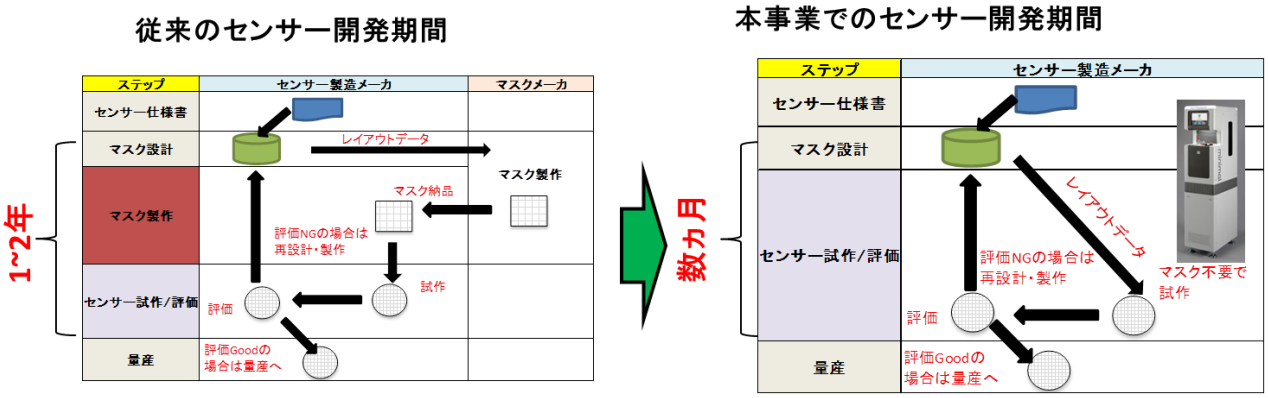

図 1.4 開発期間の短縮、開発コスト低減

・量産時の納期短縮、量産コスト低減

図 1.5 に示すようにミニマル生産システムでは、設備投資、工場の省エネルギー、家庭用 100V 電源を使用するミニマル装置自身の省エネルギー及び設備稼働に伴う廃棄物の削減等、環境負荷の大幅低減が可能となり、少量でも低コスト生産が可能である。

0.5 インチ（12.5mm）ウェハによりムダのない多品種少量生産が可能となり従来工場では数ヶ月かかる納期が、わずか数日に短縮される。

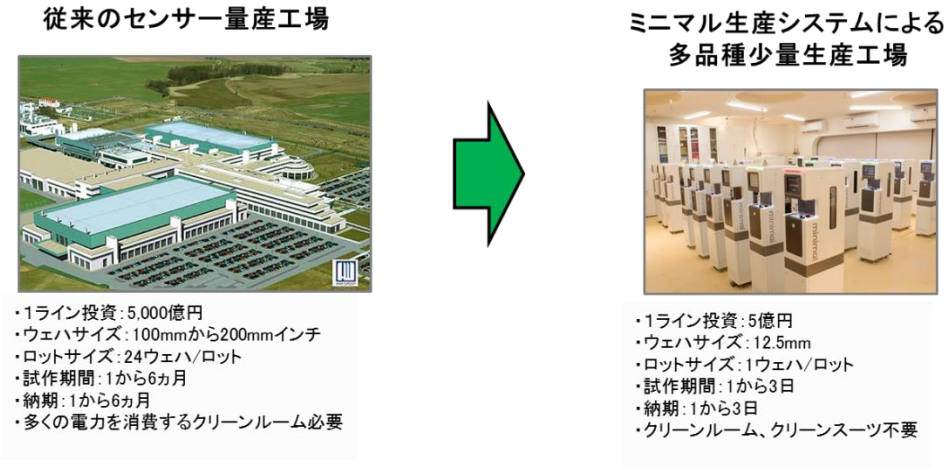

図 1.5 量産時の納期短縮、量産コスト低減

これら課題解決の検証方法は、センサーメーカの実際の製品で、開発した装置の性能実証を行うのが理想である。しかし、これには各メーカのブラックボックスである三次元精密加工プロセスの開示が必要となり、困難を伴う。この課題を解決するため、医療・ヘルスケア分野のセンサー研究者である九州工業大学安田教授が、両面アライメントを必要とし、一般的なセンサー製造に必要な構造、仕様を網羅した評価用センサーの設計（図 1.6）を行う。その評価用センサーを従来方法と本事業で開発した装置を使った製法の二通りの方法で製作した。従来方法で製作したものをベースラインとし、本事業開発装置で製造したセンサーとの比較検証を行う。この性能実証結果が仕様を満足するものであれば、医療・ヘルスケア分野以外の微小立体構造を持つセンサーの露光装置として活用できる。

評価用センサーのミニマル生産システムでの製造プロセス開発はミニマルファブ推進機構が担当する。

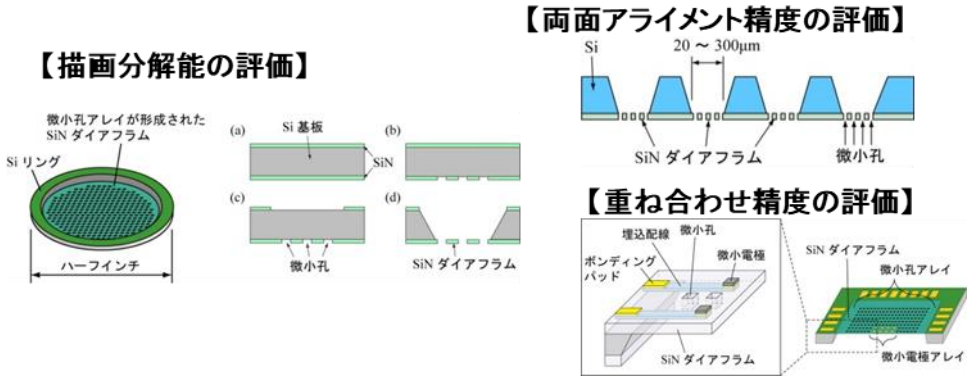

図 1.6 両面アライメントが必要なセンサーデバイス

1.1.3 実施結果

表 1.1 に実施結果一覧を示す。

表 1.1 研究開発事業の実施結果一覧

高度化目標	サブテーマ名	H29 年度結果（最終年度）
1 両面アライメント機能の実現 担当：PMT／機構	【1.1】超小型両面アライメント光学系の開発	評価用デバイス製造によって、表裏間のアライメント精度が±2.0 μm 以下であることを確認した。
	【1.2】キャリブレーション機能開発	
2 描画品質向上 担当：PMT	【2.1】重ね合わせ精度向上	評価用デバイス製造によって、表面アライメント精度が±0.5 μm 以下であることを確認した。
	【2.2】描画分解能向上	
	【2.3】焦点深度拡大	「露光装置試作機」に取り付けて露光評価を行い、焦点深度が 12 μm 以上であることを確認した。
3 スループット向上 担当：PMT	【3.1】ステージ速度高速化	「露光装置試作機」にて露光時間 120sec/枚を達成した。
	【3.2】DMD8)応答速度向上	
	【3.3】焦点調整時間短縮	
4 両面アライメントが必要なセンサーデバイスの設計とその構造評価 担当：九工大	【4.1】微小孔アレイを有する SiN 製ダイアフラム構造の形成 【描画分解能の評価】	微小孔径 1 μm 以下のデバイスを製作した。
	【4.2】SiN 製ダイアフラム・アレイ構造の形成 【両面アライメント精度の評価】	微小孔とダイアフラムの表裏間アライメント精度±3 μm 以下のデバイスを製作した（両面マスクレス露光機でアライメント）。
	【4.3】SiN 製ダイアフラム構造への微小電極の形成【重ね合わせ精度の評価】	微小孔と微小電極の重ね合わせ精度±1 μm 以下のデバイスを製作した。

1.2 研究体制

図 1.7 に示す研究体制で本プロジェクトを遂行した。なお、SL の安田教授は、両面アライメント機能付きミニマルマスクレス露光装置のユーザーでもある。

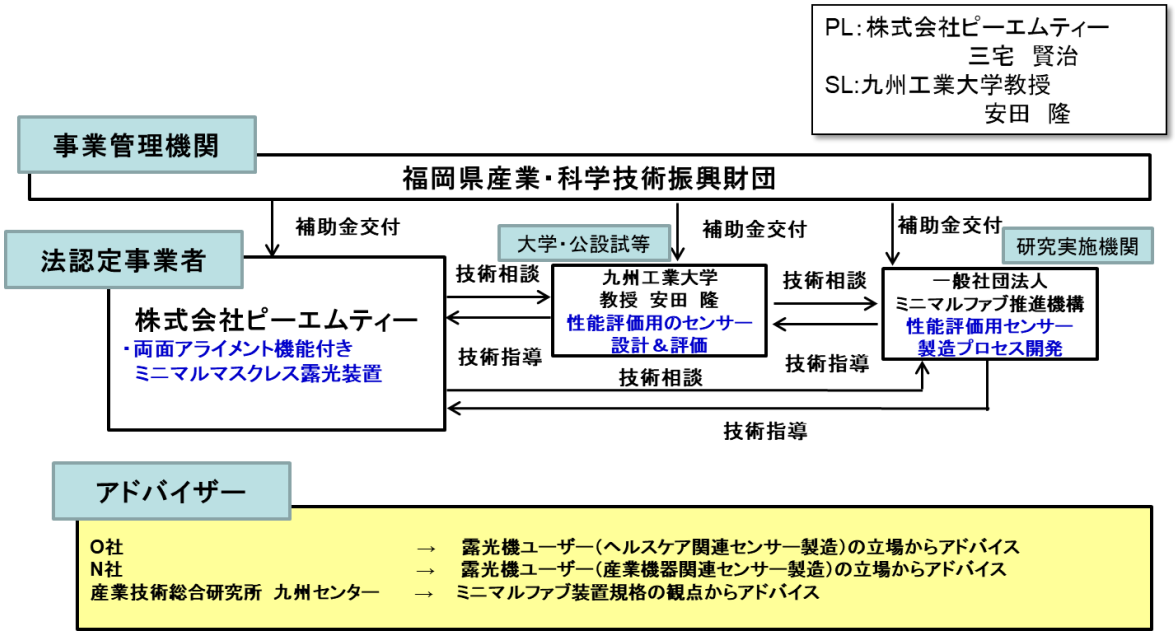

図 1.7 研究体制

1.3 成果概要

図 1.8 に示すように、既存の片面用ミニマルマスクレス露光装置に平成 27 年度開発ユニットを搭載して、両面アライメント機能付きミニマルマスクレス露光装置試験機を製作した。この実験機でセンサーデバイスの設計・構造評価を実施した。この試験機で明らかになった課題・解決策を、平成 28 年度開発のⅡ型ユニットに反映、その後、試作機に組み込み、完成させた。

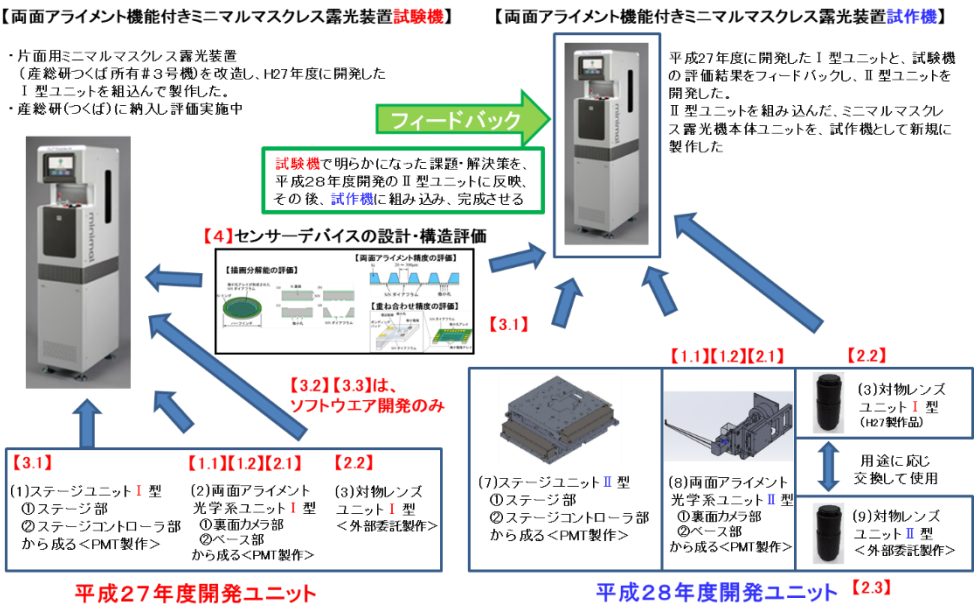

図 1.8 成果概要

表 1.2 には研究開発の目標達成度の一覧を示す。

このように、数値目標の達成と装置の性能評価用デバイス製作の完成により両面アライメント機能付きミニマルマスクレス露光装置の商品化という結果を得ることができた。

表 1.2 目標達成度一覧表

サブテーマ	目標値	達成度	達成根拠	コメント
【1.1】両面アライメント光学系開発 【1.2】キャリブレーション機能開発	・両面アライメント光学系新ユニット（温度変化対応）の評価継続 ・表裏間アライメント精度±2.0μm	100%	装置内温度平衡状態において目標精度達成。 ※但し、装置起動から温度平衡状態に至るまでに時間を要するため、更なる変位の抑制を目指して開発を継続する。	※温度平衡前でも精度を維持出来るように、キャリブレーション機能の補完研究を継続する。
【2.1】重ね合わせ精度向上	・表面重ね合わせ精度±0.5μm	100%	重ね合わせ精度が±0.5μm以下であることを確認済み	
【2.2】描画分解能向上	・0.5μmライン＆スペース描画	100%	0.5μmのライン＆スペース描画を確認済み	
【2.3】焦点深度拡大	・焦点深度12μm以上の深焦点対物レンズ製作	100%	12μm以上の焦点深度確認済み	
【3.1】ステージ速度高速化	・露光時間180sec/枚	100%	120.8sec/枚を達成 → 新バージョンのPLAD使用にて4sec短縮し、目標値達成できるため	
【3.2】DMD応答速度向上	・露光時間180sec/枚	100%		
【3.3】焦点調整時間短縮	・焦点調整所要時間　25sec	100%		
【4.1】微小孔ｱﾚｲを有するSiN製ﾀﾞｲｱﾌﾗﾑ構造の形成	・微小孔径1μm以下のデバイスの製作	100%	微小孔径0.76μmのデバイスの製作に成功	
【4.2】SiN製ﾀﾞｲｱﾌﾗﾑ・ｱﾚｲ構造の形成	・微小孔とダイアフラムの表裏間アライメント精度±3μm以下のデバイスの製作	100%	表裏間アライメント精度±1.6μmのデバイスの製作に成功	
【4.3】SiN製ﾀﾞｲｱﾌﾗﾑ構造への微小電極の形成	・微小孔と微小電極の重ね合わせ精度±1μm以下のデバイスの製作	100%	重ね合わせ精度±0.3μmのデバイスの製作に成功	

1.4 当該研究開発の連絡窓口

・研究等実施機関
株式会社ピーエムティー
〒811-2115 福岡県糟屋郡須恵町大字佐谷 1705 番 1 号
・連絡先担当者氏名　入田 亮一
・電話番号　(092)933-3110
・FAX 番号　(092)933-3115
・E-mail アドレス　irita@pm-t.com

第２章 研究開発の高度化目標及び技術的目標値

微小立体構造からなるセンサーを製造するメーカは、高機能のセンサーを効率良く開発、生産、さらに、低コストかつ短期間で市場に供給することを求めており、ミニマルファブシステムは最適なソリューションである。

複雑かつ精密な立体構造を持つセンサー（MEMS センサーとも呼ばれる）の露光を行うためには、表裏両面のマークを基準としてアライメントを行うことが必須である。そこで、本事業では、両面アライメント機能を開発するとともに、マスクレス露光装置の露光速度を向上し、さらに、それらを複合化することで世界初の微小立体構造からなるセンサー用両面アライメント機能付きミニマルマスクレス露光装置を開発することを目標とした。

高度化目標と技術的目標値を以下の通り設定した。

2.1 両面アライメント機能の実現

両面アライメント機能はセンサーの製造には必須であり、両面アライメントを実現する従来技術としては、大きく分けて以下の２つが存在する。

従来技術①　ウェハを保持するステージ内に、裏面を撮像する光学系を内蔵する。（図 2.1）

従来技術②　表面側からシリコンを透過する赤外線を用い、裏面のアライメントマークを撮像する。（図 2.2）

しかしながら、スペースの制約があるミニマル装置において、12 インチウエハと比較すると、面積比でわずか 0.2%弱しかないハーフインチウェハを保持する極小のステージ内に、相対的には巨大とも言える光学系を設置するのは物理的に困難で、従来技術①は現実的ではない。従来技術②は波長の長い赤外線を使用するため、原理的に精度を高めづらい上、ステージよりもスペース制約の厳しい露光用光学系がウェハ上部に存在しており、レイアウト上の難易度が高い。

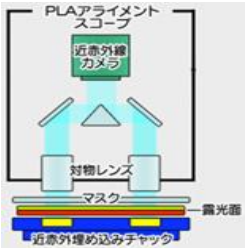

図 2.1 既存の裏面アライメント原理概略①　図 2.2 既存の裏面アライメント原理概略②

前記課題を解決するため、裏面撮像用カメラをステージ外に配置し、マスクレス露光装置の特性にあった両面アライメント機構と、精度確保のためのキャリブレーション、補正方法を新たに開発する。（図 2.3、図 2.4）

ミニマル筐体に収まる超小型両面アライメント機能を実現するため、【1.1】超小型両面アライメント光学系及び【1.2】表裏間のアライメント精度を高めるキャリブレーション機能を開発する必要がある。そこで、以下のサブテーマと目標（表 2.1）を設定した。

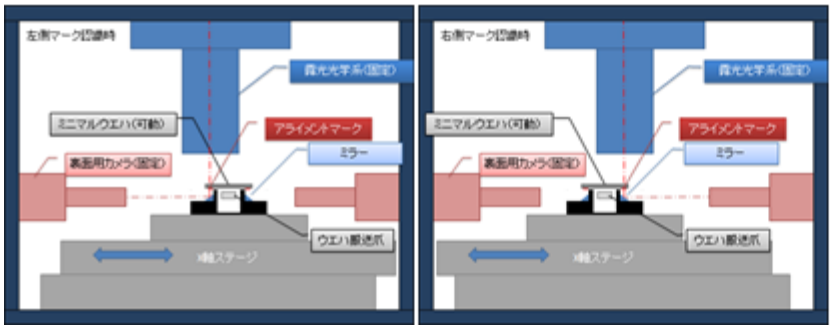

図 2.3 新両面アライメント機構概念図

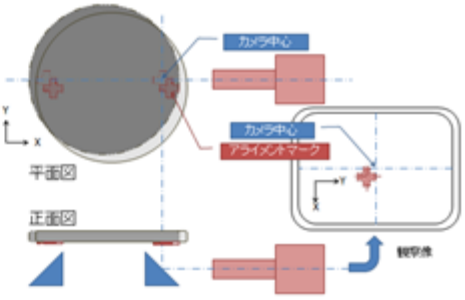

図 2.4 裏面アライメントマークと観察像

表 2.1 両面アライメントのサブテーマと目標

サブテーマ名	実施年度	目標
【1.1】 超小型両面アライメント光学系の開発	H27 年度	「両面アライメント光学系ユニットⅠ型」の機構決定及び設計、製作し、単体評価にて下記を確認する。 ・215(W)×250(D)×160mm(H)の露光プロセス室に、「ステージユニットⅠ型」とともに収納、動作する大きさ。 ・カメラにて、アライメントマークを 1 μm/画素以上の分解能で撮像できる。
	H28 年度	「両面アライメント光学系ユニットⅡ型」の設計、組立と「両面アライメント機能付きミニマルマスクレス露光装置試作機」への組込、評価を行い、表裏間のアライメント精度が±2.0 μm 以下であることを確認する。
	H29 年度	評価用デバイス製造によって、表裏間のアライメント精度が±2.0 μm 以下であることを確認する。
【1.2】 キャリブレーション機能開発	H27 年度	「両面アライメント光学系ユニットⅠ型」の設計を元に、要件定義、設計を行い、コードレビューを完了させる。
	H28 年度	「両面アライメント機能付きミニマルマスクレス露光装置試作機」にてアライメント精度を測定し、表裏間のアライメント精度が±2.0 μm 以下であることを確認する。
	H29 年度	評価用デバイス製造によって、表裏間のアライメント精度が±2.0 μm 以下であることを確認する。

2.2 描画品質向上

センサーの製造に最適化して、描画品質においては川下事業者の必要とする仕様を満たしているニコン製のミニステッパー(図 2.5)をベンチマークとして、現在のマスクレス露光装置の描画品質について比較して、以下 a)～c) の高度化目標値（表 2.1）を設定した。

http://www.ave.nikon.co.jp/n-eng/

図 2.5 ミニステッパー

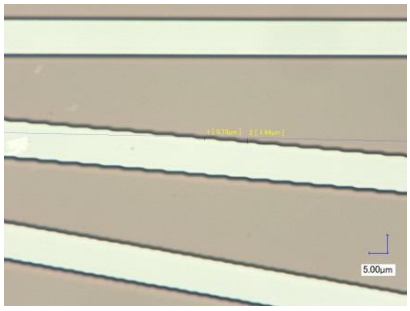

図 2.6 ジャギーの例

表 2.2 描画品質向上の高度化目標値

			ベンチマーク ニコンエンジニアリング製 MEMS 用ミニステッパーNES1V	現行 マスクレス 露光装置	本事業における 高度化目標値
a)	重ね合せ 精度	表面	±0.6 μm	±1.0 μm	±0.5 μm
		表裏間	±1.1 μm	N/A	±2.0 μm
b)	分解能		2.0 μm	1.0 μm	0.5 μm
c)	焦点深度		12 μm	2.3 μm	12 μm

a)～c）の高度化目標を達成し描画品質向上を実現するため、以下のサブテーマと目標を設定した。

2.2.1 重ね合せ精度[9]向上

表面に形成したアライメントマークに対する重ね合せ精度の向上を行う。目標値を表 2.3 に示す。

表 2.3 重ね合せ精度向上の高度化目標値

サブテーマ名	実施年度	目標
【2.1】 重ね合わせ精度 向上	H27 年度	・ディストーション 0.04%以下で、開口数 0.4 を超え、その他の性能指標も高い対物レンズの設計仕様完成。 ・上記設計仕様値が達成していることを、対物レンズ単体の測定により確認する。
	H28 年度	「両面アライメント光学系ユニットⅡ型」の設計、組み立と「両面アライメント機能付きミニマルマスクレス露光装置試作機」への組み込、評価を行い、表面重ね合わせ精度±0.5 μm 以下であることを確認する。
	H29 年度	評価用デバイス製造によって、表面アライメント精度が±0.5 μm 以下であることを確認する。

2.2.2 描画分解能向上

一見優位であるが、矩形の DMD を使用してデジタル的に露光を行うマスクレス方式の場合、斜め線や曲線を描画すると、ジャギー(図 2.6)と呼ぶ階段上のギザギザが発生してしまう。滑らかに描画するためには分解能を向上する必要がある。目標値を表 2.4 に示す。

表 2.4 描画分解能向上の高度化目標値

サブテーマ名	実施年度	目標
【2.2】 描画分解能向上	H27 年度	片面用ミニマルマスクレス露光機で露光したレジストパターンについて、「形状解析レーザー顕微鏡」にて以下のデータを測定・取得する。 ・ 本来露光すべき画素の周辺に漏れている不要光の分布と強度 ・ 露光光の強度と、レジスト膜厚の相関関係 ・ 露光光の強度と、ライン幅の相関関係 ・ パターン側面の形状
	H28 年度	「両面アライメント機能付きミニマルマスクレス露光装置試作機」にて 0.5 μm ライン＆スペース描画達成を確認する。
	H29 年度	評価用デバイス製造によって、0.5 μm ライン＆スペース安定描画を確認する。

2.2.3 焦点深度拡大

センサーデバイスには厚膜レジストへの対応力も必要であり、製造するデバイスに最適な光学特性を選択できるようなレンズバリエーションが必要である。目標値を表 2.5 に示す。

表 2.5 焦点深度拡大の高度化目標値

サブテーマ名	実施年度	目標
【2.3】 焦点深度拡大	H27 年度	―
	H28 年度	焦点深度が 12 μm 以上で、その他の性能指標も高い深焦点対物レンズの設計仕様完成と設計、製作まで行う。
	H29 年度	・「両面アライメント機能付きミニマルマスクレス露光装置試作機」に取り付けて露光評価を行い、焦点深度が 12 μm 以上であることを確認する。

2.3 スループット向上

現在、ミニマルウェハ１枚を露光するのにおよそ 350 秒を要している。試作時間の短縮を考えると、一層の高速化が望ましいことは言うまでもない。

露光装置の動作は以下のような様々な要素に分解できる。

ア） ウェハ搬送 【ステージ】
イ） 粗補正 【ステージ】
ウ） 焦点調整 【ステージ、焦点調整】
エ） 精密アライメント 【ステージ】
オ） スキャン露光 【ステージ、DMD 制御】

【 】内は、それぞれの動作を律速している主要因であり、露光装置を構成するステージ動作と DMD 制御の高速化、焦点調整方式の３つの要素技術をバランス良く高度化することで、大幅なスループット向上が可能であることが分かる。これらの寄与割合と難易度、実現性を考慮して、以下 a)～d) を高度化目標値とした（表 2.6)。

表 2.6 スループット向上の高度化目標値

		既存装置		本事業の目標	
		動作時間	仕様	動作時間	目標仕様
a)	ステージ速度	90 sec	7.5 mm/sec	27 sec	25 mm/sec
b)	DMD 応答速度	120 sec	3.75 mm/sec	28 sec	16 mm/sec
c)	焦点調整時間	100 sec	16 sec/回	25 sec	4 sec/回
d)	スループット	350 sec/枚		120 sec/枚	

a)～d) の高度化目標を達成しスループット向上を実現するため、以下のサブテーマと目標を設定した（表 2.7)。

表 2.7 スループット向上のサブテーマと目標値

サブテーマ名	実施年度	目標
【3.1】 ステージ速度 高速化	H27 年度	ステージ速度 25mm/sec 達成
	H28 年度	【3.2】、【3.3】と組み合わせて「両面アライメント機能付きミニマルマスクレス露光装置試作機」にて露光時間 180sec/枚達成
	H29 年度	「両面アライメント機能付きミニマルマスクレス露光装置試作機」にて露光時間 120sec/枚達成
【3.2】 DMD 応答速度 向上	H27 年度	DMD スキャン速度 16mm/sec 達成
	H28 年度	【3.1】、【3.3】と組み合わせて「両面アライメント機能付きミニマルマスクレス露光装置試作機」にて露光時間 180sec/枚達成
	H29 年度	「両面アライメント機能付きミニマルマスクレス露光装置試作機」にて露光時間 120sec/枚達成
【3.3】 焦点調整時間 短縮	H27 年度	―
	H28 年度	焦点調整所要時間 25sec 達成
	H29 年度	「両面アライメント機能付きミニマルマスクレス露光装置試作機」にて露光時間 120sec/枚達成

2.4 両面アライメントが必要なセンサーデバイスの設計とその構造評価

両面アライメント機能付きミニマルマスクレス露光装置の評価用デバイスとして、Si（シリコン）製のフレームに支持し、微小孔アレイ、微小電極アレイ、埋込み配線を有する SiN（窒化シリコン）製のダイアフラム構造（膜型構造）を製作する。本デバイスは医療・創薬分野における細胞解析への応用を想定したものであり、SiN 製ダイアフラム上に培養した細胞に対して微小孔を通じて栄養分供給や刺激薬剤添加を行いながら、微小電極アレイにより細胞の応答を多点で同時に電気計測することが可能なセンサーデバイスである。本事業においては、SiN 製ダイアフラムの機械的強度、細胞の寸法、電極のインピーダンスなどを考慮して、以下のサブテーマと目標を設定した（表 2.8）。

表 2.8 センサーデバイスのサブテーマと目標値

サブテーマ名	実施年度	目標
【4.1】微小孔アレイを有する SiN 製ダイアフラム構造の形成【描画分解能の評価】	H27 年度	微小孔径 3μm 以下のデバイスの製作
	H28 年度	微小孔径 2μm 以下のデバイスの製作
	H29 年度	ダイアフラム厚：約 1μm、ダイアフラム径：6～9mm、微小孔径 1μm 以下のデバイスの製作（神経線維の直径を考慮して 1μm 以下を最終目標とする）
【4.2】SiN 製ダイアフラム・アレイ構造の形成【両面アライメント精度の評価】	H27 年度	微小孔とダイアフラムの表裏間アライメント精度±5μm 以下のデバイスの製作
	H28 年度	微小孔とダイアフラムの表裏間アライメント精度±3μm 以下のデバイスの製作
	H29 年度	ダイアフラム直径、又は一辺：20～300μm、微小孔とダイアフラムの表裏間アライメント精度±3μm 以下のデバイスの製作
【4.3】SiN 製ダイアフラム構造への微小電極の形成【重ね合わせ精度の評価】	H27 年度	微小孔と微小電極の重ね合わせ精度±3μm 以下のデバイスの製作
	H28 年度	微小孔と微小電極の重ね合わせ精度±2μm 以下のデバイスの製作
	H29 年度	微小電極の 1 辺：20～50μm、微小孔と微小電極の重ね合わせ精度±1μm 以下のデバイスの製作

第 3 章 研究開発の具体的内容と実施スケジュール

3.1 両面アライメント機能の実現

3.1.1 超小型両面アライメント光学系の開発

ミニマル装置は非常に小型であるため、スペース上の制約が厳しい。ウェハ位置決め用のステージ内に、新たに裏面撮像用の光学系を追加するのは非現実的であり、新たな実現手段の開発が必要である。ステージ外にカメラを固定し、ステージを特定の場所に移動した際に裏面を撮像できる分離式の光学系を開発することとした（図 3.1）。

＜平成 27 年度実施内容＞

（株）ピーエムティーにて基礎検討を実施して、原理評価機「両面アライメント光学系ユニット I 型」を設計・製作・動作確認して、さらに、ユニット単体での実験評価を行い、以下の目標要件を満足できることを確認した。

- ミニマル筐体に収まること。内寸がおよそ 215mm（W）×250mm（D）×160mm(H)となる露光プロセス室内に、後述する「ステージユニット I 型」とともに収納、動作する大きさであること。
- カメラにてアライメントマークを 1μm/1 画素以上の分解能で撮像できること。

＜平成 28 年度実施内容＞

平成 27 年度に製作した「両面アライメント光学系ユニット I 型」を、後述する「ステージユニット I 型」及び「対物レンズユニット I 型」とともに、ミニマルファブ技術研究組合保有の片面用ミニマルマスクレス露光機に組み込むことで、「両面アライメント機能付きミニマルマスクレス露光装置試験機」を製作した。（株）ピーエムティーにて評価を行った後、ミニマルファブ推進機構に移設し、評価を行った。

これらの評価結果に基づき、試作機となる「両面アライメント光学系ユニット II 型」

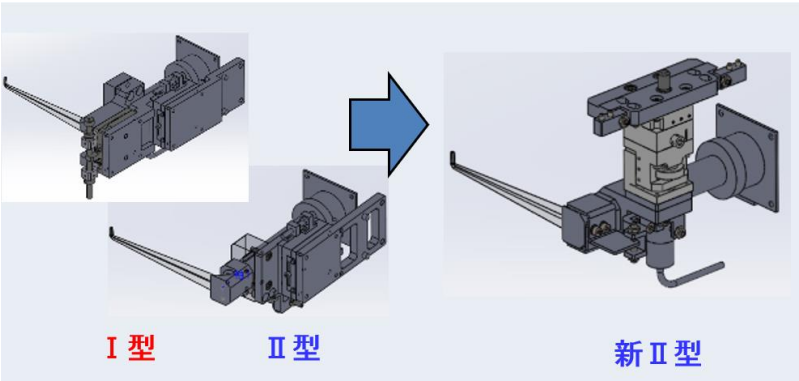

図 3.1 両面アライメント光学系ユニット

を設計・製作・動作確認して、後述する「ステージユニット II 型」、「対物レンズユニット II 型」及び「ミニマルマスクレス露光機本体ユニット」とともに、「両面アライメント機能付きミニマルマスクレス露光装置試作機」を製作し、（株）ピーエムティーにて露光評価を行った。

その結果、表裏間アライメント精度（±2.0μm）については、温度変化によるオフセット変化の課題を解決しなければ目標値を達成することが難しいことが分かった。そこで、対策として温度変化の影響が出ないように対称形状とした新 II 型ユニットを設計・製作した。

＜平成 29 年度実施内容＞

平成 28 年度に製作した「両面アライメント機能付きミニマルマスクレス露光装置試作機」を用い、温度変化対策を施した新型の両面アライメント光学系ユニットを搭載して、表裏間アライメント精度の評価を行った。その後、テーマ 4 に記載の評価用デバイスを製造することで装置性能を総合的に評価し、装置温度の平衡状態において、両面アライメント精度±1.6μm と、目標値(±2.0μm)の達成を確認した。

3.2 描画品質向上

3.2.1 重ね合わせ精度向上

重ね合わせ精度向上のためには、露光装置の構成要素を総合的に高精度化する必要があり、特に縮小投影レンズのディストーション低減について重点的に取り組む。ディストーションとは、像が糸巻き型や樽型に歪む現象である。例として、ディストーションがないケースとあるケースを図 3.2 に示す。

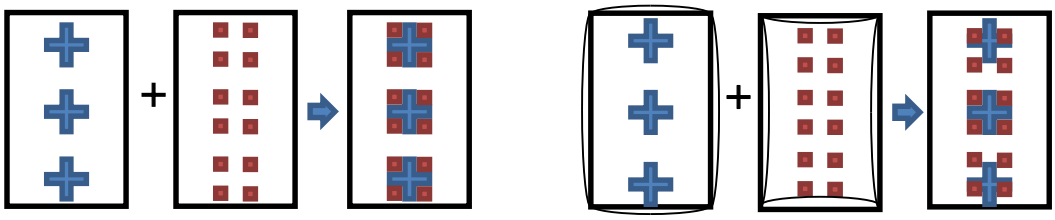

図 3.2 ディストーションがないケースとあるケース

縮小投影レンズの開発は様々なノウハウを必要とし難易度が高いため、従来は市販顕微鏡用の対物レンズを使用してきたが、ディストーションが大きい。また、ディストーション値そのものが仕様として保証していない。これまでに蓄積した知見、ノウハウを活用して専用の低ディストーション縮小投影レンズ 11) （対物レンズユニット）を開発した。

＜平成 27 年度実施内容＞

これまで片面用マスクレス露光装置の開発、評価を行って来た経験から、設計仕様を完成させた。設計仕様において、特に重要なディストーションの値だけでなく、開口数やコントラスト、その他の収差など様々な要求性能をバランス良く実現できる設計が完了した。

この設計仕様に沿った「対物レンズユニット I 型」を製作し、各種測定装置及び簡易露光結果より目標としていた仕様を満足していることを確認した（図 3.3)。

図 3.3 対物レンズユニット

＜平成 28 年度実施内容＞

平成 27 年度に製作した「対物レンズユニット I 型」をミニマルファブ技術研究組合保有の片面用ミニマルマスクレス露光機に組み込むことで、「両面アライメント機能付きミニマルマスクレス露光装置試験機」を製作して、(株)ピーエムティーにて評価を行った後、ミニマルファブ推進機構に移設し、評価を行った。

さらに、後述する「ステージユニットⅡ型」、「両面アライメント光学系ユニット I 型」及び「ミニマルマスクレス露光機本体ユニット」と「対物レンズユニット I 型」を組み合わせ、「両面アライメント機能付きミニマルマスクレス露光装置試作機」を製作し、表面重ね合わせ精度±0.5μm を達成した。

＜平成 29 年度実施内容＞

平成 28 年度に製作した「両面アライメント機能付きミニマルマスクレス露光装置試作機」を用いてテーマ 4 に記載の評価用デバイスを製造することで総合的に装置性能評価を行い、表面重ね合わせ精度について、目標値(±0.5μm)を上回る±0.3μm の達成を確認した。

3.2.2 描画分解能向上　：1μm (L/S)　⇒　0.5μm (L/S)

市販の顕微鏡用対物レンズはディストーションこそ大きいものの、仕様から導く回折限界 [12] に近い分解能まで解像できている。しかしながら最小画素サイズである 0.5μm のライン＆スペースパターンを安定して露光することはできていない　(図 3.4)。
0.5μm での安定した露光を行うため、以下 2 つの取組を行った。

(1)　DMD 制御の高度化による、光近接効果 [13] 補正機能の開発
(2)　縮小投影レンズの開口数 [14] 変更による回折限界の引き上げ
　(対物レンズユニット I 型で実施)

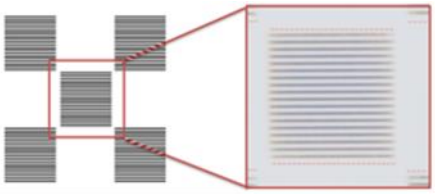

図 3.2　0.5μm ライン＆スペース
露光結果の例
CAD データ(左)にある破線部
(-------) が消えている。

図 3.4 0.5μm ライン＆スペース

＜平成 27 年度実施内容＞

(株)ピーエムティーにて光近接効果補正機能の基礎検討を行った。基礎データとして現行の光学系の実力値を定量的に把握するため、(株)ピーエムティー所有の片面用ミニマルマスクレス露光機で露光したレジストパターンについて、以下のデータを測定・取得した。

・本来露光すべき画素の周辺に漏れている不要光の分布と強度
・露光光の強度と、レジスト膜厚の相関関係
・露光光の強度と、ライン幅の相関関係
・パターン側面の形状

＜平成 28 年度実施内容＞

(株)ピーエムティーにて、平成 27 年度に取得した基礎データを元に、画素周辺に漏れている不要光の影響を最小限に抑える露光データ補正アルゴリズムを作成した。このアルゴリズムに基づいて動作する DMD 制御 FPGA 回路の設計及び光近接効果補正データの作成ソフトウェアを設計した。これらを「両面アライメント機能付きミニマルマスクレス露光装置試作機」に組み込み評価を行い、0.5μm ライン＆スペースの描画ができることを確認した。この際、パターンの幅、側面形状等を高精度に測定するために、「形状解析レーザー顕微鏡」を使用した。

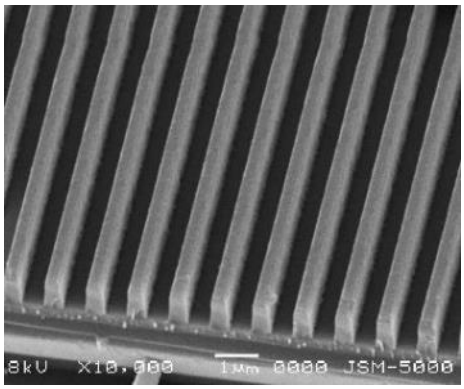

図 3.5 0.5μm　ライン＆スペース　描画結果

＜平成 29 年度実施内容＞

平成 28 年度に製作した「両面アライメント機能付きミニマルマスクレス露光装置試作機」を用いてテーマ 4 に記載の評価用デバイスを製造することで装置性能を総合的に評価し、0.5μmのライン&スペースが描画できることを確認した（図 3.5）。

3.2.3 焦点深度拡大　　：2.3μm　⇒　12μm（厚膜レジスト対応オプションレンズ）

センサーデバイスの製作には、微細なパターンを形成するだけでなく、厚膜のレジストを露光する必要もある。厚膜レジストを露光するためには、焦点深度を深くすることが欠かせない。厚膜レジスト対応のためのオプションとして、深焦点深度の縮小投影レンズ（対物レンズユニットⅡ型）を開発する。

＜平成 28 年度実施内容＞

（株）ピーエムティーにて「対物レンズユニットⅡ型」の仕様検討を行い、製作した「対物レンズユニットⅡ型」の単体評価を実施し、目標(焦点深度 12μm)の達成を確認した。

＜平成 29 年度実施内容＞

「対物レンズユニットⅡ型」を露光装置に装着して実際にスキャン露光を行い、その露光結果から焦点深度が目標値(12μm)を上回る 13μm 以上であることを確認した（図 3.6）。

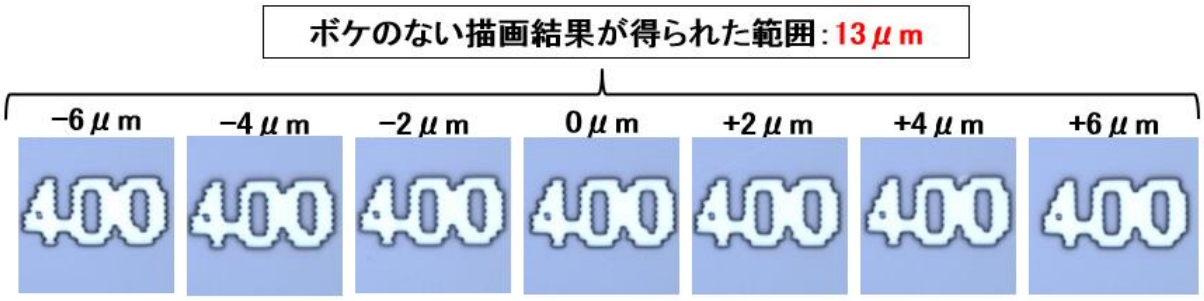

図 3.6 焦点深度確認

3.3 スループット向上

ハーフインチウェハの全面描画に要する時間を、現行の 1/3 までに大幅に短縮するためには、ステージ速度高速化、DMD 応答速度向上、焦点調整時間短縮が必要である。

3.3.1 ステージ速度高速化

従来のステージ駆動アクチュエータ 15）は、位置決め精度と静止安定性に優れる反面、高速動作に向いておらず、動的な制御特性に難がある。これを高速動作に向いたアクチュエータに変更することで、高速で高精度の位置決めを実現する。

＜平成 27 年度実施内容＞

（株）ピーエムティーにて「ステージユニットⅠ型」を設計・製作し評価を行った。なお、アクチュエータ変更にあたっては、下記主要仕様を維持したまま、動作の高速化を行った（図 3.7）。

- ミニマルステージに組み込み可能なコンパクト設計
- 超高位置決め精度、静止安定性を維持
- 極低速での等速性を維持
- プロセスに影響を与えない低発熱の確保と排熱設計

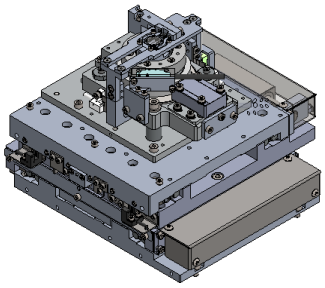

図 3.7 ステージユニット

＜平成 28 年度実施内容＞

平成 27 年度に製作した「ステージユニットⅠ型」他をミニマルファブ技術研究組合保有の片面用ミニマルマスクレス露光機に組み込むことで、「両面アライメント機能付きミニマルマスクレス露光装置試験機」を製作して、(株)ピーエムティーにて基礎評価を行った後、ミニマルファブ技術研究組合に移設し、ミニマルファブ技術研究組合にて評価を行った。その結果を基に、「ステージユニットⅡ型」を設計・製作して、後述する「両面アライメント光学系ユニットⅡ型」、「対物レンズユニットⅡ型」及び「ミニマルマスクレス露光機本体ユニット」とともに、「両面アライメント機能付きミニマルマスクレス露光装置試作機」を製作して、(株)ピーエムティーにて評価して、評価結果を基に改善、調整を行った。ユニット単体での動作速度目標(25mm/sec)を達成した（図 3.8)。

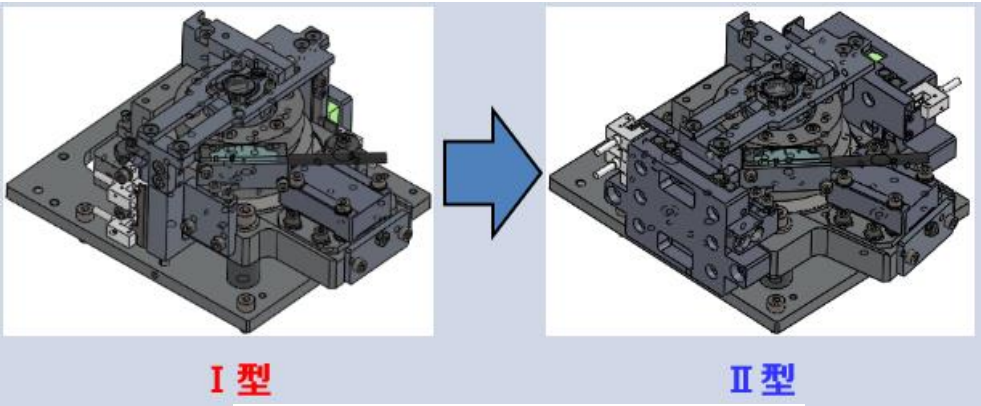

図 3.8 ステージユニットⅠ型とⅡ型

＜平成 29 年度実施内容＞

平成 28 年度に製作した、「両面アライメント機能付きミニマルマスクレス露光装置試作機」を用いて評価用デバイスを製造することで装置性能を総合的に評価し、動作シーケンスの最適化を行うことで、露光時間目標値(120sec/枚)の達成を確認した。

3.3.2 DMD 応答速度向上

従来のミニマルマスクレス露光装置では、DMD 制御ハードウエア上の制約から、8mm/sec での描画が上限であったが、新規制御アルゴリズムの開発により、16mm/sec まで高速化した。

＜平成 27 年度実施内容＞

(株)ピーエムティーが DMD 制御用 FPGA 回路を設計して、単体動作評価を行い、評価結果を基に改善、調整を行った。装置全体の挙動、特性を考慮した最適なアルゴリズムを開発することで、目標としていた DMD 制御基板単体での描画スクロール速度 16mm 以上/sec を達成した。

＜平成 28 年度実施内容＞

平成 27 年度に製作した FPGA 回路を「両面アライメント機能付きミニマルマスクレス露光装置試験機」に組み込み、評価を行った。評価結果を基に改良したものを「両面アライメント機能付きミニマルマスクレス露光装置試作機」に組み込み評価し、評価結果を基に改善、調整を行った。その結果、ユニット単体での動作速度については目標を達成した。

＜平成 29 年度実施内容＞
平成 28 年度に製作した、「両面アライメント機能付きミニマルマスクレス露光装置試作機」を用いて評価用デバイスを製造することで装置性能を総合的に評価し、DMD の最大動作速度 16mm/sec において、露光時間目標値(120sec/枚)の達成を確認した。

3.3.3 焦点調整時間短縮

従来、焦点調整はウェハを Z 軸方向に移動しながら DMD で生成した投影画像を観察用カメラで複数枚取得し、コントラストが最も高くなる位置を探すという方式で行っているため、多大な時間を要していた。ステージに組み込んだ高さ基準での定期的な焦点調整動作と、レーザー式変位計によるウェハ表面高さ計測を組み合わせて、焦点調整に要する時間を短縮した。

＜平成 28 年度実施内容＞
(株)ピーエムティーにて焦点調整時間短縮のためのソフトウェア設計を行った。その後、「両面アライメント機能付きミニマルマスクレス露光装置試作機」に組み込んで、実機評価を行った。評価結果を基に各部の改善、調整を行った結果、ユニット単体での動作速度について目標を達成、実露光評価により焦点調整所要時間の評価を行い、目標(4sec/回)を達成した。

＜平成 29 年度実施内容＞
平成 28 年度に製作した、「両面アライメント機能付きミニマルマスクレス露光装置試作機」を用いて評価用デバイスを製造することで装置性能を総合的に評価し、動作シーケンスの最適化を行うことで、露光時間目標値(120sec/枚)の達成を確認した。

3.4 両面アライメントが必要なセンサーデバイスの設計とその構造評価

以下の 3 種類のデバイスを設計・製作し、その構造評価を行うことで、本事業で開発したマスクレス露光装置の性能を評価した。

3.4.1 微小孔アレイを有する SiN 製ダイアフラム構造の形成【描画分解能の評価】

ハーフインチウェハを両面から加工することで、シリコン製のリング状構造体で支持した SiN（窒化シリコン）製のダイアフラム構造を製作し、それに多数の円形微小孔をアレイ状に形成した（図 3.9)。微小孔の直径を 0.5μm ～ 3μm の範囲で設計変更し、マスクレス露光装置の描画分解能を評価した。

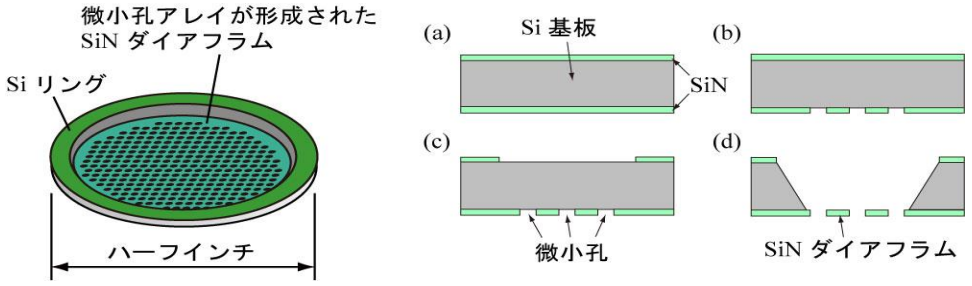

図 3.9 微小孔アレイを有する SiN 製ダイアフラムの概要（左）と製作工程（右）

＜平成 27 年度実施内容＞
片面ミニマルマスクレス露光装置を用いて、ハーフインチウェハ上に微小孔アレイをパターニングする技術を構築した。このミニマル加工に、従来の半導体加工法であるプラズマ CVD によ

る SiN 膜形成、RIE による SiN エッチング、両面マスクアライナによるウェハ裏面露光、シリコン結晶異方性エッチングなどを組み合わせたハイブリッド加工法を構築した。これにより、目標としていた微小孔径 3μm 以下(達成値:2.4μm)のデバイスを製作した。

＜平成 28 年度実施内容＞

両面アライメント機能付きミニマルマスクレス露光装置を用いて、ハーフインチウェハ上に孔径 1μm(設計値)の微小孔をアレイ状にパターニングした。SiN エッチングにおける微小孔径の広がりを抑えるために、RIE のチャンバ圧力を最適化することでアンダーカット量を最小化する条件を導出した。従来加工とミニマル加工を組み合わせたハイブリッド加工により、目標としていた微小孔径 2μm 以下(達成値:1.4μm)のデバイスを製作した。

＜平成 29 年度実施内容＞

両面アライメント機能付きミニマルマスクレス露光装置を用いて、ハーフインチウェハ上に直径 0.5μm(設計値)の微小孔をアレイ状にパターニングした。その際に、設計値に近い微小孔径を得るように露光量の最適化を行った。また、SiN エッチングにおいて垂直な微小孔側壁を得るように、RIE のチャンバ圧力等の調整を行った。これにより、目標としていた微小孔径 1μm 以下(達成値:0.8μm)のデバイスを製作することに成功した（図 3.10)。

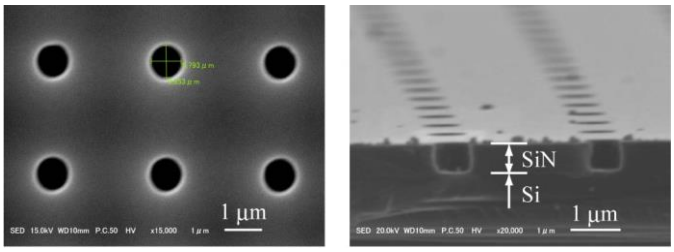

図 3.10 微小孔アレイ（左）とその断面（右）

3.4.2 SiN 製ダイアフラム・アレイ構造の形成　【両面アライメント精度の評価】

SiN 製ダイアフラム（一辺: 20 ～ 300μm）に微小孔アレイを形成し、このダイアフラム構造をアレイ状に配置した（図 3.11)。裏面の微小孔パターンと表面のダイアフラム・パターンのずれを測定することで、マスクレス露光装置の両面アライメント精度を評価した。

＜平成 27 年度実施内容＞

片面ミニマルマスクレス露光装置とドライエッチング（RIE）を用いて、ハーフインチウェハ裏面の SiN 膜に微小孔アレイを形成した。次に、両面マスクアライナを用いてウェハ表面にダイアフラム・アレイをパターニングし、SiN エッチングとシリコンの結晶異方性エッチングにより、ダイアフラム・アレイ構造を形成した。以上のハイブリッド加工により、目標としていた微小孔とダイアフラムの表裏間アライメント精度±5μm 以下(達成値:±3.1μm)のデバイスを製作した。

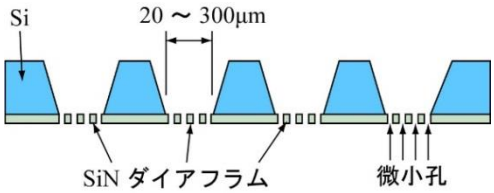

図 3.11 微小孔アレイを有する
SiN 製ダイアフラムのアレイ構造

＜平成 28 年度実施内容＞

両面アライメント機能付きミニマルマスクレス露光装置とドライエッチング（RIE）を用いて、ハーフインチウェハ裏面の SiN 膜に微小孔アレイを形成した。次に、両面マスクアライナを用いてウェハ表面にダイアフラム・アレイをパターニングし、SiN エッチングとシリコンの結晶異方性エッチングにより、ダイアフラム・アレイ構造を形成した。以上のハイブリッド加工により、目標としていた表裏間アライメント精度±3μm 以下(達成値:±1.5μm)のデバイスを製作した。また、ミニマル深掘りエッチャーを用いて SiN 製ダイアフラム・アレイ構造を形成するための製作条件を導出した。

＜平成 29 年度実施内容＞

両面アライメント機能付きミニマルマスクレス露光装置を用いてハーフインチウェハ表面の SiN 膜にダイアフラム・アレイをパターニングし、SiN 膜をエッチングすることでシリコン結晶異方性エッチング用の窓を形成した。次に、両面アライメント機能付きミニマルマスクレス露光装置を用いて表裏間のアライメントを行いながら、ウェハ裏面に微小孔アレイをパターニングし、SiN 膜をエッチングして微小孔アレイを形成した。最後に、結晶異方性エッチングによりシリコンをウェハ表面よりエッチングすることで、微小孔アレイを有するダイアフラム・アレイ構造を形成した。以上のハイブリッド加工により、目標としていた表裏間アライメント精度±3μm 以下(達成値:±1.6μm)のデバイスを製作した（図 3.12)。

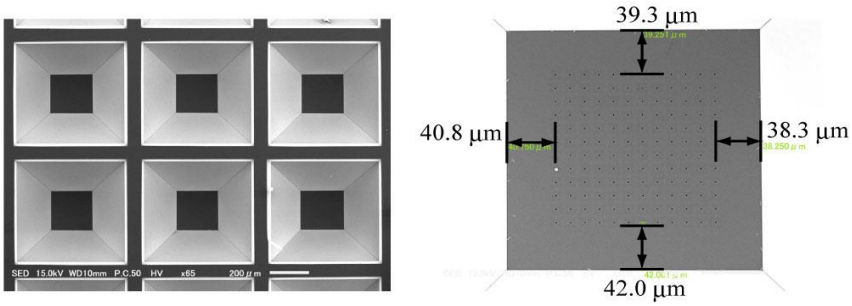

図 3.12 ダイアフラム・アレイ（左)、及び微小孔とダイアフラムのずれ（右）

3.4.3 SiN 製ダイアフラム構造への微小電極の形成　【重ね合わせ精度の評価】

微小孔アレイを形成した SiN 製ダイアフラム構造上に、金製の微小電極（1 辺 50μm）をアレイ状に形成するとともに、金製の配線（線幅 20μm）を形成した（図 3.13、図 3.14)。微小孔パターンと微小電極パターンのずれを計測することで、マスクレス露光装置の重ね合わせ精度を評価した。

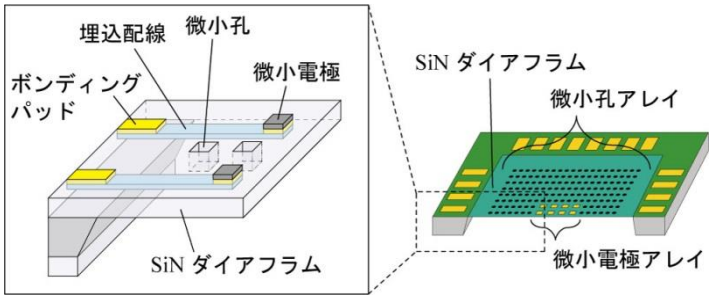

図 3.13 微小孔と微小電極を有する SiN 製ダイアフラム構造の概要

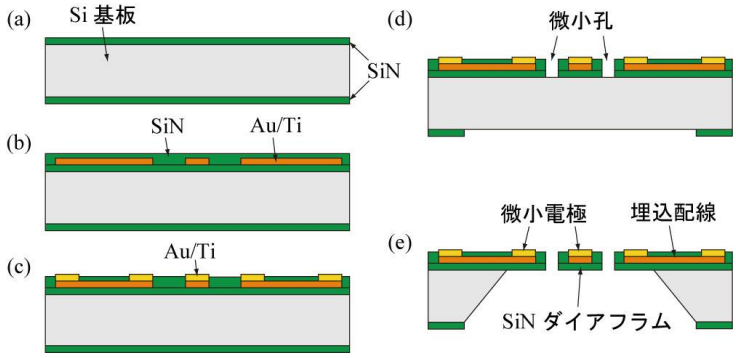

図 3.14 微小孔と微小電極を有する SiN 製ダイアフラム構造の製作工程

＜平成 27 年度実施内容＞

片面ミニマルマスクレス露光装置、真空蒸着、ウェットエッチングを用いて、ハーフインチウェハ表面の SiN 膜上に微小電極アレイを形成した。次に、その同一面上に、片面ミニマルマスクレス露光装置とドライエッチングを用いて、微小孔アレイを形成した。以上のハイブリッド加工により、目標としていた微小孔と微小電極の重ね合わせ精度±3μm 以下(達成値:±0.2μm)のデバイスを製作した。

＜平成 28 年度実施内容＞

両面マスクアライナ、スパッタリング、ウェットエッチングを用いて、ハーフインチウェハ表面の SiN 膜上に微小電極アレイを形成した。次に、その同一面上に、両面アライメント機能付きミニマルマスクレス露光装置とドライエッチングを用いて、微小孔アレイを形成した。以上のハイブリッド加工により、目標としていた微小孔と微小電極の重ね合わせ精度±2μm 以下(達成値:±0.5μm)のデバイスを製作した。

＜平成 29 年度実施内容＞

両面アライメント機能付きミニマルマスクレス露光装置、スパッタリング、ウェットエッチングを用いて、ハーフインチウェハ表面の SiN 膜上に微小電極アレイを形成した。次に、その同一面上に、両面アライメント機能付きミニマルマスクレス露光装置とドライエッチングを用いて、微小孔アレイを形成した。以上のハイブリッド加工により、目標としていた微小孔と微小電極の重ね合わせ精度±1μm 以下(達成値:±0.3μm)のデバイスを製作した（図 3.15)。

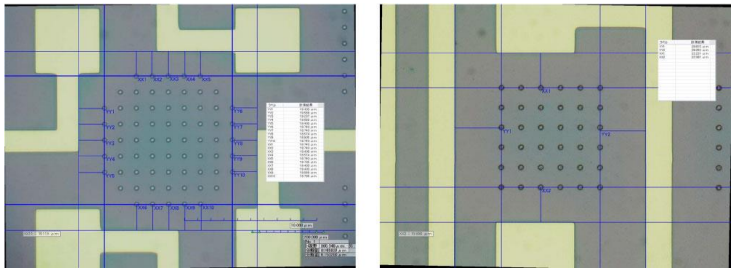

図 3.15 中央部（左）と周辺部（右）における微小孔と微小電極のずれ

第 4 章全体統括

4.1 研究開発成果

【製品名】　両面アライメント機能付きミニマルマスクレス露光装置

図 4.1 両面アライメント機能付きミニマルマスクレス露光装置

4.1.1 製品仕様

・両面アライメント機構＋マスクレス露光をミニマル装置サイズ（294mm x 450mm x 1440mm）で実現
・描画品質（分解能、重ね合わせ精度、３次元構造）向上
・位置決め精度とミニマル装置サイズを維持しつつ、高速化を実現
これらの機能を持つ両面アライメント機能付きマスクレス露光装置は世界初である（図 4.1)。

4.1.2 新技術

・ステージ外に設置した裏面アライメント光学系による高精度位置決め機構
・低ディストーションレンズと DMD 制御による光近接効果補正技術
・小型アクチュエータを使用した超高精度、高速ステージ、及び制御技術

4.2　研究開発成果の効果（波及効果）

両面アライメント機能付きミニマルマスクレス露光装置が完成することにより、多くのセンサーが低コスト　かつ短納期で開発製造可能となる。この装置を駆使することで、1 日～数日という超高速で試作～評価～改善試作を繰り返すことができる。

既存工場ではウェハ 24 枚でロットを構成しているが、ミニマル生産システムでは口径 0.5 インチ（12.5mm）のウェハ 1 枚で 1 ロットを構成するので、最低ロット枚数が大きい従来工場では難しい、生産数量が少ない高付加価値なセンサーの実用化を実現できる。

4.3　事業化展開

SEMICON　JAPAN2017 で配布した予告カタログを図 4.2 に示す。2018 年 4 月より、ミニマルマスクレス露光装置としての営業活動を PMT で行うのと並行して、ミニマルファブシステムとしての販促活動を横河ソリューションサービスが実施する。現状のミニマルファブビジネス引き合案件は、国内 2 件、国外 6 件である。

図 4.2 SEMICON japan2017 で配布した予告カタログ

事業化に至る課題として、専門家によりアドバイスの必要性や海外へのアピールがある。しかし、これらは、地域未来牽引企業に選定されたことから、専門家によるアドバイス・税制・設備投資などの支援を得ることができる（図 4.3)。さらに、九州経済産業局の MAP of Companies に掲載されたことにより、海外へのアピールが可能となった（図 4.4)。

図 4.3 地域未来牽引企業

Semiconductors /Electronics / Information Communication

	Company Name	Location	Main Product/Service
1	YASKAWA ELECTRIC CORPORATION	Kitakyushu City	Robots, Servo, Inverters, etc.
2	MITSUBISHI ELECTRIC Co., Ltd.	Fukuoka City	Power Modules, High-Power Devices, Semiconductor Sensors, Transistor Arrays, HVIC, Power Device Wafers.
3	PMT CORPORATION	Sue Town	Minimal Fab (Maskless Lithography), Minimal Foundry Service.
4	SUMCO CORPORATION	Imari City	Silicone Wafer for Semiconductors
5	ISAHAYA ELECTRONICS CORPORATION	Isahaya City	Module Products (IGBT Drivers,etc), Discrete Products (Transistors, Diodes, etc) and others.
6	Sony Semiconductor Manufacturing Corporation	Kikuyo Town	Semiconductors, mainly CMOS Image Sensors.
7	Renesas Semiconductor Manufacturing Co., Ltd. Kawashiri Factory	Kumamoto City	Car-Mounting Microcomputers (RL78 Models, etc.)
8	CHUO DENSHI KOGYO Co., Ltd.	Uki City	Entrusted Post-Processing of RF Semiconductors (Hollow Resin-Sealing, etc.), Super-Low-Noise FET, High-Frequency SW.
9	Kyushu Semiconductor KAW Co., Ltd.	Kitsuki City	Fine-Processing on Wafers, MEMS-related Special Processing, Microchannel Chip Production, etc.
10	Japan Semiconductor Corporation Oita Operations	Oita City	Analogue Devices, MCU, System LSI, ets.
11	STK TECHNOLOGY CO., LTD.	Oita City	Semiconductor Testers, IC Evaluation/Analysis Service.
12	DENKEN Co., Ltd	Yufu City	Semiconductor Assembly/Appearance Inspection, Solar Cell Testers, Medical Devices for home use, Bike-Parking Systems, etc.,
13	SYSTEM ENGINEERING CORP.	Miyakonojo City	Mask Wafer Alignment Film-Forming System
14	ULVAC KYUSHU CORPORATION	Kirishima City	Semiconductors, Electronic Parts, Sputtering Equipment for Flat Panel Displays,Vacuum Coating Equipment & Vacuum Pump and other Components, Film-Forming Materials.

図 4.4 MAP of 地域 Companies

4.4　研究開発後の課題

装置内温度平衡状態において、表裏間アライメント精度の目標値±2.0μm は達成したが、装置起動から温度平衡状態に至るまでに時間を要している。そのため、更なる変位を抑制するキャリブレーション機能の開発を行うことにより、装置の起動時安定性を達成する。

専門用語の解説

1) **ウェハ**：センサー製造の基板材料。シリコンを高純度に製錬した円柱状のインゴッドを薄くスライスした円盤状の板。口径は 12.5、50、100、125、150、200、300、450mm がある。

2) **フォトリソグラフィ**：感光性の物質（レジスト）を塗布した物質の表面を、パターン状に露光することで、露光された部分と露光されていない部分からなるパターンを生成することで微細構造を形成する技術。

3) **露光装置**：ウェハ基板上に微細構造を焼き付ける装置。

4) **マスク**：ウェハに微細構造を焼き付ける構造パターンの原板。1 セット数十万円から数百万円。

5) **ミニマル生産システム**：半導体デバイス産業は大規模化、寡占化が進み設備投資額は 5,000 億円以上に達しており、工場新設や新規参入は容易ではない。国立研究開発法人産業技術総合研究所（以下、産総研）は、この課題を解決する手段として「ミニマルファブシステム」という変種変量型生産システムを開発した。ウェハの大口径化トレンドとは一線を画し、12 インチ（300mm）ウェハと比較して面積比 1/1000 となる 0.5 インチ（12.5mm）ウェハを用いることにより、製造装置を超小型化する。さらにウェハ密閉搬送容器と、微粒子とガス分子を遮断する局所クリーン化前室システムによりクリーンルームが不要となり、半導体工場の設備投資額を従来の 1/1000 の約 5 億円とする画期的な生産システムである。これにより、多品種少量生産に適した生産ラインを構築しやすくなる。

6) **アライメント**：ウェハに微細構造物を形成するため、構造パターンを幾層にも積み重ねて構築する。その場合、積み重ねを精度良く行うために下の層にマークを形成しておく。積み重ねる上の層は、下の層のマークに合わせることにより積み重ね精度が良くなる。このマークの重ね合わせを行う位置合わせのことをアライメントという。

7) **アスペクト比**：微細加工における穴系と深さの比率、矩形の高さと上辺の長との比率。

8) **DMD**：デジタルマイクロミラーデバイス（Digital Micromirror Device）の略。多数の微小鏡面（マイクロミラー）を平面に配列した表示素子の一種である。本装置では、この微小鏡面の ON/OFF の制御を行って描画パターンを発生させている。

9) **重ね合わせ精度**：多層にわたってパターンを描画する際には、パターンの Z 方向の加工精度が総合性能に影響を及ぼす。したがって、各層のパターンが互いに Z 方向にお

いても整合がとれてなければならない。そして、パターンを重ねて加工する際には、接合精度と同様、本精度が重要になる。

10) **ミックス＆マッチ**：デバイスの製造は非常に長い工程で構成されており、その間に何度もリソグラフィプロセスが行われる。これらのリソグラフィプロセスは、複数台の露光装置、しかも微細化世代の異なる装置を使う場合もあり、それらの様々な装置を使用しても重ね合わせ精度が保たれる必要がある。これをミックス・アンド・マッチと言う。

11) **低ディストーション縮小投影レンズ**：投影像の歪み（ディストーション）を抑えられるレンズ。

12) **回折限界**：光学系の持ち得ることのできる解像力の限界のこと。解像力は光学系がどこまで細やかな物体を結像できるかを表すもので、像として識別可能な 2 点間の最小間隔を言う。回折限界は光学系に全く収差がない理想レンズか、あるいは評価波長に対して無視しても良いほど収差が小さい場合のその光学系の解像力のこと。

13) **光近接効果**：加工寸法が露光波長に近づくと、パターンの形状や大きさ、隣接パターンの影響によって、露光パターンを忠実にウェハ上に露光できなくなる。この現象を光近接効果という。

14) **開口数**：光学系の明るさと解像力に関する光学性能を表す量。光学系においてレンズへの入射光に対し、絞り半径が張る角度を θ、レンズの屈折率を n とするとき、$n \cdot \sin\theta$ で表される量で、レンズの明るさを示す。開口数が大きいほど、解像度は高く、焦点深度の浅いパターンが加工できる。

15) **アクチュエータ**：ものを動かす駆動装置と、その動作により制御を行う機械的あるいは油空圧的装置。