

薄膜の常温接合による3次元微細加工技術の
開発とオーバーレイ誤差の要因解析

2011年度

山田 高幸

主 論 文 要 旨

報告番号	甲 第	号	氏 名	山田 高幸
主論文題目： 薄膜の常温接合による 3次元微細加工技術の開発とオーバーレイ誤差の要因解析				
(内容の要旨) 情報機器等の小型化・高性能化・低消費電力化などの要請に伴い、さまざまな微細加工技術が開発されている。このような要請に応えるため、本研究では nm オーダーの加工精度と 3次元形状の自由度を両立する微細加工技術として、薄膜パターン部材を常温接合法によって積み重ねる積層造形法 (FORMULA 技術) を新たに開発した。さらに本加工技術に起因するオーバーレイ誤差 (層間の重ね合わせにおけるズレ) の計測法を開発し、加工装置の誤差要因を特定することを目的とする。 第 1 章では、本研究の背景と目的、従来技術、および本論文の構成について述べた。 第 2 章では独自の微細加工技術である FORMULA 技術の原理を説明するとともに、原理検証機 (F-0 機) の設計と構成要素および微小部品の作製結果について説明した。 第 3 章では、F-0 機製作から得られた知見をフィードバックして微小部品の自動生産を視野に入れた生産対応機 (F-1 機) の設計・製作について述べ、加工結果について説明した。その結果、多層積層時のオーバーレイ誤差が、積層精度向上に対して主要な課題であることが示された。 第 4 章では、オーバーレイ誤差を効率よく計測することを目的に開発した最小二乗円法について詳しく述べた。この方法は、多層積層された同心円パターンの中心座標の変位を計測するもので、走査型電子顕微鏡による同心円パターンの撮影、および円エッジの抽出、最小二乗法による中心座標の計算からなる。同一画像を 5 回評価した場合の繰返し精度は、 3σ (標準偏差の 3 倍) の範囲で 1 pixel 以下、距離に換算して 28.4 nm であった。 第 5 章では、この計測手法を F-1 機による積層結果に適用し、オーバーレイ誤差を評価・解析した結果について説明した。オーバーレイ誤差は、セル内のランダム誤差(34 nm)、セル間のランダム誤差(98 nm)、およびセル間の系統誤差(32 nm) の 3 種類に分類できることがわかった。セル内のランダム誤差の主要因は、ドナー基板上に形成した構造体の断面パターンのパターンニング誤差(25 nm)と、計測誤差(10 nm)であることを明らかにした。セル間のランダム誤差の主要因は、装置の振動に伴う XY ステージの位置決め誤差(74 nm)と Z 軸の XY 面内ブレ(46 nm)であった。一方、セル間の系統誤差は、ドナー基板座標系と XY ステージの座標系のアライメント調整を実施しているにもかかわらず発生しており、その原因は、アライメントマーク位置座標読み取り時のランダム誤差がアライメント係数に伝播しているためと判明した。そこでアライメントマーク位置座標を複数回読み取り、平均値を用いたところ、系統誤差は約 1/3 (9 nm) に改善された。 第 6 章では、各章の内容を総括し、本研究の成果について述べた。				

学位論文 博士（工学）

薄膜の常温接合による3次元微細加工技術の
開発とオーバーレイ誤差の要因解析

2011年度

慶應義塾大学大学院理工学研究科

山田 高幸

目次

第 1 章	緒論	- 1 -
1.1	背景.....	- 1 -
1.2	従来技術とその課題.....	- 1 -
1.2.1	<i>MEMS</i> 技術.....	- 1 -
1.2.2	<i>LIGA</i> 技術.....	- 2 -
1.2.3	切削加工技術.....	- 2 -
1.2.4	マイクロ放電加工.....	- 2 -
1.2.5	ナノインプリント技術.....	- 3 -
1.2.6	<i>FIB</i> 加工技術.....	- 3 -
1.2.7	積層造形法.....	- 4 -
1.3	本研究の目的.....	- 5 -
1.4	本論文の構成.....	- 5 -
	参考文献.....	- 6 -
第 2 章	FORMULA 技術の提案と検証	- 8 -
2.1	緒言.....	- 8 -
2.2	FORMULA 技術の提案.....	- 8 -
2.2.1	加工原理.....	- 8 -
2.2.2	常温接合について.....	- 10 -
2.2.3	原理検証のための課題.....	- 12 -
2.3	原理検証機の基本構成.....	- 12 -
2.3.1	真空チャンバ.....	- 13 -
2.3.2	<i>X-Y-θ</i> ステージ.....	- 14 -
2.3.3	<i>Z</i> ステージ.....	- 17 -
2.3.4	静電チャック.....	- 19 -
2.3.5	<i>FAB</i> 照射装置.....	- 20 -
2.3.6	アライメント顕微鏡.....	- 21 -
2.3.7	平行度調節機構.....	- 23 -
2.4	ドナー基板.....	- 24 -
2.4.1	レイアウト.....	- 24 -
2.4.2	作製プロセス.....	- 26 -
2.4.3	離型性の制御.....	- 27 -
2.5	ターゲット基板.....	- 29 -
2.6	構造体作製結果.....	- 30 -
2.6.1	薄膜の転写性の検証.....	- 30 -

2.6.2	構造体の加工精度の評価.....	- 32 -
2.6.3	積層界面の解析.....	- 36 -
2.6.4	形状自由度の検証.....	- 38 -
2.6.5	電鍍膜の積層構造体の作製.....	- 40 -
2.7	結言.....	- 42 -
	参考文献.....	- 43 -
第3章	生産対応機の製作と評価.....	- 45 -
3.1	緒言.....	- 45 -
3.2	基本コンセプト.....	- 45 -
3.2.1	F-1機の仕様.....	- 46 -
3.2.2	ドナー基板のレイアウト.....	- 48 -
3.2.3	アライメントと座標変換.....	- 54 -
3.3	各部の仕様と性能.....	- 57 -
3.3.1	全体構成.....	- 57 -
3.3.2	真空チャンバ.....	- 58 -
3.3.3	X-Y- θ ステージ.....	- 59 -
3.3.4	レーザ干渉測長器.....	- 62 -
3.3.5	Z ステージ.....	- 64 -
3.3.6	静電チャック.....	- 65 -
3.3.7	FAB 照射装置.....	- 65 -
3.3.8	アライメント顕微鏡.....	- 66 -
3.3.9	平行度調節機構.....	- 67 -
3.3.10	基板搬送系.....	- 67 -
3.3.11	制御ソフトウェア.....	- 68 -
3.4	構造体作製結果.....	- 70 -
3.4.1	多層積層の検証.....	- 70 -
3.4.2	タクトタイム.....	- 73 -
3.4.3	電鍍構造体.....	- 74 -
3.5	結言.....	- 77 -
	追補.....	- 78 -
1	アレイ座標一覧表.....	- 78 -
2	セル座標一覧表.....	- 79 -
	参考文献.....	- 80 -
第4章	オーバーレイ誤差の評価方法の開発.....	- 81 -
4.1	緒言.....	- 81 -

4.2	従来の評価方法.....	- 81 -
4.2.1	半導体装置.....	- 81 -
4.2.2	画像処理による方法.....	- 82 -
4.3	最小二乗円法の提案.....	- 87 -
4.3.1	評価用パターン設計.....	- 87 -
4.3.2	計測方法.....	- 90 -
4.4	評価結果.....	- 91 -
4.4.1	計測結果.....	- 91 -
4.4.2	抽出座標数の検討.....	- 97 -
4.4.3	計測の繰返し性.....	- 99 -
4.5	オーバーレイ誤差の分類.....	- 101 -
4.5.1	<i>FORMULA</i> 技術への適用.....	- 101 -
4.5.2	セル内ランダム誤差.....	- 104 -
4.5.3	セル間ランダム誤差.....	- 104 -
4.5.4	セル間系統誤差.....	- 105 -
4.6	結言.....	- 106 -
追補	- 107 -
1	行列計算.....	- 107 -
2	3点法の計算式.....	- 109 -
参考文献	- 110 -
第5章	オーバーレイ誤差の評価と解析.....	- 111 -
5.1	緒言.....	- 111 -
5.2	評価方法.....	- 111 -
5.2.1	オーバーレイ誤差の評価.....	- 111 -
5.2.2	<i>F-1</i> 機の性能評価.....	- 111 -
5.3	オーバーレイ誤差の評価結果.....	- 112 -
5.4	セル内ランダム誤差の解析.....	- 115 -
5.5	セル間ランダム誤差の解析.....	- 117 -
5.6	セル間系統誤差の解析.....	- 120 -
5.7	アライメント動作のシミュレーション.....	- 122 -
5.7.1	計算方法.....	- 122 -
5.7.2	計算結果.....	- 123 -
5.8	セル間系統誤差の改善.....	- 126 -
5.8.1	改善方法.....	- 126 -
5.8.2	加工精度の評価.....	- 127 -

5.9	結言	- 128 -
	追補	- 129 -
1	サンプリング周波数について.....	- 129 -
2	シミュレーションプログラム.....	- 130 -
	参考文献.....	- 131 -
第 6 章	結論.....	- 132 -
6.1	本研究の結論.....	- 132 -
6.2	今後の課題	- 134 -
謝辞	- 135 -
	本論文に関わる公刊論文及び学会発表.....	- 136 -

第1章 緒論

1.1 背景

情報機器等の小型化・高性能化・低消費電力化などの要請に伴い、センサ、レンズ、アクチュエータなどの高付加価値部品の高精度加工技術が求められている。このような要求に応えるため、MEMS 技術・LIGA 技術などのいわゆるマイクロマシン技術に加え、多軸制御加工機による切削加工、放電加工など既存加工技術の高精度化、ナノインプリント法・集束ビーム加工など新しい 3 次元微細加工技術の開発が精力的に行われている。以下では、マイクロマシン技術をはじめとする微細加工技術の現状・課題について述べ、本研究の目的を示す。

1.2 従来技術とその課題

1.2.1 MEMS 技術

MEMS技術とは、Micro Electro Mechanical Systemsの略で、半導体メモリやCPUなどの電子デバイスの作製に用いられるシリコン半導体プロセス技術を活用し、単結晶シリコン基板や多結晶シリコン薄膜を構造体としても利用して、電子回路と融合させた加工技術である[1]。その技術内容は大きく分けて 2 種類あり、数百ミクロンあるシリコン基板の厚み全体を活用したバルクマイクロマシニング技術[2]と、電子デバイス同様、シリコン基板の表面数ミクロンの範囲で機能を実現する表面マイクロマシニング技術[3]からなる。どちらもシリコンという優れた構造体材料を用い、バッチ処理による大量生産が可能といった特長を有する。またリソグラフィ技術の進歩と相まって、サブミクロンからナノメートル台の微細化が比較的容易であるという大きな魅力を有する。

バルクマイクロマシニング技術は、単結晶シリコンの結晶方位によるエッチング速度の差を利用した異方性エッチングにより、数百ミクロンの厚さを有するシリコンウェハに深い溝を形成したり、あるいはウェハを貫通する穴を形成したりして、アスペクト比の大きな構造体を作製可能である。しかしながら、エッチングに用いる水酸化カリウム (KOH) 溶液は半導体プロセスの大敵であるアルカリ金属を含むことから、電子デバイス作製工程との互換性に課題が生じる。また最終的にはウェハボンディング工程を伴うことが多いため、全体の作製プロセスは複雑である。

表面マイクロマシニング技術は、駆動回路や制御回路などとの融合性に優れるといった特徴を生かし、加速度センサやミラーデバイスなど複雑な機能部品の製造に適用されている。しかしながら、得られる形状は 2 次元的なものとなり、アスペクト比の大きい構造体の製造には適さない。また構造体として可動部分を形成するためには、オーバーハング構造や中空構造を形成する必要があるが、そのためには犠牲層エッチングやウェハボンディングといった特殊な工程が必要であり、作製プロセスを複雑なものとしている。このようなプロセスを実施するためには高価な半導体製造設備一式とMEMS用シミュレータなどが

必要となり、そのようなインフラを整えるためには多くの設備投資が必要となる[4]。この障壁を軽減するため、各種MEMSファンドリサービス（製造請負ビジネス）が立ち上がっている[5]。

1.2.2 LIGA 技術

LIGA技術は1980年代初頭にドイツのカールスルーエ核開発研究所で開発された微細加工技術であり、**L**ithographie（リソグラフィ）、**G**alvanofornung（電鍍）、**A**bformung（形成）の頭文字をとっている[6]。プロセスは、シンクロトロン加速器から放射される波長の極めて短いX線の直進性を利用して感光性樹脂をマスク露光し、さらに電鍍による転写工程を経て解像度が高くアスペクト比の大きい構造体を形成する。これまでに微小ギアや回折光学素子[7]などの作製に応用されている。

作製可能な形状は基本的に2.5次元*であるが、マスクを基板に対して動かしたり[8]、基板を光軸に対して傾斜させたり[9]することにより、テーパを有する形状を作製しようという試みも報告されている。

またシンクロトロン加速器は特殊で大掛かりな装置であるため、広く普及するには障害が大きい。そこで、紫外線に高い感度を有し数百ミクロンの厚塗り可能な特殊レジスト（SU-8）を用いて、LIGA同様の大きなアスペクト比をもつ構造体を作製しようとする試み（UV-LIGA）も提案されている[10]。

1.2.3 切削加工技術

切削加工は切削工具を用いて加工対象物を削り取る技術で、旋盤やフライス盤などで古くから実用化されている技術である。さらにマイクロ切削加工は、位置決め精度をナノメートルのオーダーとすることにより、複雑な3次元形状を高い寸法精度で実現することが可能で[11]、超精密加工技術の代表例である。

最近では、加工装置の制御軸を多軸化することにより加工形状の自由度を改善したり、加工軸の位置決め精度や剛性を高めて加工精度を改善したりする試みが報告されている[12]。また小さな加工部品は小さな加工機械で作製しようという「マイクロファクトリ」の試みも盛んに研究されている[13, 14]。

これらの技術に共通の課題として、加工対象物のマイクロ化と高精度化に伴い、加工工具の微細化と切削時の加工反力による加工精度の相対的な低下が挙げられる。

1.2.4 マイクロ放電加工

放電加工は加工対象物と電極間に微小放電を発生させ、加工対象物に微小なクレータを無数に形成することにより所望の形状を形成する加工技術である[15, 16]。放電を利用した除去加工であり、超硬材料など切削工具では切削しにくい材料の加工に威力を発揮する。

* 深さプロファイルはマスク形状を保ったまま一定であるが、アスペクト比が大きいので、2次元と3次元の間という意味で便宜的に2.5次元と称する。

棒状の電極を位置決めしながら加工対象物の形状を創生する方法が基本であるが、ワイヤ電極を順次繰り出し電極消耗を回避するワイヤ放電加工、電極の3次元形状を反転して（凸部が凹部になる）加工対象物に転写する型彫り放電加工などがある。

本技術の特長は、加工反力が小さく、工具や加工対象の変形が少なく高精度である。一方課題として、スループットが低い、加工の進行に伴い電極が消耗するため加工データの補正が必要、といった点が挙げられる。

1.2.5 ナノインプリント技術

ナノインプリント技術は、凹凸のパターンを形成した型を基板上の液状ポリマー等へ押し付け、型形状を転写するものである。もともとCD-ROMなどの光ディスク製作では良く知られているスタンパ技術を発展させ、その解像度を高めた技術である[17, 18]。前述のLIGAや切削加工などを用いて10 nmオーダーの精度で形成された型を用いることにより、型の形状が容易に転写複製可能となり、生産性が飛躍的に向上する。

液状ポリマーには、熱硬化性樹脂と光硬化性樹脂の2種類があり、これらを用いた技術はそれぞれ熱サイクルナノインプリント、光ナノインプリントと呼ばれる。前者では、PMMA（ポリメタクリル酸メチル）などの樹脂をガラス転移温度以上に加熱し、これに型を押し付け、冷却後に型を引き離して型の微細形状を樹脂に転写する。加熱・冷却を伴うため、樹脂と型の熱膨張率の差（数%）により位置ずれが生じる。後者では、石英など透明材料で型を形成し、光硬化性樹脂を塗布した基板にこれを押し付け、型を透過させて紫外線を照射し樹脂を固める。熱サイクルを伴わないため位置ずれは生じにくい。光硬化性樹脂自身が硬化時に数%収縮するので精度を落とす。

両者に共通の課題として、型と樹脂層との離型性が挙げられる。微細な型の凹凸部分に入り込んだ樹脂は離型しにくく、無理に引き離すと構造体に欠陥が発生するだけでなく、型にも損傷が生じる。また基板と型の間のアライメントも大きな課題であり、双方に形成されたアライメントマークの透過観察による方法が代表的であるが[19]、この方法によるアライメント精度は1 μm 程度であり、型の解像度を超えるアライメント精度は期待できない。また、より高精度なアライメント誤差の評価に関する報告は少ない[20]。

1.2.6 FIB 加工技術

近年注目されている付加加工技術にFIB（Focused Ion Beam）加工技術がある[21]。これはガリウムの集束イオンビームを用いた選択的な化学的気相成長法（CVD）であり、真空チャンバー内でガリウムイオンビームを3次元構造体の形状に応じて走査し、さらにフェナントレン（ $\text{C}_{14}\text{H}_{10}$ ）などの炭素を含むガス雰囲気とすることで、ビーム照射位置にアモルファスカーボンの構造体を形成することができる。この技術を用いて、外径2.75 μm 、高さ12 μm の世界最小のワイングラスが作製されている。

1.2.7 積層造形法

積層造形法は、薄い2次元シート状部材を何枚も積層して3次元構造体を形成する加工技術である。地図の等高線に対応した厚紙を重ね合わせて立体地図を作る方法と同じ原理である。切削加工のような除去加工とは逆で、部材を追加して形状を創生することから、付加加工技術とも呼ばれる。積層される部材としては、光硬化性樹脂、熱可塑性樹脂、粉末樹脂、紙、金属などがある。

近年では積層造形法の代表例である光造形法が、ラピッドプロトタイピング技術として3次元CADで設計されたモデルの現物確認に用いられるようになった[22]。この光造形法から発展したマイクロ光造形法[23, 24]は、比較的アスペクト比の大きい3次元微小構造体を安価な設備で製造することが可能であり、光硬化樹脂を利用したものでは精度の点でも前記製造法に迫りつつある。しかし構造体の材料が樹脂に制限されるため、機能上所望の目的に達しない場合がある。またセラミックスや金属の粉体を焼結するタイプの光造形法も提案されているが[25]、精度の点で前記製造法には及ばない。

Fig. 1-1 は光造形法の原理と問題点を示すものである。光造形法では、硬化した最上層(第n層)の直上に新たな液体樹脂層(第n+1層)をコートし、光ビームを2次元走査して硬化した第n+1層を形成する。塗布時には、表面張力や高粘度のため新たな液体層を均一に薄く塗布することが困難であるため、厚み精度が悪い。

次に露光においては、硬化厚さは垂直入射した光の光量が樹脂の硬化に必要な閾値に達した深さで決まるが、これは光強度の差(XY方向のガウス分布およびZ方向の指数関数的減衰)、樹脂の均一性および経時変化により変動しやすい。この要因によっても、厚さ方向の高精度化は難しい。

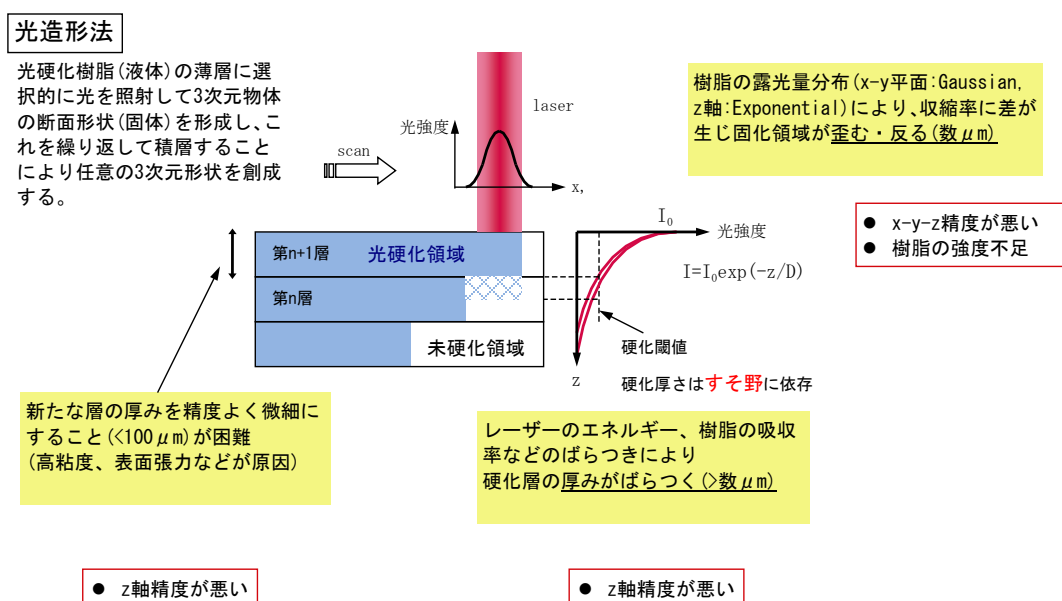


Fig. 1-1 Principle and problem of stereo lithography

さらに、全ての層の露光終了後に最終硬化プロセスが必要であり、この工程においても樹脂が数%収縮する。また場所により露光量に差があるため収縮量にもばらつきが発生し、全体的に3次元の精度を落とすことになる。さらに最終硬化後においても、光硬化樹脂は金属等に比べ強度的に十分でないといった問題もある。

1.3 本研究の目的

本研究では、まったく新規な3次元微細加工技術として、薄膜パターン部材を常温接合法で積層する **FORMULA (Formation of μ -structures by Lamination)** 技術を提案する。この加工技術は一種の積層造形法であり、フォトリソグラフィ法を用いて一括形成された薄膜パターン部材を、対向する別の基板上に常温接合法を用いて接合転写することを繰り返して、薄膜パターンの積層体からなる3次元構造体を形成する方法である。

さらに本研究では、上記 **FORMULA** 技術を加工精度の観点から考察することを目的とし、特に積層造形法において関心事となるオーバーレイ誤差の解析に焦点を当てた。オーバーレイ誤差とは、重ね合わされる2層間の位置合わせ誤差のことで、半導体作製プロセスにおけるウェハとフォトマスクの重ね合わせ誤差と同様の誤差である。積層造形法では、多数の薄板部材を積み重ねて1つの構造体を作製するため、加工精度の観点において、個々の薄板部材の形状誤差とともにオーバーレイ誤差が非常に重要となる。

本報告では、**FORMULA** 技術の原理検証および微小部品の自動生産が可能な生産対応機の開発について述べる。また多層構造体のオーバーレイ誤差を解析するための評価手段の開発から着手し、その方法を用いて生産対応機のオーバーレイ誤差を解析した。そしてその誤差要因を分類して、装置の構成要素と関連付けることを目指した。

1.4 本論文の構成

第2章では、本研究の対象となる **FORMULA** 技術の提案として、加工原理と原理検証機（以下 **F-0** 機と称す）について説明する。そして本技術が3次元微細加工技術として成立することを示す。また **F-0** 機で作製された構造体のオーバーレイ誤差解析から、装置の構成要素の課題を抽出する。

第3章では、**F-0** 機で抽出された課題から新たな生産対応機（以下 **F-1** 機と称す）の仕様を検討した。そしてこの課題を解決するための **F-1** 機の構成要素について詳しく説明する。またオーバーレイ誤差を詳細に解析するためには、多点のオーバーレイ誤差を効率よく評価するための検査パターンが必要なことを示す。

続く第4章では、オーバーレイ誤差の従来技術をレビューするとともに、これを効率よく評価するために新たに開発した最小二乗円法について詳しく説明する。

第5章ではこの最小二乗円法を **F-1** 機に適用し、オーバーレイ誤差を解析する。3種類に分類されるオーバーレイ誤差が装置の構成要素とどのように関連するかを考察し、改善の指針を提案する。

最後に第6章で本論文をまとめる。

参考文献

- [1] 特集 MEMS 設計・製造技術：精密工学会誌, **70**, 9, (2004) pp. 1133-1153.
- [2] M. エルベンスポーク/H. V. ヤンセン著, 田畑修/佐藤一雄訳：シリコンマイクロ加工の基礎, シュプリンガー・フェアラーク東京 (2001).
- [3] 江刺 正喜, 五十嵐 伊勢美, 藤田 博之, 杉山 進：マイクロマシーニングとマイクロメカトロニクス, 培風館 (1992).
- [4] 澤田廉士, 日暮栄治：MEMS 商用化技術の現状と今後の展望, 精密工学会誌, **76**, 5, (2010) pp. 491-497.
- [5] たとえば, <http://www.mmc.or.jp/fsic/>
- [6] H. GUCKEL, K. J. SKROBIS, T. R. CHRISTENSON, AND J. KLEIN: MICROMECHANICS FOR ACTUATORS VIA DEEP X-RAY LITHOGRAPHY, PROC. SPIE'S 1994 SYMPOSIUM ON MICROLITHOGRAPHY, (1994) pp. 39-47.
- [7] P. KRIPPNER, T. KUEHNER, J. MOHR AND V. SAILE: MICROSPECTROMETER SYSTEM FOR THE NEAR-INFRARED WAVELENGTH RANGE BASED ON LIGA TECHNOLOGY, PROC. SPIE 3912, (2000) p. 141.
- [8] O. TABATA, K. TERASOMA, N. AGAWA AND K. YAMAMOTO: MOVING MASK LIGA (M2LIGA) PROCESS FOR CONTROL OF SIDE WALL INCLINATION, THE 12TH MICRO ELECTRO MECHANICAL SYSTEMS WORKSHOP (MEMS '99), (1999) pp.252-256.
- [9] H. YOU, N. MATSUZUKA, T. YAMAJI AND O. TABATA: MOVING MASK DEEP X-RAY LITHOGRAPHY SYSTEM WITH MULTI STAGE FOR 3-D MICROFABRICATION, HIGH ASPECT RATIO MICRO STRUCTURES (HARMST '01), (2001) pp.13-14.
- [10] HYUN-KEE CHANG, YONG-KWEON KIM: UV-LIGA PROCESS FOR HIGH ASPECT RATIO STRUCTURE USING STRESS BARRIER AND C-SHAPED ETCH HOLE, SENSORS AND ACTUATORS A: PHYSICAL, **84**, ISSUE 3, (2000) pp. 342-350.
- [11] 竹内芳美：マイクロ切削加工, 精密工学会誌, **68**, 2, (2002) pp. 167-170.
- [12] 大場貴信, 中本圭一, 石田徹, 竹内芳美：5 軸制御加工用 CAPP/CAM システムの開発 -3次元微小部品加工への適用-, 精密工学会誌, **76**, 1, (2010) pp. 90-95.
- [13] 三井 公之, 木村 広幸: マイクロ生産機械システム専門委員会 -実用化が進むマイクロ工作機械-, 精密工学会誌, **75**, 1 (2009) pp.192_01-192.
- [14] 特集 世界に広がるマイクロファクトリの今 -ミニマルマニュファクチャリング特集-：精密工学会誌, **77**, 3 (2011) pp. 245-281.
- [15] 増沢隆久：マイクロ放電加工, 精密工学会誌, **68**, 2 (2002) pp. 180-184.
- [16] 国枝正典：放電加工の基礎と将来展望, 精密工学会誌, **71**, 1 (2005) pp. 58-62.
- [17] 松井真二：ナノインプリント技術, 表面科学, **25**, 10, (2004) pp. 628-634.
- [18] 谷口淳：はじめてのナノインプリント技術, 工業調査会, (2005).
- [19] J. LI AND F. MARTIN: ACCURATE ALIGNMENT TECHNIQUE FOR NANOIMPRINT LITHOGRAPHY, PROC. SPIE INT. SOC. OPT. ENG. 5752, PT. 1 (2005) pp. 429-437.
- [20] J. GAO, C. PICCIOTTO, W. WU AND W. M. TONG: FROM NANOSCALE DISPLACEMENT SENSING AND ESTIMATION TO NANOSCALE ALIGNMENT, J. VAC. SCI. TECHNOL. B **24**, 6 (2006) 3094.
- [21] 松井真二: 集束イオンビームによる立体ナノ構造形成技術とその応用, 表面技術, **56**, 7, (2005) pp. 361-366.
- [22] 特集 ラピッドプロトタイピングの最新動向, 精密工学会誌, **70**, 2 (2004) pp. 159-182.
- [23] S. MARUO AND S. KAWATA: TWO-PHOTON-ABSORBED PHOTOPOLYMERIZATION FOR THREE-DIMENSIONAL MICROFABRICATION, THE 10TH MICRO ELECTRO MECHANICAL SYSTEMS WORKSHOP (MEMS '97), (1997) pp. 169-172.
- [24] K. IKUTA, S. MARUO AND S. KOJIMA: NEW MICRO STEREO LITHOGRAPHY FOR FREELY MOVABLE 3D MICRO STRUCTURE, THE 11TH MICRO ELECTRO MECHANICAL SYSTEMS WORKSHOP (MEMS '98), (1998) pp. 290-293.

- [25] 前川克廣, 小倉 慧, 大島郁也, 横山雄一: グリーンテープを用いたレーザーマイクロ積層造形法, 精密工学会誌, **64**, 9 (1998) pp. 1340-1344.

第2章 FORMULA技術の提案と検証

2.1 緒言

本章では、本論文で議論する3次元微細加工技術=FORMULA技術を提案し、その原理検証について述べる。本加工技術は3次元の形状自由度とサブミクロン台の加工精度の両立を目的に開発された微細加工技術であり、常温接合と薄膜パターンの積層転写を用いた全く新しい積層造形法である。その加工原理と、原理検証実験について説明する。原理検証のために製作した常温接合装置(F-0機)の構成を基に、第3章で議論する生産対応の常温接合装置(F-1機)の仕様へ展開する。

最初に2.2節でFORMULA技術の原理について説明する。2.3節では、本加工技術を具現化するために必要な加工装置の構成とその必要要件について述べる。2.4節および2.5節では、加工に必要なドナー基板とターゲット基板について説明する。2.6節では、このF-0機で作製された微小構造体の作製結果を示し、F-0機の試作で明らかになった課題を示す。最後に2.7節で本章をまとめる。

2.2 FORMULA技術の提案

本節では、第1章で述べた従来技術の課題や限界を打破するために考案されたFORMULA技術の原理を示す。また本加工プロセスにおいて重要かつ特徴的な常温接合技術について説明する。そして加工技術として成立するための課題を示す。

2.2.1 加工原理

本方式は、薄膜を用いた積層造形法であり、FORMULA (Formation of μ -structures by Lamination) 技術と名付けた[1, 2]。本方式の加工原理をFig. 2-1に示す。工程は前半の半導体プロセスと後半の接合プロセスからなる。各プロセスは以下の通りである。

- ① 3次元構造体の設計モデルから断面パターンを抽出し、これらを展開して配置したフォトマスクを準備する。
- ② このフォトマスクを用い通常のリソグラフィ法により構造体の断面パターンが一括形成された基板(ドナー基板)を作製する。
- ③ この基板を真空チャンバ内に導入し、別に用意したターゲット基板と向かい合わせ、両者の表面をイオンビームなどの照射により清浄化する。
- ④ 両者を位置決めして圧接すると薄膜パターンとターゲット基板が常温接合される。
- ⑤ 両者を引き離すと、薄膜パターンはターゲット基板側に転写する。
- ⑥ 上記③～⑤の工程を繰り返しドナー基板上から断面パターンの剥離・転写を繰り返すと、ターゲット基板上に薄膜パターンの積層体からなる微小3次元構造体が完成する。

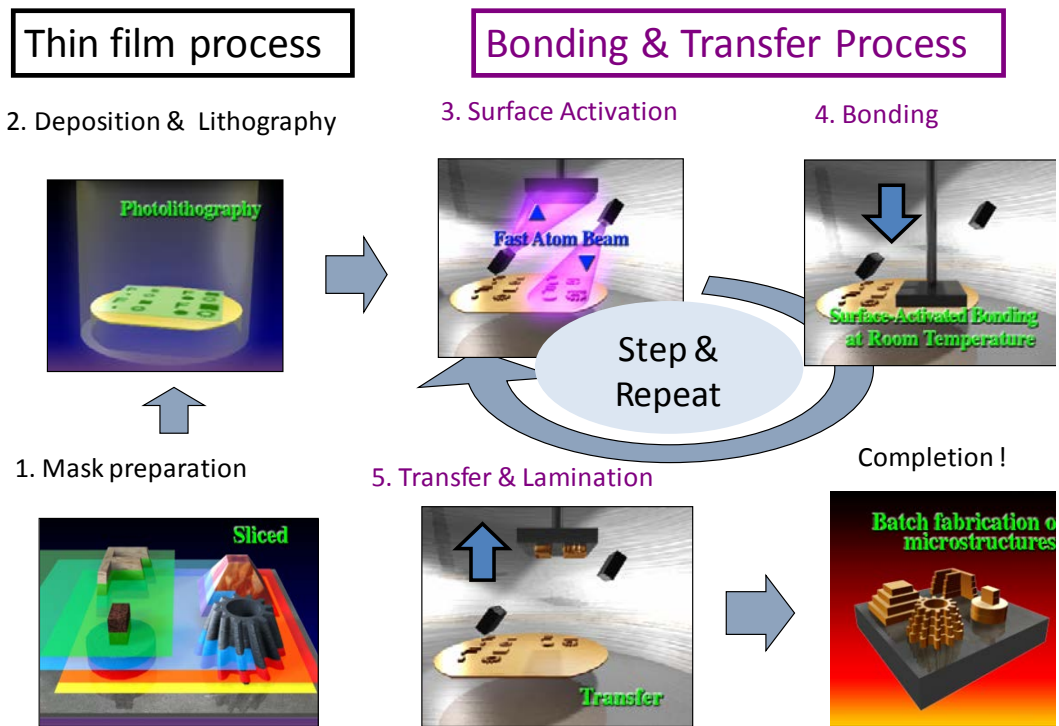


Fig. 2-1 Principle of FORMULA technology

ドナー基板とは構造体の断面パターン部材が形成され提供する基板であり，ターゲット基板とは断面パターン部材を受け取り，この上に構造体が形成される基板である．フォトリソグラフィ法を用いることにより，微小構造体の構成要素となる各断面形状の薄膜パターン部材の厚みおよび形状精度は，容易にサブミクロンを達成できる．また積層時の各層の位置決め精度も，精密ステージを適用することによりサブミクロンは実現可能である．各断面パターンの形成とこれらの積層を空間的に別の場所で行うことにより，光造形法のように新たな層の形成が下層に影響を及ぼすことが無い．積層に伴い薄膜間の接着という新たな課題が生じるが，常温接合技術[3]を用いれば，接着層の厚みを無視でき，熱変形無しに強固な接合が実現できると期待される．さらに構造体材料を各種金属など常温接合可能な複数の材料から選択可能となる．なお薄膜パターンがドナー基板から剥離しやすいよう，ドナー基板表面には離型層を形成して薄膜の密着力を適切に制御することがポイントであるが，これに関しては2.4.3節で述べる．

次に Fig. 2-2 を用いて実際の加工イメージを説明する．これは複数の微小構造体を一括して製造するバッチプロセス用の例である．まずドナー基板上に，複数の微小構造体の断面パターンのうち同一レイヤのパターンを集めた「セル」を定義し，このセルを所定のピッチでアレイ状に展開配置する．各セル内には複数の微小構造体に対応する断面パターンをそれぞれ配置する．そしてターゲット基板への接合・転写はセル単位に真空チャンバ内でステップ&リピート式に繰返して行うことにより，複数の微小構造体が一度に作製できる．

の適用事例はない。

一般に半導体プロセスに用いられる精密接合技術には、ろう接，融接，陽極接合，拡散接合などがある[5]。ろう接は，基板間にポリマやガラスなどの接着材料（ろう）を挟む接合法であり，融接は，ガラス基板同士などをガラス転移温度付近にまで加熱して融着させる接合法である。いずれも接合界面に液相を伴うため，寸法精度を保った精密な接合は期待できない。陽極接合は，Siウェハとパイレックスガラスを面接触させ，約 400°Cに加熱しながらパイレックスガラス側に−500 V程度の電圧を印加すると，界面に大きな静電引力が生じ，化学結合に至る。マイクロマシン作製プロセスにおける気密封止などに良く用いられるが，基板間の熱膨張率の差により，基板が反ったり破断したりする。拡散接合は，母材が溶融したり顕著な塑性変形を生じたりしない程度の熱と圧力を加えることにより，接合面で生じる原子の拡散を利用して固相状態で接合する方法である。金属同士や，金属とセラミックス間の接合に用いられることが多いが，陽極接合同様加熱を伴うため熱膨張率差に伴う変形などの問題がある。

常温接合の基本概念[6]とこれをFORMULA技術に適用したメリットをFig. 2-3に示す。まず試料表面に前処理として超平滑加工を施す。空気中ではその表面は酸化膜等の汚染物質により覆われているため，このような表面同士を接触させても接合を行うことはできない。ところが，真空中（一般には超高真空領域）でこの表面にイオン衝撃や中性原子を照射してこの汚染物質を取り除き，表面付近の原子の結合手を解放した状態（表面活性化状態）とし，残留ガスによる再汚染が起きる前に表面間を接触させることで原子レベルでの接合が可能となる。実際にAlの常温接合では，バルクと同程度の接合強度が確認されており[7]，原子レベルでの接合が行われていると考えられる。FORMULA技術ではこのような

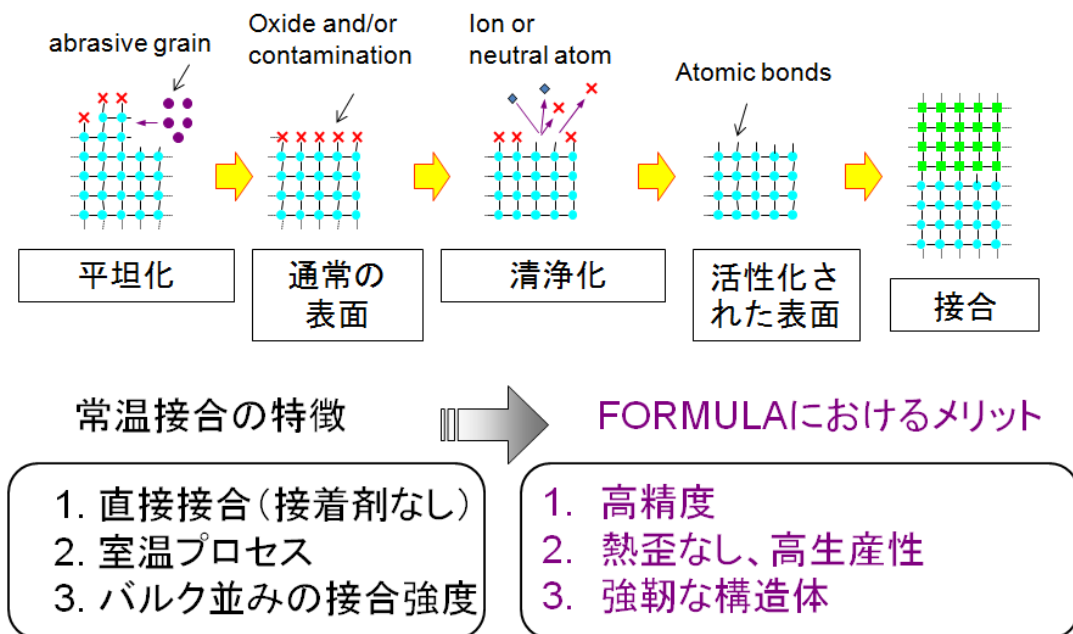


Fig. 2-3 Principle of surface activated bonding

常温接合を薄膜間の接合に用いることにより、接着材料が介在しないため薄膜の形状精度を維持したまま積層でき、加熱・冷却の工程が不要のため生産性が高く、かつバルク並みの強度を有する強靱な構造体の実現できると期待される。

なお、接合面は原子レベルの平坦性が望まれるが、薄膜パターンを用いるとRa値で1~3 nmが代表的な値である。また超高真空が必要な理由は、清浄化された状態をできるだけ長い時間保つためである。従って重要なことは残留ガスの暴露量(分圧×暴露時間)であり、清浄化後速やかに圧接できれば必ずしも超高真空である必要はないと考えられる[8]。

2.2.3 原理検証のための課題

前節で提案した FORMULA 技術を微細加工技術として原理検証し、具現化するためには以下のような課題がある。

1. 薄膜が常温接合可能で、ドナー基板上の薄膜パターンがターゲット基板の上に元の形状を保ったまま転写可能なことを示すことである。常温接合はこれまでバルク材料の接合に適用されてきたが、真空蒸着法などで形成された薄膜に対して適用された例はないからである。薄膜パターン部材が常温接合によりドナー基板から損傷を受けることなく剥離し、一括してターゲット基板に転写可能かを示すことである。
2. さらにこの転写工程を繰り返して薄膜の多層積層が可能であることを示すことである。3次元微細加工技術としてのポイントはまさにこの点にあり、真空中でサブミクロンの位置決めを繰り返し、薄膜パターン部材の積層構造体を形成できるか否かである。

以下の節では、上記課題解決のために考案した加工装置と基板（ドナー基板およびターゲット基板）について詳しく述べる。

2.3 原理検証機の基本構成

本節では、上記 FORMULA 技術を具現化するための原理検証機（以下 F-0 機と称する）について述べ、基本構成要素の要求仕様とそれを満たす部材について説明する。

装置の全体構成を Fig. 2-4 に示すが、これは Fig. 2-1 の原理図の接合転写プロセスをほぼ忠実に具現化したものである。すなわち、真空チャンバ内にドナー基板とターゲット基板を対向して配置し、両者の表面を活性化するための原子ビーム照射手段 FAB (Fast Atom Beam) を有し、これらを圧接・離間するための Z ステージを有する。さらにこのプロセスをステップ&リピート式に繰り返すための X-Y-θ ステージをドナー基板側に配している。対向する基板間の平行度を保つため、チャンバ内に高精度のやぐら(フレーム)を設け、Z 軸の駆動はユニバーサルジョイントによってリンクし、チャンバ上下面間の平行度の影響を回避した。

以下の節では、この F-0 機の主要構成要素について説明する。

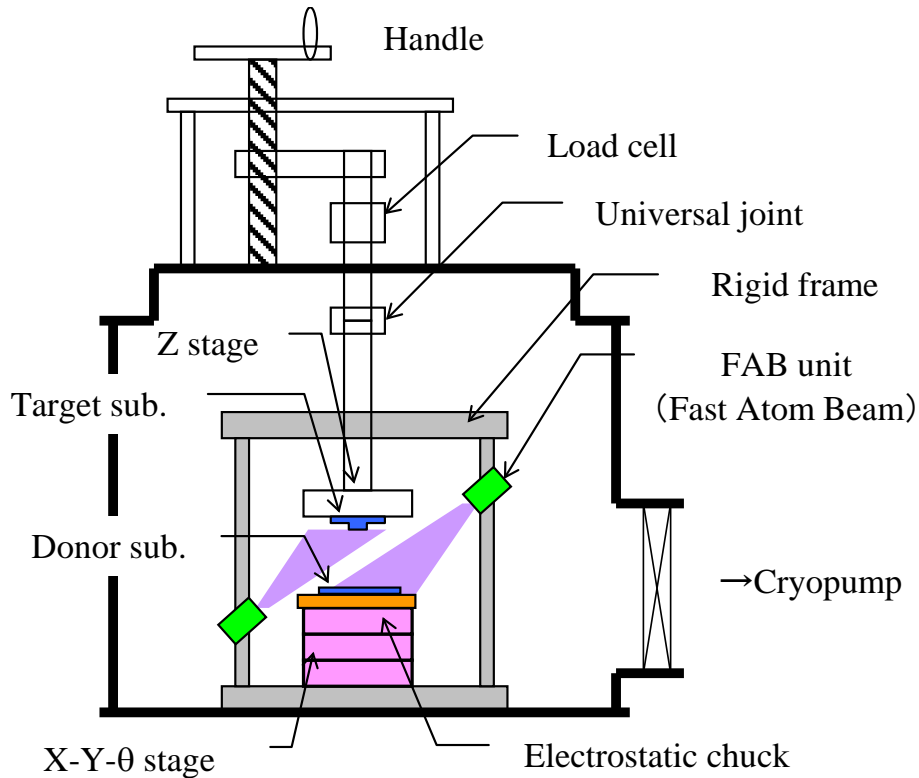


Fig. 2-4 Schematic view of F-0 machine

2.3.1 真空チャンバ

FORMULA 技術では薄膜パターン同士の接合に常温接合法を用いているが、一般に常温接合では高真空から超高真空環境が必要とされる。超高真空とは 10^{-5} Pa 以下の真空領域のことで、通常のスパッタリング装置や CVD 装置のような高真空装置とは異なり、内壁処理やガスケットなどに特殊なものが必要とされ、排気ポンプもサブリメーションポンプやタンデム式ターボポンプが用いられる。また装置構成はロードロック式（常時真空引きされた処理チャンバと基板の出し入れのためのチャンバの 2 室からなる）とすることが一般的であるが、チャンバ間の基板搬送機構を必要とするため構造が複雑となる。超高真空が必要な理由は、清浄化された表面が残留ガスの暴露により再汚染されることを防ぐためである。従って重要なことは残留ガスの暴露量（分圧×暴露時間）であり、清浄化後速やかに圧接すれば、必ずしも超高真空である必要はない[8]。今回の原理検証機では基板の大きさもさまざまであり、追加改造が予想されることから構造がシンプルなバッチ式を選択した。そこで適当なチャンバ容積を持つスパッタリング装置（徳田製作所、現芝浦エレテック社製）を改造して用いることにした。

装置の外観を Fig. 2-5 に示す。装置左半分が真空チャンバ、右半分が真空排気ユニットである。チャンバは内径約 45 cm、高さ約 35 cm の円筒形であり、内部に後述する X-Y-θ ステージおよび Z ステージ支持用フレームを取り付けた。チャンバ上蓋部分には、Z ステージ駆動用の手動ハンドルとロードセルを取り付けた。真空ポンプは低振動の観点からター



Fig. 2-5 Exterior view of the vacuum chamber

ボ分子ポンプとした（振動の影響については 2.6.2 節で述べる）。チャンバを大気解放して基板をセットした後，外壁のベーキングを行いながら終夜排気することで到達圧力は 2×10^{-5} Pa 程度が得られ，超高真空領域には達しないが，常温接合が可能な高真空が得られた。

2.3.2 X-Y- θ ステージ

初めに，真空中で動作可能なX-Y- θ ステージの要求仕様および選定機種について説明する。FORMULA技術の最大の特徴は真空中でステップ&リピート式にドナー基板を位置決めしながら常温接合を繰り返すことにあるので，装置の具現化において真空中で動作可能なX-Y- θ ステージが最大の関心事である。半導体露光装置（ステッパ）では，ナノメートル精度のステップ&リピート式の位置決めを実現しているが，真空中での動作は次世代露光システムで開発中であり[9]，またステージに垂直方向の圧接荷重を印加することは，ステッパには無いFORMULA技術固有の要求である。

ドナー基板の位置決め精度はX-Y- θ ステージの位置決め精度に大きく依存する。したがって，サブミクロンの形状精度を有する微小部品を作製するためには，X-Yステージにサブミクロンの位置決め精度が要求されることは言うまでもない。またそのストロークはドナー基板全体をスキャンできる長さが望ましい。このような要求を満たすステージを探索したところ，真空中で動作可能という条件を満たすものは非常に少なく，唯一Burleigh社の真

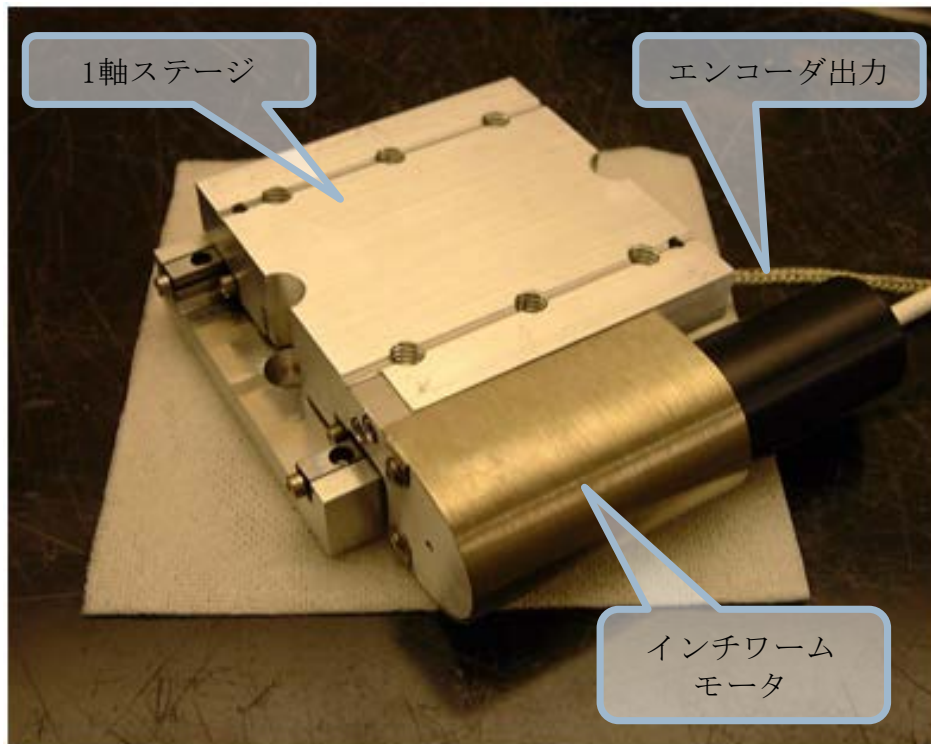


Fig. 2-6 Burleigh's Inchworm® stage TSE-150V

空対応インチワームステージを見出した。インチワームとは、3つのピエゾアクチュエータの伸縮動作を組み合わせて、尺取虫のように動作する1軸駆動デバイスである[10]。

Fig. 2-6 に TSE-150V 型インチワームステージを示す。この1軸ステージは、最小送り量 4 nm のピエゾ駆動モーターと、分解能 50 nm のリニアエンコーダ（ガラススケール）を内蔵したステージからなり、サブミクロンの位置決めが可能である。ステージの大きさは 75 mm 角、ストローク 25 mm、垂直耐荷重 30 kgf である。このインチワームステージを2台直交させて X-Y ステージを組み上げた。ストロークが 25 mm のため、セルの配置はこの範囲に収める必要がある。また常温接合時の圧接荷重は、この耐荷重 30 kgf が上限である。

次にθステージであるが、ドナー基板上に形成されたセルの配列方向と X-Y ステージの走りの方向を一致させるために必要であり、ドナー基板をステージ上に搭載した後に1回だけ調整する。したがって、ストロークは数度程度で十分だが、角度分解能は X-Y ステージのストロークと、要求精度によって以下のように決められる。

Fig. 2-7 に示されるように、セルの配列方向と X ステージの移動方向の間に角度φのズレがあり、セル間の距離が a であるとする。ステージを距離 a 移動して、この2つの薄膜パターンを積層すると、Y 方向に式 (2-1) に示される位置ズレ量 δ が生じる。

$$\delta = a \cdot \sin \varphi \dots\dots\dots(2-1)$$

したがって、サブミクロンの精度が要求される場合には、式 (2-2) を満足する角度分解

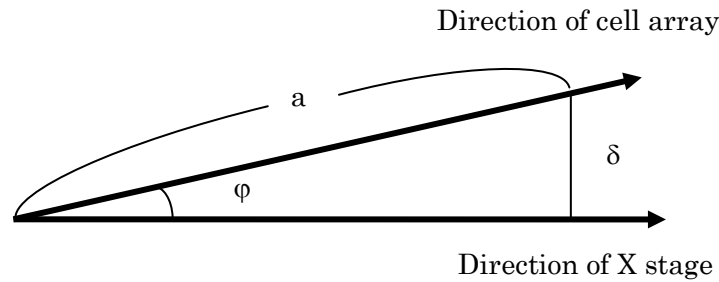


Fig. 2-7 Requirement for theta stage

能をもつθステージが必要となる.

$$\delta = a \cdot \sin \varphi < 1 \mu\text{m} \dots\dots\dots(2-2)$$

式 (2-2) より a が大きいほど角度分解能が厳しくなるため, a に X ステージのストローク長である 25 mm を代入すると,

$$\varphi < \sin^{-1} \frac{1 \mu\text{m}}{25 \text{mm}} = 4 \times 10^{-5} \text{rad} \dots\dots\dots(2-3)$$

となる.

このような要求を満たすθステージとして, Burleigh 社の RS-150V 型ロータリーステージを見出し, Fig. 2-8 に示すように X-Y ステージ上に重ねた. このステージの角度分解能は $7 \times 10^{-8} \text{rad}$ であり, 要求値 $4 \times 10^{-5} \text{rad}$ を十分に達成している. なお, このロータリーステージは, X-Y ステージと同じピエゾ駆動モーターを用い, モーターによる直進運動を double-flex pivot 機構により回転運動に変換している. また垂直耐荷重は 30 kgf である.

真空対応ステージとしての共通の特徴は, 可動部にグリースを使っていないこと, ピエゾ駆動用高圧ケーブルに脱ガスの少ないテフロン絶縁層を採用していること, 及び特殊フイードスルーを用いていることである. なお, X ステージと Y ステージの直角は専用のピンによりアライメントされているが, 直角の保証されているブロックゲージにて直交度を微調整した. そして, X-Yθステージはチャンバ外部のコントローラーに接続され, ジョイスティック, または PC 上で LabVIEW により制御される. Fig. 2-9 に X-Yθステージコントローラー, ジョイスティック, 及び制御用 PC を示す.

以上のように, この X-Yθステージを用いることで, サブミクロンの位置決めが可能となった. ただし, ステージのストローク制限からセルの配置は 25 mm 角以内, 耐荷重の制限から常温接合時の圧接荷重は 30 kgf が上限となる.

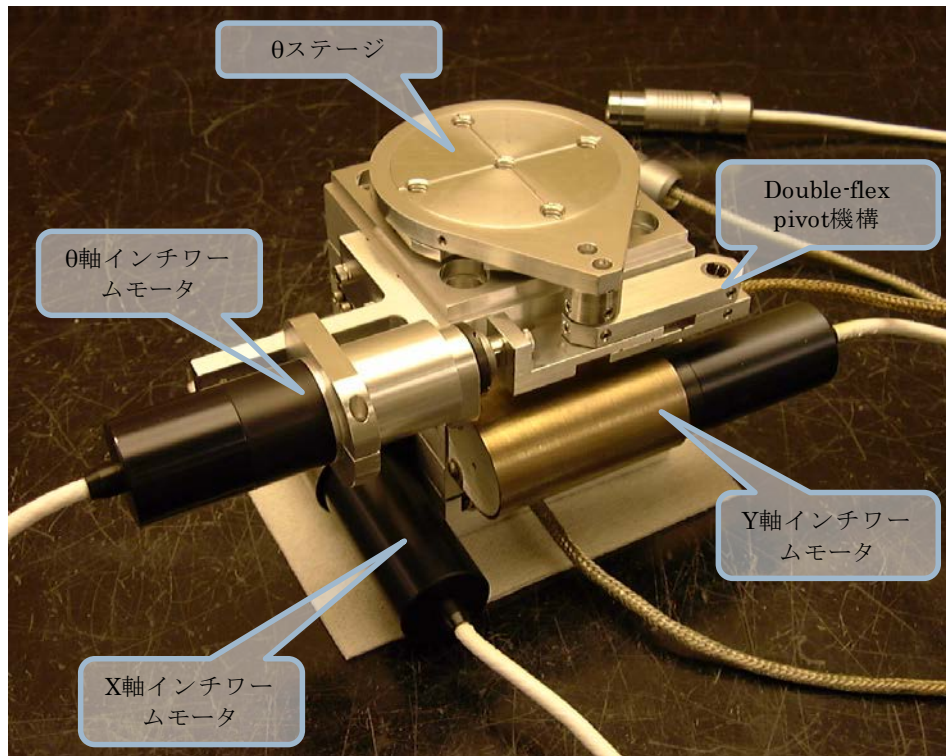


Fig. 2-8 Burleigh's Inchworm® stage RS-150V on the X-Y stage

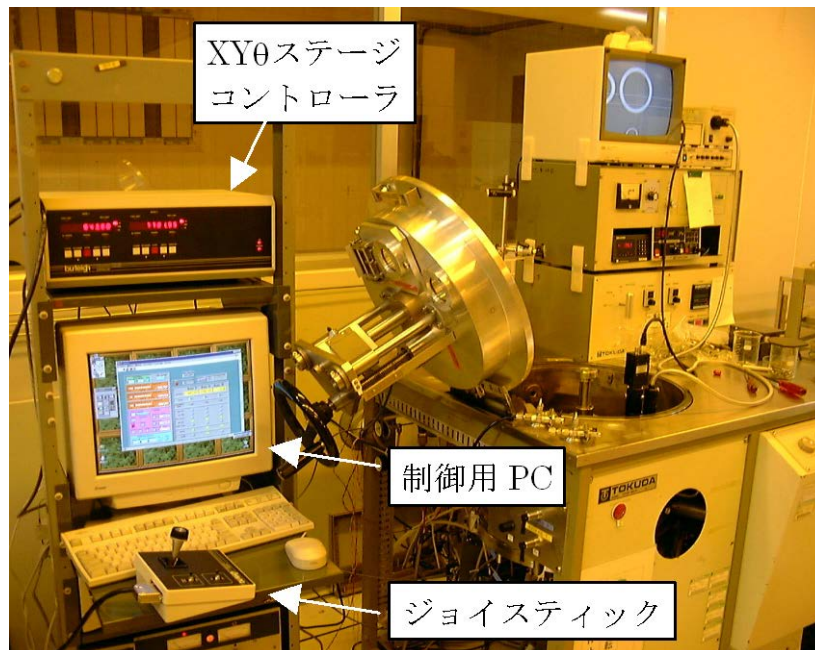


Fig. 2-9 Stage controller and PC

2.3.3 Zステージ

Zステージは、ターゲット基板をドナー基板に対して上下させるために必要である。常温接合に先立って両基板表面にFABを照射するスペースを確保するために約100 mm 離間し、

その後ドナー基板上にターゲット基板を接触させる。構造体の精度を確保するためには両基板の接触位置（タッチダウン点）でのXY座標が再現されることが重要であるが、Z軸のストローク中の真直度はあまり重要ではない。そこで Fig. 2-10 に示すボールベアリングタイプのリニアガイドを選定し、与圧を高め設定して使用することにした。ただし真空対応が必要なことから、標準仕様の機械オイルを脱脂し、真空グリースに置換して用いた。

次にこのZステージをX-Y-θステージの上に配置するために、チャンバ内に高精度圧接治具（やぐら）を組んだ。Fig. 2-11 左に示すような剛性の高いフレームを製作し、これをチ

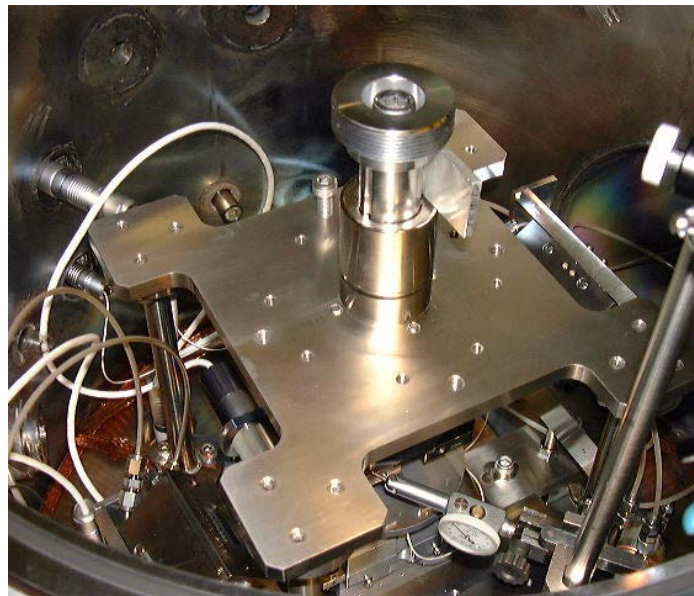


Fig. 2-10 Linear guide for Z-stage

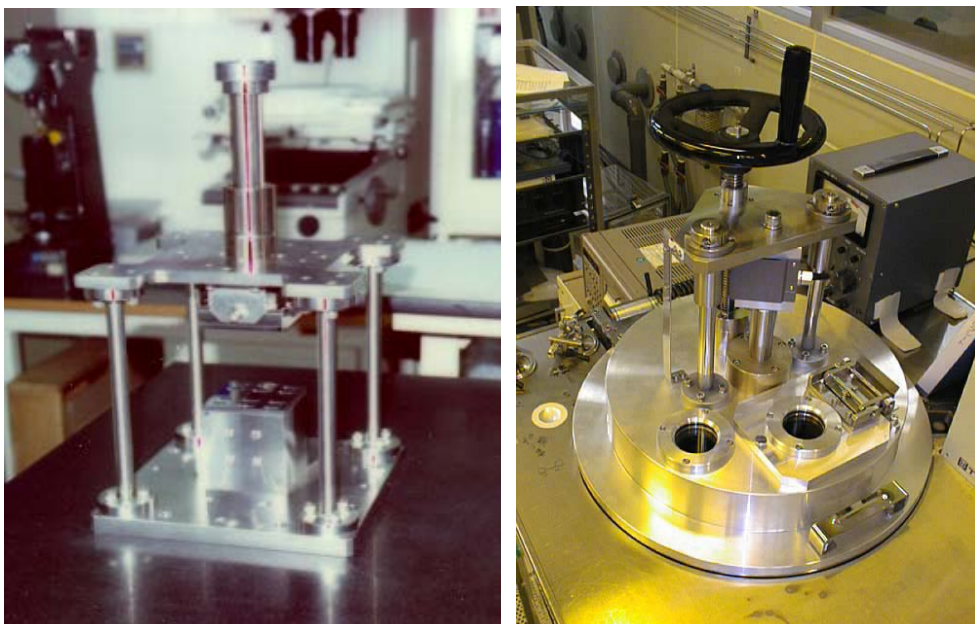


Fig. 2-11 Rigid frame (left) and up-down mechanism (right)

チャンバ内に取り付けた。なお、この写真はやぐらの検査時の写真であるため、X-Y-θステージの代わりに同じ高さのブロックが取り付けられている。また Fig. 2-11 右に示すように、Zステージの駆動はチャンバー上蓋に取り付けたハンドルを手で回すことで行い、チャンバ内でユニバーサルジョイントで連結する構造とした。このようにすることで、圧接機構の精度はチャンバ内のやぐらに取り付けられたX-Y-θステージとZステージによって保証でき、チャンバ本体の精度と切り離すことができる。駆動軸のフィードスルーはベローズが理想であるが、100 mm のストロークを得るためには大型になってしまうため、2重のガスケット構造としガスケットの間をロータリーポンプで真空引きすることにした。圧接時の荷重は、大気側駆動軸に挿入されたロードセルでモニタすることにした。ロードセルは真空側の駆動軸に挿入する方がフィードスルーにおける滑り荷重の影響を受けないので望ましいが、真空対応が困難だったので大気側に挿入した。

2.3.4 静電チャック

FORMULA 技術では薄膜パターンを剥離・転写する際、基板間に引張り応力が印加されるため、ドナー基板を確実に固定する必要がある。そのためには、固定力がドナー基板のパターン密着力よりも十分大きい必要がある。2.4.3 節で述べるようにドナー基板上の Al 薄膜と離型層の間の密着応力は 2~7 MPa (0.2~0.7 kgf/mm²)であるため、ドナー基板上で 10 mm 角程度のセルを転写する場合、密着力は 20~70 kgf となる。従って、ドナー基板を確実に固定するためには、100 kgf 以上の固定力をもつ固定手段が必要となる。

代表的な固定手段としては、真空チャック、静電チャック、機械的クランプによる固定方法などがある。基板の固定は真空中で行われるので真空チャックは使用できず、また機械的クランプでは固定力が弱く、また基板破損の心配がある。これに対して、半導体製造装置に採用されている静電チャックは、全面吸着であり、数百 V の印加電圧で数 kgf/cm²

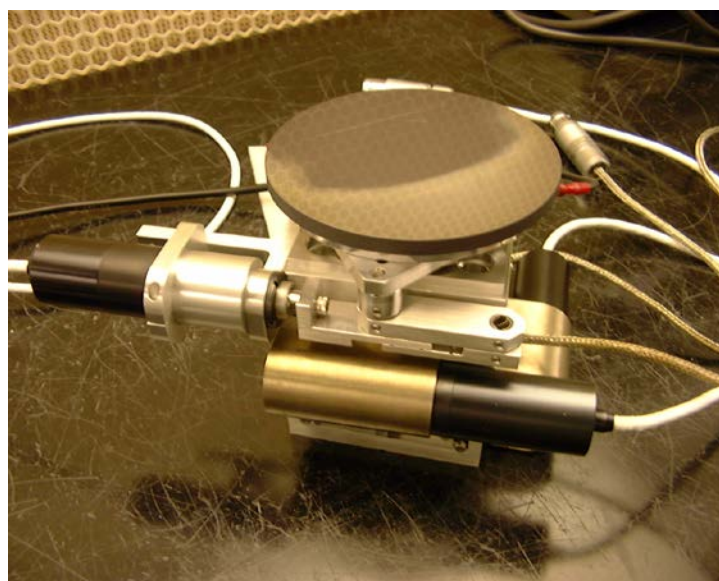


Fig. 2-12 Electro-static chuck assembled on the X-Y-θ stage

Table 2-1 Specification of the electro-static chuck

項目	スペック
直径	10 cm (4 インチウェハ対応)
材質	アルミナ
吸着力	500 V で 4 kgf /cm ² 以上
平面度	0.5 μm 以下
表面粗さ(Ra)	0.25 nm 以下

の吸着力を持つので好適である。静電チャックとは、セラミック焼結体の内部に楕円電極を配したもので、静電引力により誘電体基板を吸着するものである。通常、ドナー基板は5インチのSiウェハを4分割(面積31 cm²)して使用しているため、吸着力は100 kgfが実現可能である。したがって静電チャックを導入することにした。Fig. 2-12に採用したTOTO製AL413静電チャックをX-Y-θステージ上に取り付けた写真を示す。

また静電チャックには基板の保持に加え、反りの矯正機能がある。一般にドナー基板は、Siウェハ自身の反りや基板上に製膜した離型層や薄膜の内部応力により、数μm程度反っている場合が多い。静電チャックに吸着することにより、この反りを緩和することが期待される。そのため静電チャック表面の平面度を仕様に加えた。Table 2-1に静電チャックの主要スペックを示す。

このように静電チャックを用いることで、常温接合後の引張り応力に耐えるドナー基板保持機構が得られた。これを用いればドナー基板の反りも矯正でき、さらに基板サイズが大きくなるほど強い保持力が得られて好都合である。

2.3.5 FAB 照射装置

FAB (Fast Atom Beam) 照射装置は、常温接合に必須の装置で、接合面の清浄化を行う。これはアルゴンなどの不活性ガスを電離して加速されたイオンビームを生成し、出口付近で電子雲を通過させることで電氣的に中和された原子ビームを照射させる装置であり、スパッタリング効果により試料表面の酸化膜や汚染物質を除去できる。帯電したイオンビームと異なり電氣的に中性なため試料を帯電させることがなく、また電位分布のある試料に対しても均一に表面を清浄化処理できると言われている。

FORMULA 技術では清浄化させる面積はせいぜい10 mm角と小さいことから、機種としてはIon Tech社(英国)のFAB110/1型アトムソース(Fig. 2-13)を選択した。これは小型で、加速電圧2.5 kVまでの加速が可能である。Fig. 2-13の中央部多数の丸い穴から加速された原子ビームが放射される。さらに対向した2つの接合面を同時にFAB照射できるよう、2つのFABを取り付けた。基板に対するFABの照射角度は、治具により45°に調節した。動作には、高圧電源ケーブル、アルゴンガス供給配管、および冷却水配管が必要である。FAB照射装置の性能は、Siウェハ上の熱酸化膜SiO₂のエッチングレートを測定することにより確認した。その結果、2台とも約1 nm/minのエッチングレートが得られるこ



Fig. 2-13 Ion Tech's FAB110/1 atom source

とを確認した。

2.3.6 アライメント顕微鏡

アライメント顕微鏡は、ドナー基板の配列方向と XY ステージの移動方向を一致させるための θ ステージ角度調整手段として用いられる。この調整は 2.3.2 節で述べたように構造体の精度に直接かかわるので非常に重要である。

θ ステージの角度調整に要求される仕様を次のようにして検討した。まず倍率であるが、少なくとも $1\ \mu\text{m}$ の位置ズレ量を検出できるような倍率が必要となるので、モニタ上で $1\ \mu\text{m}$ が解像できるよう、1,000 倍以上を目標とした。また、ドナー基板とターゲット基板が対向した空間は基板をセットすると約 60 mm と狭く、また真空チャンバには顕微鏡設置のための十分な空間がない。したがって、この狭い空間への設置ができるような構成が必要となる。さらに、顕微鏡全体を真空対応とすることは放出ガスの観点から困難であり、またドナー基板を観察した後基板間から退避するための十分な空間が無いことから、アライメント動作は大気中で行い、その後顕微鏡全体をチャンバから取り外すこととした。

このような高倍率と狭い空間への設置を同時に実現する顕微鏡システムを探索したが既製品にはなかったので、Fig. 2-14 に示される顕微鏡システムを考案した。この顕微鏡システムの特徴は、ワーキングディスタンスの長い対物レンズ（ミットヨ社、M Plan Apo シリーズ）を観察面に平行に設置し、その先端に 45° ミラーを設けた特殊な光学系としたことである。これにより、狭い基板間スペースへの対物レンズ設置が可能となった。また、この顕微鏡システムは特殊光学系と同軸落射照明系を L 字型に配し、これを観察視野移動用の XYZ ステージ上に搭載することで、狭いチャンバ内に着脱できる構成とした。Fig. 2-15 にこの顕微鏡システムの外観と、接合装置にセットした状態の写真を示す。顕微鏡全体は、XYZ ステージ下部から簡単にチャンバに対して着脱可能である。また拡大用リレーレンズ

と CCD 撮像素子を用いることで、Table 2-2 に示したように総合倍率として目標である 1,000 倍を達成した。

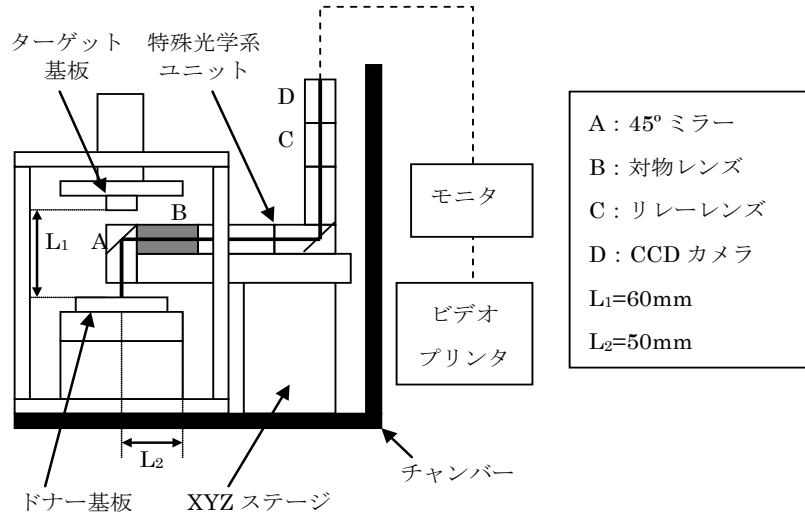


Fig. 2-14 Configuration of alignment microscope

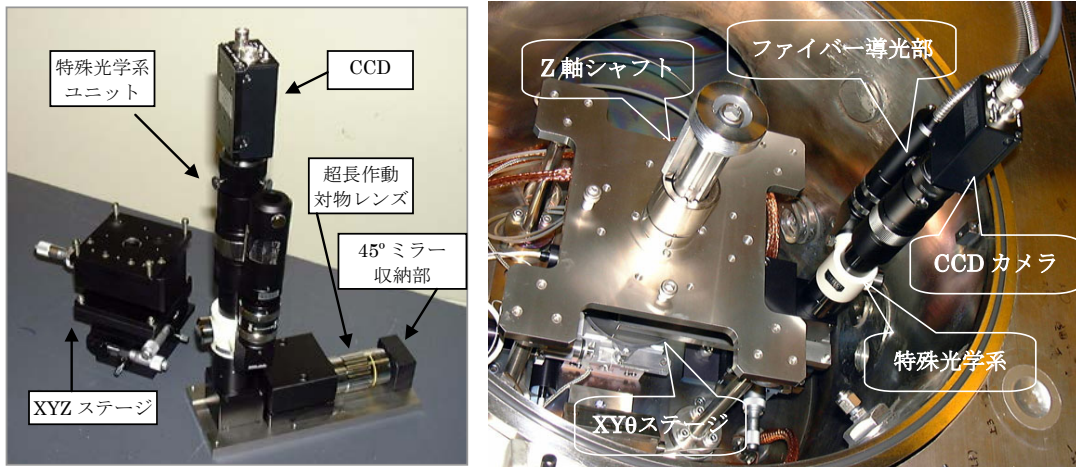


Fig. 2-15 Alignment microscope

Table 2-2 Specification of alignment microscope

構成要素	スペック
対物レンズ	倍率 10 倍, Working Distance 38.9mm
リレーレンズ	倍率 2 倍
CCD カメラ	1/3" 38 万画素モノクロカメラ
光学系倍率	対物&リレー系にて倍率 20 倍
電気倍率	12 インチ CRT 倍率 51 倍
総合倍率	約 1,020 倍

2.3.7 平行度調節機構

もう一つの重要な課題は、対面する2つの基板を面接触させるために、これらの基板を薄膜の厚み程度の平行度を保って圧着することである。通常の常温接合では、平面と球面を接触させる報告が多く、平行度はあまり問題とされないが、FORMULA 技術では平面同士の接合であるため平行度が悪いと片当たりを起す。要求される平行度としては、少なくとも接合される薄膜の膜厚以下すなわちサブミクロン台である必要がある。

対向するドナー基板とターゲット基板の平行度を定める要因をFig. 2-16に示す。2.3.3節で示した高精度圧接治具（やぐら）では、フレーム自身や上下ステージを構成する各部品の平面度及び平行度には注意を払いそれぞれ2 μm以下とした。それでも上記要求には満たないので、Z軸と上ステージの連結部分に首振り機構を設け、上ステージ表面と静電チャック表面を一旦圧接して平行に做わせた後、シャフトロックネジを締めて首振り機構をロックしてこれら2面の平行を維持した。またターゲット基板を保持する基板ホルダの上下面間をサブミクロンの平行度とし、さらに基板ホルダとターゲット基板間に緩衝層を挿入することで、ある程度の做い機能を持たせることにした[11]。なおターゲット基板およびドナー基板は、接合対象範囲においてそれぞれサブミクロンの平行度が得られている。

以上の構成により、ターゲット基板とドナー基板を面接触させる機構が整った。

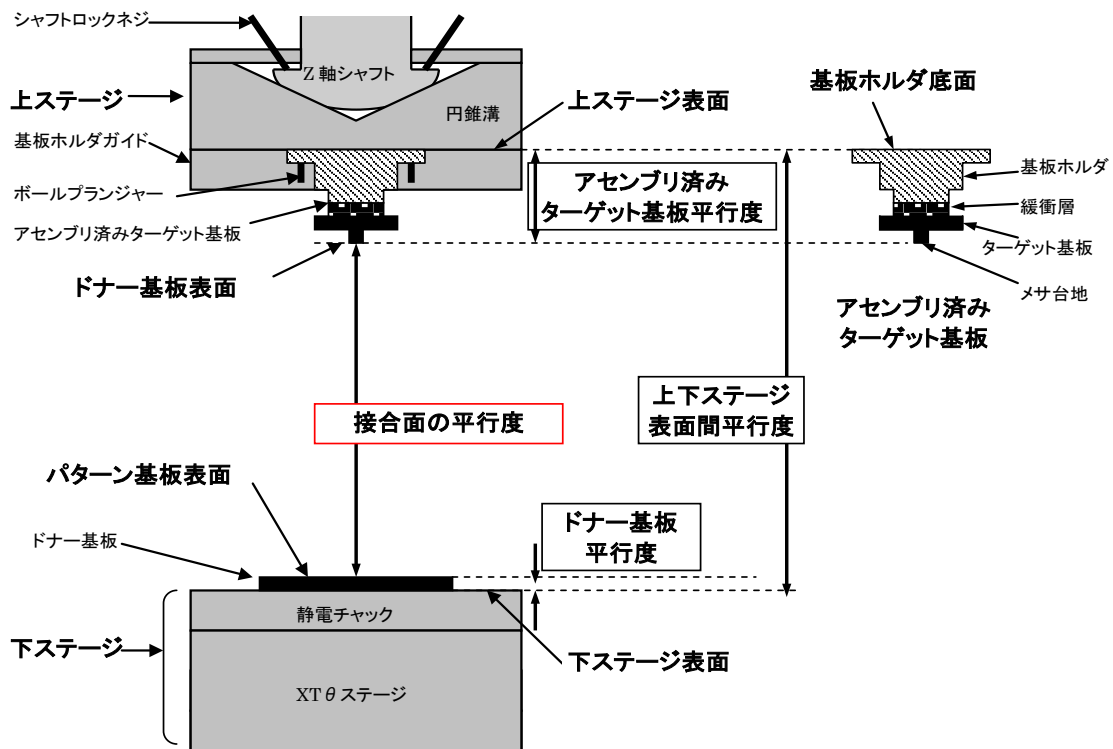


Fig. 2-16 Factors of parallelism between donor and target substrates

2.4 ドナー基板

本節ではドナー基板のレイアウトと作製プロセス、および FORMULA 技術で重要となる断面パターン部材の離型性について述べる。

2.4.1 レイアウト

通常半導体デバイスのフォトマスク（レチクル）を作製する場合、専用の CAD ツールを用いてデバイスを設計し、マスクメーカーに所定フォーマットのデータを渡せばマスクが得られる。しかしながら本 FORMULA 用フォトマスクの場合、所望の微小構造体をスライスデータに分割して各レイヤの断面データを作成し、これを所定のピッチで同一マスクの異なる座標上に展開配置すると言う特殊なレイアウトが必要となる。このため、半導体デバイス用の CAD ツールを使うものの、そのレイアウト方法やデータ変換には、固有のプロセスを確立する必要が生じる。

したがって本節では、FORMULA 技術の原理検証のために用意したテストパターン群（TEG: Test Element Group）のフォトマスク設計に関して述べ、種々の微小構造体の設計、FORMULA 技術固有のレイアウト手法について概要を説明する。

マスク設計の全体の流れを Fig. 2-17 に示す。

STEP1：構造体のレイアウト

今回設計した構造体は、原理検証のため比較的単純な幾何学形状とした。すなわち、円柱や角柱など積層方向に断面形状が同一の構造体、円錐や角錐など上層ほど断面形状が小さくなる構造体、オーバーハングを有する構造体、微小ギアなどとした。これらの構造体の各レイヤの断面パターンを 10-25 層分描画し各ストラクチャ（レイアウトソフトの用語で1つのデバイスのこと）とした。Fig. 2-17 ではレイヤの違いを色の違いで示している。

STEP2：セルのレイアウト

上記ストラクチャをセルに配置する。セルとは Fig. 2-2 で示した積層の単位で、今回は 1 mm 角を基本とし最大 5 mm 角を用意した。セル内に各ストラクチャを均等に配置し、また四隅には最大積層数の構造体を配置するようにした。

STEP3：レイヤごとにデータを分割

各ストラクチャのデータはすべてのレイヤが一つのファイルになっているので、これをレイヤごとに分割し、次のステップでレイヤ単位のデータファイルに整理できるようにする。この段階で各レイヤのデータは参照データから実データとなり、それぞれ別々の座標位置に配置することが可能となる。

STEP4：レイヤ単位のデータをまとめる

セル内に配置された各構造体のデータを、レイヤごとにまとめて一つのストラクチャデータにする。したがってレイヤの数（たとえば 10 層分）だけストラクチャのファイルができる。

STEP5：各レイヤを再配置

各レイヤのストラクチャファイルを、所定のピッチでアレイ状に配置する．たとえば 1 mm 角のセルの場合なら，1 mm ピッチで 1 次元または 2 次元配置する．これにより各レイヤの断面パターンが等ピッチでドナー基板上に配置されたことになる．10 層からなる 1 mm 角のセルの場合，展開されたパターンの面積は 10 mm² となり，これが 1 つのセルの積層に必要なブロックとなる．

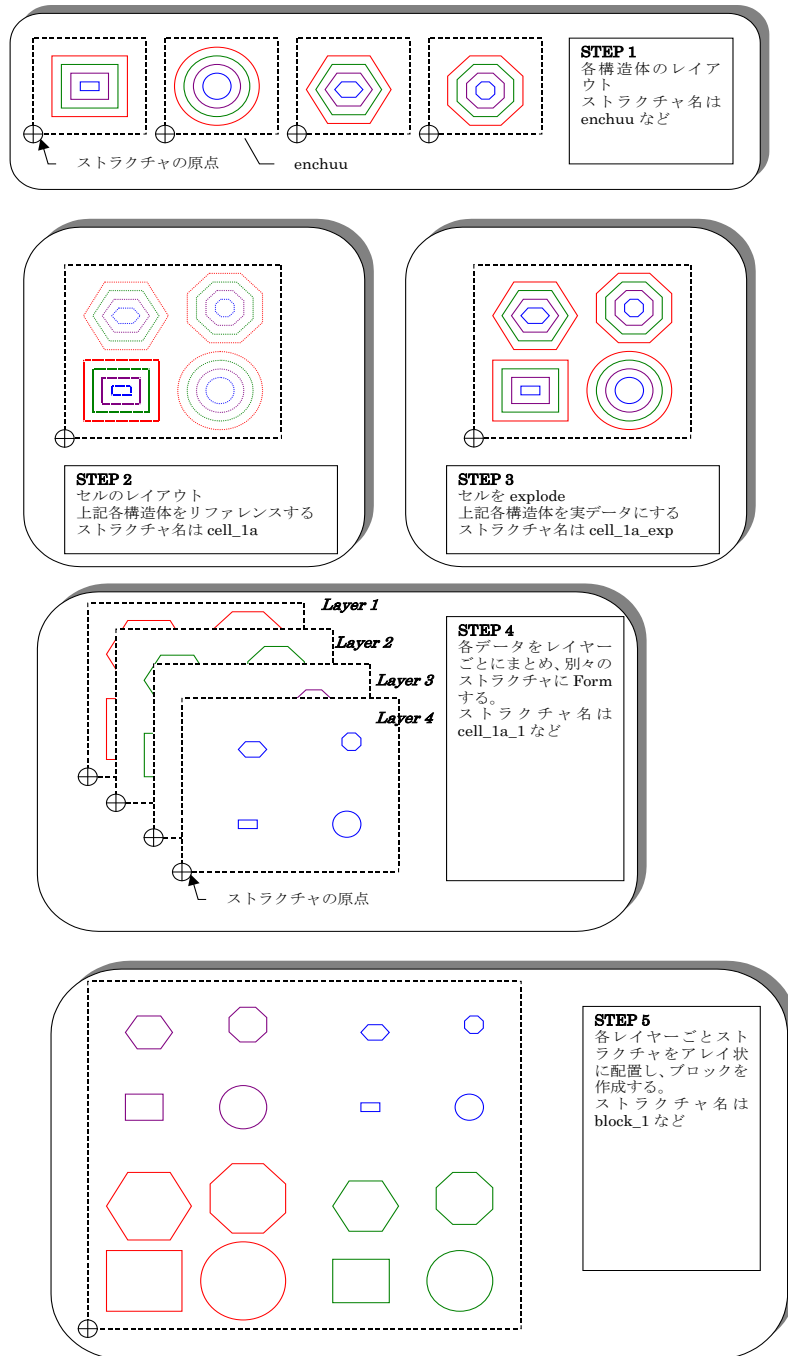


Fig. 2-17 Process flow for preparing photomask for FORMULA

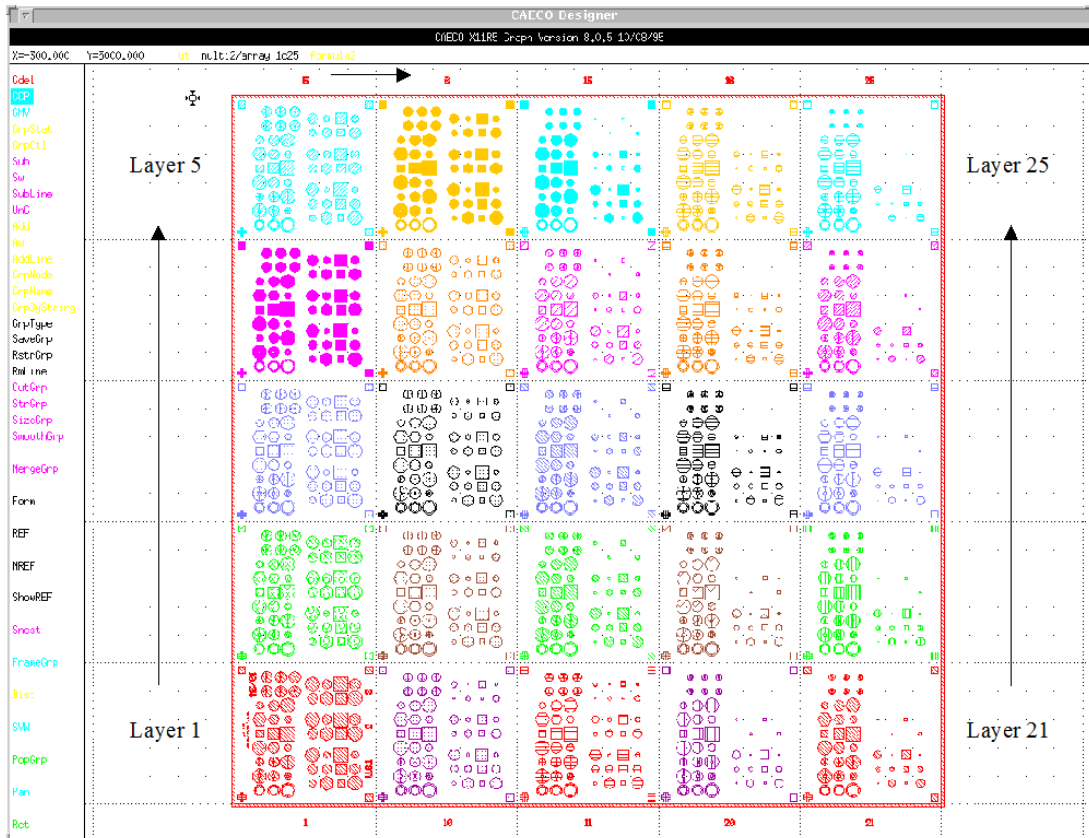


Fig. 2-18 Example of block layout

CADでレイアウトしたブロックの例を Fig. 2-18 に示す。これは全体が 5 mm 角のブロックで、内部に 1 mm 角のセルが 25 層分、5×5 のアレイ状に配列されたものである。セルの内部には円柱、角柱、円錐、角錐などの断面パターンが描かれている。最後にこれらのブロックをドナー基板（通常 5 インチウエハ）上に複数個配置して、TEG マスク全体が完成する。

2.4.2 作製プロセス

ドナー基板の作製プロセスを Fig. 2-19 を用いて説明する。基板は、Siウエハ、離型層であるポリイミド、構造体となる薄膜パターンから構成される。離型層（日立化成社製 PIX3400）は、薄膜パターンとターゲット基板を接合した後、薄膜パターンが基板表面から剥離し、ターゲット基板に転写されやすくするために用いる（詳細は次節参照）。薄膜パターンの材料は純Alを基本としたが、その理由は、純Alは常温接合されやすい材料であるからで、F-0 機の到達圧力 10^{-5} Pa 台の圧力においても、Alバルク同士の常温接合の報告がされているためである[12]。ただし、表面粗さや硬度の観点からAl合金系の材料も適用するが、作製プロセスは同一である。薄膜パターンの表面粗さは材料や膜厚によって異なるが、原子間力顕微鏡（AFM）で評価して、1~3 nm (Ra値) である。表面粗さの影響は、2.6.3 節で議論する。

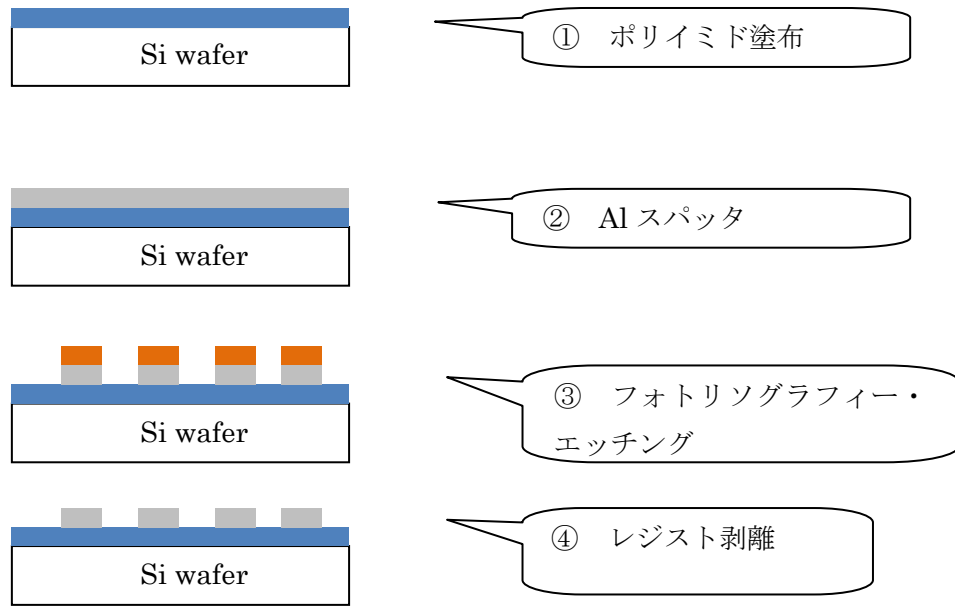


Fig. 2-19 Fabrication process of the donor substrate

2.4.3 離型性の制御

FORMULA 技術では、薄膜がフォトリソグラフィ法により構造体の断面形状に忠実にパターンニングされ、転写工程ではこれらが確実にダメージなくターゲット基板に転写されることが重要な課題である。通常の半導体プロセスでは着膜した薄膜を意図的に剥がすような工程はなく、基板への密着応力は大きいほど好ましい。しかし FORMULA 技術では、密着応力は小さいほど転写には好都合であるが、小さすぎるとパターンニング工程で剥がれてしまうというトレードオフがある。そこで、薄膜の密着応力を適切な値に制御することを目的に、ドナー基板上に離型層を導入することにした。

離型層として種々の材料やその表面処理を検討した。材料としては通常の半導体プロセスで利用されている絶縁膜を基本とし、更に密着応力を下げる方向に作用すると考えられる表面のフッ化処理や、フッ素系樹脂などを検討した。これらの表面にスパッタリング法で Al を着膜し、数 mm 角にフォトリソグラフィ又はメタルマスクでパターンニングした後、引張試験機にて密着応力を測定した。Al パターンと引張治具の間は、エポキシ系接着剤で固定した。また、離型層の特性値として純水の接触角も評価した[11]。

各種離型層の水に対する接触角と Al/離型層の密着応力の関係を Fig. 2-20 に示す。密着応力の測定データにはばらつきが大きかったことから、最大値と最小値をバーにして示した。またシリコン酸化膜などの無機絶縁膜上の密着応力は、引張り試験では接着層界面で破断したため、接着剤の引張りせん断接着強さや文献値[13]などから数十MPaと推定した。このグラフから、接触角と Al/離型層の密着応力 σ_1 はほぼ直線関係にあることが分かる。

一方我々のフォトリソグラフィ工程では、エッチングや乾燥工程に耐える密着応力 σ_0 が1 MPa 程度であった。また Al 薄膜パターンの常温接合応力 σ_2 をスクラッチテストで評価したところ数十 MPa 程度であった。この値は Al バルク材料の常温接合応力[7]よりも多少小さい値である。薄膜のパターニングが可能で常温接合により転写できる条件は、

$$\sigma_2 > \sigma_1 > \sigma_0 \dots\dots\dots(2-4)$$

であることから、Fig. 2-20 のポリイミドがこの条件を満たすことが分かる。この場合、密着応力は接合応力の 1/10 程度なので、十分なマージンをもって転写可能である。

薄膜の密着応力は、薄膜の種類、基板の着膜前処理、着膜方法、着膜条件などによって大きく変化することから、離型層の選択はその都度最適化する必要がある。また引張試験による密着応力の評価は準備が煩雑であり評価結果もばらつきやすいため、接触角を指標に離型層を選択することが効率的な方法と考える。

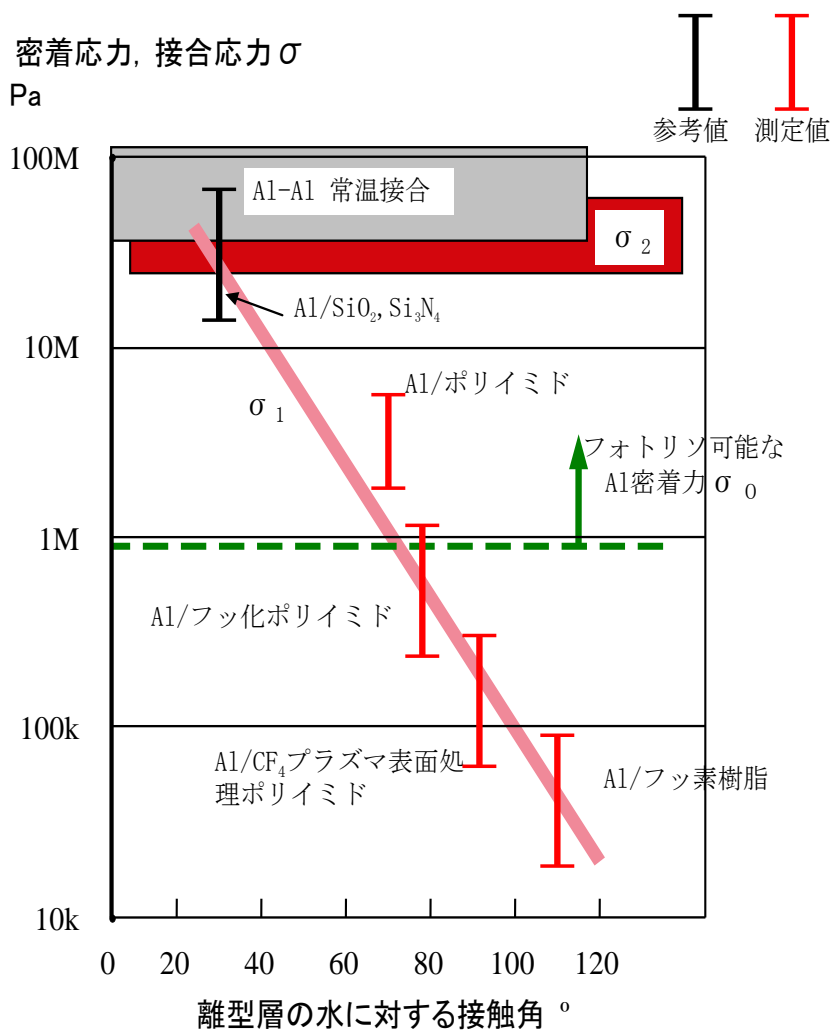


Fig. 2-20 Evaluation of the low- adhesion layers

2.5 ターゲット基板

ターゲット基板の作製プロセスをFig. 2-21 を用いて説明する. ターゲット基板はSiウェハとし, その大きさは接合面積とハンドリングを考慮して 10 mm角としたが, 基板のダイシング時に発生するチップングが接合面の均一な接触の妨げにならないよう, メサ(台地)形状のパターンを作製した[14]. メサ形状を形成する方法として, バルクマイクロマシニング技術(第1章 1.3.1 節参照)で良く用いられるSiの異方性エッチングを適用した. Siウェハの(100)面は(111)面よりもKOHに対し 200 倍ほどエッチングレートが大きいため[15], 段差の大きなテーブル状のメサ台地を形成するのに適している. 90°C, 20 minエッチングし, 約 30 μmの段差を形成した.

異方性エッチングのマスクには Si の熱酸化膜を用い, そのパターンには 1 mm 角の領域が 10 mm ピッチでアレイ状に配列されているマスクを用いた. Si のメサ台地が形成された後, エッチングマスクの SiO₂を除去し, 表面に Al を 100 nm 着膜した. これにより構造体としてドナー基板上に形成した Al パターンとの Al 同士の常温接合が実現できる.

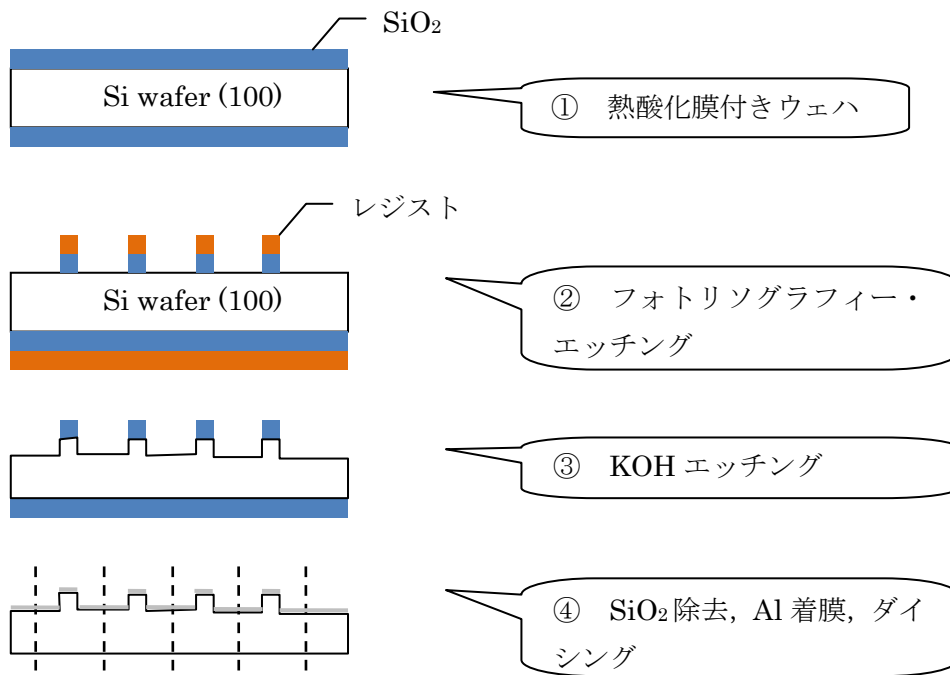


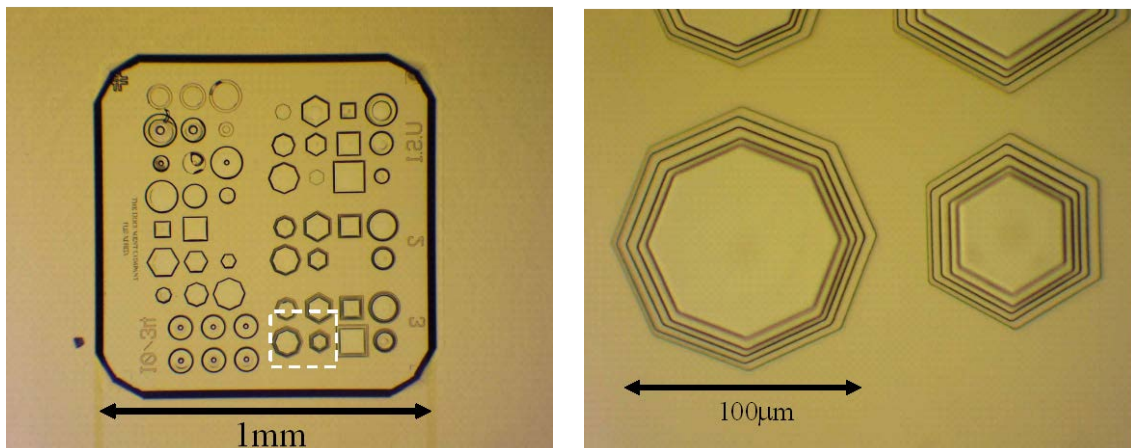
Fig. 2-21 Fabrication process of the target substrate

2.6 構造体作製結果

本節では、原理検証機（F-0 機）とドナー基板・ターゲット基板を用いて、FORMULA 技術の原理検証として実施した各種構造体の作製結果について述べ、そこから抽出された課題を説明する。

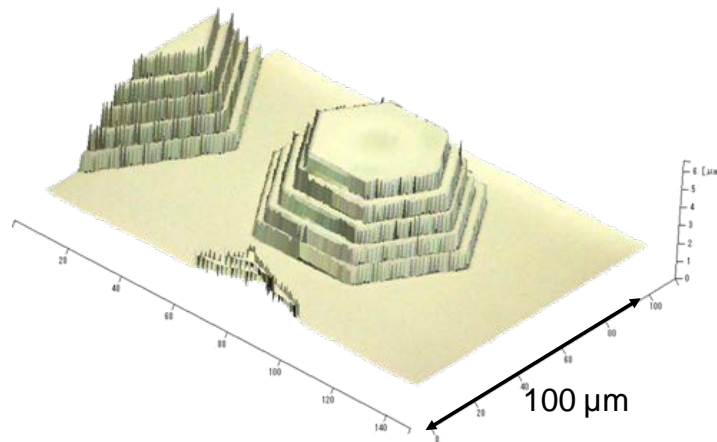
2.6.1 薄膜の転写性の検証

スパッタリング法により製膜した Al-Cu 合金製の薄膜を積層した結果を Fig. 2-22 に示す。これは 1 mm 角のセル内に数十個の幾何学的なパターンを配置したもので、すべて 5 層の構造体である。Fig. 2-22 (a) はセル全体の顕微鏡写真であり、白い破線で示した領域を拡大した写真が (b) である。Al-Cu 薄膜 1 層の膜厚は 1 μm である。Fig. 2-22 (c) は構造体の一部を AFM で観察した結果である。薄膜パターンが積み重なって 3 次元構造体が形成されている様子が分かる。この時に用いられた常温接合条件を Table 2-3 に示す。なお今後この条件を F-0 機の標準接合条件とした。



(a) micrograph of the cell

(b) micrograph of truncated cone structures

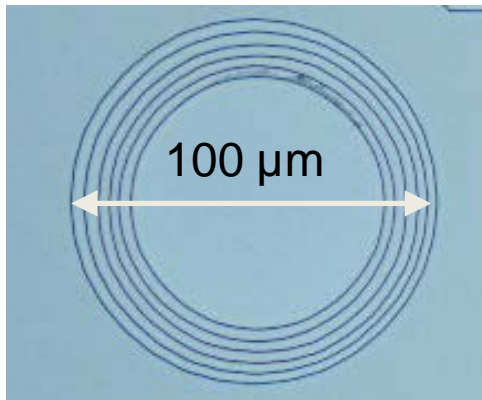


(c) AFM image of truncated cone structure

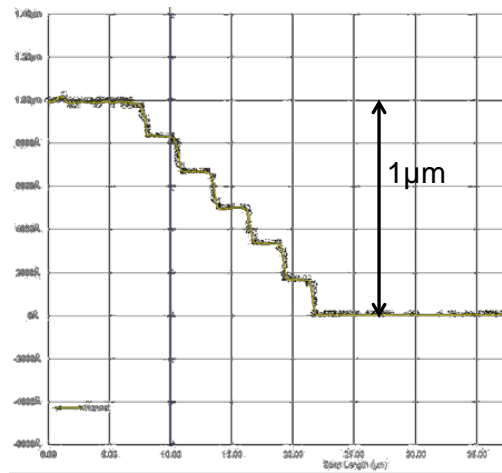
Fig. 2-22 Multi-layered structures by 1 μm -thick Al-Cu patterns

Table 2-3 Typical bonding condition

レイヤ No	FAB 照射条件	圧接条件	備考
1 層目	電圧 : 1.5kV 電流 : 20 mA 時間 : 10 min	荷重 10-30kgf (100-300 MPa) 時間 5 min	FAB 照射時間が 2 層目以降より長いのは, 大気中に保管された基板上に酸化膜や汚染層が多いため
2 層目以降	電圧 : 1.5kV 電流 : 20 mA 時間 : 5min	荷重 10-30kgf (100-300 MPa) 時間 5 min	FAB 照射による表面のエッチング量は, 約 5 nm



(a) Cone structure



(b) Thickness profile measured by Tencor

Fig. 2-23 Multi-layered structure fabricated by stacking very thin films

Fig. 2-22 と同様の構造体が作製可能なことは, 膜厚 0.5 μm の純Al薄膜を 10 層積層して確認している[16]. しかしながら, 薄膜パターンの膜厚が 0.5 μm よりもさらに薄くなると, ドナー基板からターゲット基板への転写性が悪くなるという問題が発生した. この原因は, 薄膜の圧接時に離型層であるポリイミド膜に薄膜パターンが埋没して十分な圧接応力が印加できないことと判明し, パターン周囲のポリイミド膜を一部エッチバック (エッチングにより膜を後退させる) して転写性を改善できた[17]. Fig. 2-23 は実験結果を示すもので, (a) は膜厚 170 nm のAl-Cu薄膜を 6 層積層した最大直径 100 μm の同心円状の積層構造体の顕微鏡写真, (b) は段差部のプロファイルを触針式膜厚計 (KLA-Tencor社製P-15 型機) で評価した結果である. この図から, 非常に薄い薄膜でも元の形状・膜厚を保ったまま階段状に積層できていることが確認できる.

これにより, 薄膜パターン部材を積層して構造体を作製する上で, 実質的に転写可能な膜厚の下限に制限がなくなったと考えられる. また構造体作製のタクトタイムは 1 層あたり 15-20 min である. これは Table 2-3 に示した FAB 照射時間, 圧接時間と, 手動操作による FAB 照射条件調整 (アルゴン流量や電圧・電流) 時間, およびステージ移動時間の合計である.

2.6.2 構造体の加工精度の評価

前述のように、薄膜パターン部材はドナー基板上に形成された形状と膜厚を維持したままターゲット基板上に転写されることが検証されたが、加工技術としての課題は積層されたパターン間の位置ずれであることが明らかとなった[18]。積層されたパターン間のX、Y方向位置ずれ誤差のことを、今後オーバーレイ誤差 (overlay error) と呼ぶことにする。

Fig. 2-24 は F-0 機におけるオーバーレイ誤差を示したものである。積層された構造体を SEM で直上から観察すると、本来同心状となるべきパターンが (a) のように大きくずれていることがわかる。各層の中心座標を対角線の中点から算出し、第 1 層 (最外層) の中心を基準にプロットしたグラフが (b) である。F-0 機の初期状態では、図中初期状態 (A) のように 1 層につき 1 μm 以上ドリフトしていることがわかる。

これらの原因について検討した結果、Fig. 2-25 のような要因が抽出された。大項目は、X-Y- θ ステージ、Z ステージ、振動、薄膜パターンの4つである。それぞれの項目について中項目を抽出し、Fig. 2-25 の特性要因図を得た。X-Y- θ ステージに関しては、X 軸および Y 軸の走りの方向と、ドナー基板上に形成された X 方向直線および Y 方向直線が一致しないことが判明し、後述する直交度の調整を実施した。Z ステージ繰返し昇降時の位置ずれに関しては、Fig. 2-16 に示した上ステージの各部について後述する方法により剛性を点検したところ、Z 軸ガイド自身の剛性不足と、基板ホルダ部分の固定が不十分であることが判明した。装置の振動に関しては、加速度センサをチャンバや装置の真空ポンプ、設置している床に取り付け、ポンプや空調の on/off、作業者の動作などに関連付けて調査した。その結果、主排気ポンプのクライオポンプが主要因であることが判明した。最終的に、Fig. 2-25 の赤枠で示した 4 項目が特に大きな原因と考えられた。以下にその改善方法を述べる。

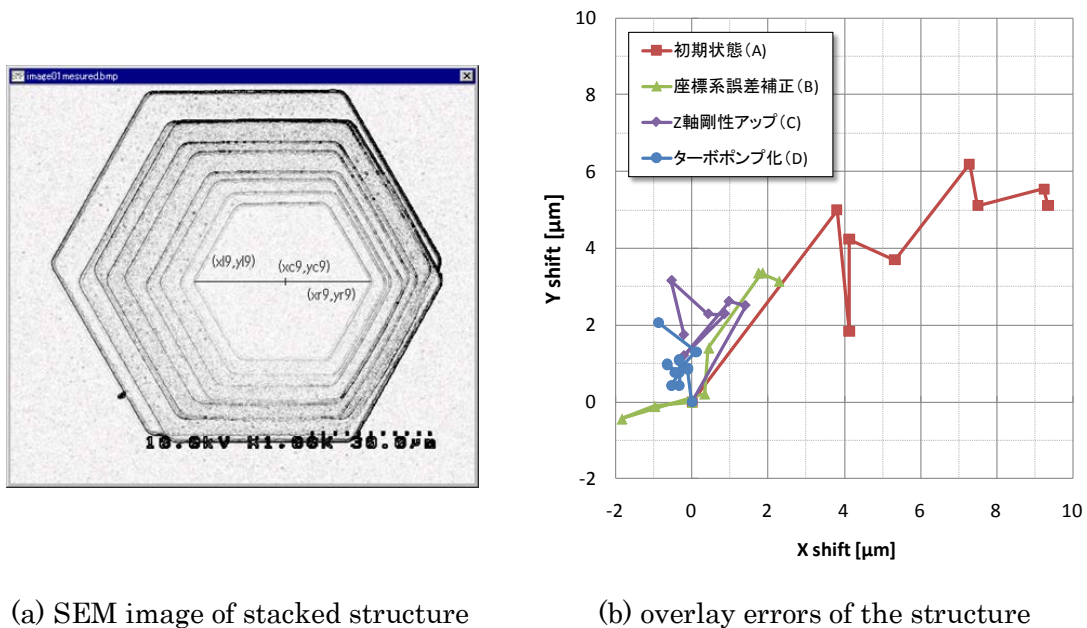


Fig. 2-24 Overlay error of the patterns of F-0 machine

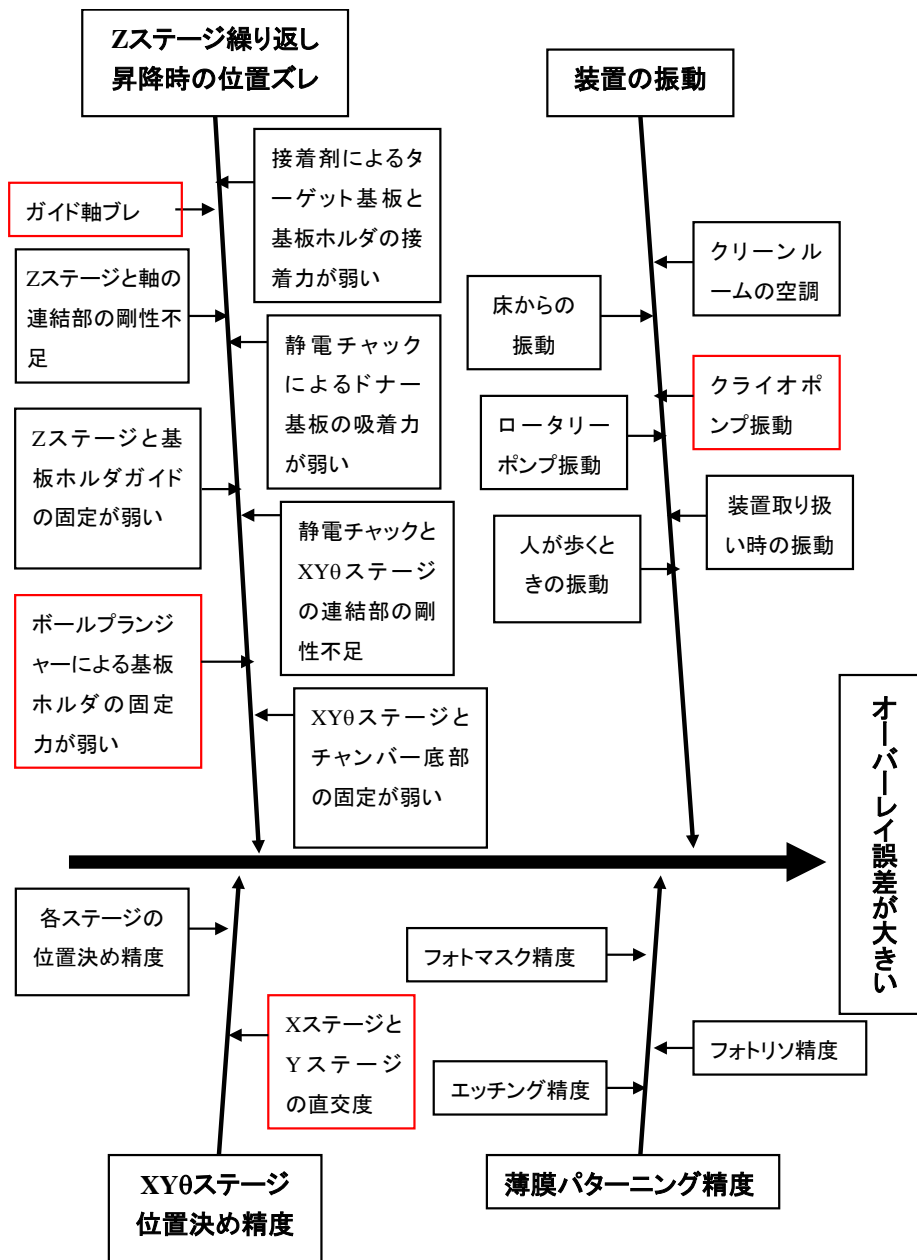


Fig. 2-25 Fishbone chart of the overlay error

X ステージと Y ステージの直交度に関しては、当初この調整は専用のピンとブロックゲージにより行われていたが、それでは不十分 (25 mm スキャン時の位置ずれが 5 μm) であることが分かった。そのためドナー基板上に設けた直交ラインを 2.3.6 節で示したアライメント顕微鏡で走査して観察し、25 mm スキャン時の位置ずれが 1 μm 以下となるように X ステージと Y ステージの直角を微調整した。これはドナー基板の直交度 (すなわちフォトマスク座標系の直交度) を正とするもので、これにより Fig. 2-24 (b) 図中の座標系誤差補正 (B) のようにオーバーレイ誤差の改善がみられた。

Z ステージに関しては、Fig. 2-10 に示したリニアガイドのブレ量を Fig. 2-26 に示す方法

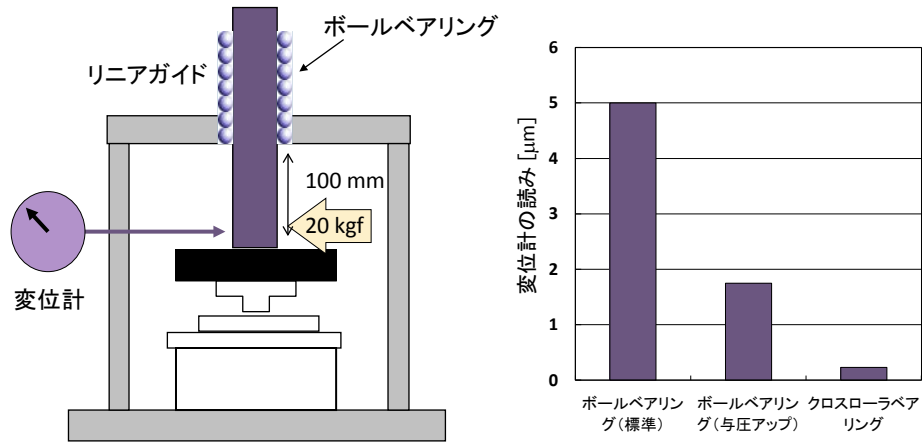


Fig. 2-26 Improvement of stiffness of Z stage



Fig. 2-27 New linear guide for Z-stage

で計測した結果、Z軸のリニアガイド自身に軸ブレがあることが明らかとなった。このためまずボールベアリングの与圧を増やしたところ軸ブレは改善されたが、スムーズな駆動が困難になった。そこで剛性の高いリニアガイドを再検討し、クロスローラータイプのリニアガイド、ガイドマックス® (エノモト社製) に置き換えたところ、軸ブレはサブミクロンに改善された。これは主に金型の開閉用に用いられているリニアガイドであり、ボールベアリングよりも剛性に優れたローラーベアリングを用いているため軸ブレがきわめて小さい。これを装置内やぐらに取り付けた写真を Fig. 2-27 に示すが、当初の Z ステージ (Fig.

2-10) に比べ非常に太い大きなガイドであることが分かる。

次に基板取り付け部分は接合時の圧接と引張によりターゲット基板の位置がずれてしまうことが分かったため、Fig. 2-16 に示した上ステージ部分を全面的に見直し、Fig. 2-28 に示したマグネットチャックを用いることにした。すなわち、Z 軸の先端に球座式の倣い機構を取り付け、その先に手動のマグネットチャック（カネテック社製永磁タイプ）を取り付ける。その端面を対向する静電チャック面に一旦押しつけて平行を出し、倣い機構を固定する。またターゲット基板を取り付けた基板ホルダを磁性材料に変更し、マグネットチャックに吸着させる。Z 軸先端部分の変更内容を Fig. 2-29 に図示した。これらの変更により Fig. 2-24 (b) 図中の Z 軸剛性アップ (C) のようにオーバーレイ誤差の改善がみられた。

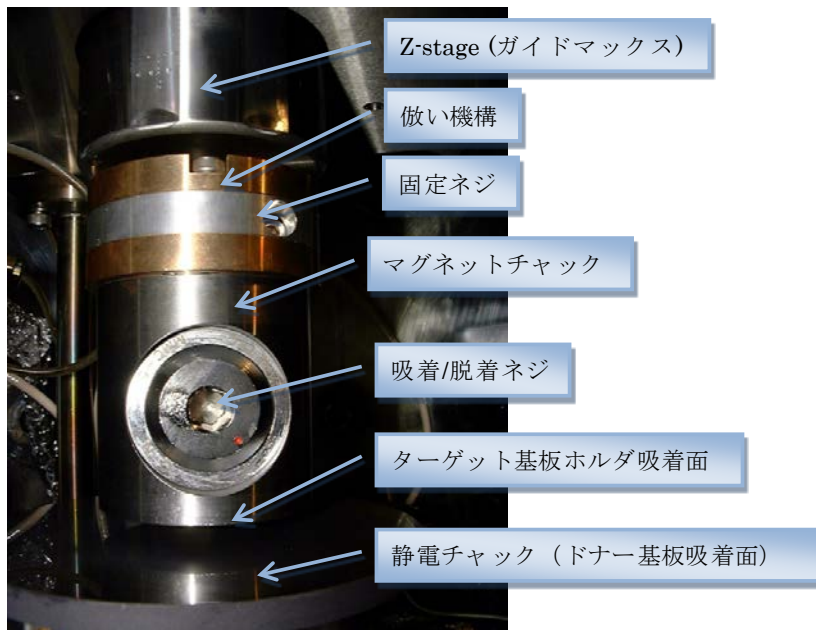


Fig. 2-28 Magnet chuck for the target substrate

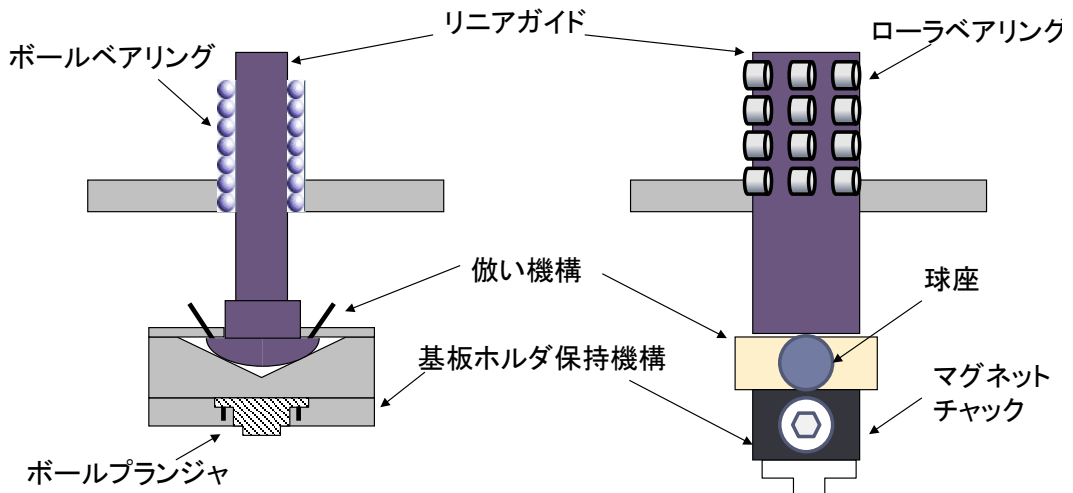


Fig. 2-29 Modification of Z-stage and chuck

最後にクライオポンプの振動に関しては、排気系へのベローズ継ぎ手の挿入、チャンバ本体へのウェイト追加など各種除振対策を試したが効果が見られなかったため、ポンプ自身を振動発生が少ないターボ分子ポンプに交換した。このポンプ交換により Fig. 2-24 (b) 図中のターボポンプ化 (D) のようにオーバーレイ誤差の改善がみられた。

上記のような各種対策を施した結果、オーバーレイ誤差は標準偏差値で当初の $2\ \mu\text{m}$ から $0.5\ \mu\text{m}$ に改善された。2.6.1 節で示した各種積層構造体は、このような対策後に作製したものである。さらなる改善のためには、Fig. 2-25 に示された残りの要因への対策が必要である。

2.6.3 積層界面の解析

FORMULA 技術では薄膜パターン部材を常温接合により積層して 1 つの微小構造体を作製するため、その接合界面の状態は微小構造体の機械的特性を決める大きな要因となる。そこで作製された構造体をスライスし、接合界面を透過型電子顕微鏡 (TEM) で観察することにした[19, 20]。

試料は純 Al および Al-Cu 薄膜の積層構造体とし、界面に影響を及ぼすと考えられる表面粗さ Ra 値は $3\ \text{nm}$ で一定となる膜厚 (それぞれ $0.47\ \mu\text{m}$ および $0.9\ \mu\text{m}$) とした。純 Al では Ra 値が大きくなりやすいので、スパッタリング製膜時に放電を一旦停止する間欠放電を適用した。構造体作製時の圧接応力は $100\ \text{MPa}$ ($10\ \text{kg/mm}^2$) である。

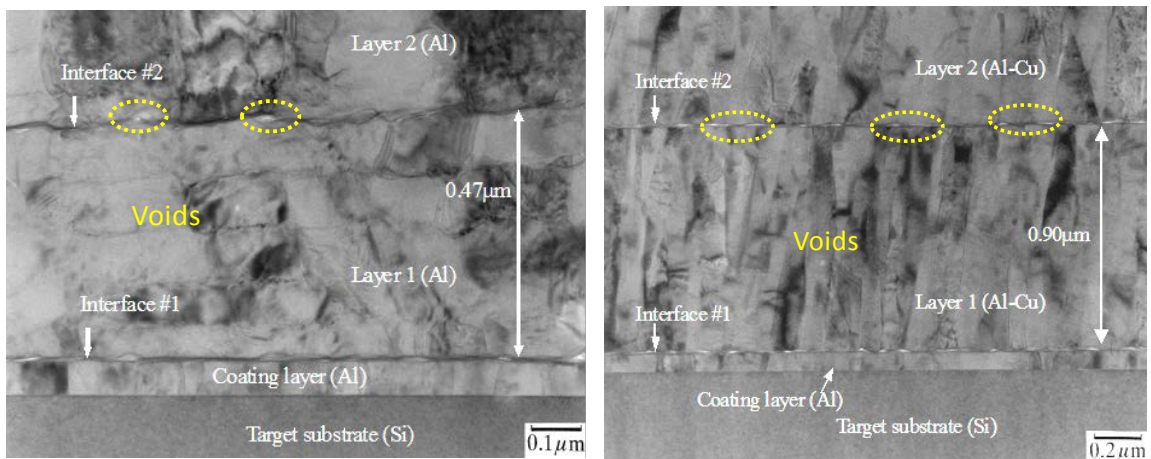
Fig. 2-30 は接合界面の TEM 写真であるが、(a), (b) いずれの写真にもターゲット基板の Si とその表面には Al コーティング層があり、その上に薄膜が 2 層分積層されている。Fig. 2-30 (a) は純 Al 薄膜の接合界面であり、界面の白い島状領域 (黄色の点線で囲まれた領域) はボイド (空孔) である。薄膜自身には多結晶構造であることを示す柱状の粒界が見られ、また間欠放電による層構造が見られる。一方 Fig. 2-30 (b) は Al-Cu の接合界面であり、接合界面には純 Al より多くのボイドが見られる。これらのボイドの割合を、界面に沿った白い領域の長さを計測することにより求め、結果を図キャプションに示した。両者の表面粗さと圧接荷重は同一であるが、Al-Cu ではボイド率が 11% となり純 Al よりもかなり大きい。この差は薄膜自身の硬さの差に起因すると考えられる。参考のため、ナノインデントで計測した両薄膜の硬度を図キャプションに示した。

次に接合界面を高倍率の TEM で観察した結果を Fig. 2-31 に示す。サンプルは Fig. 2-30 (b) のボイドがない領域 (Al-Cu 同士) である。接合界面の下層と上層の両方に格子状のパターンが見られることから、結晶構造 (多結晶膜の 1 つのドメイン) であることがわかる。一方接合界面には幅約 $10\ \text{nm}$ のランダムドットパターンが見られることから、この領域がアモルファス層であることが分かる。このように薄膜同士は薄いアモルファス層という中間層を介して原子同士が直接接合されていることが分かった。

この結果から FORMULA 技術における接合メカニズムを図示すると Fig. 2-32 のようになる。この図は理想的な常温接合の原理を示した Fig. 2-3 に置き換わるもので、接合対象として薄膜を用いる本技術特有のものである。多結晶構造をもつ薄膜パターン部材は表面

の凸凹が大きく、これらの面同士を圧接するため表面粗さや圧接荷重が適切でないとボイドを生じる。また接合界面のアモルファス層は常温接合時のアルゴン原子の照射によって生成されたと考えられる[7]。

最後に、表面粗さがRa値で1 nmのAl-Cu薄膜同士の常温接合界面の写真を図. 2-33 に示す。このサンプルは図. 2-23 で示した膜厚が170 nmと非常に薄い薄膜パターンで、Ra値はSiウェハ並みの非常に小さな値である。図. 2-33 では界面に白いボイド領域は全く観察されず、ボイドレスの接合が実現できていることが分かる。このように薄膜パターン部材でも表面粗さを1 nm程度とすることで、ボイドのない良好な接合を得ることが示された。



(a) pure Al, 0.47 μm , $R_a = 3 \text{ nm}$
Void ratio = 3%, Hardness = 0.84 GPa

(b) Al-Cu alloy, 0.9 μm , $R_a = 3 \text{ nm}$
Void ratio = 11%, Hardness = 1.31 GPa

Fig. 2-30 TEM image of bonding interface

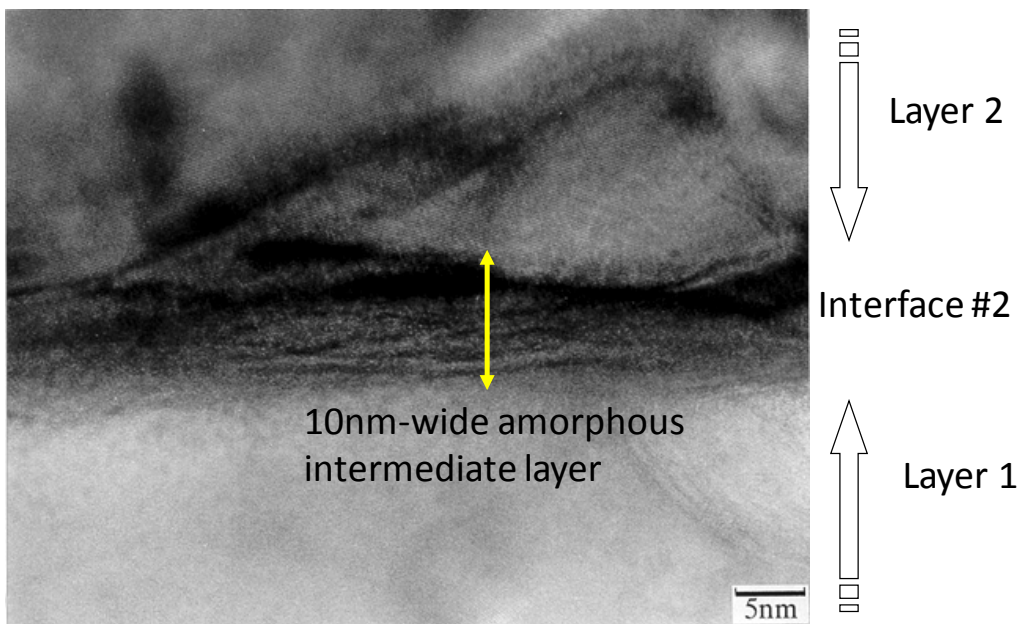


Fig. 2-31 High resolution TEM image of the Al-Cu/Al-Cu bonding interface

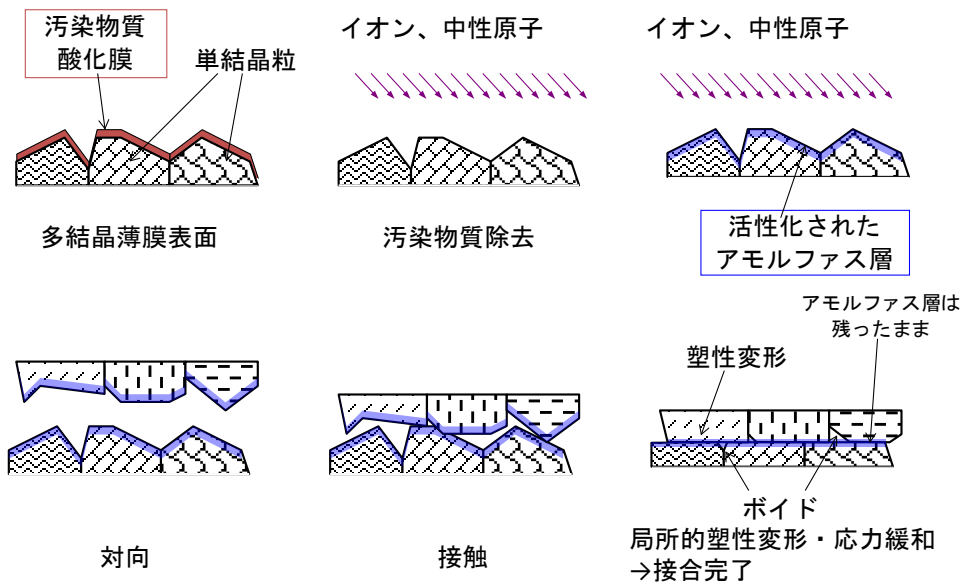


Fig. 2-32 Mechanism of surface activated bonding in FORMULA technology

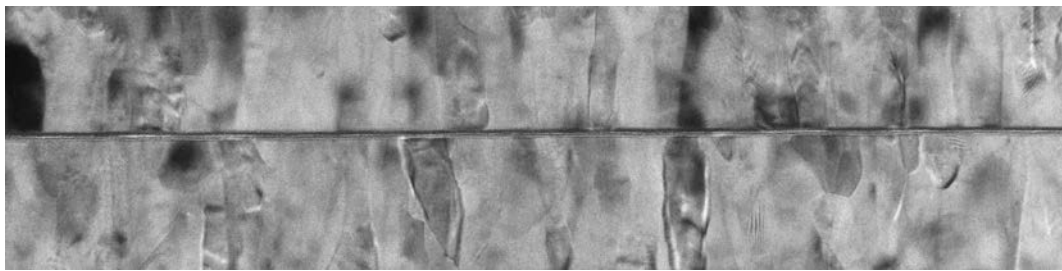


Fig. 2-33 TEM image of void-less interface

なおこの例は製膜後の表面粗さが 1 nm 程度の薄膜であるが、そのような平坦な表面を持たない薄膜でも、製膜後に CMP (Chemical Mechanical Polishing) プロセスを導入して表面を鏡面研磨することにより、1 nm 程度の表面粗さを得ることが可能である[21]。

以上述べてきたように、FORMULA 技術による薄膜パターン部材の常温接合界面は、薄いアモルファス層を介して原子同士が直接接合していることが確認された。薄膜パターンは一般には多結晶構造であり、単結晶基板のように原子レベルの平坦性は有していない。表面粗さが大きいと界面にボイドが発生するが、表面粗さ、薄膜の硬さ、および圧接応力を適切に選択すればボイドレスの接合界面が得られることが示された。

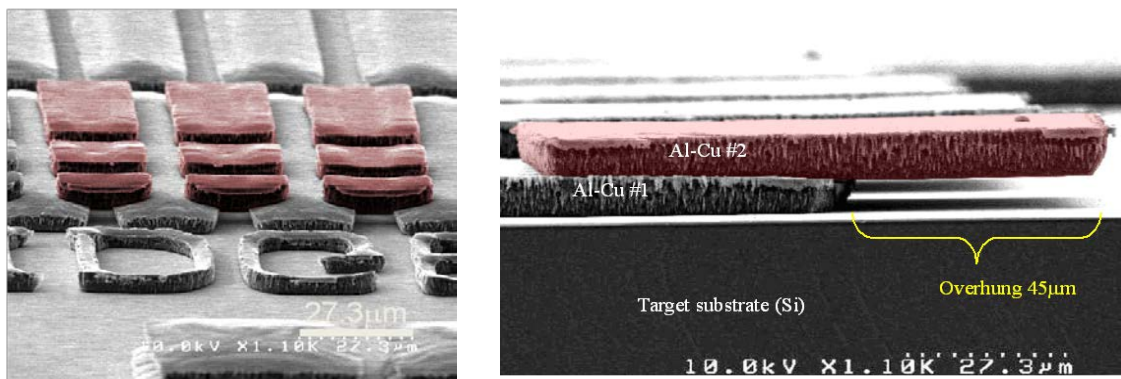
2.6.4 形状自由度の検証

本節では、積層造形法である FORMULA 技術ならではの構造体作製例を示す。Fig. 2-34 はオーバーハング構造体の SEM 写真であり、1 層の膜厚が 8 μm の純 Al 薄膜を単純に 2 層積層したものである[22]。Fig. 2-34 (a) はブリッジ構造体 (両持ち梁) であり、第 1 層が橋脚

部分、赤く着色された部分が第2層の橋げた部分であり、いずれも単純な矩形パターンを積層したものである。一方Fig. 2-34 (b) は片持ち梁であり、赤く着色された第2層部分が約 45 μm オーバーハングしているため、その下部にはエアギャップが形成されている。これらのサンプルの第1層は多少歪んで見えるが、その理由は厚い純Alの表面粗さが大きいため圧接荷重を大きくする必要があったため、その荷重により純Alが塑性変形したためである。

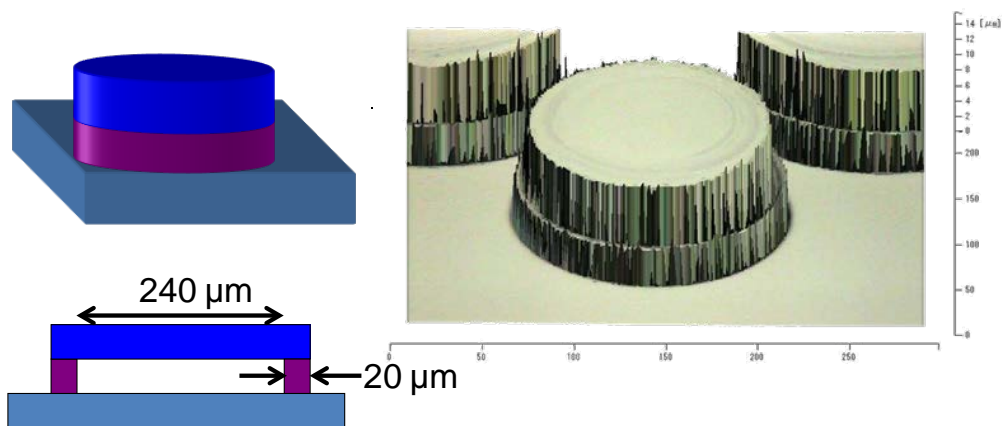
また Fig. 2-34 (c) はダイヤフラム構造体のレーザ顕微鏡イメージである。この構造体もリング状の第1層の上に円形状の第2層を転写積層しただけの簡単な工程で作製されたものである。積層プロセスは真空中で行われるため、このダイヤフラムの内部は真空状態になっていると考えられる。しかしながらこのような微小空間の真空度を計測する手段がないため、真空状態を維持しているか否かは検証できていない。

一般にMEMSプロセスではこのようなオーバーハングのある構造体を作製するには犠牲層の導入やウェハ接合が必要なのでプロセスが複雑となる。これに対し、FORMULA技術では簡便にオーバーハング構造が作製できるので、形状自由度において優位性がある。ここに示した構造体は振動子や触針の作製、真空封止構造など電子デバイスの実装技術に応



(a) Bridge structures (SEM)

(b) Cantilever structures (SEM)



(c) Diaphragm structure (laser microscope)

Fig. 2-34 Micrograph of overhang structures

用できる可能性がある。

2.6.5 電鍍膜の積層構造体の作製

前節でオーバーハング構造が簡単に作製可能なことを示したが、スパッタリング法で膜厚 $8\ \mu\text{m}$ の Al を形成するというのは、効率が悪い。そこで簡便に比較的厚いパターン部材を形成する方法として、電鍍プロセスを検討した。電鍍とは電解メッキのことで、電解液に浸した導電性基板上に金属イオンを析出させ金属膜を形成する方法である。基板上にあらかじめ絶縁性のレジストパターンを形成しておけば、レジストのない領域に電鍍パターンを選択的に形成することが可能である。

そこで基板として鏡面研磨したステンレス基板を用い、これに膜厚 $30\ \mu\text{m}$ のフィルムレジストパターンを形成して、この基板上に膜厚 $25\ \mu\text{m}$ のニッケルおよび膜厚 $0.3\ \mu\text{m}$ の金を析出させてニッケル製のパターン部材を形成した（表面粗さはRa値で約 $10\ \text{nm}$ ）。そしてこれをドナー基板として用い、FORMULA技術により3次元マイクロ流路構造を作製した[23, 24]。ステンレス基板の表面粗さとニッケルの析出条件を最適化することで、常温接合後に電鍍パターンが離型してターゲット基板上に転写可能なことを示した。

Fig. 2-35 はマイクロ熱交換器のカットモデルをこのプロセスにより作製した例である。

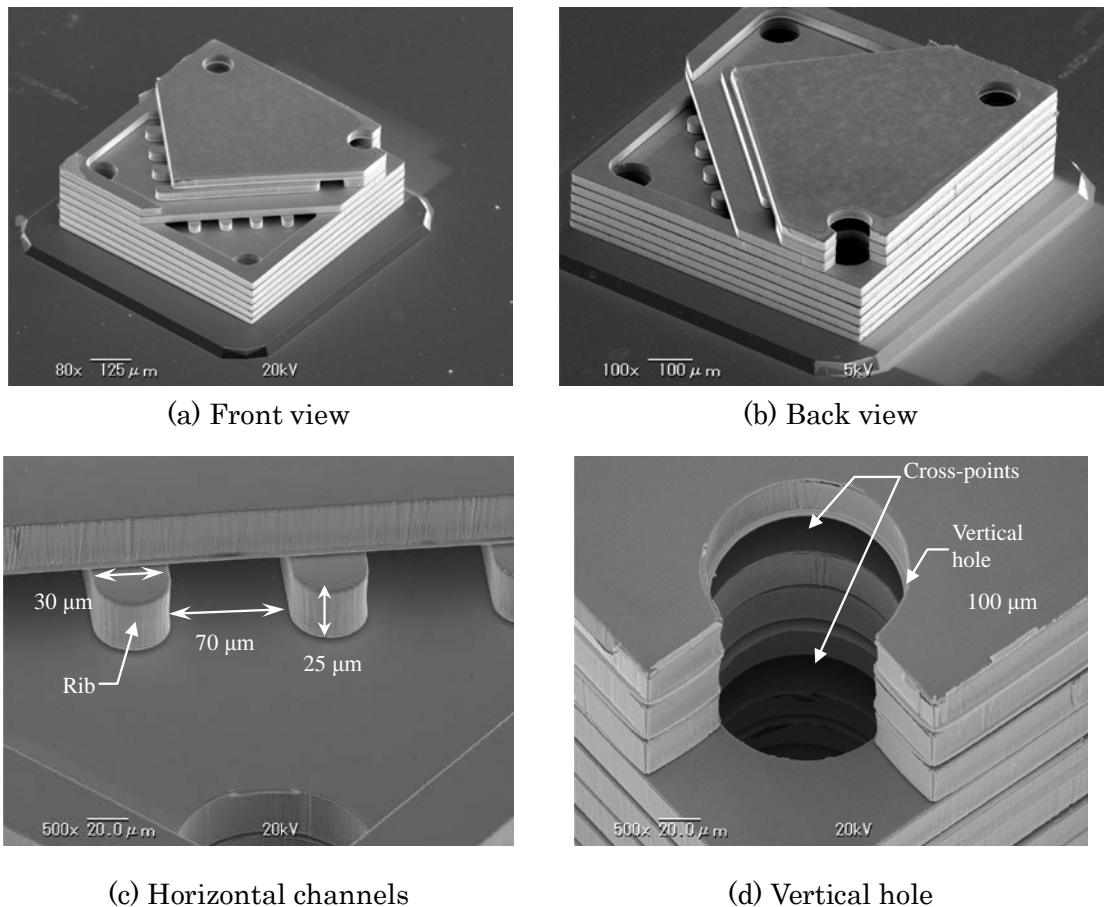
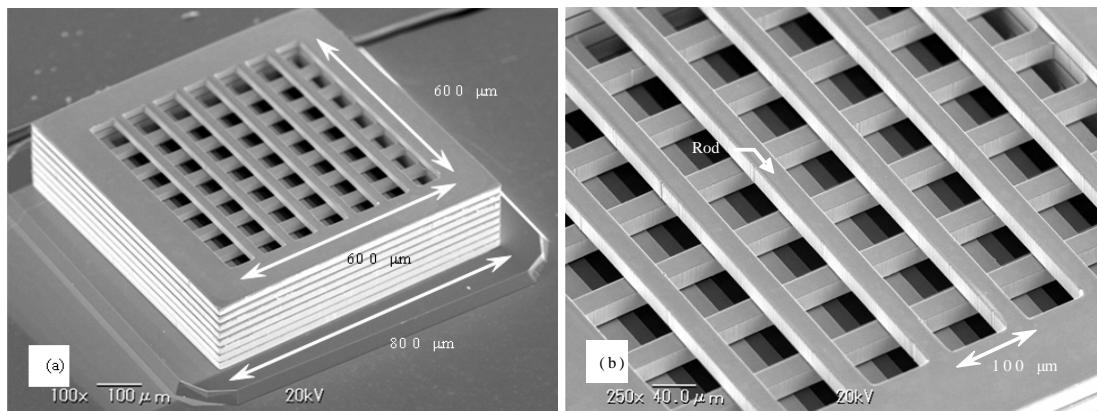


Fig. 2-35 SEM photographs of a fabricated micro heat exchanger

ニッケル電鍍パターンの大きさは $800\ \mu\text{m}$ で、 $25\ \mu\text{m}$ のパターンを8層積層した。この写真を見れば明らかなように、数十マイクロメートル台の水平流路や垂直流路からなる3次元マイクロ流路構造が形成可能である。

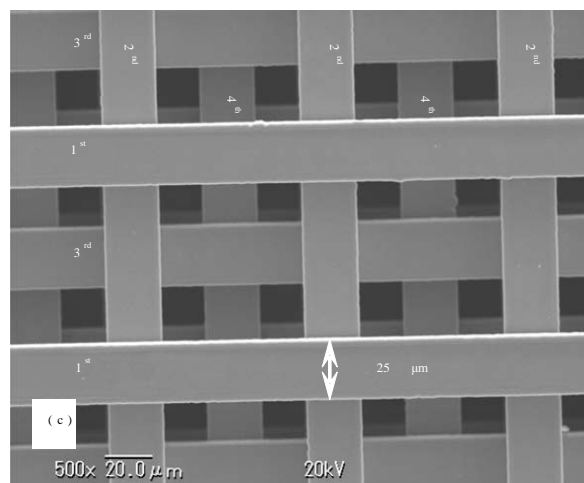
また Fig. 2-36 は、同様のプロセスで作製したニッケル電鍍製のウッドパイル構造体である。これも厚さが $25\ \mu\text{m}$ の電鍍パターンが8層積層されたものである。各層は幅 $25\ \mu\text{m}$ 、長さ $600\ \mu\text{m}$ のロッドを6本有する。奇数層4層と偶数層4層は互いに直交しており、また3層目のロッドは1層目のロッドの中間に位置している。本技術により、切削加工では実現できないこのような複雑なオーバーハング形状が作製できることを確認した。

上記のようにFORMULA技術は、薄膜だけでなく電鍍膜も適用可能であり転写可能な膜厚範囲を大幅に広げることができた。これらの結果、1層の膜厚設定範囲は、 $0.1\sim$ 数十 μm となり、設計の自由度が非常に広がった。このような微小流路は、マイクロクーラ[25, 26] や、近年研究が盛んに行われているマイクロリアクタ[27]などに適用可能と思われる。



(a) Over view

(b) Close-up view



(c) Top view of staggered woodpiles

Fig. 2-36 SEM photographs of a woodpile structure

2.7 結言

本章では、全く新しい積層造形法として、薄膜パターン部材の常温接合と積層転写を利用した「FORMULA 技術」を提案した。この方法は、真に3次元の形状自由度を有する微小構造体をサブミクロンの形状精度で作製でき、しかも金属や誘電体など各種材料が適用可能な3次元微細加工技術である。本加工技術が原理的に成立することを示すために原理検証機（F-0 機）を製作し、その基本要素であるステージ系やアライメント系について説明した。さらにドナー基板とターゲット基板についてその特殊なレイアウト手法や作製プロセス、および離型性の制御について詳しく述べた。

そして、この F-0 機を用いて各種構造体を作製し、以下の結論を得た。

- (1) アルミ製薄膜やニッケル製電鍍膜が転写積層可能であり、これらの積層体からなる3次元微小構造体の実現可能である。
- (2) エッチバックプロセスや電鍍プロセスを用いることにより、実質的に転写可能な膜厚範囲に制限がない。
- (3) オーバーハング構造や中空構造など複雑な3次元構造が簡単に作製可能であるので、3次元マイクロ流路などが実現できる。
- (4) 接合界面はアモルファス層を介してボイドなしに直接接合可能である。表面粗さが大きく圧接荷重が不十分な場合にはボイドが形成される。

また加工技術としての重要な課題として、積層パターン部材間の位置ずれ＝オーバーレイ誤差が抽出され、これが主に常温接合装置の構成要素に起因することを明らかにした。

次章では、この F-0 機のフィードバックを受け、新たな常温接合装置の仕様と設計、および性能について述べる。

参考文献

- [1] 山田高幸, 高橋睦也, 永田真生, 山田真樹: 薄膜の常温接合による新しい微細 3 次元形状創成法の提案と検証, 1998 年度精密工学会秋季大会, (北海道大学), B34, p. 65.
- [2] 山田高幸, 高橋睦也: 薄膜の常温接合による微小 3 次元形状創成法の提案と検証, 精密工学会誌, **66**, 8, (2000) pp. 1265-1269.
- [3] 須賀唯知: 常温接合の現状と課題, 溶接学会誌, **64**, 4 (1995) pp.282-288.
- [4] 須賀唯知: 表面活性化による低エネルギー接合, まてりあ, **35**, 5, (1996) pp.496-500.
- [5] 江刺 正喜, 五十嵐 伊勢美, 藤田 博之, 杉山 進 著: マイクロマシーニングとマイクロメカトロニクス, 培風館, (1992) p.39.
- [6] 加柴良裕, 町田一道, 奥田滝夫: 超高真空常温界面接合装置の開発, 溶接技術, 7 月号, (1987) pp.88-91.
- [7] 高橋裕, 高木秀樹, 須賀唯知, B. GIBBESCH, G. ELSSNER, 板東義雄: Al/Al 常温接合体の組織的, 機械的および電気的特性に及ぼす接合環境の影響, 日本金属学会誌, **55**, 9, (1991) pp.1002-1010.
- [8] 須賀唯知: 常温接合, 日本金属学会会報, **29**, 11, (1990) pp. 944-947.
- [9] 田中慶一: 露光装置における 6 自由度磁気浮上ステージ開発ー背景と第 1 報ー, 精密工学会誌, **75**, 4, (2009) pp. 501-506.
- [10] <http://documents.exfo.com/appnotes/AnoteBurleigh010-ang.pdf>
- [11] 山田高幸, 高橋睦也: 薄膜の常温接合による微小 3 次元形状創成法における薄膜パターンの転写性に関する検討, 電気学会論文誌 E, **120-E**, 7, (2000) pp. 333-338.
- [12] 須賀唯知, 宮沢薫一, 高木秀樹: 表面活性化法による Al および Cu 常温接合界面の TEM 観察, 日本金属学会誌, **54**, 6, (1990) pp. 713-719.
- [13] 薄膜ハンドブック, オーム社, (1983) 第 2 章.
- [14] H. TAKAGI, R. MAEDA, Y. ANDO AND T. SUGA: ROOM TEMPERATURE SILICON WAFER DIRECT BONDING IN VACUUM BY AR BEAM IRRADIATION, PROC. MEMS '97, (1997) pp. 191-194.
- [15] 江刺 正喜, 五十嵐 伊勢美, 藤田 博之, 杉山 進 著: マイクロマシーニングとマイクロメカトロニクス, 培風館, (1992) p.16.
- [16] 山田 高幸: 薄膜の常温接合による微細 3 次元形状創製, 2002 年度日本機械学会ワークショップ (日本大学).
- [17] 山田高幸, 高橋睦也, 堀田宏之: 薄膜の常温接合による微細 3 次元形状創成法における薄膜パターンの転写性改善, 2003 年度精密工学会秋季大会 (富山大学).
- [18] 山田高幸, 高橋睦也: 薄膜の常温接合による微細 3 次元形状創成法におけるアライメント精度の改善, 2002 年度精密工学会秋季大会 (熊本大学).
- [19] 高橋睦也, 山田高幸: 常温接合法により積層した薄膜の接合界面の断面 TEM 観察, 2001 年度電気学会全国大会 (工学院大学).
- [20] TAKAYUKI YAMADA, MUTSUYA TAKAHASHI, TAKASHI OZAWA, SATOSHI TAWARA, AND TAKAYUKI GOTO: NOVEL FABRICATION METHOD FOR 3-D MICROSTRUCTURES USING SURFACE-ACTIVATED BONDING AND ITS APPLICATION TO MICRO-MECHANICAL PARTS, SPIE'S INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON MART MATERIALS, NANO-, AND MICRO-SMART SYSTEMS, (2002) pp. 105-112.
- [21] 山田高幸, 高橋睦也, 山崎芳文, 田畑和章: 薄膜の常温接合界面の CMP による平坦化, 2005 年度精密工学会秋季大会 (京都大学) D68, pp. 317-318.
- [22] 高橋睦也, 堀田宏之, 山田高幸: FORMULA 技術により作製した微小機械部品, 平成 15 年電気学会全国大会 (東北学院大学) 3-154, p. 205.
- [23] TAKAYUKI YAMADA, KAZUAKI TABATA: 3D MICROFLUIDIC DEVICE FABRICATED BY USING SURFACE ACTIVATED BONDING OF ELECTROPLATED NI PATTERNS, THE

- 13TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOLID-STATE SENSORS, ACTUATORS AND MICROSYSTEMS (TRANSDUCERS '05), (2005) PP. 1485-1488.
- [24] 田畑和章, 山田高幸: ニッケル電鍍パターンを積層して作製した3次元マイクロ流路デバイスの作製, 2005年度精密工学会秋季大会(京都大学) B08, PP. 91-92.
- [25] TAKAYUKI YAMADA, KAZUAKI TABATA, DAISUKE NAGAO, MUTSUYA TAKAHASHI: HIGH PERFORMANCE MICROCOOLER FABRICATED BY MULTIPLE STACKING OF ELECTROPLATED METAL PATTERNS, THE 14TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOLID-STATE SENSORS, ACTUATORS AND MICROSYSTEMS (TRANSDUCERS '07), (2007) PP. 1625-1628.
- [26] 田畑和章, 高橋睦也, 山田高幸, 長尾太介: 電鍍膜の積層による高性能マイクロクーラの作製と評価, 2007年度精密工学会秋季大会(旭川市ときわ市民ホール) L21, PP. 873-874.
- [27] 草壁 克己, 外輪 健一郎 著: マイクロリアクタ入門, 米田出版, (2008).

第3章 生産対応機の製作と評価

3.1 緒言

本章では、第2章で示した原理検証機 F-0 機のフィードバックを受け、新たな常温接合装置 F-1 機の仕様と構成、および性能について述べる。F-0 機の製作と評価の結果、FORMULA 技術が3次元微細加工技術として成立することが検証できたので、この装置をスケールアップしさらに自動化して、微小部品の自動生産が可能なレベルを目指した。そのために、デバイスサイズ拡大に対応するドナー基板サイズの拡大、圧接荷重の増加、自動運転化などを実施した。また F-0 機で明らかとなった積層精度に関しては、ステージの高剛性化や高精度化の対策を施すことにした。

最初に 3.2 節で生産対応機 (F-1 機) の仕様と基本構成を示す。3.3 節では F-1 機の各部の仕様と性能について説明する。3.4 節では、組み上げた F-1 機の性能を評価するとともに、スケールアップされた構造体の作製例を示す。最後に 3.5 節で本章をまとめる。

3.2 基本コンセプト

F-1 機製作の目的は、F-0 機で原理検証された FORMULA 技術が、実用的な微小部品や微小システムの実現手段となりうることを実証することである。そのためには、基板サイズのスケールアップにより製作可能な部品サイズを拡大すること、また積層工程の自動化とタクトタイムの短縮により、人手をかけずに部品の作製を可能とすることが必要である。また F-0 機で明らかとなった積層精度に関しては、装置各部の高剛性化や高精度化等の対策を盛り込むことにした。

F-1 機の目標性能を F-0 機と対比させながら Table 3-1 に示す。ドナー基板サイズは富士

Table 3-1 Target of F-1 machine

No.	項目	F-0 機実績	F-1 機目標
1	ドナー基板サイズ	5 インチウエハの 1/4	6 インチウエハ
2	ターゲット基板サイズ	10 mm 角	15 mm 角
3	デバイスサイズ	1 mm 角内	10 mm 角内
4	圧接荷重	30 kgf	1,000 kgf
5	位置決め精度 (標準偏差)	500 nm	100 nm
6	到達圧力 (接合室)	10^{-5} Pa 台	10^{-6} Pa 台
7	チャンバ構成	バッチ式	ロードロック式 (仕込み室と接合室)
8	生産性 (積層工程のタクトタイム)	1 層あたり 15-20 min	1 層あたり 5 min 以下
9	制御性	手動	自動

ゼロックスの6インチウェハラインを利用するため、6インチウェハとした。ターゲット基板サイズは、10 mm角のデバイスが作製できるよう、一回り大きな15 mm角とした。デバイスサイズの拡大に伴い、圧接荷重を最大1 tonまで増加させた。

常温接合時の真空環境はこれまで高真空領域(10⁻⁵ Pa台)であったが、構造体材料としてAl以外の材料への拡張を考慮すると、さらなる真空領域の実現が望ましい。そのため到達圧力の目標を10⁻⁶ Pa台の超高真空とした。これを実現するにはバッチ式では困難なので、接合を行うプロセスチャンバと基板仕込みチャンバを有するロードロック式の装置構成を選んだ。これによって超高真空が得られる代わりに、ドナー基板とターゲット基板を搬送するための機構が必要になる。

3.2.1 F-1機の仕様

前節で述べたF-1機の基本コンセプトから実際のマシンの仕様を作成する。Fig. 3-1は、F-1機に求められる要求仕様とそれを具現化するための対策をまとめたものである。特にデバイスの大型化に伴いステージのストロークや圧接荷重が増大するが、一方で積層精度を向上させなければならず、この相反する要求を具現化するところに多くの検討を費やした。

ドナー基板用XYステージは、200 mm程度の移動距離でナノメートルオーダの位置決め精度を超高真空環境下で実現しなければならないが、市販のステージでこれを満足するのは無い。そこで、微動ステージ(ナノメートル台の高精度と数十マイクロメートルの小ストローク)を搭載した粗動ステージ(数マイクロメートル台の精度と数百ミリメートルの大ストローク)により、粗動ステージの移動によって発生した位置決め誤差を微動ステ

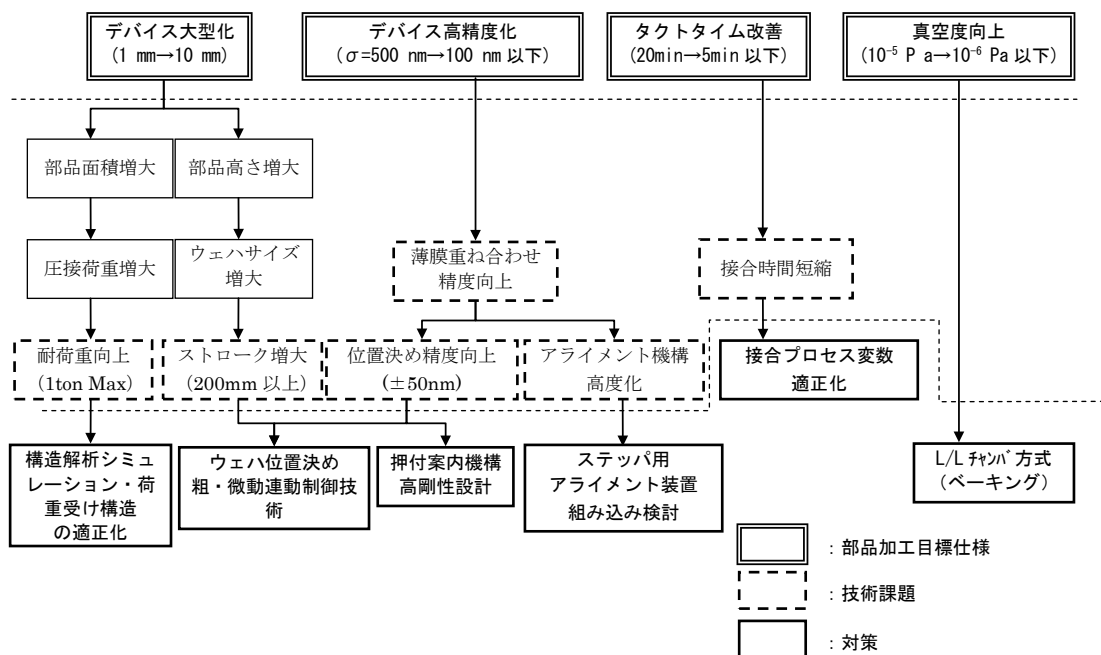


Fig. 3-1 Technical challenges and countermeasure for F-1 machine

ージによって補償する，いわゆる「粗・微動連動制御システム」が，ストローク増大と位置決め精度向上を両立させるために最も有効な対応策であると考えた．また 1 ton という大きな押付け荷重に耐えるため，ステージ自身だけでなくチャンバ全体の構造解析シミュレーションを実施した．

高精度化に関しては，XY ステージの位置決めを高精度レーザ干渉測長器のフィードバックで実施すること，および Z 軸（押付け案内機構や倣い機構）を F-0 機以上に高剛性化することによって対応した．

積層のタクトタイム短縮に関しては，F-0 機の現状分析から，常温接合プロセスのパラメータ最適化およびプロセスの自動化により対応可能と見込まれた．

これらの対応を検討した結果，F-1 機の全体構成を Fig. 3-2 のように，設計仕様を Table 3-2 のようにそれぞれ決定した．

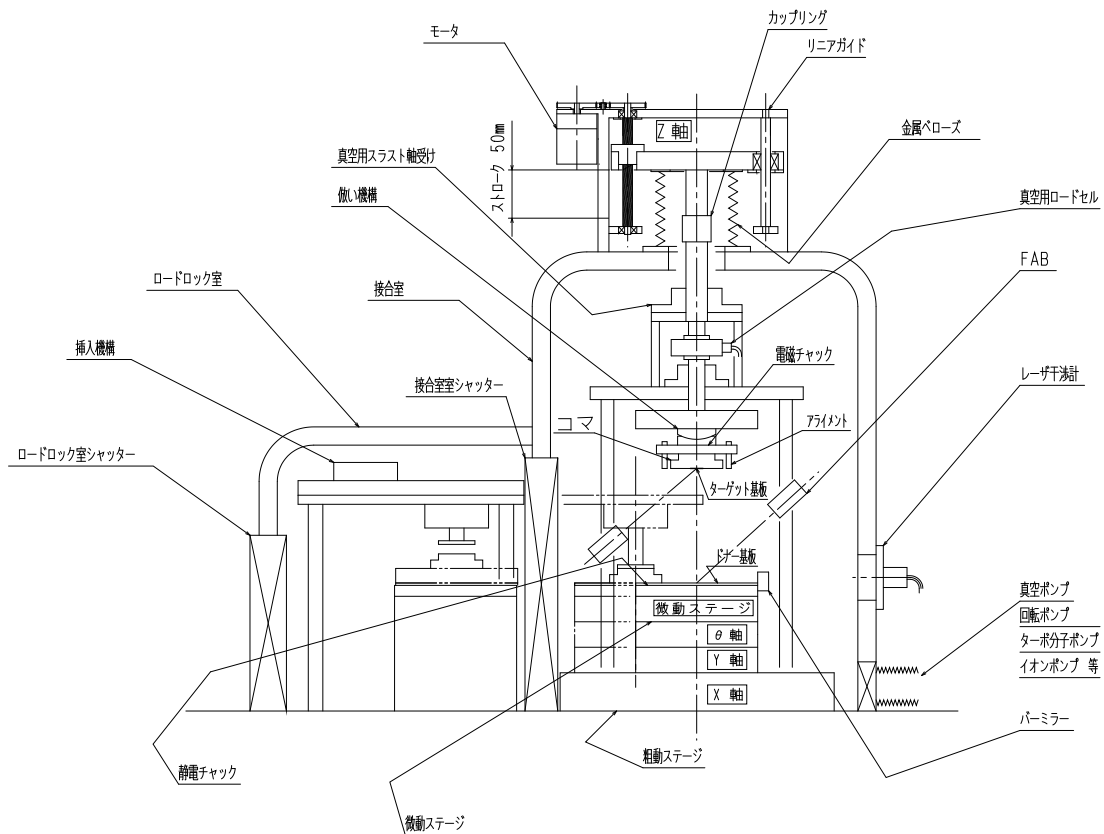


Fig. 3-2 Configuration of F-1 machine

Table 3-2 Specifications of F-1 machine

No.	項 目		仕 様	備 考	
1	真空チャンバ	真 空 度	10 ⁻⁶ Pa 台	主排気はターボ分子ポンプ	
		構 成	接合室及び Load Lock 室		
2	ドナー基板ステージ	粗動	X 軸ストローク	200 mm	Local Feedback By Linear Encoder
			Y 軸ストローク	200 mm	
			θ 軸ストローク	±5°	
			位置決め分解能	0.1 μm	
			繰返し位置決め精度	±1 μm	
			ステージ真直度	1~3 μm	
			θ 軸分解能	3.0×10 ⁻⁴ °	
			θ 軸繰返し性	0.01°	
			耐荷重	1,000 kgf	
		微動	X 軸ストローク	20 μm	No Local Feedback
			Y 軸ストローク	20 μm	
			位置決め分解能	5 nm	
		基準ミフ	長さ (形状)	L : 250 mm (バーミラー)	通常使用最高レベル L 型スコヤの最高レベル
			平坦度	λ/20 (0.032μm 相当)	
直角度 (設置時)	0.1 arcsec (0.1 μm@200 mm)				
トータルフィードバック	分解能 1.25 nm				
		位置決め誤差 3σ	50 nm	繰返し位置決め計測	
3	静電チャック	吸 着 面 積	φ 150 mm	F-0 機同等品のスケールアップ	
		平 面 度	0.3 μm		
		吸 着 力	1.5 kgf/cm ² (±400 V)		
		φ6 インチウエハ吸着力	270 kgf		
		耐 荷 重	1000 kgf		
4	押付け機構 (Z 軸)	Z 軸ストローク	150 mm	電動 チャンバ内ロードセルにて計測	
		貼合せ時 XY 方向振れ	10 nm 以下		
		方 式	直動機構により加圧		
		圧 接 荷 重	1000 kgf		
5	ターゲット基板保持機構	吸着方法	マグネットチャック	F-0 機同等品のスケールアップと電磁制御化	
		倣い機構	球面座等で構成		
6	アライメント機構	方 式	2 視野顕微鏡方式	真空チャンバ内鏡筒	
		位置決め精度	1 μm 以下		
7	FAB の取付	均等照射面積	10 mm□	F-0 機同等品使用	
		そ の 他	照射時 Ar ガス導入		

3.2.2 ドナー基板のレイアウト

ドナー基板と作製する構造体のサイズアップ、および接合プロセスの自動化に伴い、ドナー基板を再設計した。今回 F-1 機のために用意したテストパターン群 (TEG: Test Element Group) は TEG3 と呼ばれ、F-0 機用の TEG1 および TEG2 を更新したものである。TEG3 の要求仕様を以下にまとめる。

- i. 6 インチウエハ用であること
- ii. アライメント用のマークがあること
- iii. 接合プロセスのクロスチェックが可能となるように、F-0 機 (5 インチウエハ

- の4分割基板を使用)でも使えるレイアウトにすること
- iv. 過去の TEG 内のデータをできるだけ利用し、またバグを修正すること
- v. 自動連続積層のプログラミングが容易になるよう、セル配置を示すデータテーブルを Microsoft Excel (以下エクセル) 形式にすること
- vi. マスク自身の精度を測定できるように、座標測定用マークを配すること

(1)アライメントマーク

F-1 機のアライメントの目的は、ドナー基板座標系におけるセル座標(x, y)すなわち設計位置を、ステージ座標系におけるスタンプ位置座標(X, Y)すなわち加工位置に変換することである。後述するアライメント顕微鏡の配置および座標変換に対応して、Fig. 3-3 に示すアライメントマーク A1~A5 を配置した。A1 は長さ 600 μm の十字マークで、低倍率の顕微鏡で観察しθステージの粗調整に用いる。A2~A4 は長さ 60 μm の十字マークで、高倍率の

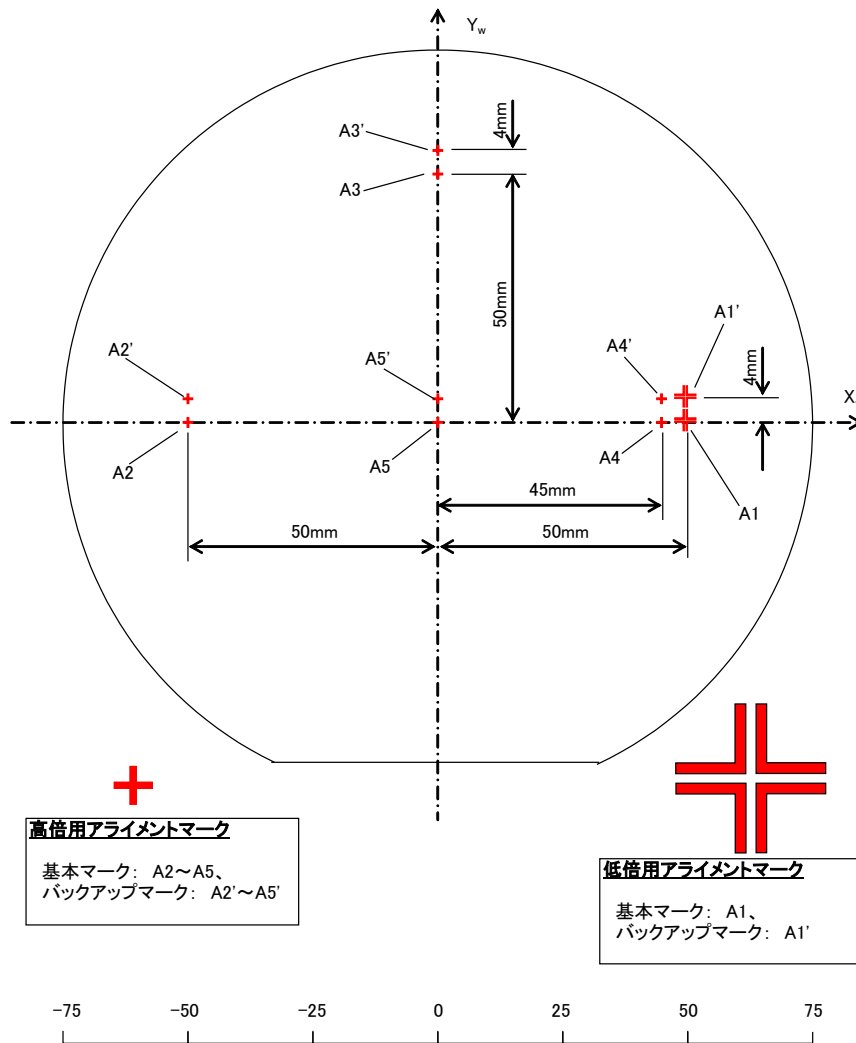


Fig. 3-3 Layout of alignment marks

顕微鏡で観察し精密なアライメントに用いる。フォトリソグラフィのトラブルなどによりこれらのマークが欠損するとそのドナー基板は使用不能となるため、バックアップとして予備のセット（A1'~A5'）を用意している。

(2) レイアウト詳細

以下に TEG3 のフォトマスクのプロット図を示してレイアウトを説明する。Fig. 3-4 は全体図であるが、様々な色でレイヤの異なる構造体パターンを描画している。細かなパターンはパソコン画面への描画が省略されるので（描画速度改善のため）、オレンジ色の枠だけ表示されている所もあるが、実際にはその枠の中に細かなパターンが含まれている。また緑色の輪郭線はメモ用の線であり実際にはマスク上に描画されない。全体レイアウトは、F-0 機でも使えるように 10 mm 幅のカッティング帯により 4 つの象限に分かれている。

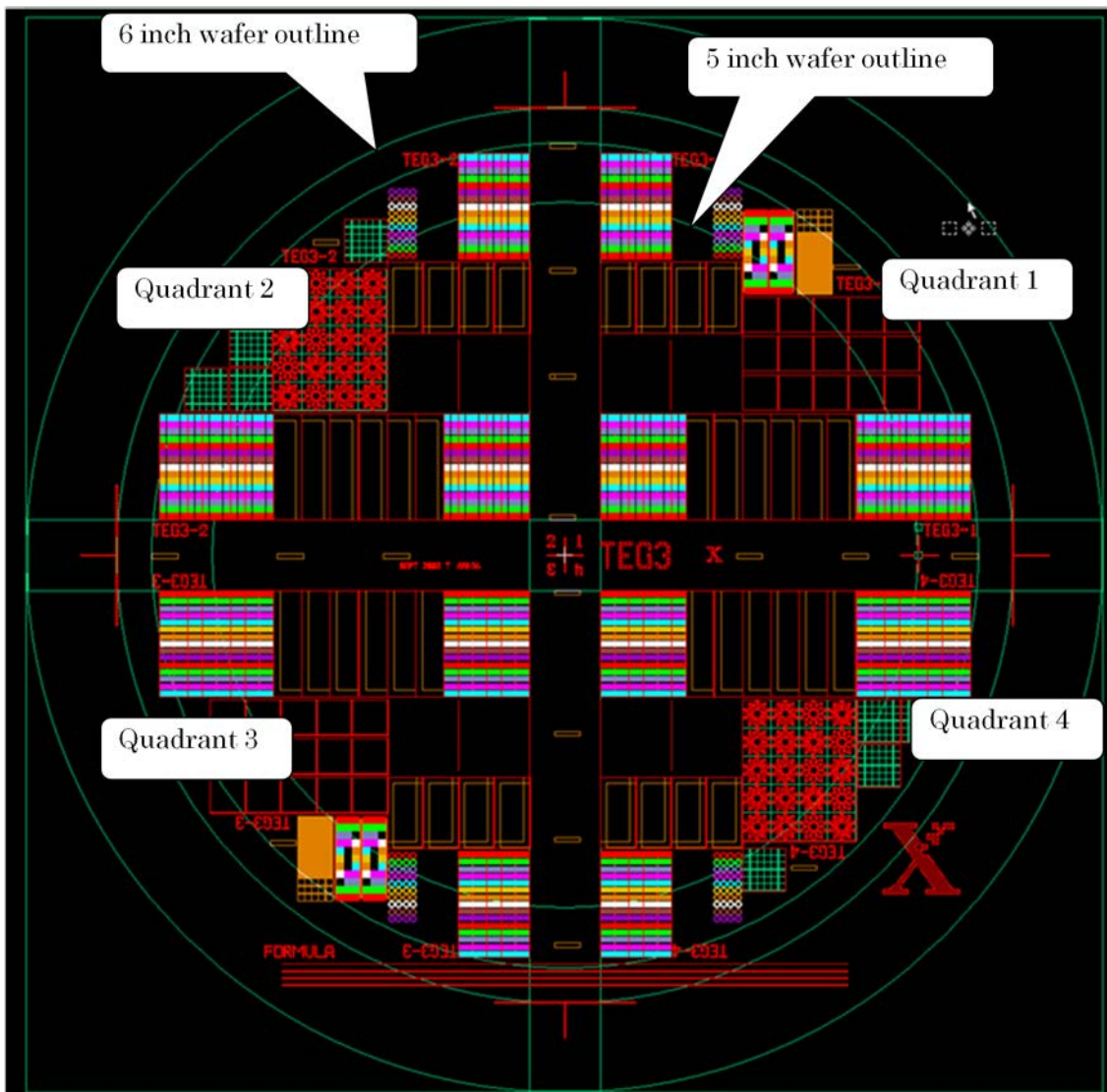


Fig. 3-4 Overview of TEG3

Fig. 3-5 はアライメントマーク A1 と A4 付近の拡大図である。Fig. 3-6 はパターンの例で、1 mm 角のセルとこれが 5×5 に配置されたアレイである。色の違いはレイヤ（積層の層番号）であり、最大 25 レイヤからなる。したがってこの例は、25 層分のセルが 1 セットになったアレイ「1C25」である。セルは 1 回の接合転写の単位であり、TEG3 では 1 mm 角と 5 mm 角の 2 種類のセルがある。アレイひと固まりが連続的に積層される単位となる。

Fig. 3-7 はセルの詳細図であり、1 mm 角のセル 10 層分の「1C10」というアレイの拡大図である。第 1 層は赤で示され、1 mm 角内に複数の構造体の断面パターンが配置されている。その上隣には緑で示された第 2 層のパターンが配置されている。セル 1 とセル 2 のピッチは 1 mm なので、セル 1 をターゲット基板に積層転写した後、ドナー基板を 1 mm 移動させればセル 2 がターゲット基板の真下に来る。このアレイは 10 層のセットなので、サイズは 1×10 mm² である。このようなアレイが、ドナー基板上に複数配置されている。また 1 mm 角のセル内には、座標測定マークを配している。このマークは F-1 機では用いられないが、マスク寸法測定機などで座標を計測することによりマスクの精度が評価できる。

なお、上記プロット図ではレイヤの違いを色の違いで示したが、これは設計工程における便宜的なもので、実際のフォトマスク上ではすべての色が同じレイヤのパターンとして描画される。

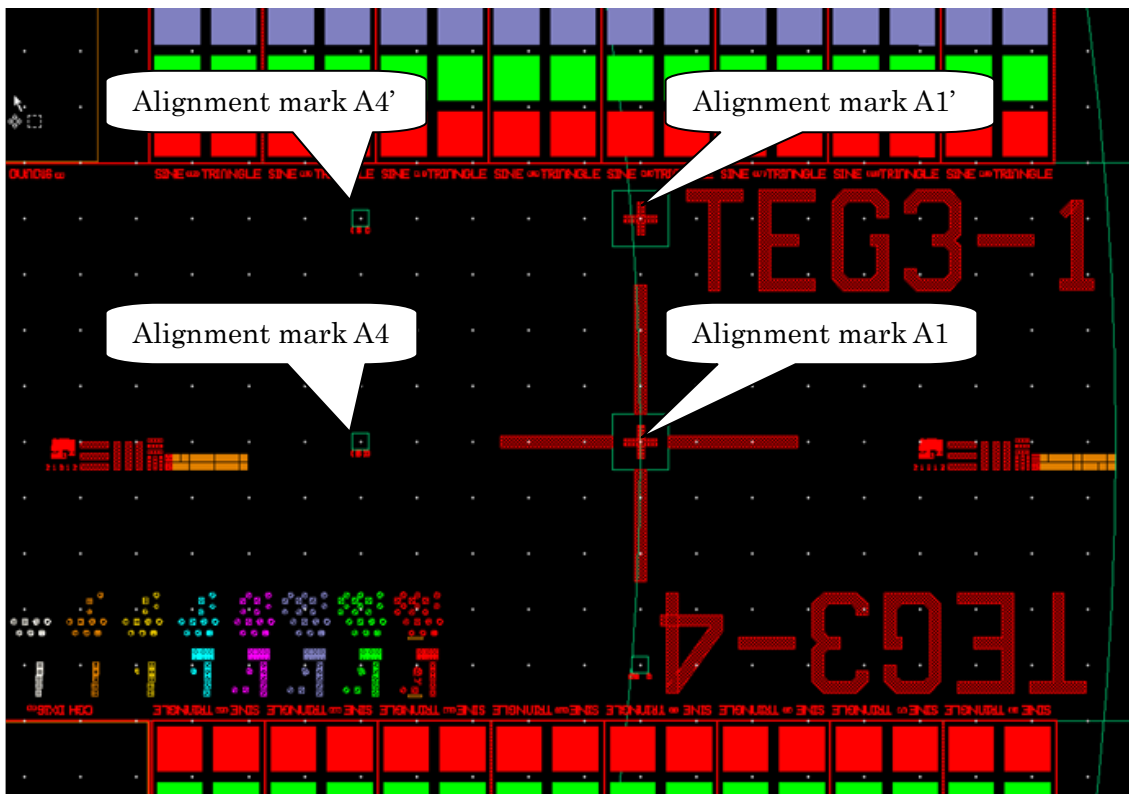


Fig. 3-5 Alignment mark A1 and A4 on TEG3

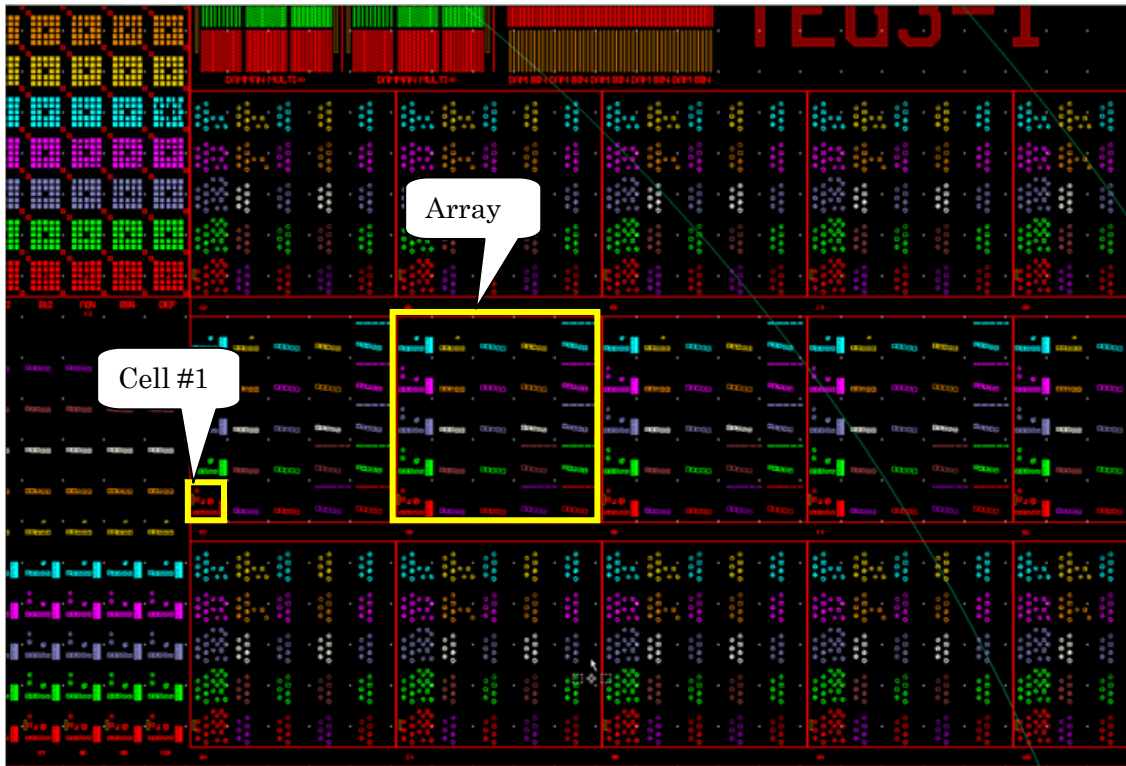


Fig. 3-6 Example of cells and arrays

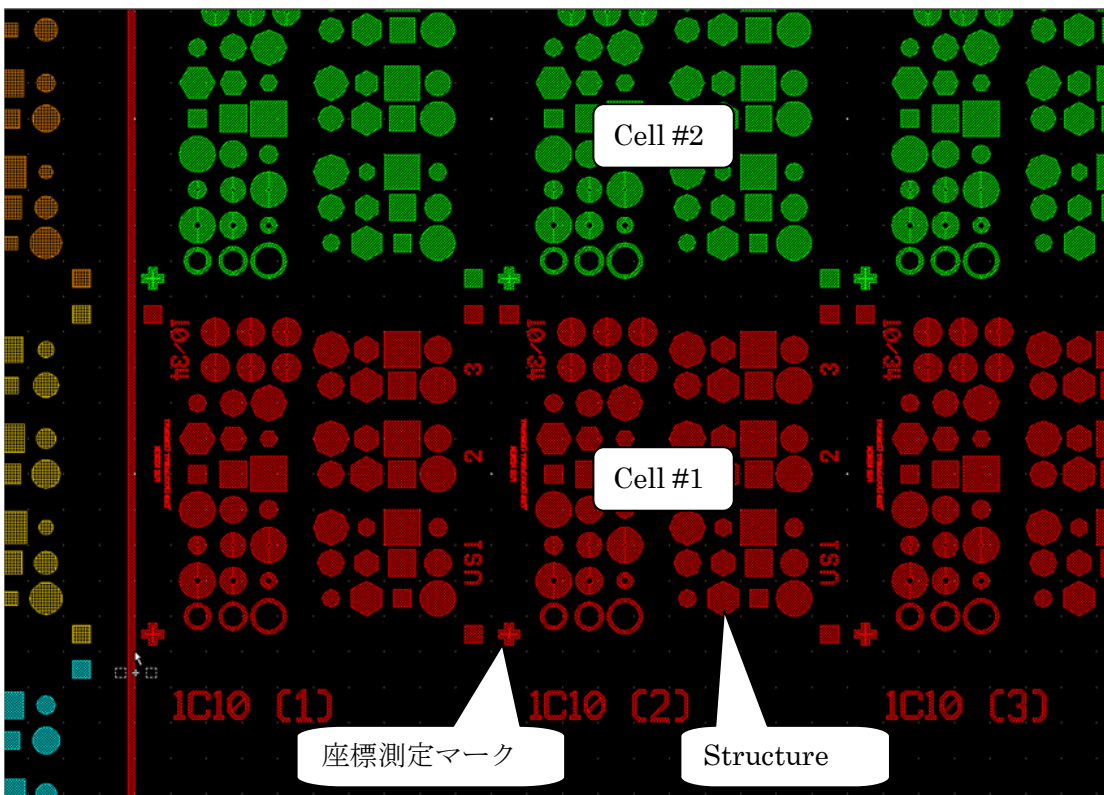


Fig. 3-7 Example of array "1C10"

(3) データテーブル

マスクのレイアウト終了後、ウェハ上に配した各アレイやセルの座標値をエクセルにまとめる。F-1機でこのエクセルファイルを読み込み、多層積層を自動的に実行するので、この表とフォトマスクデータが完全に一致している必要がある。

ウェハ、アレイ、セルの各座標系の定義を Fig. 3-8 に示す。この定義に基づき、各象限ごとに配置された複数のアレイ座標の一覧表、および各アレイ内の複数のセル座標をまとめたセル座標の一覧表が必要となる。これらを追補に記した。

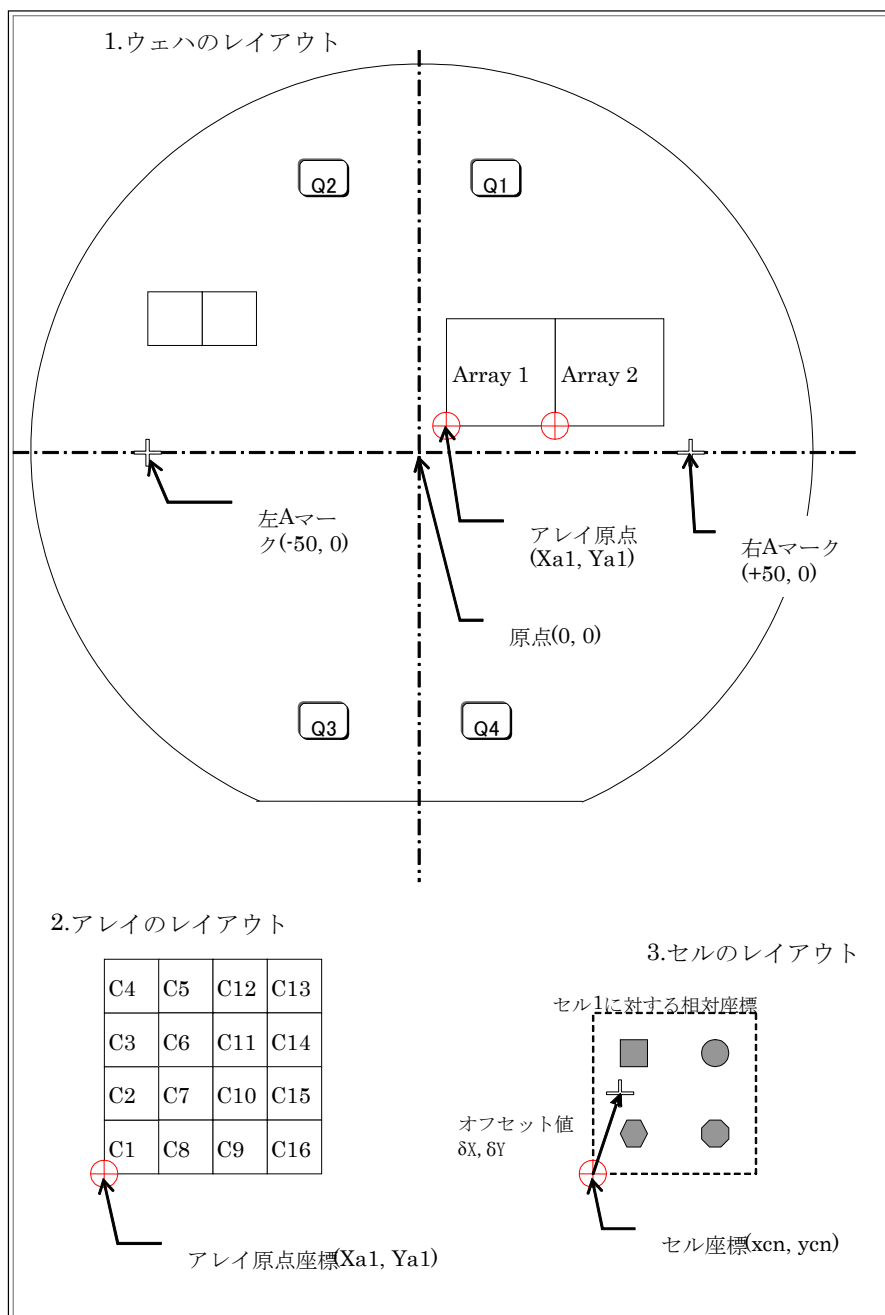


Fig. 3-8 Coordinate definition of wafer, array, and cell

3.2.3 アライメントと座標変換

アライメント動作はドナー基板が接合室に搬入された直後に以下のステップで行われる。

- i. アライメントマーク A1 を低倍率顕微鏡で観察し、 θ ステージの粗調整
- ii. アライメントマーク A2~A4 を高倍率顕微鏡で観察し、 θ ステージの微調整
- iii. アライメントマーク A2~A4 を高倍率顕微鏡で観察し、座標変換係数の決定

これらの工程は、必要に応じてオペレータの確認・支援を受けるが、基本的に自動的に行われる。以下では、 θ ステージの微調整終了後の iii の工程を詳しく説明する。

Fig. 3-9 はステージ座標系 (X, Y) およびウェハ座標系 (x, y) 間にスケール誤差 α および β 、回転誤差 θ_x および θ_y が存在する場合に、ウェハ上ベクトル \mathbf{W} がステージ上ベクトル \mathbf{S} にどのように変換されるかを示した図である。ここでスケール誤差 α は、ウェハ座標系の x 方向長さとステージ座標系の X 方向長さのスケール (尺度) 差を補正する係数で、任意の長さ x に対し、 $X=(1+\alpha)x$ である。 β は同様に y 方向の補正係数である。

ウェハ座標系の原点のステージ座標系における位置を (X_0, Y_0) とすると、ウェハ座標系上の (x, y) 点は、ステージ座標上の (X, Y) 点に次式を用いて変換される。

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} X \\ Y \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} (1+\alpha)\cos\theta_x & -(1+\beta)\sin\theta_y \\ (1+\alpha)\sin\theta_x & (1+\beta)\cos\theta_y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \dots\dots\dots(3-1) \\ &= \begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} a_1 & a_3 \\ a_2 & a_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \end{aligned}$$

上記 $X_0, Y_0, a_1 \sim a_4$ が求めるべき座標変換係数である。

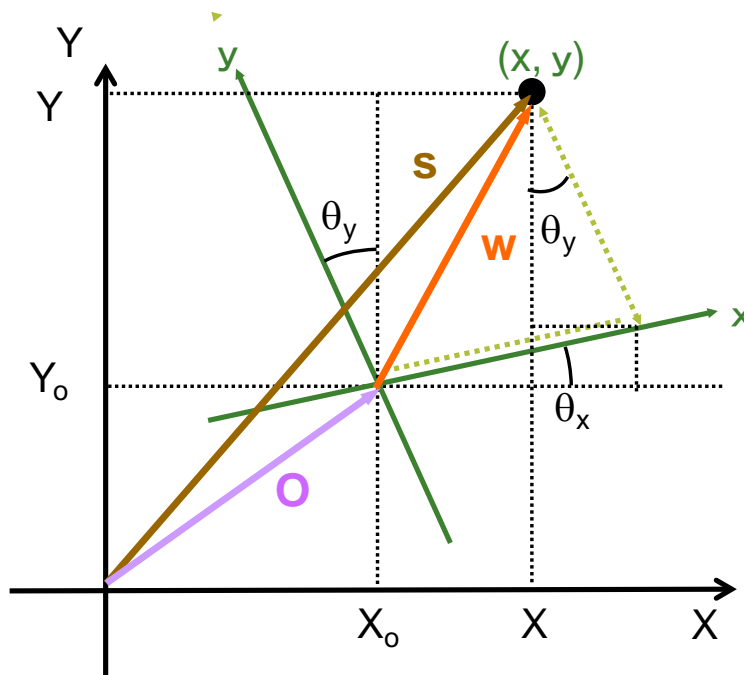


Fig. 3-9 Geometrical derivation of coordinate transformation

アライメントマーク A2~A4 のドナー基板座標系における設計座標は Fig. 3-3 により

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} x_{A2} \\ y_{A2} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} -r_2 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -50 \\ 0 \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} x_{A3} \\ y_{A3} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 0 \\ r_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 50 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (3-2) \\ \begin{bmatrix} x_{A4} \\ y_{A4} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} r_4 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 45 \\ 0 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

一方アライメントマーク A2~A4 のステージ座標系における読取座標を次式のように表す。

$$\begin{aligned} \mathbf{A2} &= \begin{bmatrix} X_{A2} \\ Y_{A2} \end{bmatrix} \\ \mathbf{A3} &= \begin{bmatrix} X_{A3} \\ Y_{A3} \end{bmatrix} \dots\dots\dots (3-3) \\ \mathbf{A4} &= \begin{bmatrix} X_{A4} \\ Y_{A4} \end{bmatrix} \end{aligned}$$

アライメントマーク A2 について式 (3-1) に代入すると、

$$\begin{bmatrix} X_{A2} \\ Y_{A2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} a_1 & a_3 \\ a_2 & a_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -r_2 \\ 0 \end{bmatrix}$$

と座標変換される。A3, A4 についても同様に座標変換されるので、

$$\begin{bmatrix} X_{A2} \\ Y_{A2} \\ X_{A3} \\ Y_{A3} \\ X_{A4} \\ Y_{A4} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -r_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -r_2 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & r_3 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & r_3 \\ 1 & 0 & r_4 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & r_4 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ a_4 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (3-4)$$

と表すことができる。したがって、

$$\begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ a_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -r_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -r_2 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & r_3 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & r_3 \\ 1 & 0 & r_4 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & r_4 & 0 & 0 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} X_{A2} \\ Y_{A2} \\ X_{A3} \\ Y_{A3} \\ X_{A4} \\ Y_{A4} \end{bmatrix} \dots\dots\dots (3-5)$$

により、式 (3-1) の座標変換係数が求まる。

例えば、アライメントマーク A2~A4 のステージ座標系における読取座標が、設計座標

から 1 μm ずれている場合，式 (3-5) より変換係数は，

$$\begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ a_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -50 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -50 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 50 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 50 \\ 1 & 0 & 45 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 45 & 0 & 0 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} -50.001 \\ 0.001 \\ -0.001 \\ 49.999 \\ 45.001 \\ 0.001 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.0000526 \\ 0.001 \\ 1.0000211 \\ 0. \\ -0.0000211 \\ 0.99996 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (3-6)$$

が得られる。この時，

$$\theta_x = \tan^{-1}(a_2 / a_1) = 0$$

$$\theta_y = \tan^{-1}(a_3 / a_4) = -2.1 \times 10^{-5} \text{ rad}$$

であり，

$$\alpha = a_1 / \cos \theta_x - 1 = 0$$

$$\beta = a_4 / \cos \theta_y - 1 = -4.0 \times 10^{-5}$$

となる。

この例では，たまたま $\theta_x = \alpha = 0$ となったが，通常これらのスケーリング誤差や回転誤差は 10^{-5} 位の値をとる。また (X_0, Y_0) の値はドナー基板作製時の露光位置や自動搬送の位置決めにより変わるが，数十μm から数 mm の範囲となる。

3.3 各部の仕様と性能

本節では、F-1 機について基本構成要素の要求仕様とそれを満たす部材、およびその単体での性能評価結果について説明する。

3.3.1 全体構成

F-1 機の外観を Fig. 3-10 に示す。これは 3.2.1 節で述べた仕様に基づき Fig. 3-2 で示した装置構想図をほぼ忠実に具現化したものである。本機は写真右側の装置本体および左側の制御盤からなる。また装置本体の透視図を Fig. 3-11 に示す。

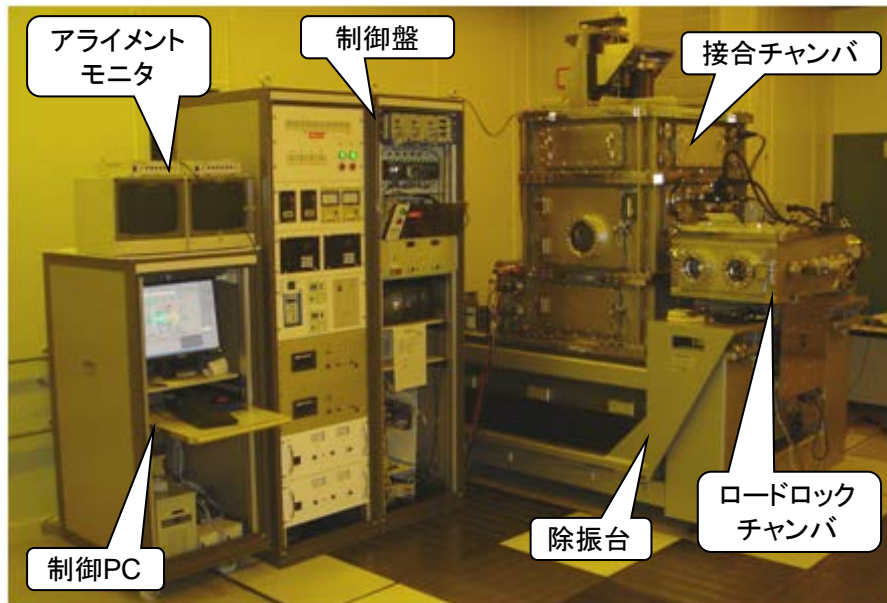


Fig. 3-10 Exterior view of F-1 machine

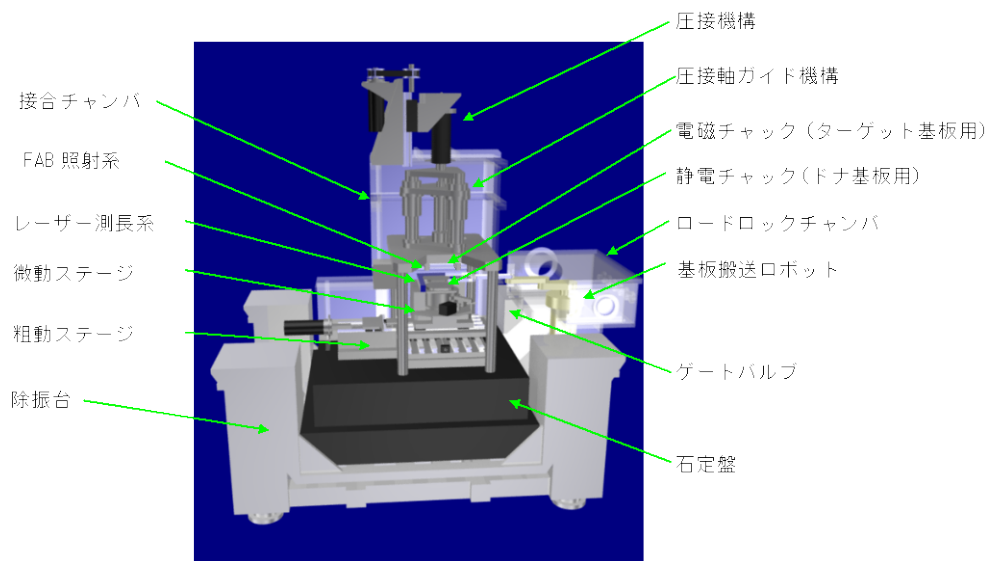


Fig. 3-11 Perspective view of the machine

3.3.2 真空チャンバ

F-0 機はチャンバ構成をバッチ式とし、これをターボ分子ポンプ (TMP) で排気することで到達圧力は終夜排気後 10^{-5} Pa 台を得た。F-1 機ではさらなる高真空領域を目標にチャンバ構成を Fig. 3-2 に示したロードロック式とし、接合を行うプロセスチャンバは TMP で常時排気することとし、到達圧力 10^{-6} Pa 台を目指した。

プロセスチャンバの真空排気系統図を Fig. 3-12 に示す。主排気ポンプは排気速度 2,300 L/s の TMP であり、このフォアラインを小型の TMP およびロータリポンプで排気する構成である。この構成で、 5.46×10^{-6} Pa を得た。

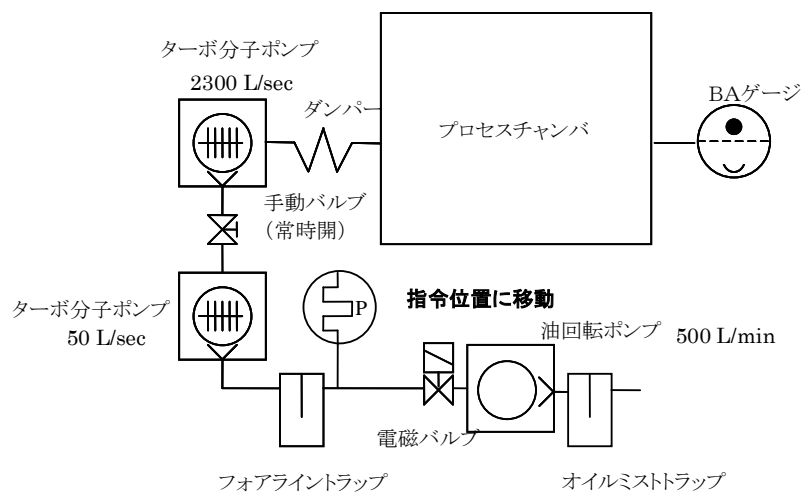


Fig. 3-12 Vacuum system of the process chamber

3.3.3 X-Y-θ ステージ

F-1 機において最も重要な構成要素はX-Y-θステージである。本ステージは、高精度かつ大ストローク（200 mm）、高耐荷重、高真空対応といった両立し難い性能を兼ね備えていることを特徴としている。本要求を実現させるための装置構成として、Fig. 3-13 に示す粗・微動連動制御を適用した位置決めシステムを採用した。高剛性、大ストロークといった優れた性能を持ちながらも、精度が粗い粗動ステージの上に、小ストロークながら高精度な微動ステージを載せた、いわゆる親子亀構成である。制御対象の位置を次節で述べるレーザ干渉測長器によって常にモニタリングしながら、ステージ位置指令に対するレーザ干渉測長器変位信号の偏差分だけ微動ステージを駆動する[1]。すなわち、レーザ干渉測長器の座標計測値をステージ位置座標の正とする。微動ステージは、案内にヒンジばね（弾性案内）、アクチュエータに圧電素子を用い、高精度位置決め性と高剛性を実現している。更に、荷重 1 ton が印加されることから、あらゆる角度から応力・変形解析を実施し、また高真空対応を実現するために材質の見直しとして低ガス放出材の選定・採用、これらすべてを考慮しながら位置決めステージの設計を行った。総合的な位置決め精度の目標を 50 nm とした。

粗動 X-Y ステージの仕様を Table 3-3 に、微動 X-Y ステージの仕様を Table 3-4 に、θステージの仕様を Table 3-5 にそれぞれ示す。また微動 X-Y ステージの写真を Fig. 3-14 に、プロセスチャンバ内において粗動 X-Y ステージ上に微動 X-Y ステージを取り付けた状態の写真を Fig. 3-15 に、それぞれ示す。

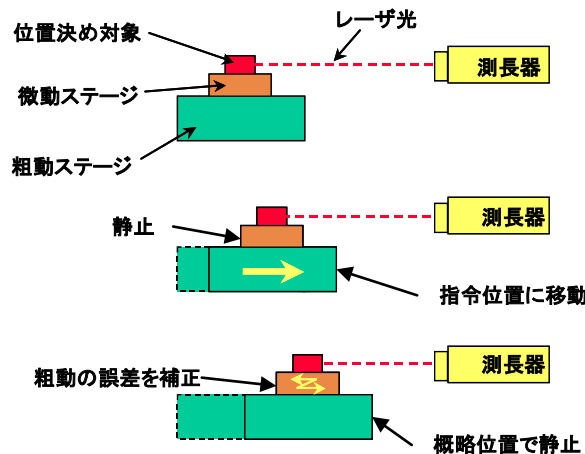


Fig. 3-13 Fine stage on coarse stage

Table 3-3 Specifications of coarse X-Y stage

項目		仕様
ストローク	X 軸	200 mm
	Y 軸	200 mm
最高速度		50 mm/s
位置決め分解能		0.1 μm
繰返し位置決め精度		$\pm 3 \mu\text{m}$
ピッチング		4 arcsec
ヨーイング		4 arcsec
XY 軸直角度		5 μm
耐荷重		1,000 kgf

Table 3-4 Specifications of fine X-Y stage

項目		仕様
ストローク	X 軸	20 μm
	Y 軸	20 μm
応答周波数		100 Hz
位置決め分解能		5 nm
アクチュエータ		ピエゾ方式
駆動		X : 1 軸 Y : 2 軸 (ヨーイング補正)
案内機構		弾性ばね (切り欠きヒンジ)
耐荷重		1,000 kgf

Table 3-5 Specifications of θ stage

項目	仕様
ストローク	$\pm 5^\circ$
最高速度	0.28 $^\circ/\text{s}$ (1 mm/s)
位置決め分解能	0.1 arcsec (0.1 μm)
繰返し位置決め精度	± 1 arcsec ($\pm 1 \mu\text{m}$)
軸受軸方向剛性	670 N/ μm
静止時耐荷重	1,000 kgf

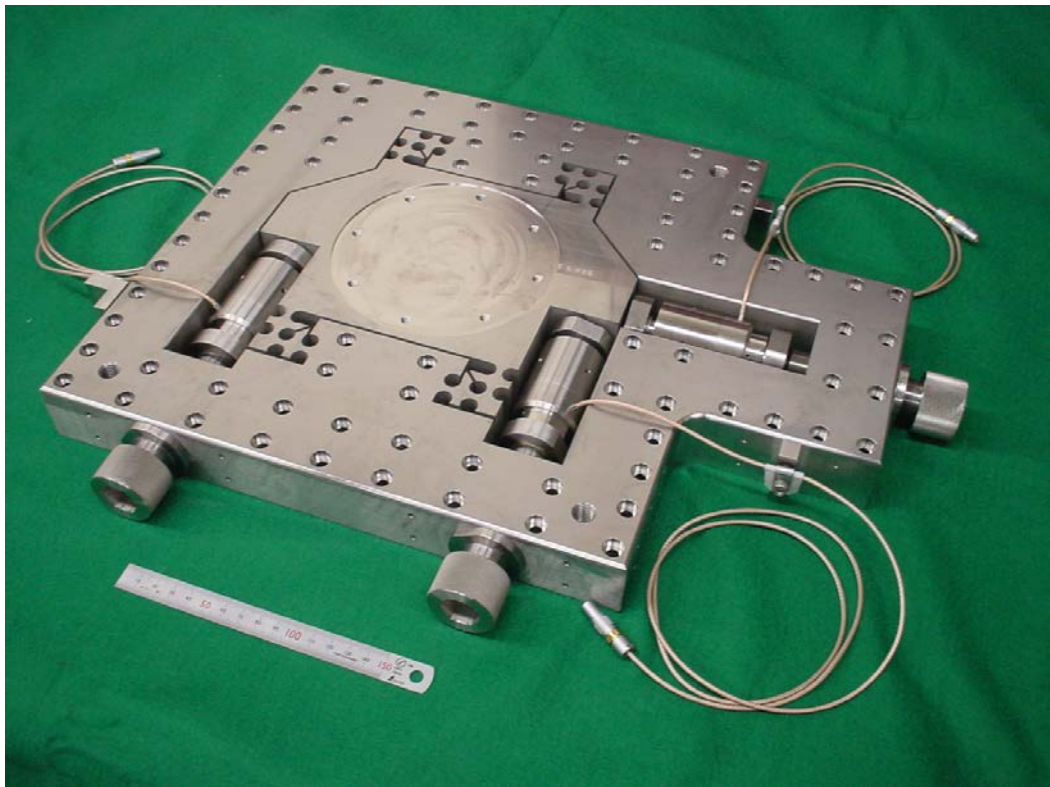


Fig. 3-14 Fine X-Y stage



Fig. 3-15 Fine X-Y stage on Coarse X-Y stage in process chamber

次に粗微動連動制御 X-Y ステージの位置決め繰返し性を評価するため、ステージ指令値 10 mm、速度 5 mm/s、真空度 10^{-6} Pa 台の雰囲気、50 回のステップ応答駆動させた。ステージ位置の計測は装置に常設のレーザ干渉測長器の信号を用いた。Fig. 3-16 に X, Y 軸各々について、位置決め誤差発生頻度の分布をヒストグラム表示したものを示す。これより、繰返し位置決め精度は、平均値周りのばらつきの程度を表す指数 3σ (3 標準偏差) で表せ、ステージ X, Y 軸はそれぞれ、 $3\sigma_x = 26.2$ nm、 $3\sigma_y = 25.7$ nm となり (二乗和の平方根は 37 nm)、要求仕様の 50 nm を達成した。

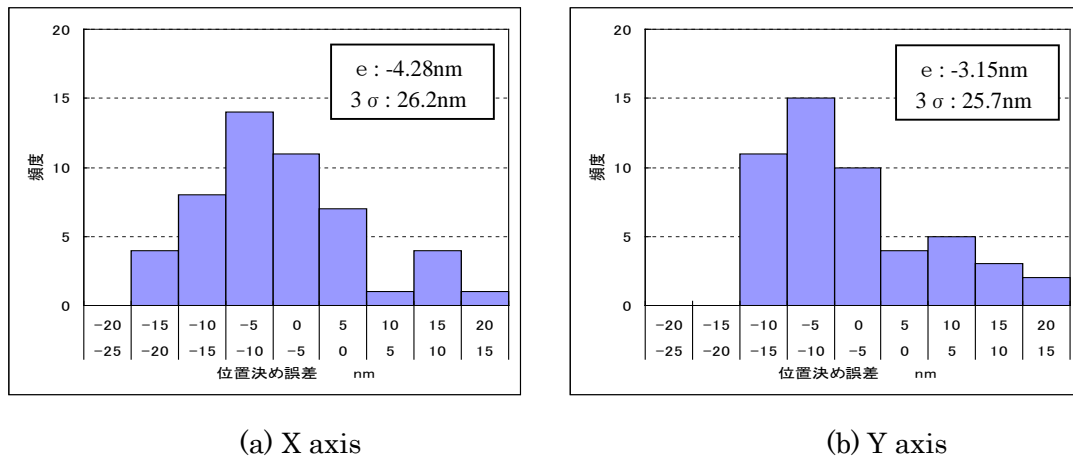


Fig. 3-16 Positioning error of X-Y stage

3.3.4 レーザ干渉測長器

レーザ干渉測長器は、ドナー基板を移動させる X-Y- θ ステージの座標基準となるものであり、レーザ測長器と L 型ミラーから構成される。前述のように粗微動連動制御による X-Y ステージは、この計測値とした指令値との偏差を最小化するように動作する。装置の構成は Fig. 3-17 に示すように、X 軸について 1 点、Y 軸について異なる 2 点を測定し、X, Y 座標値の取得とヨーイング補正を実施する構成とした。

また、測長の基準となるミラーは、X-Y 軸一体の L 型ミラーを採用したので、このミラーの直角度が本ステージ系の直角度を定めることになる。その値は、検査成績書の数値として 0.1 arcsec が得られている。これは 200 mm の距離に対して約 0.1 μ m の誤差となる。

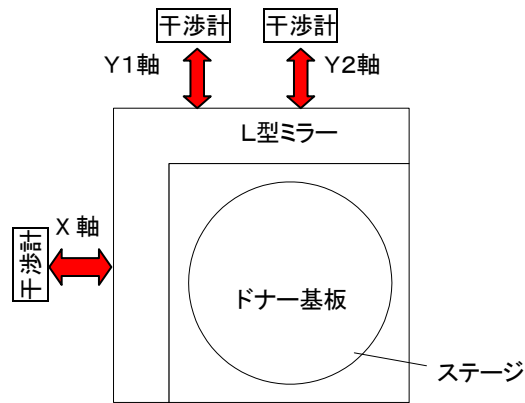
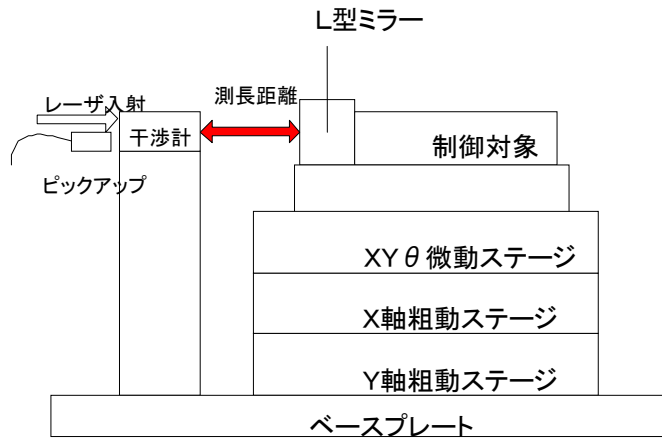
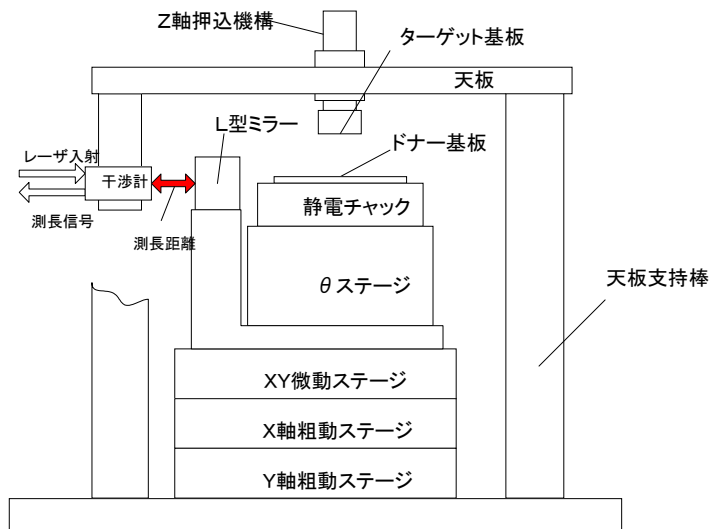


Fig. 3-17 Configuration of laser interferometer



(a) Normal manufacturing machine



(b) F-1 machine

Fig. 3-18 Position of the laser interferometer

またレーザ干渉測長器の取り付け位置にも FORMULA 技術固有の配慮をした。通常の加工装置のステージ系と測長系の位置関係は Fig. 3-18 (a) のようになっており、装置のベースプレートから両者が立ち上がる構造となる。しかしながら FORMULA 技術においては、ターゲット基板を保持する Z 軸とドナー基板を保持する X-Y ステージの相対位置関係が重要であることから、Z 軸が取り付けられた天板を基準にするのが適切との考えから、Fig. 3-18 (b) のようにレーザ干渉測長器をこの天板に取り付ける構成とした。

3.3.5 Z ステージ

圧接荷重が最大 1 ton に増加したことから、F-0 機よりも Z ステージの剛性を大幅に高める必要がある。このため、F-0 機に採用されたクロスローラタイプのリニアガイドと同じシリーズでより剛性の高いもの（シャフト径の拡大とガイド部の長尺化）を選択し（Table 3-6）、さらにこれを 3 本並列に並べることで全体の高剛性化を図った。加工精度に影響する水平方向の繰返し位置決め精度は、総合誤差を 100 nm としたので、その 1/10 である 10 nm を目標とした。また圧接荷重のモニタは、F-0 機ではチャンバ外にロードセルを設置して計測したが、F-1 機ではチャンバ内にロードセルを設置した。これは、F-1 機では超高真空化のため駆動軸導入部にベローズ継ぎ手を採用したが、Z ステージの移動に伴いベローズにバネ反力が生じ、これが正確な圧接荷重計測の誤差となるためである。

Z 軸の静剛性に関しては、第 2 章 Fig. 2-26 と同様の方法にて評価したところ、変位量は 0.1 μm 以下となり、改良後の F-0 機（同 0.23 μm ）よりも剛性が改善されたことが確認された。次に Z 軸昇降時の繰返し性として、下死点における Z 軸先端の水平方向変位を静電容量型変位計で計測した。本加工方式では、Z 軸のストローク全体にわたる運動の直線性は重要ではなく、ターゲット基板がドナー基板にタッチダウンする位置での XY 面内座標の繰返し性が加工精度に影響を及ぼすからである。繰返し性の評価は、定盤上において Z 軸フルストローク（150 mm）を 50 回行い、その都度 1 方向の位置を計測し、その標準偏差 σ を系の持つ精度として定義した。その結果、 σ は 22 nm となった。これは目標の 10 nm に対して未達であるが、F-1 機に組み込んだ後、再調整と再評価を行うこととした。

Table 3-6 Specifications of Z stage

項目	仕様
耐用真空度	10 ⁻⁶ Pa 台
耐用温度範囲	0~40 °C
構成部材材質	オールメタル（樹脂部品不可）
ストローク	150 mm
軸直交方向静剛性	45 kgf/ μm
繰返し位置決め精度（水平方向）	10 nm（標準偏差 σ で評価）

3.3.6 静電チャック

ドナー基板を保持する静電チャックは、F-0 機で実績のあるセラミック製静電チャックを採用した。変更点は、ドナー基板のウェハサイズ変更に伴い、直径を6インチ（152 mm）にした点である。この仕様を Table 3-7 に示す。

Table 3-7 Specifications of electrostatic chuck

項目	仕様
静電吸着力	1.5 kgf/cm ² 以上（印加電圧±400V）
耐荷重	100 MPa（1 ton/cm ² ）
平坦度	1 μm 以下/φ 150 mm

3.3.7 FAB 照射装置

FAB 照射装置も F-0 機で実績のある Ion Tech 社の FAB110/1 型を利用した。デバイスサイズが最大 10 mm 角に拡大されたが、この FAB で十分に照射可能である。F-0 機におけるこれまでの照射条件が継承可能なことも大きな要因である。仕様を Table 3-8 に示す。

F-1 機では接合プロセスの自動化に伴い、照射シーケンスの完全自動化を行った。これまで F-0 機においてマニュアルで行っていたアルゴンガス導入～FAB 点火（高電圧 ON）～ガス流量調整（手動ニードルバルブ）～印加電圧設定等の操作は煩雑であり、流量や圧力の調整には勘と経験が必要であった。また調整に失敗すると、しばしば放電が停止することがあった。このシーケンスを自動化することで、安定な点火動作、および放電停止後の迅速な復帰が図られる。これにより、接合プロセスの効率的な運転と FAB の照射条件（照射時間、電流、電圧）を精度よく制御することを可能とし、デバイスの生産性向上と常温接合条件の繰返し性・信頼性を高めることができる。

Table 3-8 Specifications of FAB source

項目	仕様
ビーム出射口	5.3×23.3 mm
出力ビーム電流	30 mA (max)
ビームイオン濃度	< 1%（他は中性原子ビーム）
印加電圧	0.8～2.5 kV
投入電力	最大 100 W
動作圧力範囲	10 ⁻² ～10 ⁻¹ Pa（10 ⁻⁴ ～10 ⁻³ Torr）
ガス流量	4 SCCM
冷却水流量	2 L/min (at 20 °C)
ソース外寸	45×80×40 mm ³
制御電源	1 ch 駆動タイプ（×2）

FAB 照射装置の性能は、Si ウェハ上の熱酸化膜 SiO_2 のエッチングレートを測定することにより確認した。すなわち、ターゲット基板およびドナー基板として熱酸化膜が約 100 nm 形成された Si ウェハを用意し、これを装置内に搬送し、FAB を 5 min 照射する。FAB 照射前後の酸化膜の膜厚を光学的膜厚測定装置（ナノスペック）で計測し、その差を算出し FAB 照射時間で割るとエッチングレートが求まる。その結果、

ターゲット基板側：0.84 nm/min

ドナー基板側：0.74 nm/min

との値が得られ、F-0 機と同様のエッチングレートが確認できた。

3.3.8 アライメント顕微鏡

F-0 機においてアライメント顕微鏡は、ドナー基板上のセル配列方向と X-Y ステージの移動方向を一致させるために、ドナー基板上のパターン観察手段として用いられていた。

F-1 機のアライメントの目的は、これに加えて 3.2.3 節で述べたように、ドナー基板座標系におけるセル座標 (x, y) すなわち設計位置をステージ座標系におけるスタンプ位置座標 (X, Y) すなわち加工位置に変換することであり、F-1 機にとって非常に重要な役割を有する。このため、顕微鏡は真空対応とし、常時プロセスチャンバ内に設置される点が、F-0 機用顕微鏡と異なる。

アライメントの方法は、Fig. 3-3 に示したアライメントマークを光学顕微鏡により観察し、その画像から十字マークを認識し、その座標情報を取得する。アライメント用顕微鏡は低倍率と高倍率を組み合わせ、2 視野観察が可能な系とした。ウェハロード後、アライメントマーク A1 を低倍率顕微鏡で観察し、 θ ステージの粗調整を行う。その後、高倍率顕微鏡を用いて A2~A4 のアライメントマークを観察し θ ステージの微調整を行う。さらに高倍率顕微鏡を用い、A2~A4 のアライメントマークを観察し、画像処理によりそれぞれの十字マークの中心位置をアライメントマーク座標として取得する。アライメント用顕微鏡の構成図を Fig. 3-19 に、仕様を Table 3-9 にそれぞれ示す。

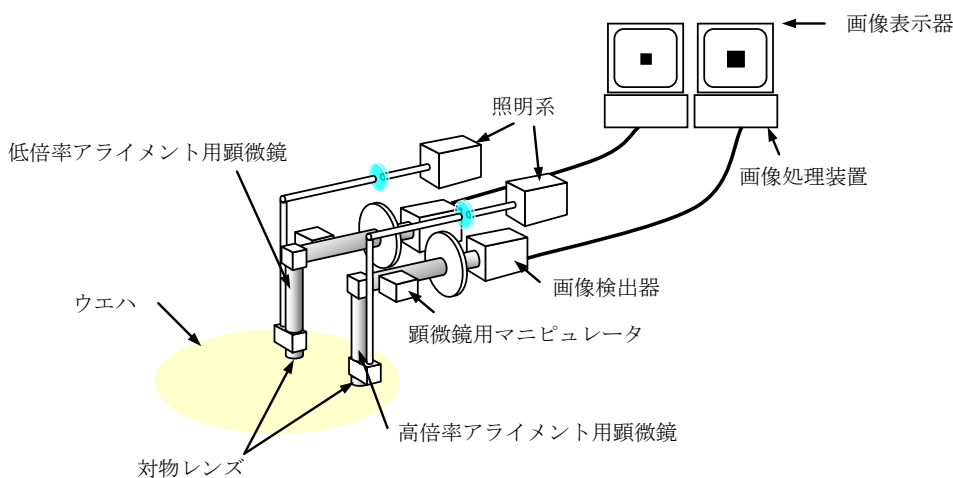


Fig. 3-19 Configuration of alignment microscope

Table 3-9 Specifications of alignment microscope

項目	構成	仕様
光学系	顕微鏡	形状：90° 光路変換による直角鏡筒 対物レンズ：×5（低倍率）及び×20（高倍率） 使用環境：10 ⁻⁶ Pa 台 作動距離：11 mm 以上 照明方式：同軸落射
	画像検出器	1/3"白黒 CCD
	照明装置	ライトガイド式照明装置
位置及び焦点調整系		駆動軸数：z軸のみの1軸（低倍率側） x, y, z軸の計3軸（高倍率側） ステージ：真空対応直進キャリッジ ストローク：5 mm 分解能：2 μm
画像処理系	画像処理装置	画像表示：512×480×8bit I/O：RS232C
	電子ライン発生器	ライン数：垂直2本，水平2本
	モニタ	12"白黒

3.3.9 平行度調節機構

対向するドナー基板とターゲット基板の接合面間の平行度をサブミクロン台にする構成は、基本的に F-0 機の構成を踏襲した。すなわち接合を行う上下ステージはチャンバ等の機械精度の影響を受けないように、チャンバ内の高精度やぐらに固定する。ただし圧接荷重が最大 1 ton に増加したことと、基板搬送機構の自動化に伴い、以下の変更を加えた。

倣い機構は改造後の F-0 機（第 2 章 Fig. 2-29）と同様球座を用いたもので、装置組み立て後静電チャック表面に上部ステージ表面を押付け、球面を固定する。圧接荷重の増加に合わせ、球座の大径化および球座クランプの面接触化（F-0 機では線接触）により剛性を向上させた。F-0 機の上部ステージはターゲット基板ホルダをスライド挿入後ボールプランジヤで固定していたが、F-1 機では自動化に伴い、ターゲット基板を固定した磁性基板ホルダをマグネットチャックに吸着させる方式に変更した。

3.3.10 基板搬送系

真空チャンバをロードロック式に変更したため、プロセスチャンバとローディングチャンバ間に基板の搬送が必要となる。しかも搬送すべきワークはサイズの異なる 2 種類で、6 インチ Si ウェハのドナー基板と、ターゲット基板を固定した磁性基板ホルダである。

このため、真空対応のウェハ搬送ロボットを導入した。これは回転 2 軸、並進 1 軸（Z 軸）の自由度を持つ半導体プロセス用の標準品である。ドナー基板とターゲット基板ホルダを、ローディングチャンバの基板セットステーションからプロセスチャンバの静電チャック上およびマグネットチャック上までそれぞれ搬送する。ロボットアーム先端の基板把持フォークを専用仕様とすることで、2 種類のワークをハンドリングできるようにした。Fig. 3-20 に、ローディングチャンバ内の基板セットステーションおよび搬送ロボットを示す。これは基板セットのためローディングチャンバの蓋を開けた状態の写真で、手前側にドナ

一基板（左）とターゲット基板ホルダ（右），奥に搬送ロボットのフォークの一部が確認できる．2つのワークはそれぞれフェイスアップ（接合面が上）およびフェイスダウンの状態です。基板セットステーションに置かれ，ローディングチャンバが真空引きされた後，1つずつ順にプロセスチャンバに搬送される。

この基板搬送ロボットの導入により，ロードロック式の装置構成が完成された。

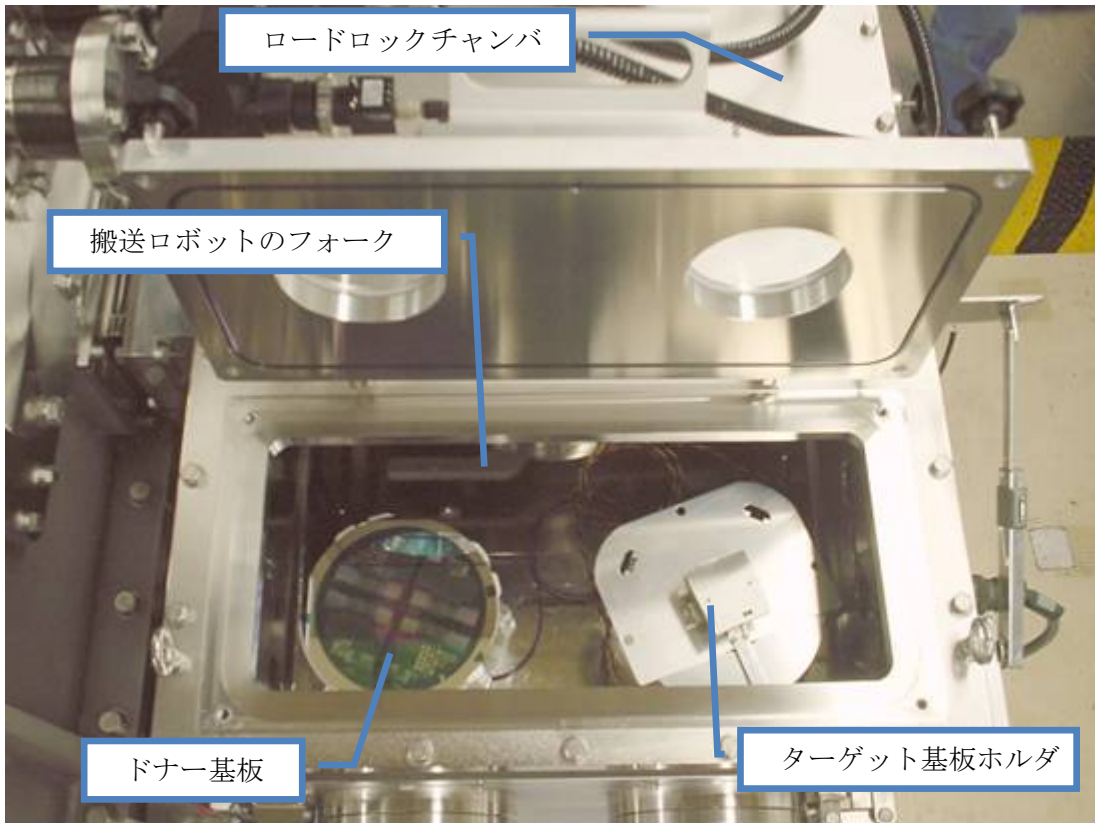


Fig. 3-20 Load-lock chamber and transport robot for the substrates

3.3.11 制御ソフトウェア

F-1機は，デバイスの作製プロセスのすべての工程の自動化を目指した．そのため，ローディングチャンバへの基板の出し入れを除く下記工程は，基本的にすべて自動である．

1. 装置の立ち上げ，初期化，立ち下げ
2. ローディングチャンバの真空排気
3. ローディングチャンバからプロセスチャンバへの基板搬入
4. ドナー基板のアライメント動作（オペレータのアシストあり）
5. 接合転写（位置決め，FAB照射，圧接，の繰返し）
6. プロセスチャンバからローディングチャンバへの基板搬出
7. ローディングチャンバの大気解放

特に工程 5 が自動化の主要な部分であり，FORMULA 技術固有の接合転写プロセスをドナー基板の位置決めを繰り返しながら行う工程である．この工程の詳細を Fig. 3-21 に示す．セルの座標情報は，3.2.2 節で示したドナー基板の情報に基づくもので，具体的には Table 3-10 および Table 3-11 のエクセルファイルを読み込む．この座標情報とアライメント工程で得られたアライメントマーク座標値から，式 (3-5) を用いてステージ座標系におけるスタンプ位置座標を算出する．FAB 照射条件や圧接条件は，Table 3-11 の各行に対応して別に用意された電圧，電流，時間等を定めたエクセルファイルから読み込まれる．これらの情報に基づき，所定積層数の接合転写が自動的に行われる．

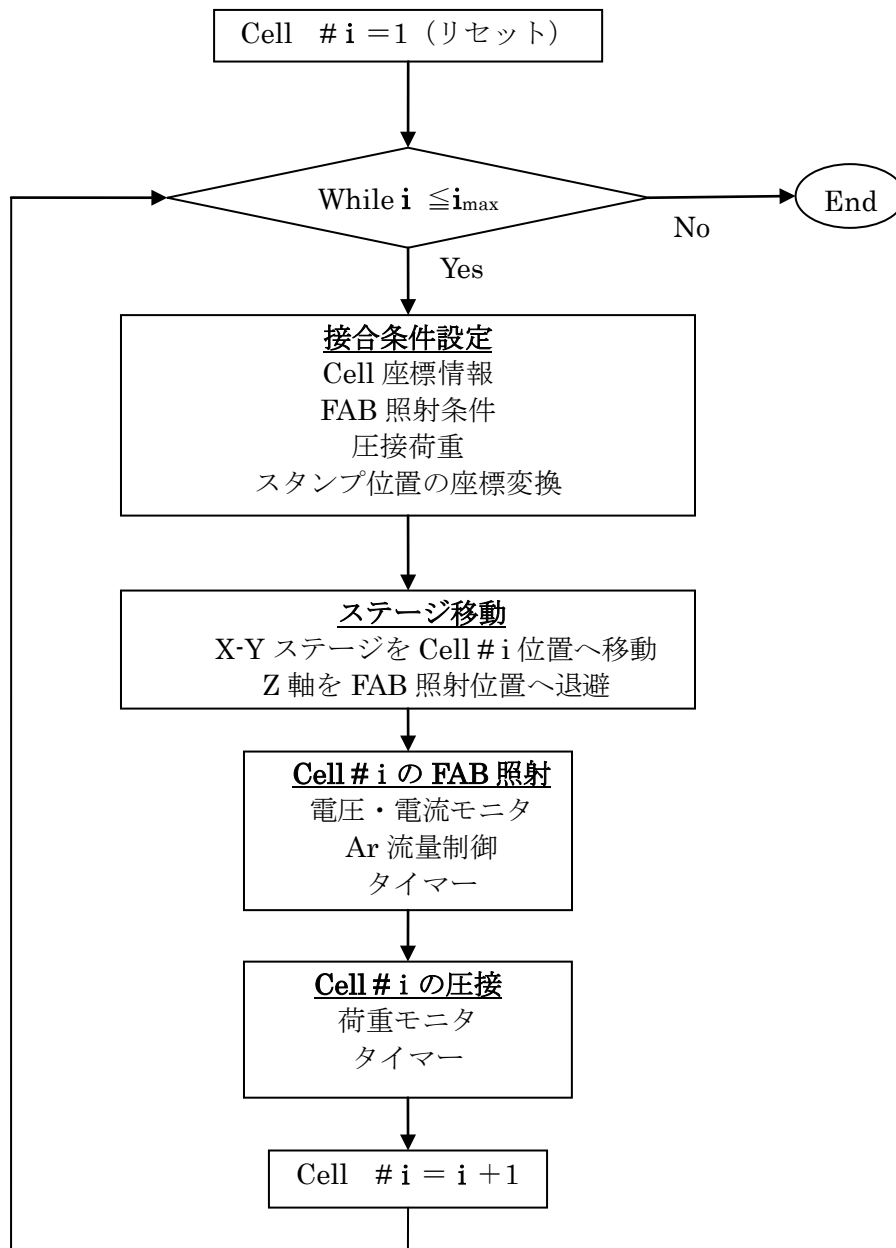


Fig. 3-21 Detailed sequence of lamination process

3.4 構造体作製結果

本節では、前述の F-1 機を用いて作製した各種構造体の結果について述べ、そこから抽出された課題について説明する。

3.4.1 多層積層の検証

F-1 機で最初を実施したのは、F-0 機の評価と同様に薄膜による多層積層の検証である。Fig. 3-22 は、1 層の膜厚が 170 nm の AlCu 合金製薄膜を 10 層積層したターゲット基板の SEM 写真である。1 mm 角のセル内に多数の構造体が作製されていることが確認できる。一方 Fig. 3-23 は積層後のドナー基板の顕微鏡写真であり、第 1 層と第 10 層の位置を示している。茶色に見える丸や矩形の領域が AlCu パターン転写後の離型層（ポリイミド）表面であり、2.7.1 節で示したようにポリイミドのエッチバックをしているためパターンと同一の形状のポリイミドが残って見える。各写真の周囲に見える白色パターンが、転写エリア外の AlCu パターンである。この例はピラミッド状構造体の作製であるので、第 10 層のパターンは第 1 層のパターンよりも小さいことが分かる。

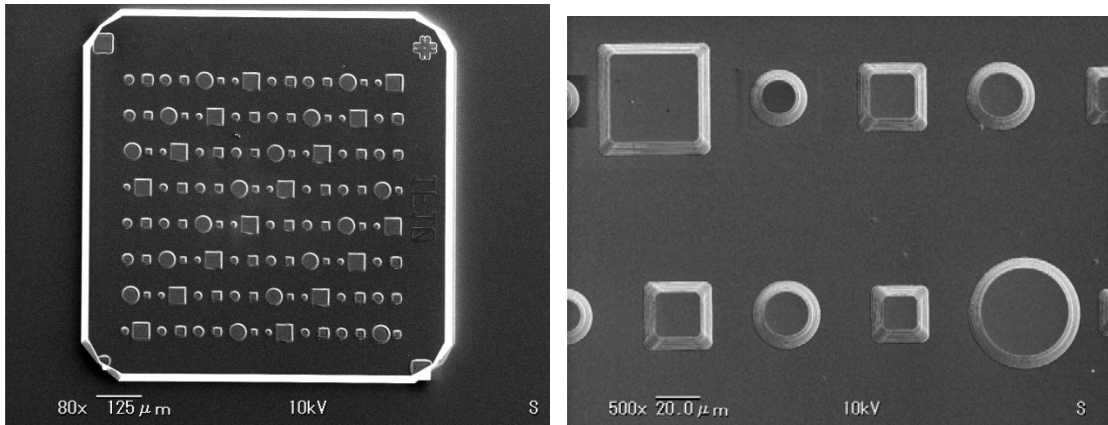
なお F-0 機の積層テストで用いたパターンは円形、矩形、六角形など多種類の幾何学パターンを配した TEG (Test Element Group) としたが、3.2.2 節で述べたように F-1 機用にドナー基板のレイアウトを変更したことから TEG を新たに設計し (TEG3)、その中にてオーバーレイ誤差が評価しやすい円形と矩形パターンのみを配したセルを主に積層している。

次に F-1 機の積層精度 = オーバーレイ誤差を評価した[2]。オーバーレイ誤差の評価には Fig. 3-24 (a) に示す矩形パターンの SEM 写真を用い、(b) のように各層の四辺に補助線（赤線）を引いて矩形パターンの中心座標を算出した（計測方法の詳細は第 4 章 4.2.2 節で述べる）。そして各層の中心座標の隣接レイヤ間のシフト量をオーバーレイ誤差とした。これを 4 つの矩形パターン (f4, e3, e4, f5) に対して実施し、プロットしたものが Fig. 3-25 である。これらのデータのばらつきは標準偏差で

$$\sigma_x = 92 \text{ nm}, \sigma_y = 40 \text{ nm}, \text{二乗和の平方根} = 100 \text{ nm}$$

となり ($n = 36$)、目標値を達成した。ただし Fig. 3-25 に見られるように、X 方向と Y 方向では傾向の違いが存在し、この誤差をもたらす要因も現時点では明らかでない。

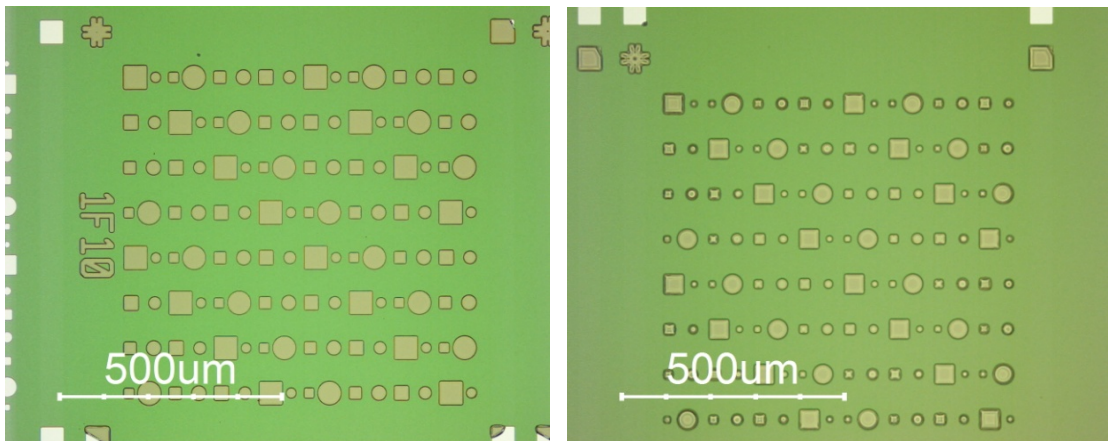
このオーバーレイ誤差は F-1 機における加工誤差であり、この加工誤差の究明が本論文の主題である。上記のようにオーバーレイ誤差の計測方法は煩雑であり、データ数を増やすことは容易でない。そこで新たな計測方法の開発を第 4 章で述べ、それを用いたオーバーレイ誤差の解析結果を第 5 章で述べることにする。



(a) Overview of the target substrate

(b) Close-up view of the structures

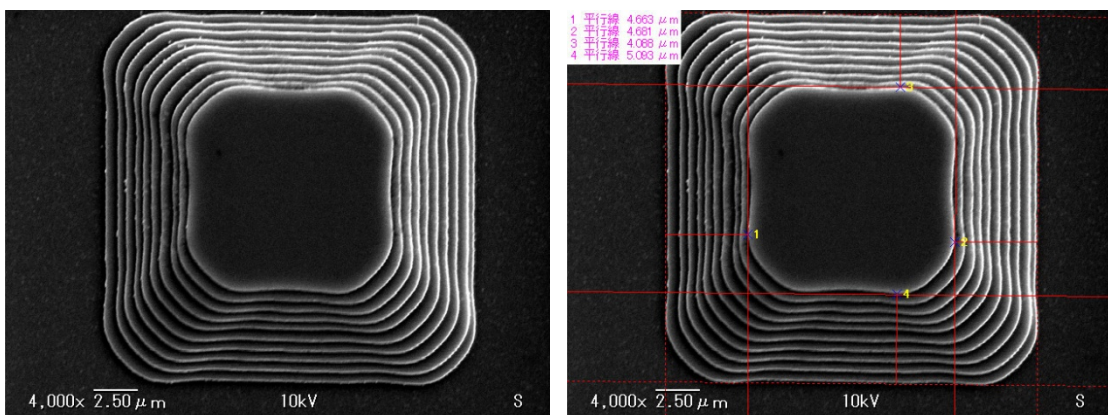
Fig. 3-22 SEM photograph of 10-layered structures



(a) Cell #1 (1st layer)

(b) Cell #10 (10th layer)

Fig. 3-23 Micrograph of the donor substrate after lamination



(a) Rectangle pattern for the evaluation

(b) Measurement of an overlay error

Fig. 3-24 Evaluation of the overlay error in F-1 machine

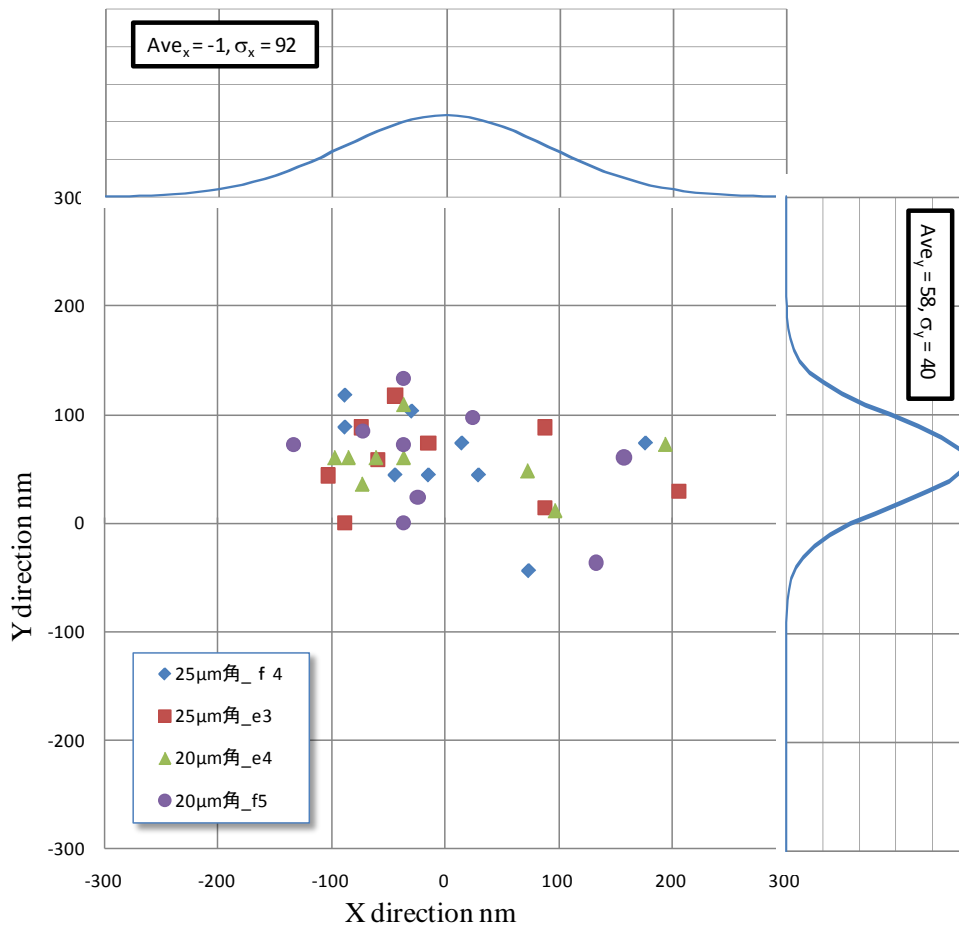


Fig. 3-25 Overlay error between adjacent layers

3.4.2 タクトタイム

構造体作製のタクトタイムを短縮するため、常温接合による接合転写プロセスを見直した。Fig. 3-26 は1層の接合転写にかかる時間を F-0 機のそれとともに比較したグラフであり、各工程ごとに分類したものである。F-0 機の当初の接合条件は、FAB 照射時間や圧接時間をそれぞれ 5 min と長めに設定していたが、これらを短縮しても接合転写が可能なことを実験的に確かめ、結果的にトータルの所要時間を約半分に短縮できた。さらに F-0 機で長時間を要していた FAB 照射条件の調整やステージ移動の時間を、F-1 機では自動化により短縮できるようになった。1 層あたりの所要時間は最終的に 4.7 min となり、目標の 5 min 以下を達成した。

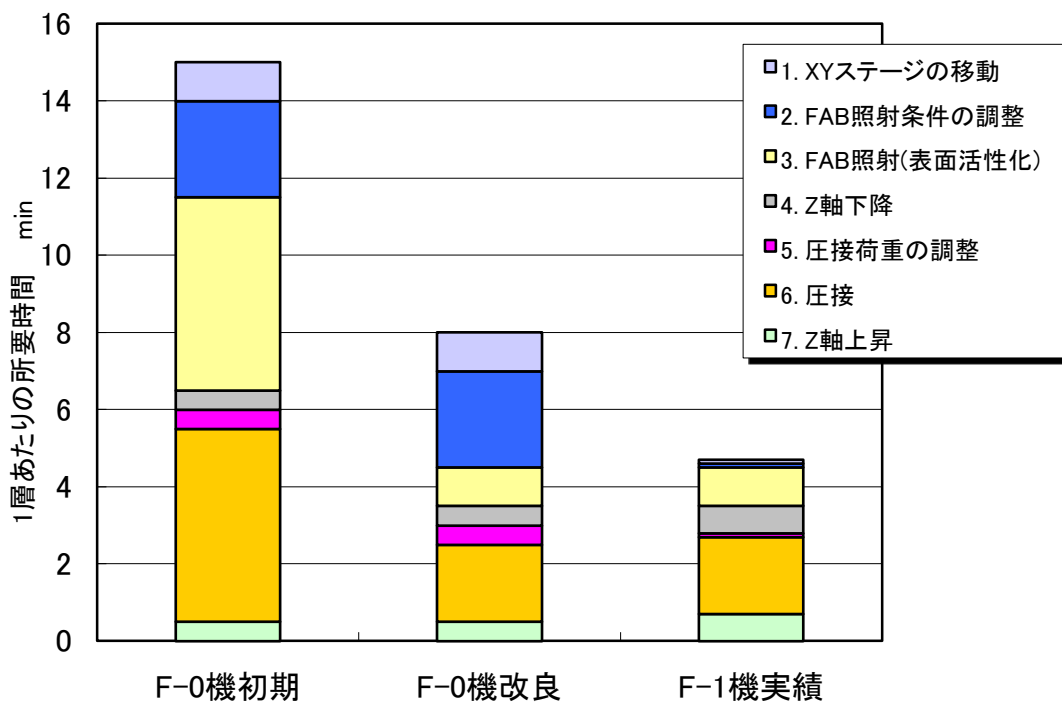


Fig. 3-26 Improvement of takt time in lamination cycle

3.4.3 電鍍構造体

F-1 機の目的の一つであるデバイスサイズの拡大を検証するために、10 mm 角のマイクロクーラをデバイスとして選択し、これを電鍍パターンを積層して作製した。マイクロクーラとは熱交換器の一種で、CPU や LED チップなど消費電力の高い半導体素子から発生する熱を冷却水に効率的に移動させ、半導体素子を冷却するデバイスである。

作製したマイクロクーラの構成を Fig. 3-27 に示す。デバイスのサイズは 10 mm 角で、これを 14.8 mm 角のターゲット基板（メサ領域は 10.2 mm 角）上に積層した。マイクロクーラの構造は、両端に形成された入出力用の垂直流路（ $8 \times 1 \text{ mm}^2$ ）とこの間を繋ぐ水平流路からなり、2 種類のパターン A と B を交互に積層することにより作製される。水平流路は幅 25~75 μm 、長さ 600 μm 、1 層あたり 80 本のマイクロチャンネルがあり、細いリブで仕切られている。このような電鍍膜パターンを有するドナー基板を第 2 章 2.7.5 節で示したプロセスで用意し、ターゲット基板上に積層した。電鍍パターンは、Ni と Cu の 2 種類が可能である。

作製した Cu 製デバイスの写真を Fig. 3-28 に示す[3, 4]。(a) は積層後のターゲット基板であり、100 円玉の上に置いてある。(b) は積層後のドナー基板であり、青い点線領域の Cu 電鍍パターンが転写されてなくなっている様子が分かる。圧接荷重は 960 kgf であり、F-1 機のほぼ最大荷重とした。このデバイスの SEM 写真を Fig. 3-29 に示す。(a) は垂直流路部分であり、斜めから観察すると水平流路部分が見える。(b) は水平流路の拡大図であり、幅 25 μm のリブで仕切られた幅 75 μm のマイクロチャンネルが 5 段積層されている様子が確認できる。なお、リブが細く見えるのは、先端を半円状に細くしてあるためである。(c) および (d) は垂直流路と水平流路が交わる様子を斜めから観察したもので、3 次元マイクロ流路構造が形成されていることがよくわかる。

このデバイスの冷却能力を、Fig. 3-30 に示す評価ベンチにて測定したところ、Fig. 3-31 に示すように 150 ml/min の冷却水流量において、設計通りの 150 W の冷却能力が 0.1 MPa

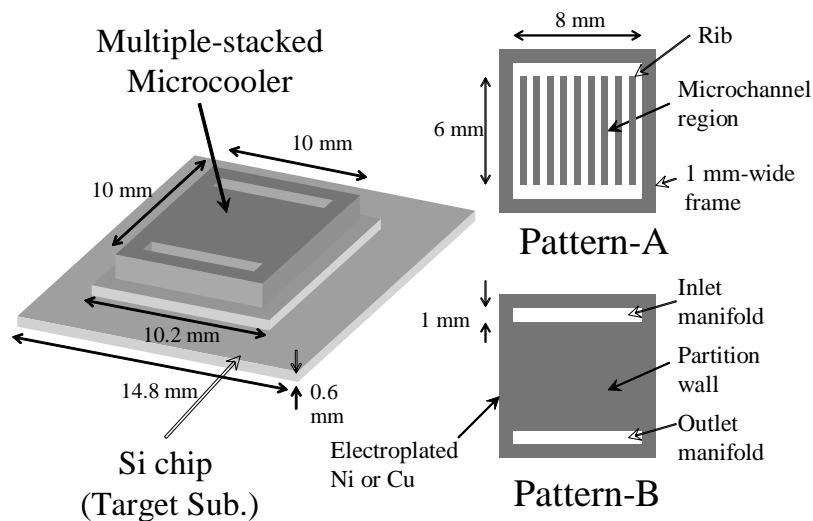
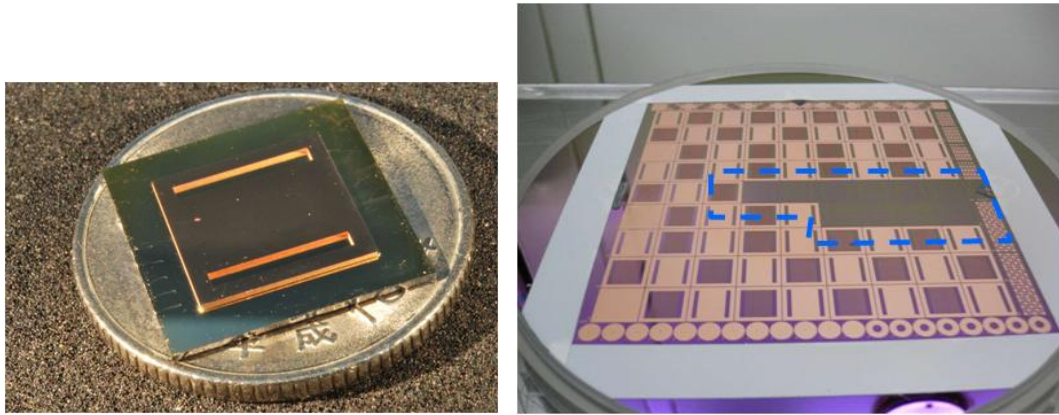


Fig. 3-27 Configuration of microcooler

以下という低圧力損失で実現できることが確認できた。この発熱量は次世代マイクロプロセッサで想定されている熱量であり、このような高発熱デバイスに適用可能と思われる。

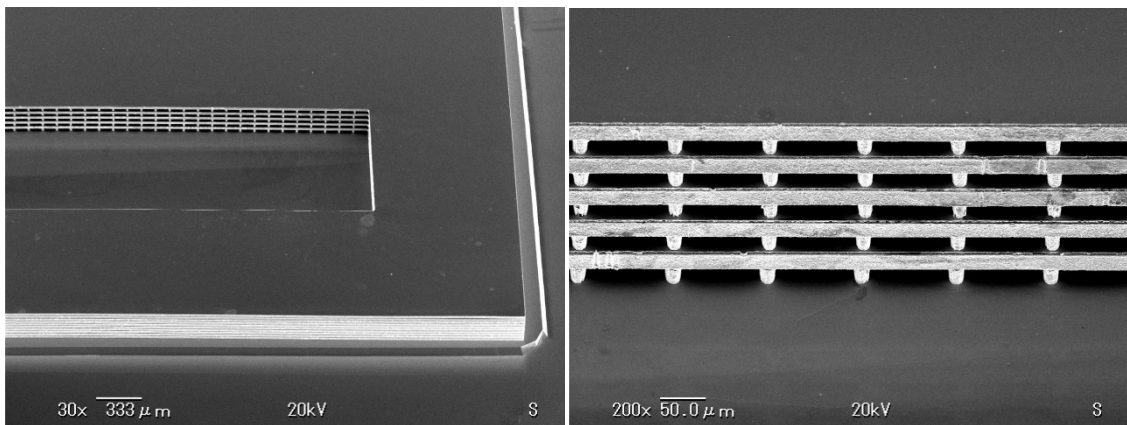
上記のように、電鍍パターンを積層して実動作可能な 10 mm 角のデバイスが作製可能であることを実証した。



(a) Target substrate on ¥100 coin

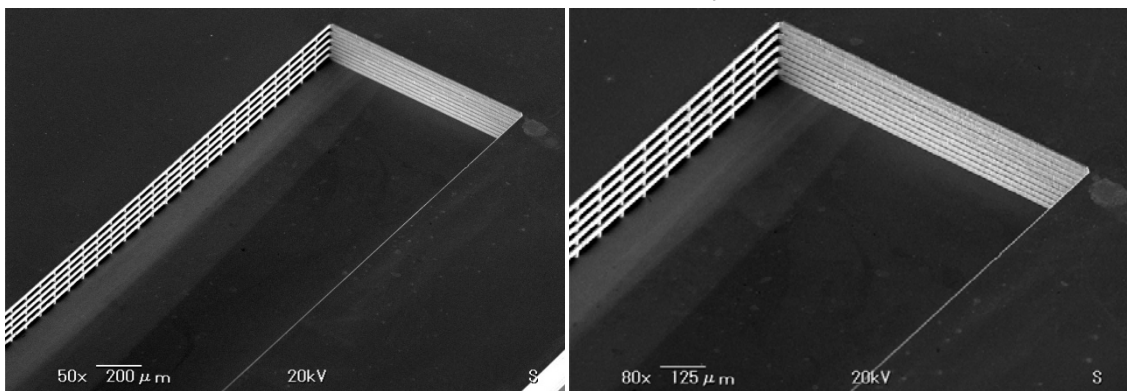
(b) Donor substrate

Fig. 3-28 Substrates for fabricating microcooler



(a) Vertical channel

(b) 5-layered horizontal channels



(c) Vertical and horizontal channel

(d) Close-up view

Fig. 3-29 SEM photographs of the fabricated microcooler

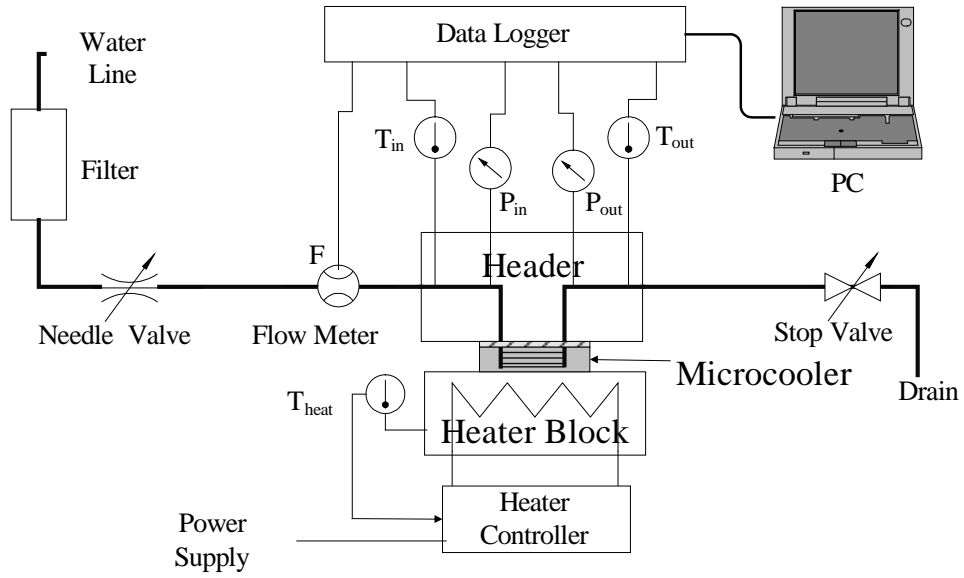


Fig. 3-30 Schematic of the evaluation setup

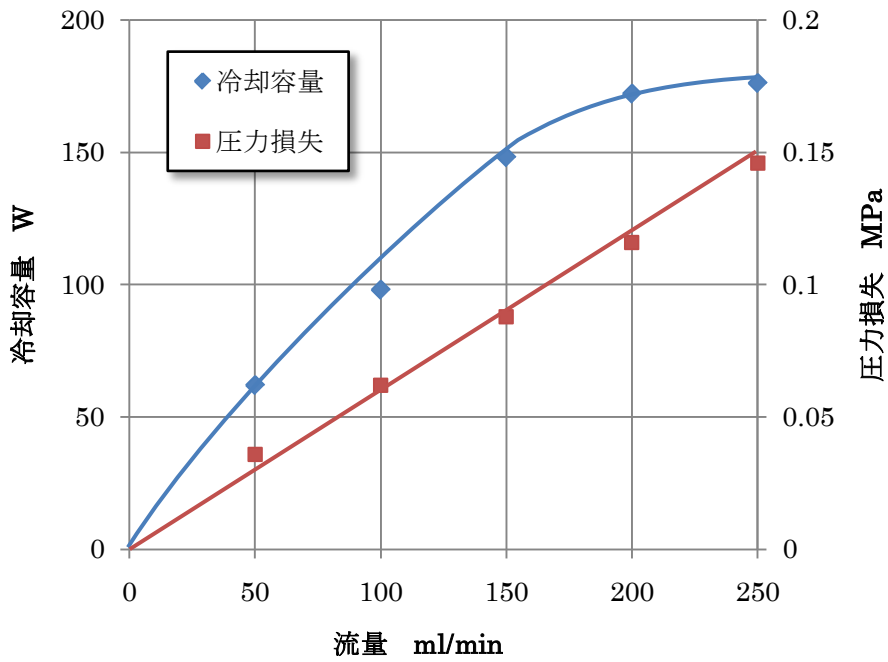


Fig. 3-31 Results of the cooling performance

3.5 結言

本章では、第2章で示した原理検証機 F-0 機の特性解析を基に、新たな生産対応機 F-1 機の仕様と構成、および性能について述べた。多くの構成要素は F-0 機の知見が生かされたが、特にデバイスサイズ拡大に対応するドナー基板サイズの拡大、圧接荷重の増加、自動運転化などに対応し、粗微動連動 X-Y ステージや自動制御システムを新たに導入した。また F-0 機で明らかとなった積層精度に関しては、ステージの高剛性化や高精度化の対策を施した。

その結果、6 インチウエハ対応、デバイスサイズ 10 mm 角、最大圧接荷重 1 ton、積層精度 100 nm、積層タクトタイム 5 min/layer の全自動常温接合装置を得ることができた。また電鋳プロセスを用いて、10 mm 角の 3 次元マイクロ流路デバイスが作製できることを確認した。これは高発熱デバイスへの適用を想定したマイクロクーラであり、0.1 MPa 以下の低圧力損失にて 150 W の冷却能力を有することを実証した。

F-1 機の課題はオーバーレイ誤差の要因解明である。目標とした積層精度を達成したが、その内訳は分離されて理解されていない。そのためにはオーバーレイ誤差を精度よく簡便に多数評価する方法が必要となる。そこで次の第4章では新たな計測方法の開発を述べ、第5章でそれを用いたオーバーレイ誤差の解析結果を述べることにする。

追補

1. アレイ座標一覧表

アレイ座標の一覧表とは、各構造体のウェハ座標系における第 1 層目の座標をまとめたものである。Fig. 3-8 に示したウェハ、アレイ、セルの各座標系の定義に基づき、各象限ごとに配置されたアレイ座標値を示している。Table 3-10 は一例であり、ウェハ第 1 象限のアレイ 1C10, 1C25 などのウェハ座標系における原点座標を表示している。この表から、アレイ 1C10 と 1C25 はそれぞれ 10 セットあることが分かる。実際にはこれらのアレイ以外に、機械要素のパターンなど、百数十個のアレイが存在する。このデータテーブルの行数は、各象限に存在するアレイの数と一致する。

この表の見方であるが、例えば 1 行目は 10 個あるアレイ 1C10 の 1 番目のアレイ「1C10(1)」であり、これを積層する場合、ステージが移動すべき第 1 層のスタンプ位置座標はウェハ座標系の (5000, 20,500) であることが分かる。

Table 3-10 Array coordinate data table in Quadrant 1

Array_Num	Array_Name	Xa[μm]	Ya[μm]	δX[μm]	δY[μm]
1	1C10 (1)	5,000.00	20,500.00	50.00	50.00
2	1C10 (2)	6,000.00	20,500.00	50.00	50.00
3	1C10 (3)	7,000.00	20,500.00	50.00	50.00
4	1C10 (4)	8,000.00	20,500.00	50.00	50.00
5	1C10 (5)	9,000.00	20,500.00	50.00	50.00
6	1C10 (6)	10,000.00	20,500.00	50.00	50.00
7	1C10 (7)	11,000.00	20,500.00	50.00	50.00
8	1C10 (8)	12,000.00	20,500.00	50.00	50.00
9	1C10 (9)	13,000.00	20,500.00	50.00	50.00
10	1C10 (10)	14,000.00	20,500.00	50.00	50.00
11	1C25 (1)	25,120.00	31,500.00	50.00	50.00
12	1C25 (2)	30,140.00	31,500.00	50.00	50.00
13	1C25 (3)	35,160.00	31,500.00	50.00	50.00
14	1C25 (4)	40,180.00	31,500.00	50.00	50.00
15	1C25 (5)	45,200.00	31,500.00	50.00	50.00
16	1C25 (6)	25,120.00	20,500.00	50.00	50.00
17	1C25 (7)	30,140.00	20,500.00	50.00	50.00
18	1C25 (8)	35,160.00	20,500.00	50.00	50.00
19	1C25 (9)	40,180.00	20,500.00	50.00	50.00
20	1C25 (10)	45,200.00	20,500.00	50.00	50.00
21	1D10 (1)	15,020.00	20,500.00	50.00	50.00
22	1D10 (2)	16,020.00	20,500.00	50.00	50.00
23	1D10 (3)	17,020.00	20,500.00	50.00	50.00
24	1D10 (4)	18,020.00	20,500.00	50.00	50.00
25	1D10 (5)	19,020.00	20,500.00	50.00	50.00
26	1D10 (6)	20,020.00	20,500.00	50.00	50.00
27	1D10 (7)	21,020.00	20,500.00	50.00	50.00

2. セル座標一覧表

セル座標の一覧表とは、第1層のセルに対する第2層目以降の相対座標を定義した表である。一例を Table 3-11 に示す。これは25層のパターンを積層する「1C25」アレイ内のセル座標データであり、第1層に対する以降の層の相対座標値が記されている。自動積層時には、第1セルの転写後、ステージは表中の (x_c, y_c) だけ移動し第2層目の積層をすることになる。なお表中の $(\delta x, \delta y)$ は、各セル座標の補正用オプションであるが通常0である。このセル座標データテーブルは、アレイの種類の数だけ存在する。

Table 3-11 Cell coordinate data table of array “1C25”

Array_Name		1C25		
cell_Num	x_c [μm]	y_c [μm]	δx [μm]	δy [μm]
1	0.00	0.00	0.00	0.00
2	0.00	1,000.00	0.00	0.00
3	0.00	2,000.00	0.00	0.00
4	0.00	3,000.00	0.00	0.00
5	0.00	4,000.00	0.00	0.00
6	1,000.00	4,000.00	0.00	0.00
7	1,000.00	3,000.00	0.00	0.00
8	1,000.00	2,000.00	0.00	0.00
9	1,000.00	1,000.00	0.00	0.00
10	1,000.00	0.00	0.00	0.00
11	2,000.00	0.00	0.00	0.00
12	2,000.00	1,000.00	0.00	0.00
13	2,000.00	2,000.00	0.00	0.00
14	2,000.00	3,000.00	0.00	0.00
15	2,000.00	4,000.00	0.00	0.00
16	3,000.00	4,000.00	0.00	0.00
17	3,000.00	3,000.00	0.00	0.00
18	3,000.00	2,000.00	0.00	0.00
19	3,000.00	1,000.00	0.00	0.00
20	3,000.00	0.00	0.00	0.00
21	4,000.00	0.00	0.00	0.00
22	4,000.00	1,000.00	0.00	0.00
23	4,000.00	2,000.00	0.00	0.00
24	4,000.00	3,000.00	0.00	0.00
25	4,000.00	4,000.00	0.00	0.00

参考文献

- [1] 浅野伸, 後藤崇之, 岡崎祐一: 精密工学会秋季大会講演論文集,p411(1991)
- [2] 木ノ内雅人, 後藤崇之, 田原諭, 津野武志, 浅野伸, 長谷川修, 高橋睦也, 山田高幸: 常温接合を用いた3次元マイクロデバイス製造装置の開発, 2005年度精密工学会秋季大会(京都大学) B07, pp. 89-90.
- [3] TAKAYUKI YAMADA, KAZUAKI TABATA, DAISUKE NAGAO, MUTSUYA TAKAHASHI: HIGH PERFORMANCE MICROCOOLER FABRICATED BY MULTIPLE STACKING OF ELECTROPLATED METAL PATTERNS, THE 14TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOLID-STATE SENSORS, ACTUATORS AND MICROSYSTEMS (TRANSDUCERS '07), (2007) pp. 1625-1628.
- [4] 田畑和章、高橋睦也、山田高幸、長尾太介: 「電鍍膜の積層による高性能マイクロクーラの作製と評価」, 2007年度精密工学会秋季大会(旭川市ときわ市民ホール) L21, pp. 873-874.

第4章 オーバーレイ誤差の評価方法の開発

4.1 緒言

本章では、第3章で示した FORMULA 技術の生産対応機 (F-1 機) のオーバーレイ誤差を評価する方法として最小二乗円法を提案する。100 nm 程度のオーバーレイ誤差を効率よく計測することが目的であり、そのためのテストパターン (TEG: Test Element Group) と、この計測・解析手法からなる。

最初に 4.2 節でオーバーレイ誤差を評価するための既存の方法を説明し、その課題を明らかにする。4.3 節では提案する最小二乗円法について詳しく説明する。4.4 節では、本方式で評価した結果の一例を示すとともに、本方式の繰返し性を議論する。4.5 節では、本方式を F-1 機のオーバーレイ誤差の評価に適用した時、オーバーレイ誤差が 3 種類に分類可能であることを示す。最後に 4.6 節で本章をまとめる。

4.2 従来の評価方法

本節ではオーバーレイ誤差の評価に関する従来技術をレビューするとともに、その課題についてまとめる。

4.2.1 半導体装置

FORMULA 技術は光造形法に代表される積層造形法の一つであり、積層造形法は 3 次元形状自由度に優れるため精力的に開発されている。主な関心事は、新しい加工原理に基づく製法や作製時の分解能の改善に関するものである[1]。しかしながら作製された構造体の精度、特にレイヤ間の重ね合わせ誤差 (オーバーレイ誤差) に関する報告は少ない。

オーバーレイ誤差に関しては、半導体産業を代表する超精密加工装置：ステッパで詳細に研究されている[2]。ステッパでは、半導体基板上に形成されたマークと、フォトマスク (レチクル) 上のマークを光学的に位置合わせしてアライメントを行う。その重ね合わせ誤差は、評価用の特殊パターン (バーニヤ, bars-in-bars など) をデバイス上に形成して x, y 方向別々に計測され、その代表的な値は数十 nm である。

一方ステッパ以外の加工装置、例えばマスクアライナ装置、ウェハ貼り合せ装置でも、アライメントは非常に重要な機能であり、半導体基板とフォトマスクまたは 2 枚の基板を数 μm に近接させて、アライメントマーク (十字マーク等) を一方の基板の裏面側から透過観察してアライメントを行う。またフリップチップボンダーでは、2 枚の基板を数十 mm 程度離間させその間に両面観察可能な顕微鏡を配して、対向する基板上的アライメントマークを観察してアライメントを行う[3]。その重ね合わせ誤差はサブミクロン台～数 μm 程度である。また近年ナノインプリント技術が精力的に開発されているが[4]、基板と金型 (石英など) 間のアライメントは双方に形成されたアライメントマークの透過観察による方法が代表的である[5]。またスタンプ位置のオーバーレイ誤差の評価に関する報告は少ない[6]。

このように、半導体装置においてアライメントは2つの対象物間（基板とフォトマスク間、または2枚の基板間）で行われ、主に光学的な方法により計測される。しかしながらその関心は主に加工装置の機能やスペックに関するもので、作製されたデバイスや構造体のオーバーレイ誤差に関するものは少ない。

4.2.2 画像処理による方法

本節では、既存の画像処理によるオーバーレイ誤差評価方法をレビューする。画像処理技術は、計測・検査の分野で広く活用されている[7]。FORMULA技術のような積層造形法のオーバーレイ誤差を評価するためには、少なくとも3層以上の積層構造体の各層を認識し、その位置ずれを評価する必要がある。そのためにこれまで筆者らのグループで試みられてきた方法を取り上げ、その特徴と課題を明らかにする。

(1) 矩形パターン法

矩形法は、これまで筆者らのグループで標準的に用いられてきた方法である（3.4.1節参照）。まず Fig. 4-1 に示すように、作製した構造体の中にある同心の矩形パターンを SEM（キーエンス製電子顕微鏡 VE-7800）でできるだけ高倍率（数千倍）で撮影し、計測アプリケーション（VE-H2A）を用いて矩形パターンの各辺に沿って補助線（図中の赤線）を引く。この補助線付きの画像から各補助線の対角2点（図中緑色丸）の座標（ピクセル値）を読み取り、その中点をこの矩形パターンの中心座標とする。この方法を各レイヤに対して繰り返し、中心座標のシフト量をレイヤ間のオーバーレイ誤差とする。

矩形パターンは半導体マスクパターンの基本であり、FORMULA用フォトマスクの多くの積層パターン中に含まれているため、この方法はこれまでに多用されてきた。しかしながら矩形パターンのサイズが十数 μm 以下になると（Fig. 4-1の最も小さい矩形は10 μm 角）、フォトリソグラフィーの解像度が低かったりサイドエッチングの影響で角が丸くなったり

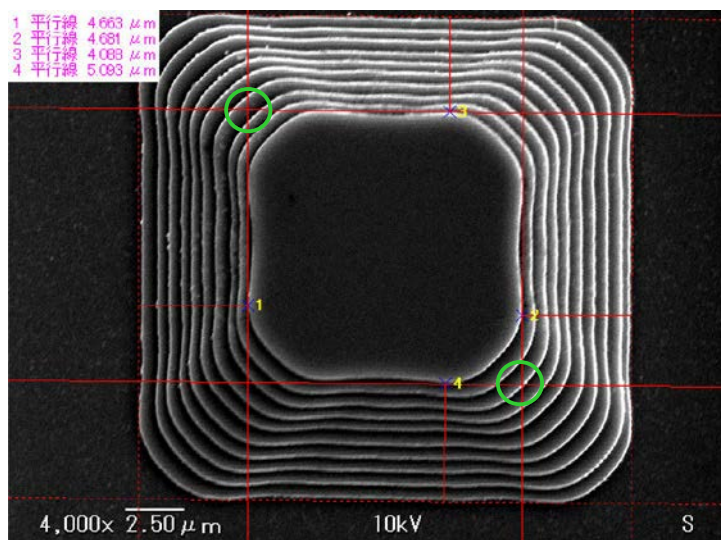


Fig. 4-1 Rectangle method for overlay error analysis

辺が歪んだりする。またエッジそのものが数ピクセルの幅を持っていることもある。そのため補助線の引き方に計測者の癖やばらつきが出やすいと言う欠点がある。さらに1つの矩形パターン(1層分)につき、補助線を4本引き交点の座標を求め中点を計算する、と言うプロセスが全て手動であり、しかも別々のソフトウェアで実行する必要があるため、1バッチ分(10層分)のオーバーレイ誤差を求めるのに1時間以上を要するという欠点がある。

次に本方式の計測精度について考察する。Fig. 4-2は、本方式による繰返し性の確認結果である。同一SEM画像を用いて同一人物が5回評価を繰り返し、隣接レイヤ間オーバーレ

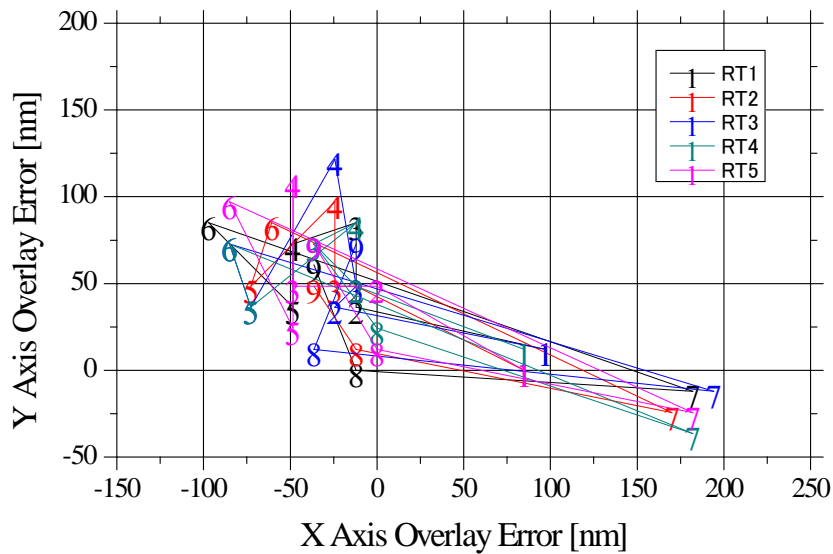


Fig. 4-2 Repeatability of the rectangle method

Table 4-1 Repeatability of the rectangle method

Layer	$3\sigma X$	$3\sigma Y$	
1	1.25	1.05	
2	0.67	0.00	
3	1.64	0.82	
4	1.06	2.01	
5	1.34	0.82	
6	0.67	0.82	
7	1.34	0.82	
8	0.82	1.34	
9	1.34	0.82	
10	0.67	1.50	
平均 pixel	0.98	0.89	
平均 nm	23.87	21.59	距離 33.7

イ誤差を計算してプロットした。プロット中の数字 n は、レイヤ $n+1$ とレイヤ n の間の中心座標のシフト量を示している。計測 5 回分の各レイヤ間シフト量は、ほぼ近い領域に集まっていることが確認できるが、ばらつきもあることが分かる。これが計測の繰返し性である。

この繰返し性を標準偏差で評価した。すなわち、各レイヤの矩形の中心座標のばらつきの 3σ を求めると、Table 4-1 のようになる。レイヤ分の平均で X,Y 各成分はそれぞれ 0.98 および 0.89 pixel となる。これらの二乗和を求めさらに距離に換算すると、この方法の計測精度は 3σ で 34 nm と結論付けられる。これは 100 nm 程度のオーバーレイ誤差を評価するには妥当な精度と考えられる。

以上のように、これまで標準的に用いられてきた矩形法は、繰返し性の点では十分な精度を有しているが、計測時間の点では効率が悪いという欠点を有していることが確認できた。

(2) 3点法

次の方法は、前述の SEM に備わる計測アプリケーションの円計測機能を活用したものである。観察する構造体を同心円パターンに変更し、各円の円周上の 3 点を指定して中心と半径を求める。

この評価の様子を Fig. 4-3 に示す。各円に対して、円周上の境界と判断される点を 3 点指定すると（図中の青い x 点）、この 3 点で定義される円が描画され（図中の赤い円）、その中心座標が表示される。

この方法は SEM 用の PC 上ですべての処理を実行できるので比較的簡便ではあるが、3 点の指定だけで中心座標が決まってしまうため、円周上エッジ座標の認識誤差が中心座標の精度に大きな影響を及ぼすこと、および同心円の中心が近接しているため、中心を示す

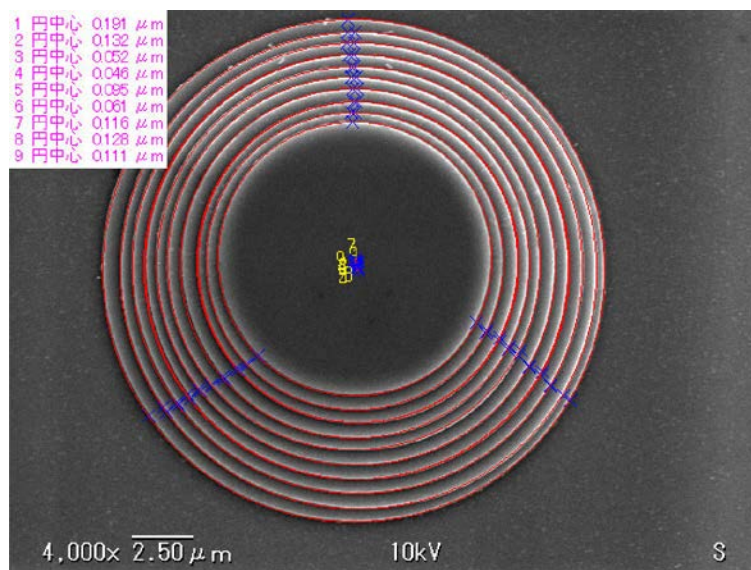


Fig. 4-3 3-point method for overlay error analysis

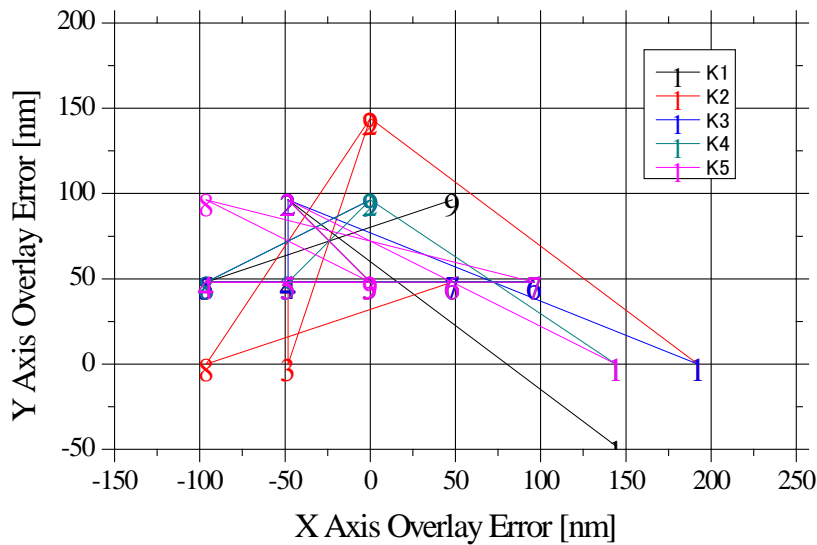


Fig. 4-4 Repeatability of the 3-point method

青いx点が重なってしまい、判別が困難になるなどの欠点がある。

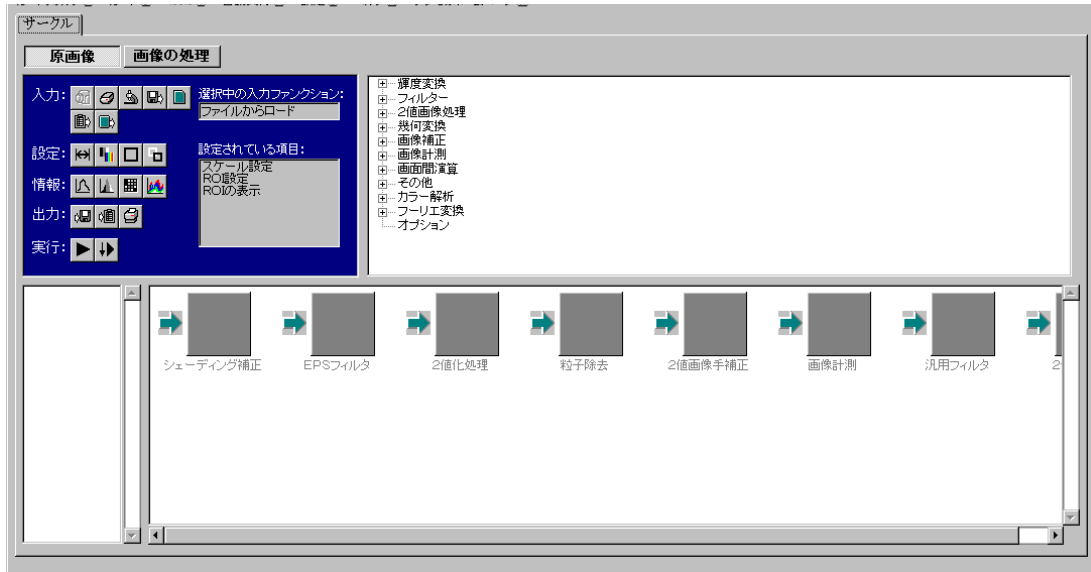
本方式の繰返し性を Fig. 4-4 に示す。前述の矩形パターン法と同様に、同一の SEM 画像を用いて同一人物が 5 回評価を繰り返した結果である。このグラフから、オーバーレイ誤差は 48 nm 単位で離散化して不自然になっていることが分かる。この原因は、中心位置の座標表示が、この計測ソフトウェアの仕様により 2 ピクセル単位に丸め込まれているためと判明した。この写真の場合、1 ピクセルが 24 nm なので、48 nm となったものと思われる。

そこで 3 点法の計算を独自に実施し、この方法の正しい評価を 4.4.2 節で述べる。

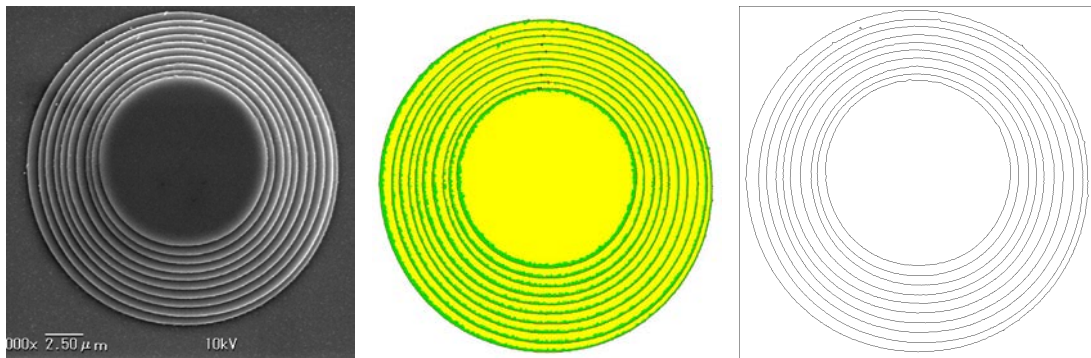
(3) IH 法

この方法は、市販の画像処理解析ソフトウェアを用いる方法である。本ソフトウェアは汎用の画像処理ソフトウェアで、各種フィルタ処理、エッジ強調・抽出処理、計測処理などが可能である。以下、この方法を IH 法と称する。

このソフトウェアによる同心円パターンの操作画面を Fig. 4-5 (a) に示す。入力画像に対して各種の画像処理（シェーディング補正、フィルタ、2 値化、輪郭抽出など）を実行する手順を定義し、さらに各処理の詳細パラメータ（補正の強さ、フィルタの種類、閾値レベルなど）を設定することにより、所望の画像処理や計測を自動化することができる。例えば、Fig. 4-5 (b) の原画像（入力画像）に対して、(c) のように輪郭が強調され、さらに (d) のように円が認識されてそのエッジが抽出される。最終的には、10 個の円の重心座標が csv ファイルとして出力される。



(a) User interface of Image Hyper II



(b) Input image

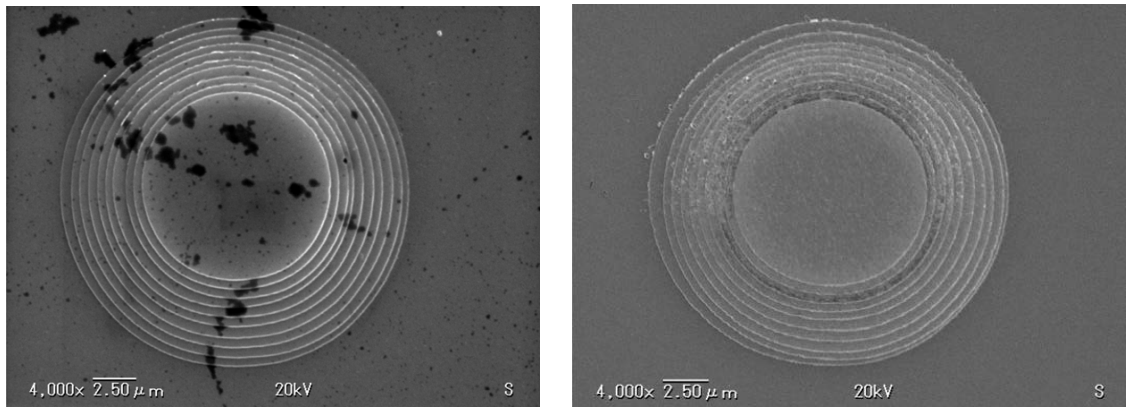
(c) Edge enhancement

(d) Extracted contour

Fig. 4-5 Example of data processing by IH method

このように処理が順調に進めば、原画像を指定してから10層分の結果が得られるまで数秒程度と高速で、しかもエクセルで編集可能なcsvファイルが出力されるので、非常に便利である。しかしながら、実際に入力パターンはFig. 4-6に示すように、異物が載っていて円以外の輪郭線があったり、エッジ部分が不鮮明だったり、SEM写真のコントラストや明るさに差があったりすると、上記各処理を手作業で補正する必要があり自動化にならないことが分かった。特にエッジの抽出工程は、原画像の汚れやノイズの影響を受けやすく、二値化の閾値の設定やノイズ除去フィルタの設定を都度行う必要がある。

このように一般的な画像処理による方法は、エッジ抽出におけるロバスト性が不十分であり、オーバーレイ誤差の計測には不适当であることが分かった。



(a) Debris on the pattern

(b) Blurred edges

Fig. 4-6 Examples of unclear SEM image

以上のように、これまで標準的に用いてきた方法、および他の 2 つの方法は、いずれも一長一短があり、大量のオーバーレイ誤差計測には課題が多いことが明らかとなった。この課題の本質は、エッジ抽出のロバスト性と、誤差を含むエッジ座標からいかに繰り返し性良く中心座標を算出するかということに帰結される。

したがって、100 nm 程度のオーバーレイ誤差を高い繰り返し性で効率よく計測するには、新たな手段が必要とされることが明らかとなった。

4.3 最小二乗円法の提案

本節ではオーバーレイ誤差を評価するための新しい方法「最小二乗円法」を提案する。本方式の概要は以下のとおりである。

1. 評価用パターンは同心円とし、できるだけ高倍率の SEM で観察する
2. 各円のエッジ座標を肉眼により 3 点以上抽出し、最小二乗法により円の中心座標を求める
3. 各円の中心座標のシフトをオーバーレイ誤差とする

以下にこの方法の詳細を説明する。

4.3.1 評価用パターン設計

前述のように、既存の計測方法では 3 次元構造体のオーバーレイ誤差を評価するための適切な方法が存在しない。そこで Fig. 4-7 に示す同心円状パターンを用いた TEG (Test Element Group) を提案する。すなわち、Fig. 4-7 (a) に示すように上層ほど半径が小さくなる複数の円形パターンを積層して、頂部が平坦な円錐状構造体を作製する。各円形パターンは、設計上、同心円とするが、実際の構造体で各円の中心座標を計測し、そのシフト量をオーバーレイ誤差とするものである。中心座標の計測手段は、電子顕微鏡 (SEM) 写真

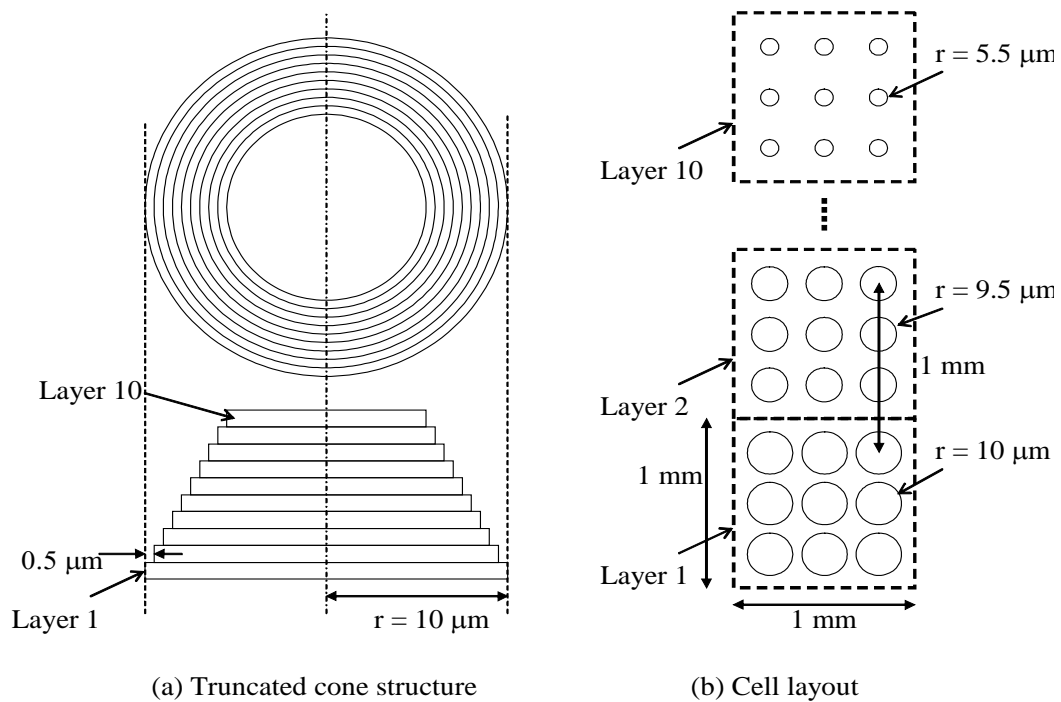


Fig. 4-7 TEG patterns for the measurement

から各円の複数のエッジ座標を人間の判断により抽出し、これから最小二乗法によって円のパラメータを算出するものである。本方式を「最小二乗円法」と呼ぶことにする。

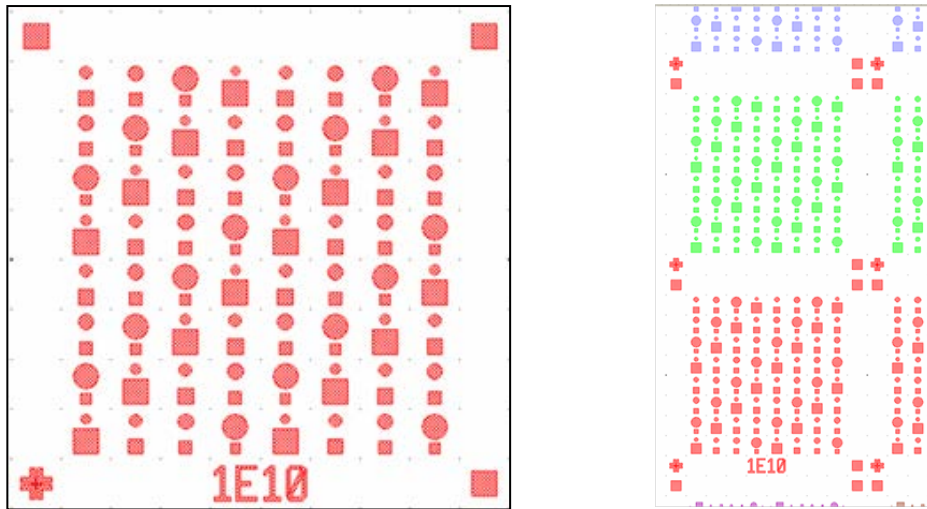
各層間の半径の差（アンダーサイズ量）は、想定される F-1 機のオーバーレイ誤差が 100 nm 程度、また突発的に大きなオーバーレイ誤差が生じて同心円が接したり重なったりしないよう、500 nm を標準とした。積層数は、積層動作の繰返し性を見るため 10 層とした。また円の半径は、できるだけ高倍率の SEM 画像を取得したいので小さい方が望ましいが、アンダーサイズ量と積層数で決まる最上層の半径がリソグラフィーの解像度を下回らないよう、第 1 層 = 10 μm を標準とした。なお、評価の対象は円の中心座標なので、各円の半径やアンダーサイズ量は、絶対値が保証されたものである必要はない。

このような構造体は Fig. 4-7 (b) に示すようなセルを 10 層積層することによって同時に複数個作製できる。複数個を同時に作製することにより、セル内の分布や繰返し性を確認できる。第 1 層のセル内には半径が 10 μm の円形パターンを複数配置し、第 2 層のセル内には半径 9.5 μm の円形パターンを配置する。セルの大きさは 1 mm 角としているので、各円形パターンの中心間距離は、設計上正確に 1 mm となる。このような方法で第 10 層までのセルをドナー基板上に用意する。

実際の設計図面を Fig. 4-8 に示す。Fig. 4-8 (a) に示すように、1 mm 角のセル内には上記第 1 層半径 10 μm の円形パターンを複数配し、参考のため、大きさの異なる円錐状構造体やピラミッド状構造体のためのパターンも含まれている。第 2 層以降のレイヤは、Fig. 4-8 (b) に色の塗り分けで示すように、第 1 層に隣接して 1 mm ピッチでアレイ状に配した。10 層分のアレイ（1 セット）の面積は 1 × 10 mm² である。そして Fig. 4-8 (c) に示すように、

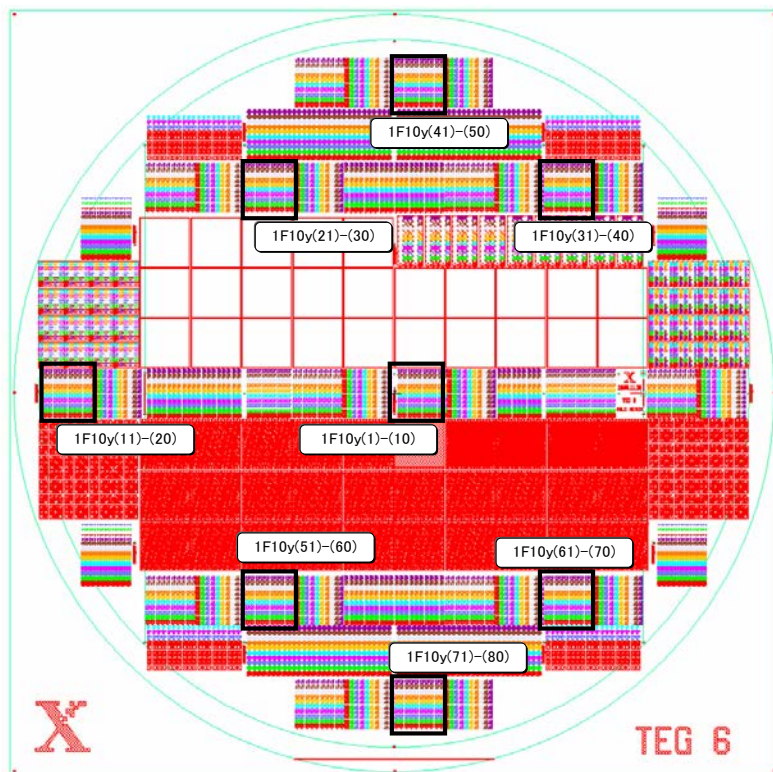
第4章 オーバーレイ誤差の評価方法の開発

このパターンを6インチウェハ上に複数配した。図中で黒い四角で囲んだ領域がこの領域であり、 $10 \times 10 \text{ mm}^2$ 内に10セットのパターンが含まれている。このような領域を6インチウェハ上に8か所設けた。このマスクパターンをTEG6と称する。



(a) 1st Layer

(b) Cell layout



(c) Wafer floor map

Fig. 4-8 Layout of TEG patterns

4.3.2 計測方法

円形パターンの中心座標の計測には最小二乗法を適用した。撮影された SEM 画像から各円形パターンにつき n 点の円エッジ座標を抽出し、これらから中心と半径を次のように算出する。

円の方程式を、次のように定義する。

$$(x-a)^2 + (y-b)^2 = c^2 \dots\dots\dots(4-1)$$

ここで、a, b は円の中心、c は半径であり、これらが未知数である。x,y は抽出された円周上の座標である。これは次式のように変形できる。

$$x^2 + y^2 = 2xa + 2yb + c^2 - a^2 - b^2 \dots\dots\dots(4-2)$$

ここで次のような行列 **A**, **B**, **C** を導入する。

$$\begin{aligned} \mathbf{A} &= [x^2 + y^2] \\ \mathbf{B} &= [2x \quad 2y \quad 1] \end{aligned} \dots\dots\dots(4-3)$$

$$\mathbf{C} = [a \quad b \quad c^2 - a^2 - b^2]^T = \begin{bmatrix} a \\ b \\ c^2 - a^2 - b^2 \end{bmatrix}$$

これを用いると、式 (4-2)は次のように簡単に表すことができる。

$$\mathbf{A} = \mathbf{BC} \dots\dots\dots(4-4)$$

問題は**C**を求めることであり、最小二乗法を使うと次のように計算される[8]。

$$\mathbf{C} = (\mathbf{B}^T \mathbf{B})^{-1} \mathbf{B}^T \mathbf{A} \dots\dots\dots(4-5)$$

この計算は、マトリックス計算ソフトウェアを用いると非常に簡単に計算できる。すなわち、概略同一円周上にあるとみなされる複数の x,y 計測座標 (n 点) を用いて、ベクトル **A** と **B** を次のように定義する。

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} x_1^2 + y_1^2 \\ x_2^2 + y_2^2 \\ \dots\dots\dots \\ x_n^2 + y_n^2 \end{bmatrix} \dots\dots\dots(4-6)$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} 2x_1 & 2y_1 & 1 \\ 2x_2 & 2y_2 & 1 \\ \dots\dots\dots \\ 2x_n & 2y_n & 1 \end{bmatrix} \dots\dots\dots(4-7)$$

このようにすれば、求める行列 **C** は、式 (4-5) の計算だけで求められる。この計算を同心円の数 (今回は 10 個) だけ繰り返す。

この計算は行列計算ソフトウェアを用いて行った。プログラムの詳細は追補 1 に記した。

4.4 評価結果

本節では、最小二乗円法によるオーバーレイ誤差計測の実際を説明し、また計測の繰返し性について議論する。

4.4.1 計測結果

最初に Fig. 4-9 を用いて計測の全体の流れを説明する。尚、同一円周上の抽出座標数 n は 8 を標準としたが、その妥当性は次節で議論する。

- (1) 同心円の TEG パターンを SEM で撮影し、画像ファイルを取得する
- (2) 10 個の円のエッジを計測者の目視判断で各 8 点抽出し、座標データのテキストファイルを出力する
- (3) このファイルを元に最小二乗法により円の中心座標と半径を計算し、10 個の円の中心座標・半径を含むテキストファイルを出力する
- (4) エクセル等でオーバーレイ誤差を算出する

ポイントは、人間の目視判断によるエッジの抽出と、最小二乗法による円の計算である。4.2.2 節 (3) でも述べたように、ノイズや異物が乗った SEM 画像から注目している円のエッジを自動で認識させることは困難なため、結局人間の判断でエッジを抽出するのがもっとも信頼性が高いと判断した。異物などの特異点やコントラストの低いエッジは避けることができる。また円周上の 3 点ではなくそれ以上の座標数を使うことでエッジ抽出時の判断誤差が減少すると期待される。また最小二乗法による円の計算にはマトリックス計算ソフトウェアを活用することで、非常に高速な処理ができる。

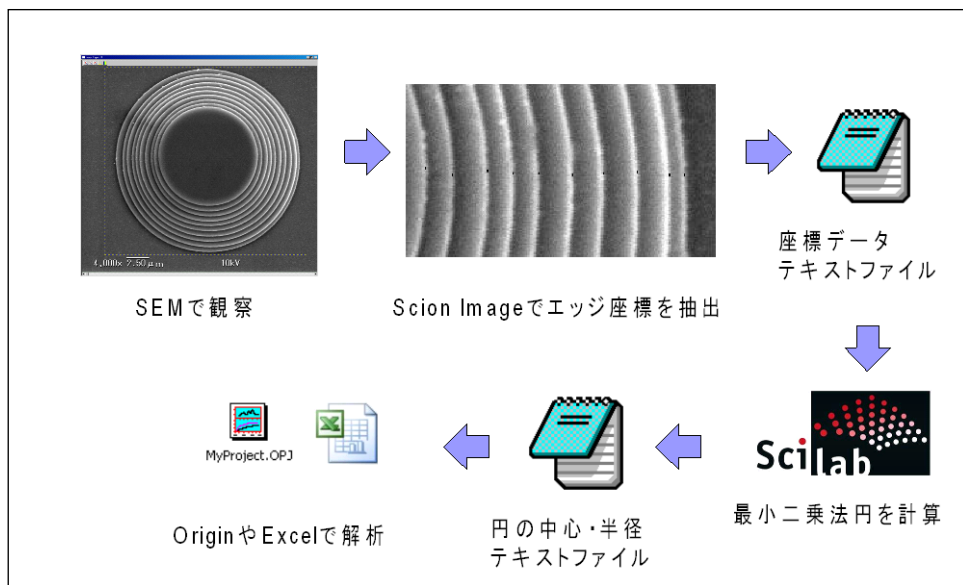


Fig. 4-9 Flow of the least square circle method

(1) SEM 画像の取得

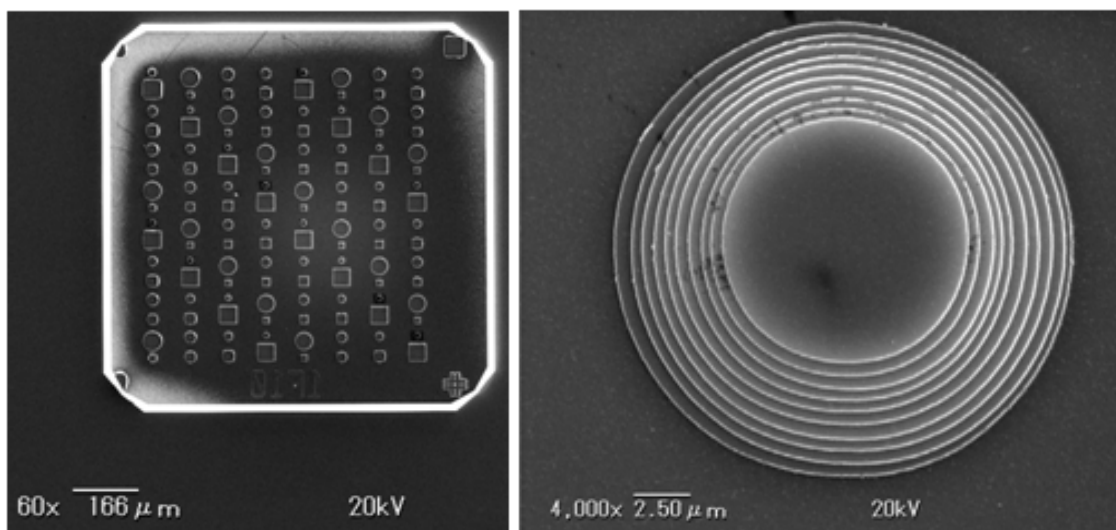
作製された円錐状構造体のSEM写真の例をFig. 4-10 に示す. Fig. 4-10 (a) はターゲット基板上の1 mm角のセル全体写真で、底辺の半径が10 μmの円錐状構造体のほか、底辺の半径がそれぞれ12.5, 15, 25 μmの円錐状構造体、および4種類のピラミッド状構造体が合計128個一括して作製されている。これらすべてが10層の積層構造体であり、1バッチの積層工程で作製されたものである。この中の一部を拡大した写真がFig. 4-10 (b) である。これは第1層の半径が10 μmのAl-Cu合金製積層構造体である。1層の膜厚は170 nmで10層からなっている様子がわかる。SEMはあらかじめ標準サンプル（日立標準メゾスケール[9]）で校正済みであり、倍率4,000倍の画像の1 pixelは24 nmである。ターゲット基板にはこのようなパターンが複数あるので、観察したパターンを明示するためFig. 4-11 に示す表記を用いてパターンを特定する。

なお、SEM撮影時に観察方向が鉛直線からずれた場合、各層の高さの差に起因する系統誤差が原理的に発生する。その量は、2層間の高さの差（1層の膜厚）をd、ずれ角をθとすると、

$$d \cdot \sin \theta$$

となる (Fig. 4-12)。

今回の計測では鉛直方向からの観察に配慮したので、θは最大0.2°と見込まれる (SEMのステージチルト角の最小目盛りが1°なので、その±1/10とした)。したがって、隣接レイヤ間 (d= 170 nm) の系統誤差は0.59 nm、高さの差が最大値1.53 μmの時 (レイヤ1と10)、5.3 nmとなる。今回、対象とするF-1機の隣接レイヤ間オーバーレイ誤差が100 nm程度であることを考慮すると、これは無視できるレベルと考えられる。ただし、構造体の高さが増えたり、今後加工精度が改善されたりすれば、この要因を考慮に入れる必要がある。



(a) Overview of the cell

(b) Close-up view of the structure

Fig. 4-10 SEM photographs of the TEG patterns

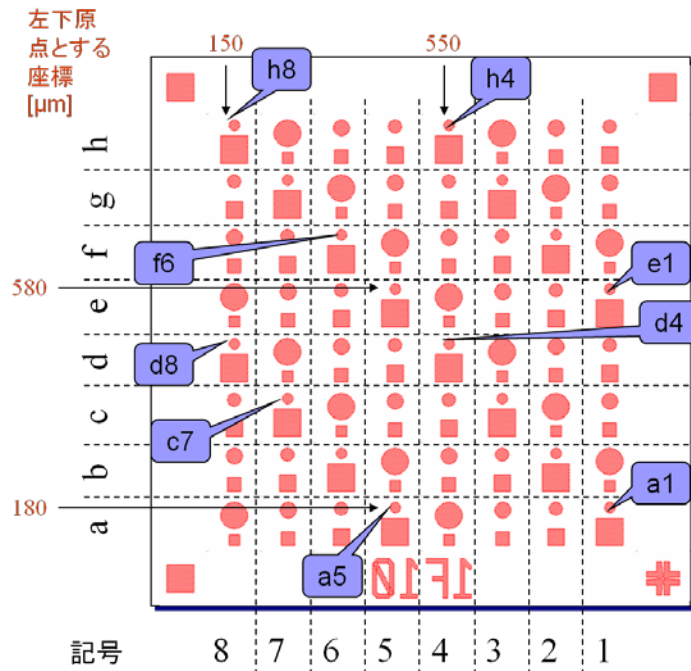


Fig. 4-11 Notation of observed patterns on the target substrate

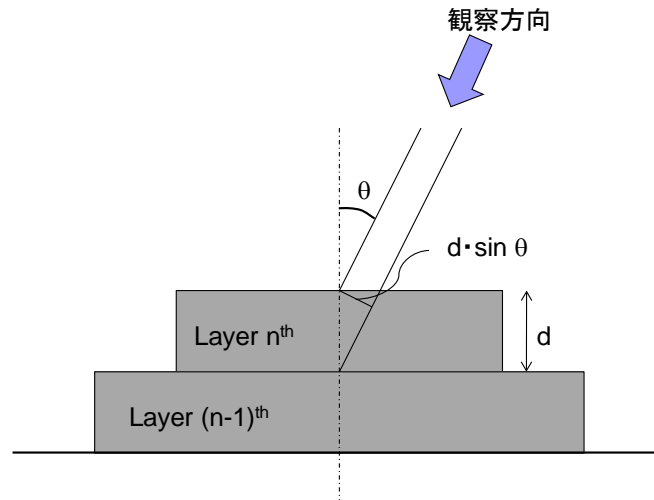


Fig. 4-12 Systematic error caused by observation direction

(2) エッジ座標の抽出

本節では、手順(2)について説明する。SEM 画像から各円のエッジを抽出する作業は、Scion Image を用いて行う。このソフトウェアから計測対象の画像データを開き、座標計測モードにして画像上をクリックすると、その画素の x, y 値が記録される。具体的には、Fig. 4-13 に示すように、10 個の同心円の外側から矢印に示すように順番にエッジをクリックしてゆく。重要な決めごとは後の計算プログラムとの対応で外側から内側に向かってクリックすることで、8 本の動径の位置や順序は任意である。このため異物がある場所やコントラ

ストが不鮮明な部分を避けることができる。合計 80 点を抽出するのに要する時間は、約 5 min である。なお座標原点は、画像左下とした。

Scion Image の操作画面を Fig. 4-14 に示す。SEM 画像を拡大表示することで、各円のエッジ部分が判別でき、クリックした点は黒く表示される。そしてこの点の座標が、テキストファイルに出力される。この図においてエッジは白い（明度の高い）領域であるが、その幅は数 pixel ある（1 pixel は 24 nm）。その理由として、サンプルの段差が必ずしも垂直ではない（膜厚 170 nm の薄膜の断面がテーパになっている）ことや、SEM の性能や設定（フォーカスやコントラスト）が考えられる。

Fig. 4-15 は、出力したテキストファイルの例と、確認のためこれをエクセルで読み込み散布図にプロットしたものである。テキストファイルには、画像上でクリックした順番に 80 点の x, y 座標が csv 形式で記録されている。

上記のように本方式では、目視により各円につき複数のエッジを抽出することを特徴としている。SEM画像を半導体プロセスの寸法計測に用いることは一般的であり[10]、画像処理により自動的にエッジを抽出することも可能であるが、下記 2 つの理由により目視によりエッジを判定した。

- ① 評価パターン自身の問題として、エッジに異物などが付着している場合がある。この時は画像処理において正しく円のエッジを認識できない。同心円パターンの設計上の半径の差は $0.5 \mu\text{m}$ であり、2 つの円のエッジのギャップは $0.5 \mu\text{m}$ 土オーバーレイ誤差量となり、実際のギャップは $0.1 \mu\text{m}$ 程度の場合がある。そのため、その程度の直径の異物が付着してもエッジ抽出にエラーを生じる。
- ② 画像形成時の問題として、SEM 画像の明度やコントラストが必ずしも一定ではない。これにより画像処理時にエッジが正しく抽出できないことがある。

ただし目視によるエッジ抽出には作業者の差や再現性に懸念があることから、目視によるエッジ抽出による計算結果の繰返し性を次節で評価する。これは目視による認識だけの問題ではなく、画像処理においても生じる共通の課題である。

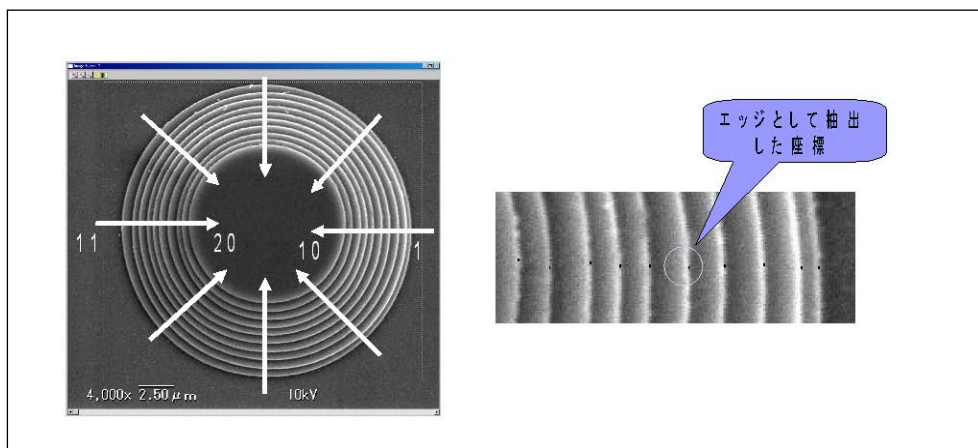


Fig. 4-13 Edge extraction of concentric circles

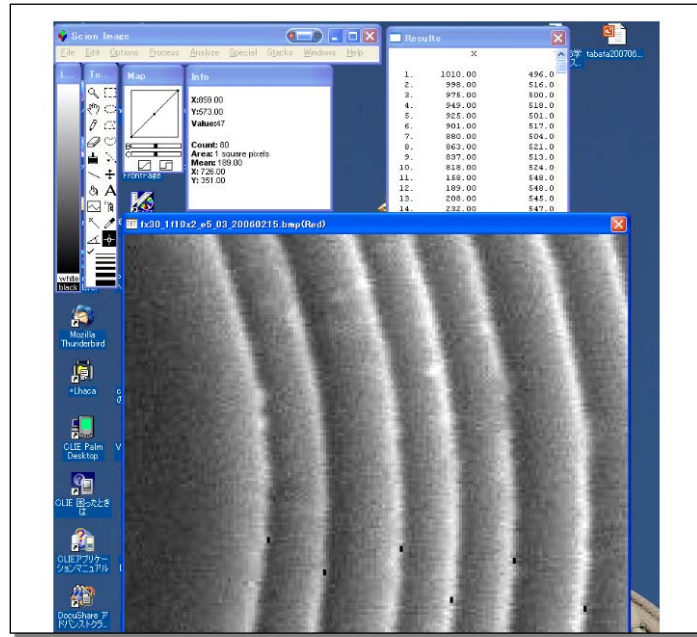


Fig. 4-14 Operation view of edge extraction by Scion Image

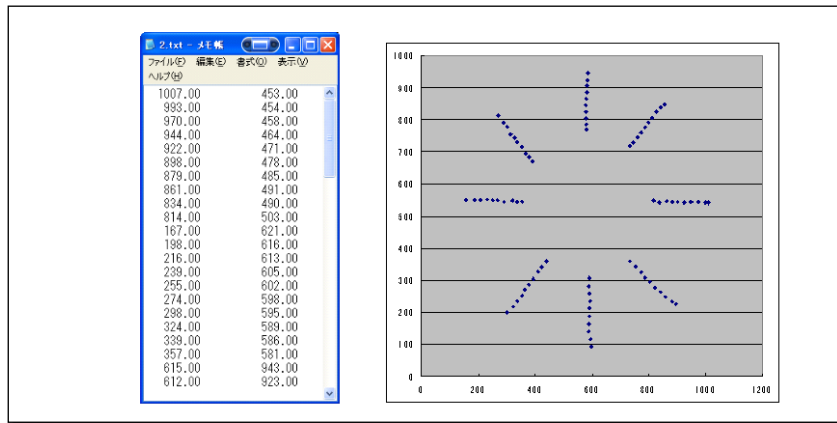


Fig. 4-15 Confirmation of the extracted edges

(3) 最小二乗法による円の計算

ここでは追補1で述べた行列計算プログラムと Fig. 4-15 に示したエッジ抽出ファイルを用いて算出した10層の最小二乗円を Fig. 4-16 に示す。左の表は、行列計算ソフトウェア Scilab による計算結果の出力ファイルで10層分の円の中心座標と半径が csv ファイル形式で書き出されている。また右のグラフは Scilab のプロットコマンドによるグラフで、エッジ抽出点 (赤丸) と、算出された最小二乗円 (青線) を重ねてプロットした図である。このプロットと Fig. 4-10 に示した SEM の元画像を対比させれば、各円が正しく算出できたかどうかを確認することができる。計算に要する時間は標準的なデスクトップ PC (Pentium 4, 3.6GHz) で 1-2 s である (グラフ描画を含む)。

(4) オーバーレイ誤差の算出

行列計算ソフトウェア Scilab による計算結果の出力ファイルをエクセルで読み込み、オーバーレイ誤差の算出結果を Table 4-2 に示す。表中で水色のハッチング部分が csv ファイル部分である。円の中心座標や半径の単位は元画像のピクセル値なので、これをあらかじめ校正したスケール値（黄色のハッチング部分）を乗じてナノメートル単位に変換する。オーバーレイ誤差としては 2 種類算出する。ひとつは隣接レイヤ間誤差で、もう一方は第 1 層基準誤差である。第 1 層基準誤差は、隣接レイヤ間誤差を累積したものとなる。

Fig. 4-17 は結果のプロットである。Fig. 4-17 (a) は各レイヤの半径のプロット、Fig. 4-17 (b) は第 1 層基準のオーバーレイ誤差をプロットしたグラフである。このように、最小二乗円法により各円の半径および中心座標の変動が得られた。各円の半径は、レイヤ数の増加に対しこの例では 515 nm ずつ小さくなっていく様子が Fig. 4-17 (a) の 1 次回帰線から確認できる（設計上は 500 nm）。また Fig. 4-17 (b) において各プロット点は第 1 層に対する各レイヤのオーバーレイ誤差であるが、これらの点を順に結ぶ各ベクトルは隣接レイヤ間

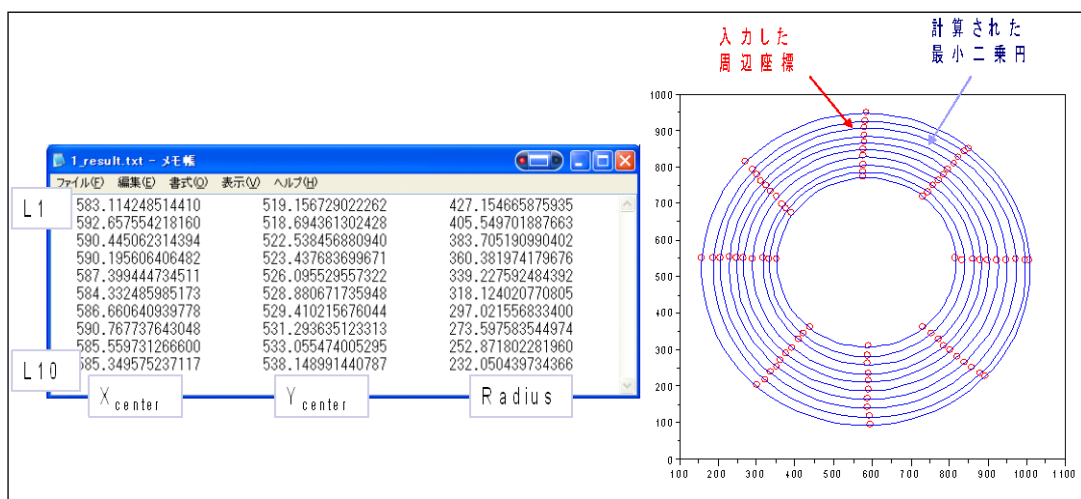


Fig. 4-16 Calculated result of the least square circles

Table 4-2 Calculation of the overlay error

Layer	Xcenter	Ycenter	radius	Xn-Xn-1	Yn-Yn-1	Xc[nm]	Yc[nm]	R[nm]
1	583.1	519.2	427.2			14017.2	12479.7	10268.1
2	592.7	518.7	405.5	9.5	-0.5	14246.6	12468.6	9748.8
3	590.4	522.5	383.7	-2.2	3.8	14193.4	12561.0	9223.7
4	590.2	523.4	360.4	-0.2	0.9	14187.4	12582.6	8663.0
5	587.4	526.1	339.2	-2.8	2.7	14120.2	12646.5	8154.5
6	584.3	528.9	318.1	-3.1	2.8	14046.5	12713.5	7647.2
7	586.7	529.4	297.0	2.3	0.5	14102.4	12726.2	7139.9
8	590.8	531.3	273.6	4.1	1.9	14201.1	12771.5	6576.9
9	585.6	533.1	252.9	-5.2	1.8	14076.0	12813.8	6078.6
10	585.3	538.1	232.1	-0.2	5.1	14070.9	12936.3	5578.1
								σ [nm]
pixel	nm	nm/pixel						Ave[nm]
104	2500	24.03846						

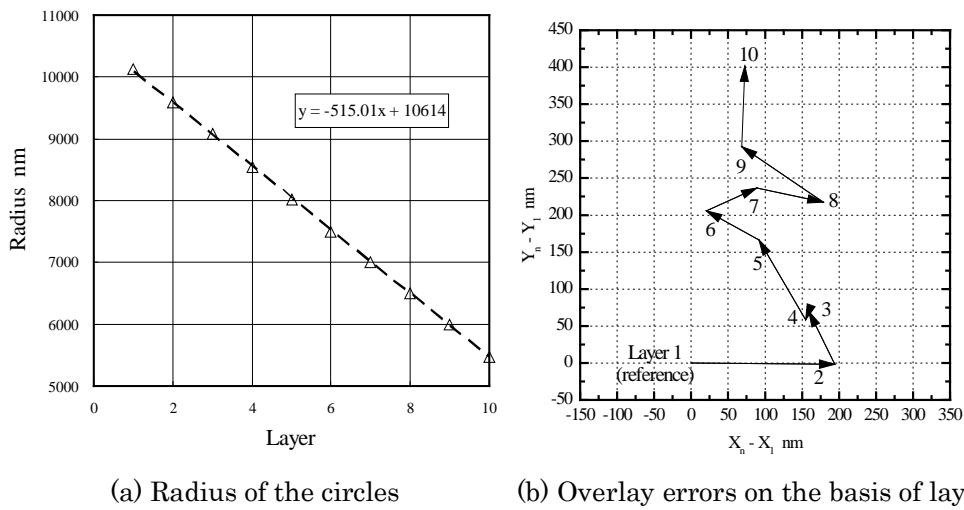


Fig. 4-17 Result of the overlay error

のオーバーレイ誤差となる。このベクトルを見ると、同心円として設計された各円がレイヤごとに不規則な位置ずれを起こしている様子がわかる。

4.4.2 抽出座標数の検討

これまで円周上の抽出座標数は $n=8$ を標準としてきたが、この座標数の妥当性を検討するために、抽出座標数をパラメータとして中心座標を算出し、そのばらつきを評価した。

1枚のSEM画像中の1つの円周上から抽出された40点のエッジ座標を用意し、これからランダムに n 点を選択して円の中心と半径を算出する。最小二乗円法に用いるエッジ座標の数を $n=4, 6, 8, 16, 32$ とした。また比較のため、4.2.2節で示した3点法 ($n=3$ に相当) による評価も実施した。3点法では3つの円周座標から一義的に円が決定するが、その計算式は追補2に記した。いずれの計算もそれぞれランダムな選択を20回実施し、中心と半径の平均およびばらつき(標準偏差)を求めた。

計算結果を Fig. 4-18 に示す。この図は上から順に、算出された円中心の x 座標 a 、 y 座標 b 、および半径 c の各平均値と抽出されたエッジ座標数 n との関係を示すものである。各図で $n=3$ は3点法の結果であり、 $n=4\sim 32$ は最小二乗円法による結果である。これらから、平均値はどの点もほぼ1 pixel 以内となっているが、エラーバー (1σ) は n が大きくなるとともに小さくなることを確認できる。

Fig. 4-19 は、円中心座標の標準偏差の変化をプロットしたものである。3点法 ($n=3$) ではばらつきは2 pixel 以上あるが、 n の増加とともに減少し、 n が6以上で1 pixel またはそれ以下になることが分かる。 n 数は大きいほどばらつきが小さくなるが、計測に要する時間を考慮すれば現実的には $n=8$ 程度でも妥当な結果が得られると考えられる。この場合、 1σ 値は $0.75 \text{ pixel} \times 24 \text{ nm/pixel}$ で 18 nm となる。

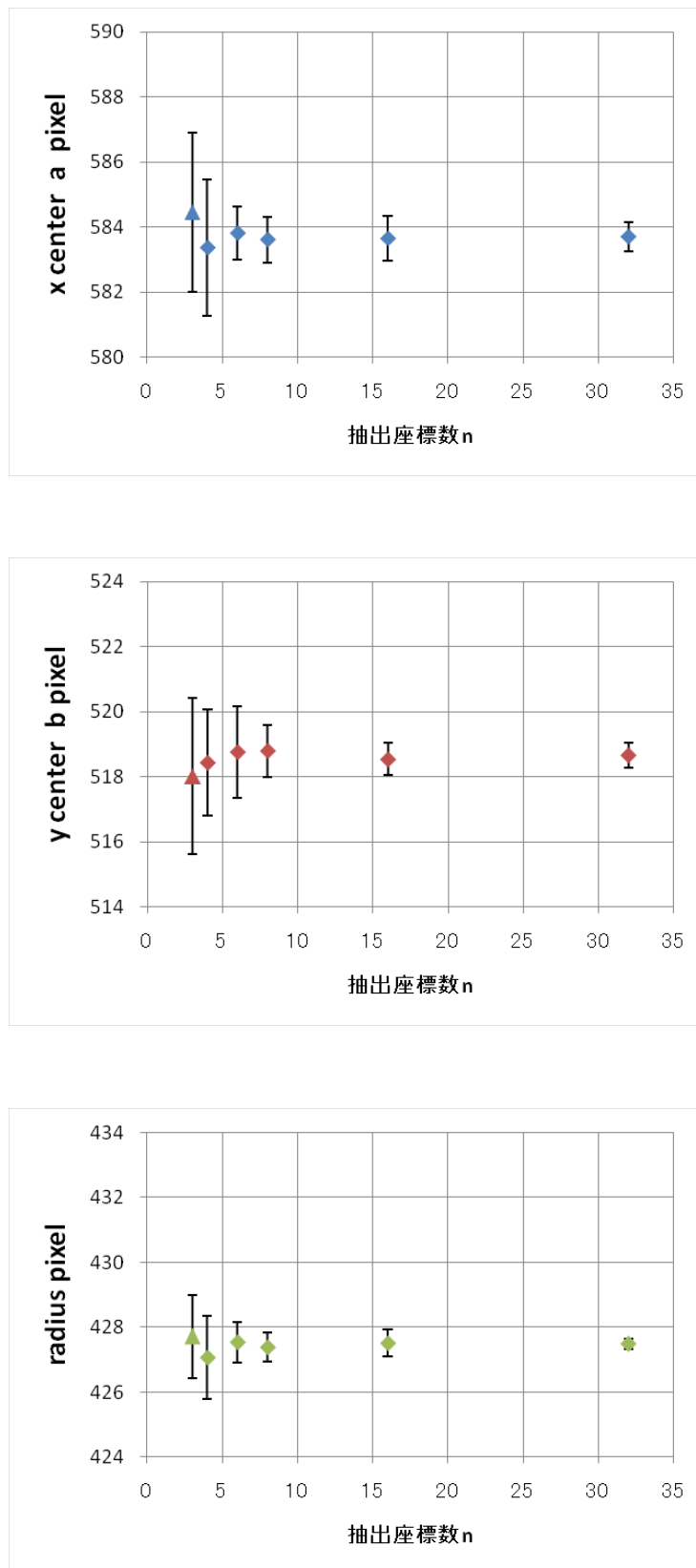


Fig. 4-18 Results of the calculation

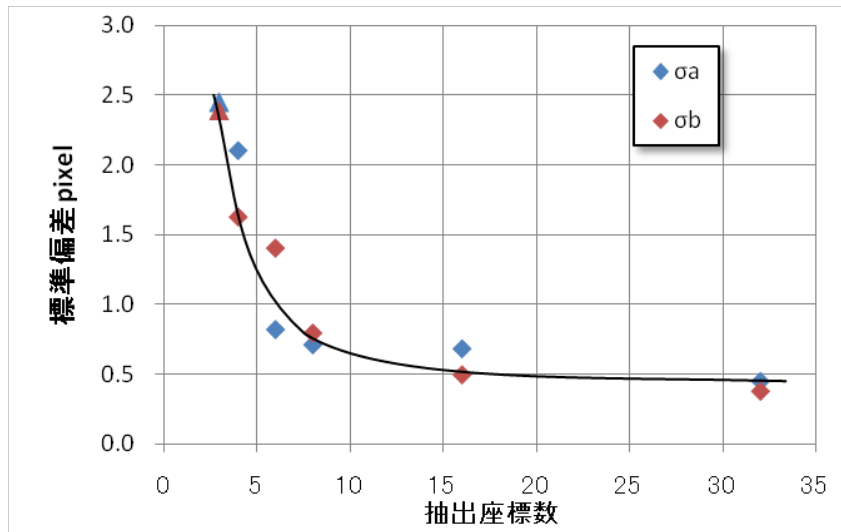


Fig. 4-19 Relationship between 1σ and n

4.4.3 計測の繰返し性

前節の結果，円周上の抽出座標数は 8 点が妥当であることが示された．本節ではこの評価方法の繰返し性を見積もるために，同一の SEM 画像を用いて複数回の計測を行い，標準偏差を算出する．各計測において抽出されるエッジ座標には，それぞれ数 pixel の誤差が含まれるが，これが円の中心座標にどのように伝播するかを明らかにする．

1 枚の SEM 画像において，10 層の各円に対して 8 点のエッジ抽出を行い，1 セットの計測データとする．同一 SEM 画像を用いてあと 4 回同様の計測を繰返し，合計 5 セットの計測データを取得する．これらのデータから最小二乗円法により円の中心座標を計算し，得られる 10 層の円のそれぞれの中心座標 (pixel 値) の繰返し性 (3σ) を評価する．さらに別のサンプルの SEM 画像 2 枚を追加して，別の計測者がそれぞれ同様の評価を行った．

結果を Table 4-3 に示す．用いた SEM 画像は Fig. 4-10 (b) と同様で，倍率 4,000 倍である (24 nm/pixel)．この表から，各円の中心座標測定 of 繰返し性は x, y 各成分とも平均で 1 pixel 以下が得られることがわかる．これは距離に変換 (二乗和の平方根) すると 1.2 pixel となり，スケールを考慮すると半径 29 nm 以下の円に収まることを意味している．

また Fig. 4-20 は，5 回の計測結果から得られた隣接レイヤ間オーバーレイ誤差の繰返し性を示すものである．プロット点の数字シンボル n は，第 $n+1$ 層と第 n 層の円の中心座標の差である．この図から，5 回のオーバーレイ誤差の計測値は，レイヤ間のオーバーレイ誤差のばらつき (数字シンボルを結ぶ線分の長さ) よりも小さく，狭い領域に集中していることがわかる．

したがって，最小二乗円法 ($n=8$) における計測の繰返し性は， 3σ 値で 1.2 pixel (29 nm)， 1σ 値で 0.4 pixel (10 nm) と言える．尚この値は前節の結果 (1σ 値で 0.75 pixel) よりも小さな値となっている．その理由は，前節ではランダムに円周上の点を抽出したのに対し，

Table 4-3 Repeatability of the measurement

Layer	3 σ of center coordinates (n=5) pixel					
	SEM #1		SEM #2		SEM #3	
	x	y	x	y	x	y
1	1.2	1.0	1.5	0.6	1.2	1.5
2	0.7	0.6	0.8	0.8	0.5	1.0
3	1.1	0.5	1.1	1.1	1.0	0.5
4	1.3	0.8	0.2	0.4	1.2	1.0
5	0.8	0.8	0.4	1.0	1.0	0.9
6	0.4	0.4	1.4	1.2	1.2	1.0
7	0.8	0.7	0.5	1.0	0.6	1.2
8	1.2	0.6	0.7	0.6	0.9	0.5
9	0.8	0.7	0.7	1.1	0.9	0.8
10	0.7	1.4	0.6	0.7	0.7	0.8
Ave.	0.9	0.8	0.8	0.9	0.9	0.9
Radius	1.2		1.2		1.3	
Ave.	1.2 (29 nm)					

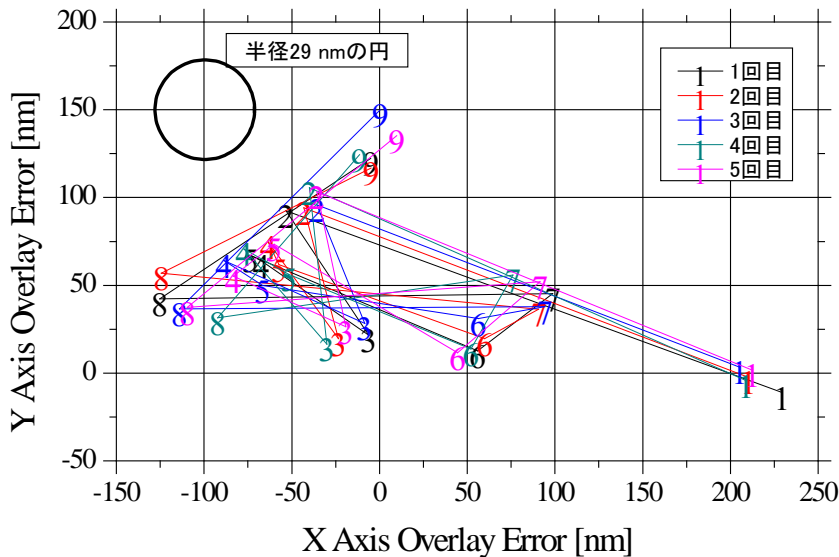


Fig. 4-20 Repeatability of the overlay error by the measurement

本節ではほぼ均等に円周上の点を抽出したためと考えられる。実際の計測では後者のように実施するので、3 σ 値で1.2 pixelの方が妥当である。

本加工技術ではオーバーレイ誤差の目標値を1 σ で100 nmと設定しており、第3章の段階でこれを達成している (Fig.3-25)。しかしながら、このオーバーレイ誤差の内訳をさら

に詳しく解析するためには、その10分の1程度の評価方法が望まれる。本評価方法はそれを達成しており、オーバーレイ誤差の解析に適用可能と考える。

4.5 オーバーレイ誤差の分類

本節では、最小二乗円法を FORMULA 技術に適用し、生産対応機 (F-1 機) において大量の画像データを処理しオーバーレイ誤差を計測する。そしてこれらが 3 種類の誤差に分類できることを示す。

4.5.1 FORMULA 技術への適用

最小二乗円法を用いて、F-1 機のオーバーレイ誤差を評価した。1 回の加工 (1 バッチ) に付き 10 層の積層転写を繰り返して、Fig. 4-21 の SEM 写真に示したように 1 mm 角のセル内に百数十個の構造体を作製する。その中の白い矢印で示した 9 個の円錐状構造体 (底辺の半径が 10 μm) を 4,000 倍で撮影し (Fig. 4-22), オーバーレイ誤差を本評価方法で計測した。各構造体は 10 層からなるので、10 個の円の中心座標が得られ、9 つの隣接レイヤ間のオーバーレイ誤差が取得できる。それが 1 mm 角内に 9 つあるので、1 バッチの加工に付き 81 個のオーバーレイ誤差を計測できる。

解析結果の例を Fig. 4-23 に示す。これは上記セル内 9 個の円錐状構造体の隣接レイヤ間 (第 1 層と第 2 層) のそれぞれのシフト量をベクトル表示したものである。各ベクトルの始点は、1 mm 角のセル内における各構造体の位置 (Fig. 4-21 の白矢印の位置) に置かれている。各ベクトルの終点は第 1 層と第 2 層間のシフト量=オーバーレイ誤差である。このベクトルの長さは実際の 1,000 倍に拡大してあるので、X, Y 軸のスケールを nm として読み替えばよい。そして 9 つのベクトルの x, y 各成分の平均と標準偏差をグラフ右に数値で示し、平均ベクトルをグラフ内左下青四角内に挿入した。この平均ベクトルとばらつきがレイヤ 2-1 間のオーバーレイ誤差の特徴量と言える。この例は、+X 方向に平均で 190 nm 変位しており、その標準偏差は 27 nm であることを示している。同様に Y 方向は、平均で +10 nm、標準偏差は 29 nm である。

このグラフを他の全ての隣接レイヤ間に拡張したものを Fig. 4-24 に示す。左上から右下に向かって、第 1 層と第 2 層の間のオーバーレイ誤差および第 9 層と第 10 層の間のオーバーレイ誤差を順に示している。各ベクトル図の表記は Fig. 4-23 と同様である。この図から、各隣接レイヤ間の 9 つの計測点のベクトルはほぼ同様の傾向であることが分かり、その平均を各プロットの左下囲み中のベクトルで示す。一方個々の隣接レイヤ間のベクトルはそれぞれ向きや大きさが異なることもわかる。

以上が 1 バッチの加工で得られるオーバーレイ誤差のデータである。9 つの構造体それぞれに 9 つのレイヤ間オーバーレイ誤差ベクトルが得られた。以下の節では、これらの誤差ベクトルをランダム誤差や系統誤差に層別して考察する [11]。

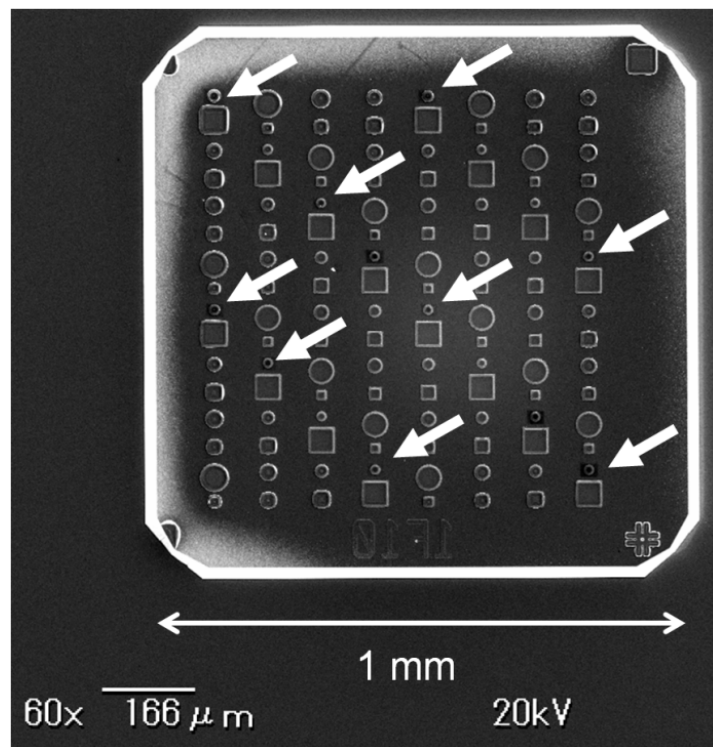


Fig. 4-21 SEM photograph of the cell

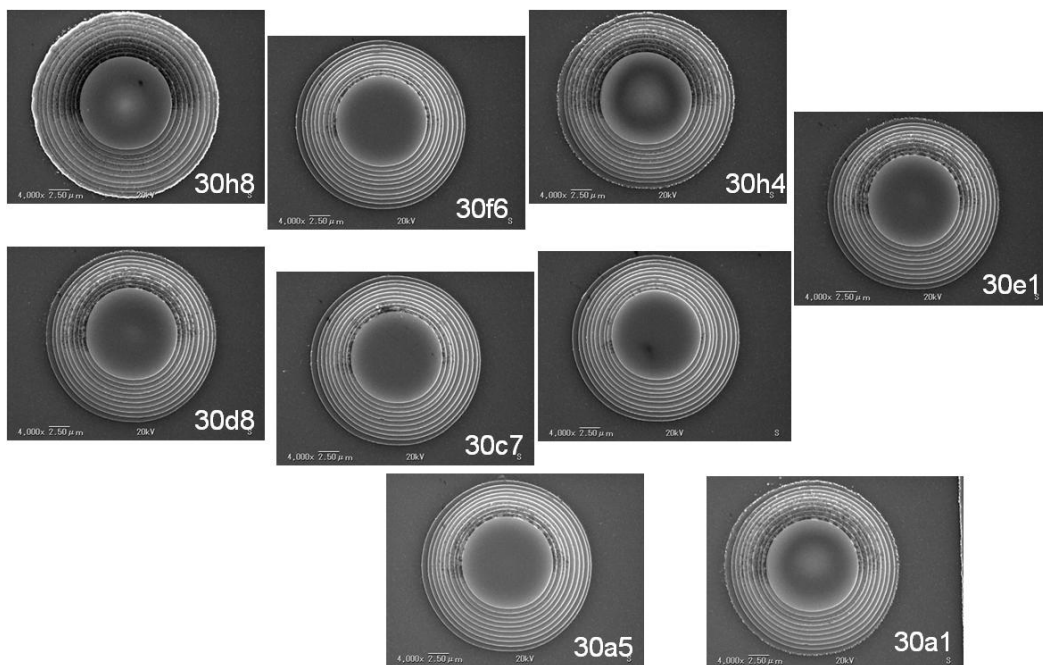


Fig. 4-22 Close-up view of the evaluated patterns

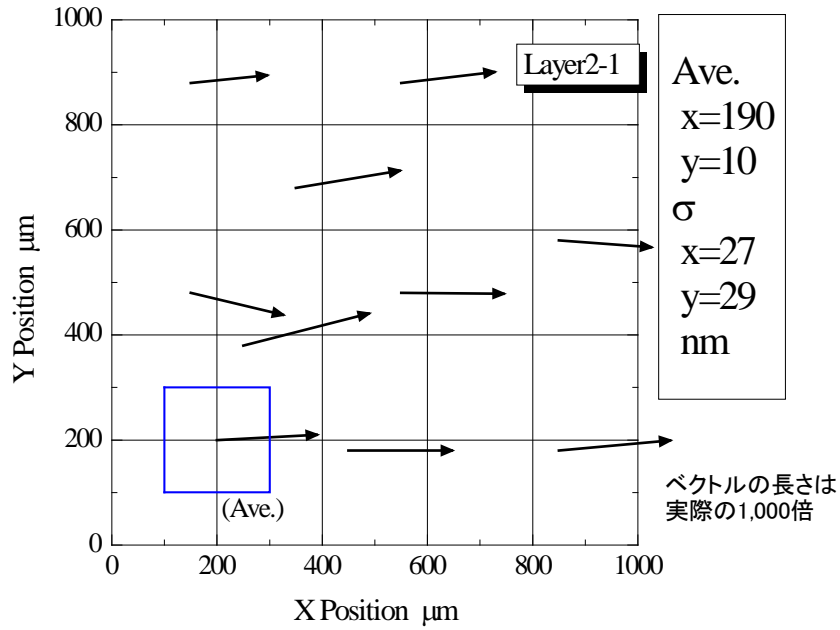


Fig. 4-23 Vector plot of the overlay errors (Batch30, Layer2-1)

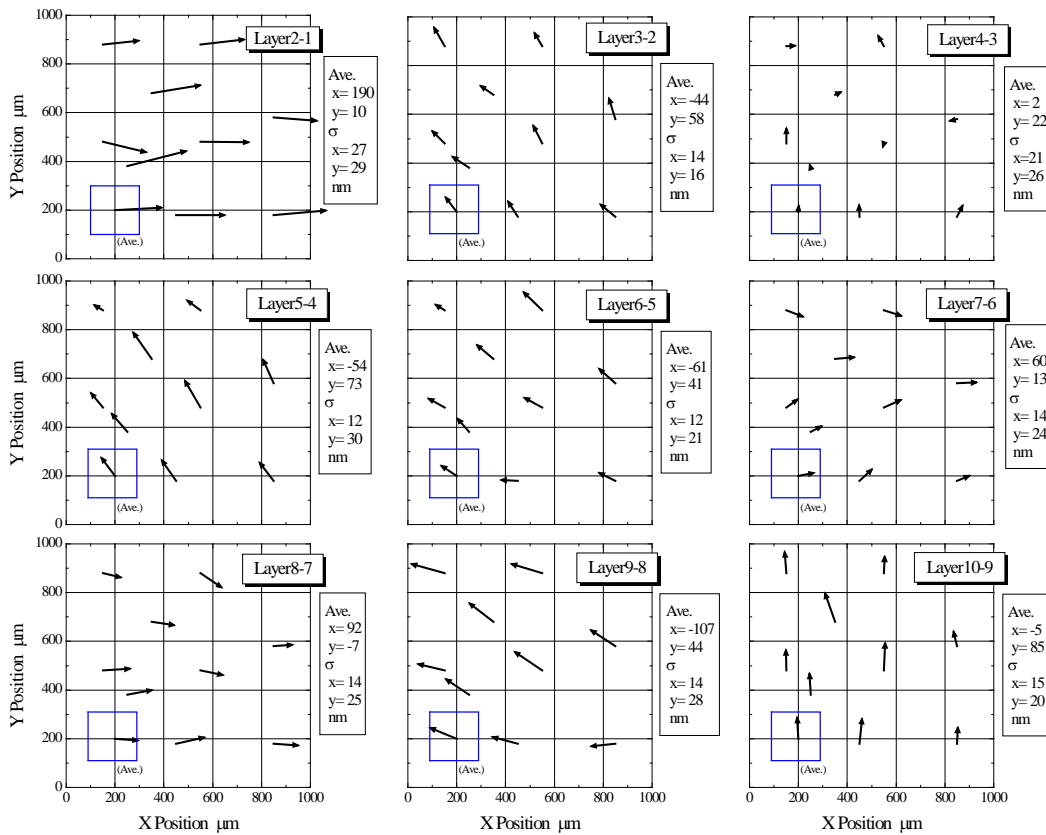


Fig. 4-24 Vector plots of the overlay errors (Batch 30 All)

4.5.2 セル内ランダム誤差

Fig. 4-23 に示したように、セル内の 9 つの構造体の隣接レイヤ間シフト量はほぼ同様である。このことは、これらの構造体が積層転写により一括作製されたことを考えると妥当な結果である。一方それらの標準偏差 (Fig. 4-24 の各プロット右四角内の σ 値) を Fig. 4-25 にまとめた。横軸は隣接レイヤであり、例えば「2-1」はレイヤ 2 とレイヤ 1 のレイヤ間を示す。縦軸は X, Y 各成分の σ 値とこれらの二乗和の平方根 (距離 Dist.) である。これらの平均は、距離にして約 30 nm である。この隣接レイヤ間のランダム誤差を、「セル内ランダム誤差 : Intra-cell random error」と呼ぶことにする。この要因は、セル内の各同心円の位置のばらつき、および最小二乗円法による計測によるばらつきの合計と考えられるが、次章で詳しく議論する。

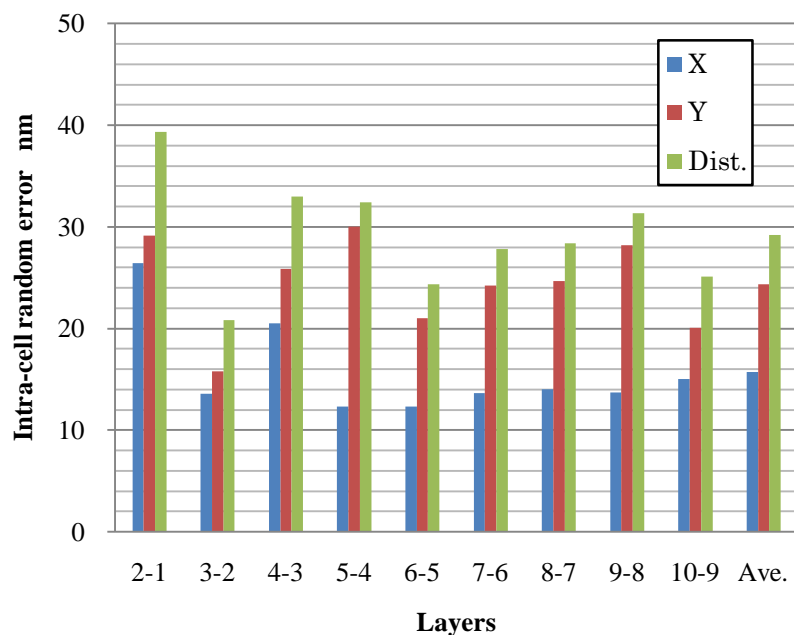


Fig. 4-25 Intra-cell random error (Batch 30)

4.5.3 セル間ランダム誤差

一方 Fig. 4-24 によれば、隣接レイヤ間のシフト量は青四角内の平均ベクトルが示すようにレイヤごとにばらついている。これを「セル間ランダム誤差 : Inter-cell random error」と呼ぶことにする。これら 9 つの平均ベクトルをレイヤ 1 から 9 まで順につないだものを Fig. 4-26 に示す。また各ベクトル先端の円はセル内ランダム誤差を示す円 (Fig. 4-25 の Dist. が半径) である。このようなベクトルのばらつきは、各レイヤを積層転写する際に装置 XY ステージの移動を伴っているため、ステージ位置決め (スタンプ位置) の誤差を表していると考えられる。その要因としては、①装置に振動や熱変位がある、②Z 軸の剛性が不十分、などが推定されるが、その詳細は次章で議論する。

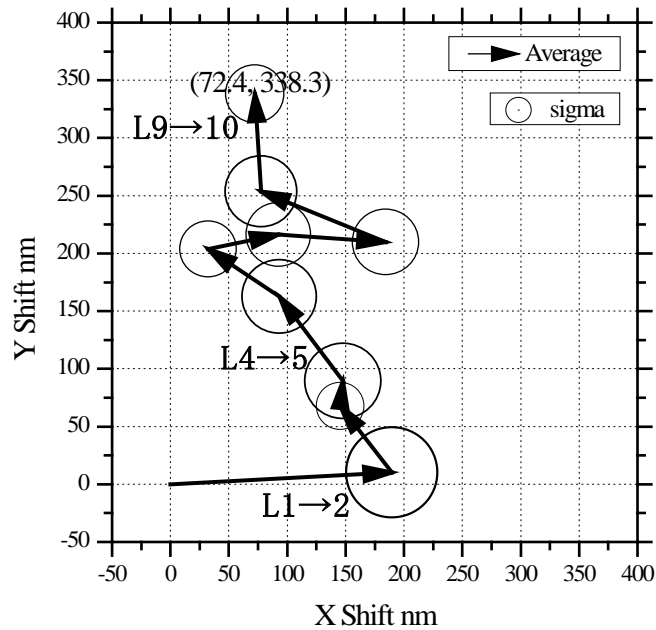


Fig. 4-26 Inter-cell random errors (vectors) with intra-cell random errors (circles)

4.5.4 セル間系統誤差

Fig. 4-26 に示したように一見ばらついているように見えるセル間ランダム誤差であるが、全体的に見れば+Y 方向にドリフトする傾向にあることがわかる。このドリフト量を「セル間系統誤差：Inter-cell systematic error」と呼ぶ。この系統誤差は 10 層目まで（9 回のステージ移動）で (72.4, 338.3) nm であるので、1 レイヤあたり平均で (8.0, 37.6) nm/layer である。またこの構造体を作製した時のセルピッチ（隣のセルへ移動するときのステージ移動量）が 1 mm であることから、概略+Y 方向に 38 ppm (parts per million) と読み替えることができる。このような系統誤差が発生しないよう、積層前にはドナー基板の座標系と装置ステージの座標系のアライメント動作を実施しているが、このような系統誤差が残っているということはこのアライメント動作が不十分であった可能性が高いと考えられる。

以上述べてきたように、オーバーレイ誤差は 3 種類に分類されることを示してきた。これらをまとめると Fig. 4-27 のように表すことができる。黒線のベクトルで示されるセル間ランダム誤差は、ステージの移動に伴うレイヤ間のオーバーレイ誤差のばらつき、円で示されるセル内ランダム誤差は、セル内で同時に接合転写された複数のパターン間のオーバーレイ誤差のばらつき、太い青矢印で示されるセル間系統誤差は、積層を繰り返すことにより生じるセル間オーバーレイ誤差のドリフトである。

このように最小二乗円法を用いることにより大量のオーバーレイ誤差を簡便に評価することが可能となった。これまでは第 3 章 Fig. 3-25 に示したように、限られた量のデータし

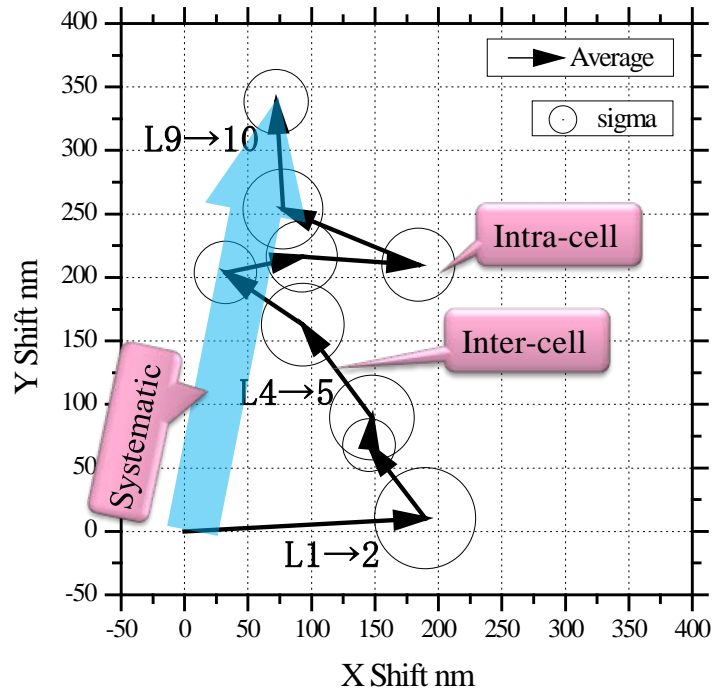


Fig. 4-27 Summary of overlay errors

かななかったため、全体的な傾向を把握するにとどまっていた。本評価方法を用いれば FORMULA 技術におけるオーバーレイ誤差をランダム誤差と系統誤差に切り分けることが可能となり、本加工方法に起因する誤差要因の分析に有用である可能性が示された。

4.6 結言

本章では、積層造形法による3次元構造体のオーバーレイ誤差を評価する方法として、「最小二乗円法」を提案した。この方法は、多段の円錐状構造体を加工し、各段の円エッジ座標から最小二乗法により各円形パターンの中心座標を算出し、この変位をオーバーレイ誤差とするものである。抽出されるエッジ座標に数ピクセルのばらつきが含まれていても、抽出座標数を8点とすれば、中心座標のばらつきは十分小さくなる。同一SEM画像を複数回計測して得られた本計測法の繰返し性は、中心座標の 3σ 値でx, yともに1 pixel以下、距離に変換すると1.2 pixel (29 nm)である。これは従来の方法に対し繰返し性で優れるとともに、計測時間の大幅な短縮が可能となった。

本計測法を FORMULA 技術による加工精度の評価に適用したところ、オーバーレイ誤差は、(1)セル内ランダム誤差、(2)セル間ランダム誤差、(3)セル間系統誤差、の3種類に層別できることが明らかとなった。これは、最小二乗円法の適用により多数の位置ずれデータを簡便に取得できる点と、繰返し性の高い計測精度による寄与が大きい。

以下の章では生産対応機 (F-1 機) において複数バッチの加工を実施し、上記3種類の誤差と加工装置との相関を詳細に解析し、オーバーレイ誤差の原因を明らかにする。

追補

1. 行列計算

最小二乗法を実行するマトリックス計算ソフトウェアとしては、Matlab®が一般的である[12]。これとほぼ同じ機能・同じ使い勝手を有するScilab[13]を使用した。Scilabの解説はInternet上にいくつか有益なサイト[14], [15]があり、またMatlabの参考書[16]がほぼそのまま参照できる。

作成したプログラムコードを Fig. 4-28 に示す。図中右側に解説を挿入したが、プログラムは4つのセクションからなる。第1のセクションは抽出された80点の座標データファイルの読み込みと後の計算のためのベクトルの整形である。第2のセクションで実際の計算を行っているが、同心円10個分の計算をループ計算で実行している。行列計算ソフトウェアを使うことで、計算が非常にシンプルに記述されることが分かる。第3のセクションは確認のため、元データと計算結果の円のプロットである。グラフ描画のコマンドも非常にシンプルである。最後のセクションで、計算結果をテキストファイルに出力する。このファイルに10層分の円の中心座標と半径が含まれている。

```

SciPad - doshimen3.sce
File Edit Search Execute Debug Scheme Options Windows Help

function [kotae]=multicircle()
//山田
//2007/7/3
//xy座標のテキストファイルを読み込んで、
//同心円の中心と半径のテキストファイルを出力する所まで自動化
//同心円10個の円周上の点各8点から、それぞれの円の中心と半径を計算
//元データと最小二乗円をプロット

file_name=input("Type file_name.txt?","string");
xypoints=read(file_name,80,2);
newxypoints=matrix(xypoints,10,16);
xx=newxypoints(1:10,1:8);yy=newxypoints(1:10,9:16);

L=10;n=8;
aa=zeros(L,1);bb=zeros(L,1);rr=zeros(L,1);

for elle =1 : L
A=(xx(elle,:).^2+yy(elle,:).^2)';
z=ones(xx(elle,:));
//disp(A);disp(z);
B=[(2*xx(elle,:))',(2*yy(elle,:))',z]';
//disp(B);
C=inv(B'*B)*B'*A;
//disp('C=',C);
//
aa(elle)=C(1,1);
bb(elle)=C(2,1);
rr(elle)=sqrt(C(3,1)+C(1,1)^2+C(2,1)^2);
//disp('rr=',rr(elle))
end
kotae=[aa,bb,rr];
disp('kotae=',kotae);

//それぞれの円を描画する
t=-%pi:%pi/36:%pi;clf();
plot(xx,yy,'ro');

for elle =1 : L
x=rr(elle)*cos(t)+aa(elle);
y=rr(elle)*sin(t)+bb(elle);
plot(x,y,'-b');
end

//結果の出力
output_file=strsubst(file_name,'.txt','_result.txt');
write(output_file,kotae);

endfunction

```

ファイルの読み込みと行列の整形

計算と結果の確認

元データと算出された円のプロット

座標と半径の行列を出力

Fig. 4-28 Scilab program for the least square fitting

2. 3点法の計算式

円の方程式を

$$(x-a)^2 + (y-b)^2 = c^2$$

と表す. 3点 (x_1, y_1) , (x_2, y_2) , (x_3, y_3) がこの円上にあることから,

$$(x_1 - a)^2 + (y_1 - b)^2 = c^2$$

$$(x_2 - a)^2 + (y_2 - b)^2 = c^2$$

$$(x_3 - a)^2 + (y_3 - b)^2 = c^2$$

となる. a, b, c を未知数としてこの連立1次方程式を解くと, 以下のようになる.

$$a = -\frac{(y_3 - y_2) \cdot P - (y_2 - y_1) \cdot Q}{2\{(x_2 - x_1)(y_3 - y_2) - (x_3 - x_2)(y_2 - y_1)\}}$$

$$b = \frac{(x_3 - x_2) \cdot P - (x_2 - x_1) \cdot Q}{2\{(x_2 - x_1)(y_3 - y_2) - (x_3 - x_2)(y_2 - y_1)\}}$$

$$c = \sqrt{(x_1 - a)^2 + (y_1 - b)^2}$$

ここで簡単のため,

$$P = x_1^2 - x_2^2 + y_1^2 - y_2^2$$

$$Q = x_2^2 - x_3^2 + y_2^2 - y_3^2$$

とおいた.

参考文献

- [1] S. KAWATA, H. B. SUN, T. TANAKA AND K. TAKADA: FINE FEATURES FOR FUNCTIONAL MICRODEVICES, NATURE, **412** (2001) P. 697.
- [2] 佐藤康春, 佐藤 隆: ステップにおけるオーバーレイ誤差の統計解析, 精密工学会誌, **69**, 7, (2003) P. 1018.
- [3] 山内朗: 光 MEMS のサブミクロン組み立てについて, エレクトロニクス実装学会誌 **5**, 2, (2002) P. 122.
- [4] 例えば, 谷口淳: はじめてのナノインプリント技術, 工業調査会
- [5] J. LI AND F. MARTIN: ACCURATE ALIGNMENT TECHNIQUE FOR NANOIMPRINT LITHOGRAPHY, PROC. SPIE INT. SOC. OPT. ENG. **5752**, PT. 1 (2005) P. 429.
- [6] J. GAO, C. PICCIOTTO, W. WU AND W. M. TONG: FROM NANOSCALE DISPLACEMENT SENSING AND ESTIMATION TO NANOSCALE ALIGNMENT, J. VAC. SCI. TECHNOL. B **24**, 6 (2006) P. 3094.
- [7] (社)精密工学会 画像応用技術専門委員会編: 画像処理応用システムー基礎から応用までー, 東京電機大学出版局 (2000).
- [8] http://mcalc.zapto.org/otherDoc/reg_circle/index.html
- [9] 日立ハイテク社製標準メゾスケール, Si チップ上に形成された格子状のパターンで 20 μm 、6 μm 、2 μm の三種類のピッチを持つ.
- [10] T. OTAKA: CD MEASUREMENT TECHNOLOGY USING ELECTRON BEAM AND SCOPE OF FUTURE PROSPECT, TECH. REP. IEICE, **102**, 622, (2003) P. 33.
- [11] 林茂雄, 馬場涼 訳, 計測における誤差解析入門, 東京化学同人, 2000.
- [12] 開発元は, The MathWorks 社 <http://www.mathworks.com/>, 日本における代理店はサイバネット社 <http://www.cybernet.co.jp/matlab/>
- [13] <http://www.scilab.org/>
- [14] <http://www.ecl.sys.hiroshima-u.ac.jp/scilab/introscilab/introscilab.html>
- [15] <http://www.bekkoame.ne.jp/~ponpoko/Math/Scilab.html>
- [16] 高井信勝, 「信号処理」「画像処理」のための MATLAB 入門【増補版】, 工学社

第5章 オーバーレイ誤差の評価と解析

5.1 緒言

本章は本論文の主たる部分である。第3章で示した **FORMULA** 技術を具現化する生産対応機 (F-1 機) のオーバーレイ誤差を、第4章で示した最小二乗法で評価する。

最初に 5.2 節で F-1 機のオーバーレイ誤差を評価するための積層構造体の作製方法と、F-1 機自身の性能評価方法について説明する。5.3 節ではオーバーレイ誤差の測定結果を示すとともに、第4章で例示した3種類の誤差分類に従いオーバーレイ誤差を整理する。5.4 節から 5.6 節では、これら3種類の誤差ごとに F-1 機の性能と関連付けて誤差要因を特定する。次の 5.7 節では、特にセル間系統誤差に着目し、この主要因と考えられる F-1 機のアライメント動作をシミュレーションにより再現し、ランダム誤差と系統誤差の関連を議論する。5.8 節ではこの結果を活用し F-1 機のアライメント動作を実験的に変更して、セル間系統誤差を改善するための試みについて示す。最後に 5.9 節で本章をまとめる。

5.2 評価方法

5.2.1 オーバーレイ誤差の評価

F-1 機の加工誤差の要因を解析するために、第4章で提案した最小二乗法を用いてオーバーレイ誤差を詳細に評価し解析した。

評価用のパターンは 4.3 節で示した **TEG6** であり、第4章 Fig. 4-7 に示した 10 層の円錐状積層構造体である。構造体材料は Al-Cu 合金で、転写前後の膜厚およびそのばらつきは、いずれも $170 \text{ nm} \pm 10\%$ である。構造体の加工は 5 バッチ実施し、すべて同一のドナー基板、同一の加工条件を用いた。

1 mm 角のセル内には 128 個の円錐状積層構造体が一括して形成されているが、その中から底辺の直径が $20 \mu\text{m}$ の円錐状構造体を 9 つサンプリングしてオーバーレイ誤差を評価した (Fig. 4-21 および Fig. 4-22 参照)。

5.2.2 F-1 機の性能評価

一方 F-1 機自身を構成する機械要素の性能評価としては、XY ステージや Z ステージの静止安定度を装置に付属するレーザ干渉測長器や外付けの静電容量型変位計で評価した。レーザ干渉測長器 (3.3.4 節参照) は装置に常時設置されているため利用しやすく、また基準面 (天板) に対する変位量を直接読み取れるというメリットがある。静電容量型変位計は補助的に使用し、ドナー基板 (X-Y ステージ) に対するターゲット基板 (Z 軸先端) の相対的な変位を計測するために用いた。

またステージや天板など機構部の温度を熱電対で測定した。特に発熱源として考えられる FAB 照射装置 (3.3.7 節参照) やそのビーム照射方向にある部材に着目して計測した。

一方構造体の断面パターンを形成するフォトマスク (**TEG6**) の寸法精度はフォトマスク

用座標測定装置 (Leica LMS IPRO2) で評価した。

5.3 オーバーレイ誤差の評価結果

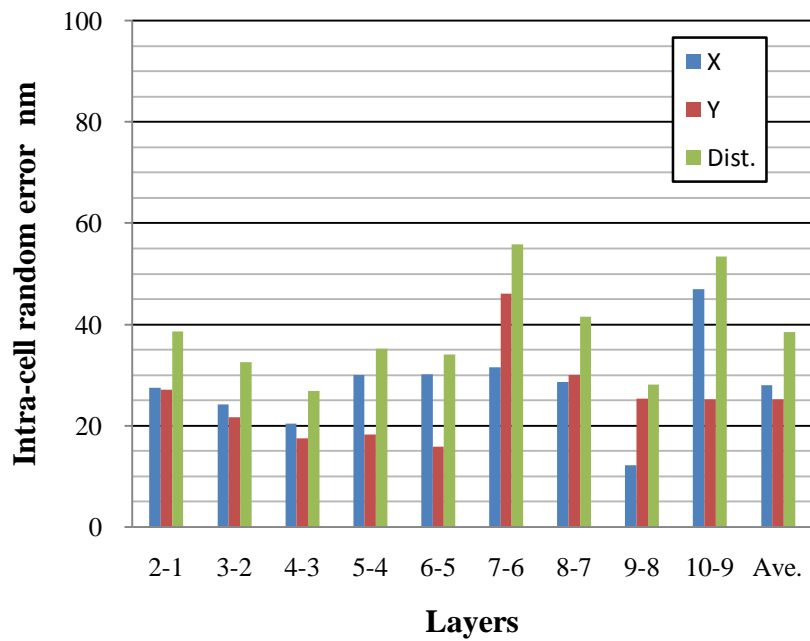
10層積層体の加工を5バッチ行い、それぞれに対して第4章 Fig. 4-23 および 4-24 に示したオーバーレイ誤差のベクトルプロットを行い、この統計処理からセル内ランダム誤差、セル間ランダム誤差、およびセル間系統誤差を算出した。

Fig. 5-1 はセル内ランダム誤差の評価結果を示すもので、5バッチの加工の中から例として2バッチ分を示す。これは第4章 Fig. 4-25 に対応するものである。横軸は隣接レイヤであり、例えば「2-1」はレイヤ2とレイヤ1のレイヤ間を示す。縦軸はセル内ランダム誤差の 1σ 値であり、 x 方向成分、 y 方向成分、およびそれらから算出される距離 $\text{Dist.}(\sqrt{x^2 + y^2})$ である。

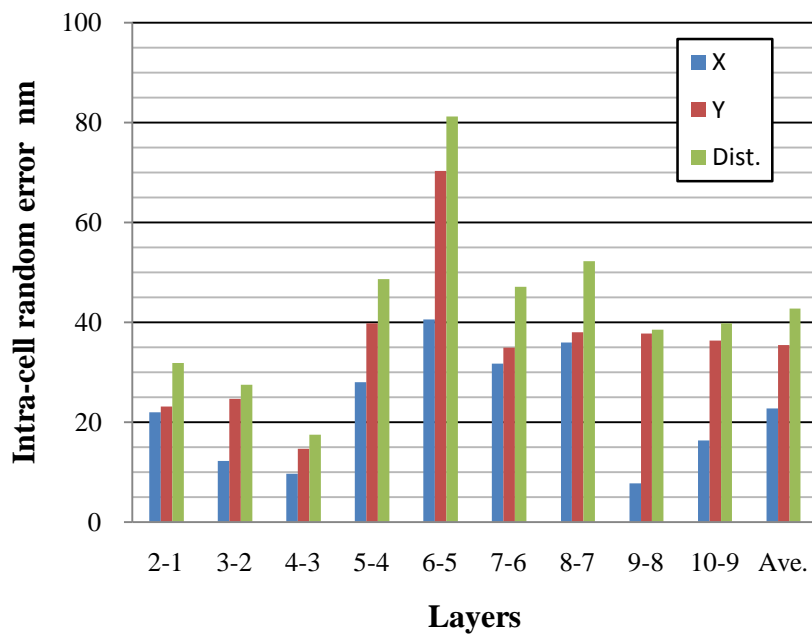
Fig. 5-2 はセル間ランダム誤差の結果を示すもので、例として2バッチ分を示す。これは前章 Fig. 4-26 に対応するものである。ベクトルは隣接レイヤ間のシフト量の平均、ベクトル先端の円はその標準偏差 (Fig. 5-1 内の Dist.) を半径とする円である。このベクトルの長さの平均がそのバッチのセル間ランダム誤差である。

Fig. 5-3 はセル間系統誤差5バッチ分のベクトルプロットであり、加工バッチ毎のばらつき傾向を示すものである。青線で示したベクトルが各バッチのセル間系統誤差の値であり、それらの長さの平均は 32 nm である。この図中の赤線で示した平均ベクトルは、 x, y 各要素の5バッチ分の平均からなるベクトルであり、その長さは 19 nm である。また黒線で示したベクトルは、各バッチのセル間系統誤差と平均ベクトルとの差ベクトルである。これらの関係は、5.6節で議論する。

上記3種類のオーバーレイ誤差ごとに5バッチ分の評価結果をまとめたグラフを Fig. 5-4 に示す。セル内およびセル間ランダム誤差は、標準偏差の x 成分および y 成分の二乗和の平方根 (距離) である。また系統誤差は、隣接レイヤ間のシフト量 (1 mm ピッチあたりの距離) とし、レイヤ 2-1 間～レイヤ 10-9 間の9データの絶対値の平均である。計測誤差をエラーバー ($\pm\sigma$) として表記したが、 $n=9$ の平均値の標準偏差なので、第4章で述べた最小二乗円法による計測誤差 ($1\sigma=10$ nm) の $1/\sqrt{9} = 1/3$ を用いている。3種類の誤差要因の中で、セル間ランダム誤差が最も大きいことが分かる。



(a) Batch 31



(b) Batch 80

Fig. 5-1 Intra-cell random error

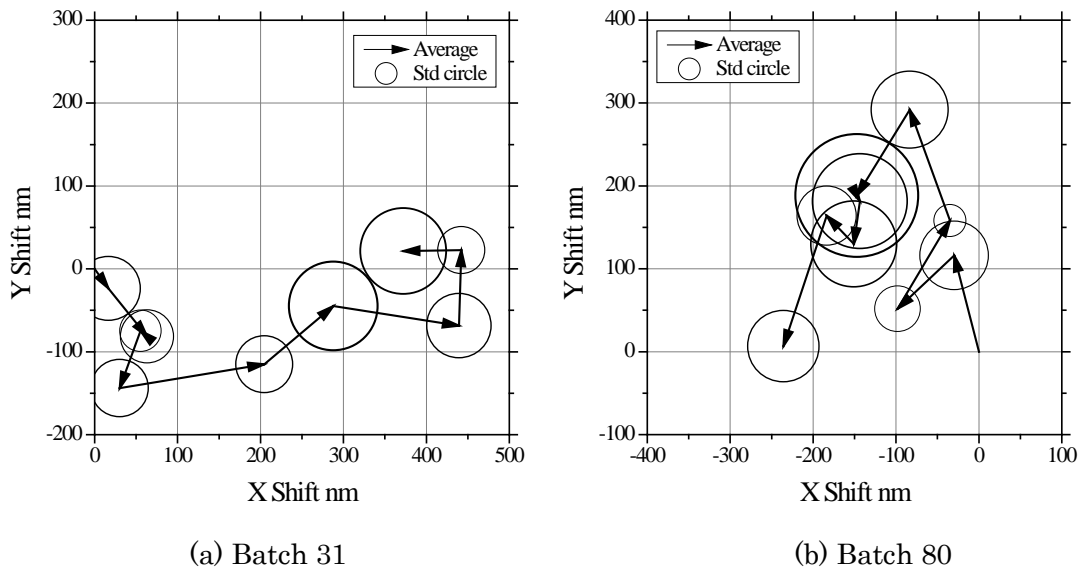


Fig. 5-2 Inter cell random error

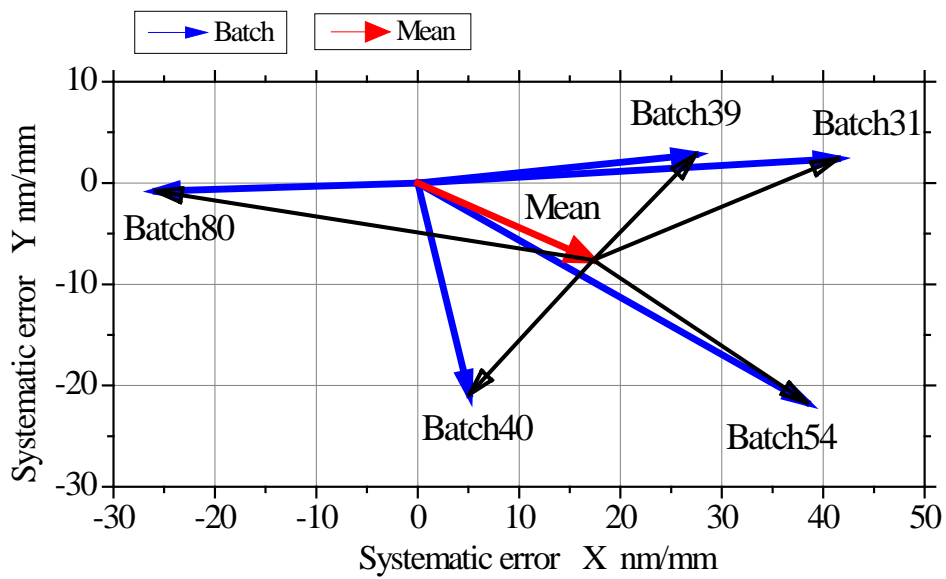


Fig. 5-3 Vector plot of the inter cell systematic error

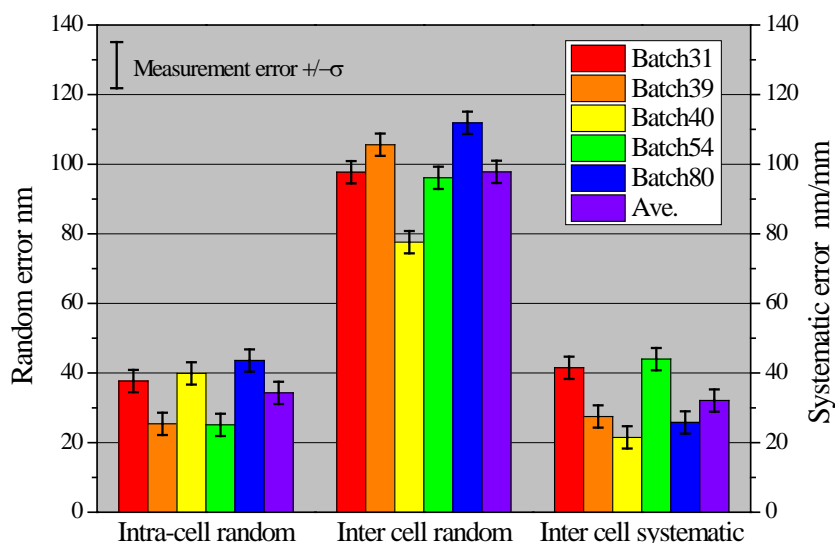


Fig. 5-4 Summary of overlay errors in 5 batches

5.4 セル内ランダム誤差の解析

3つの誤差分類の内、まずセル内ランダム誤差から解析する。Fig. 5-4 から、セル内のランダム誤差の5バッチ平均は1σ値で34 nmであることが分かる。セル内の各構造体は一括して積層転写されていることから、これらのランダム誤差は最小二乗円法によるオーバーレイ誤差の計測誤差と、ドナー基板上に形成された各構造体を構成する断面部材（円形パターン）の座標位置誤差からなると考えられる。

第4章ではこの計測誤差（繰り返し性）が3σ値で29 nm（1σ値で9.5 nm）と評価した。したがって残差としてドナー基板のパターニング誤差は

$$34.0^2 - 9.5^2 = 32.6^2$$

から33 nmと見積もられる[1]。さらにこの内訳は、パターンの原版であるフォトマスク自身の座標誤差と、これを用いたリソグラフィー工程（レジストパターニングとエッチングなど）による誤差である。

ドナー基板の作製に用いたフォトマスク TEG6 の座標誤差は、フォトマスク用座標測定装置（Leica LMS IPRO2）を用いて、1 mm 角のセル内に形成された基準マークの座標を計測して、そのばらつきとして評価された。この測定装置の座標測定精度（繰り返し性）は3σ値で10 nm 以下である。フォトマスク上のパターン内、Fig. 5-5 に示す1 mm 角セル内に配した十字パターンの中心座標を計測し、設計値（1,000.00 μm）からの変位をランダム誤差とした。セルの配列方向はx方向とy方向の2種類あるため、その両者を評価した。また参考のため、古いフォトマスク TEG3（第3章 3.2.2 節参照）も計測し、比較した。

結果を Fig. 5-6 に示す。これは十字パターンの座標のランダム誤差3σ値をフォトマスクの種類およびアレイの配列方向ごとに評価した結果である。それぞれについて十字パター

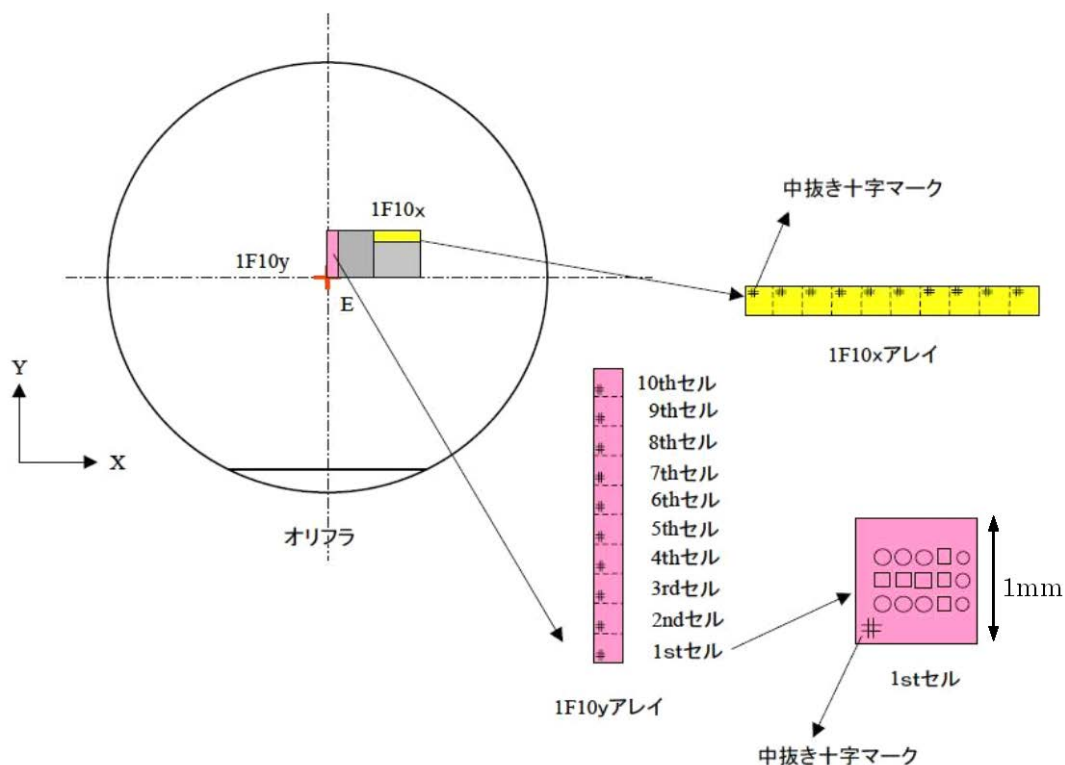


Fig. 5-5 Measurement of photomask accuracy

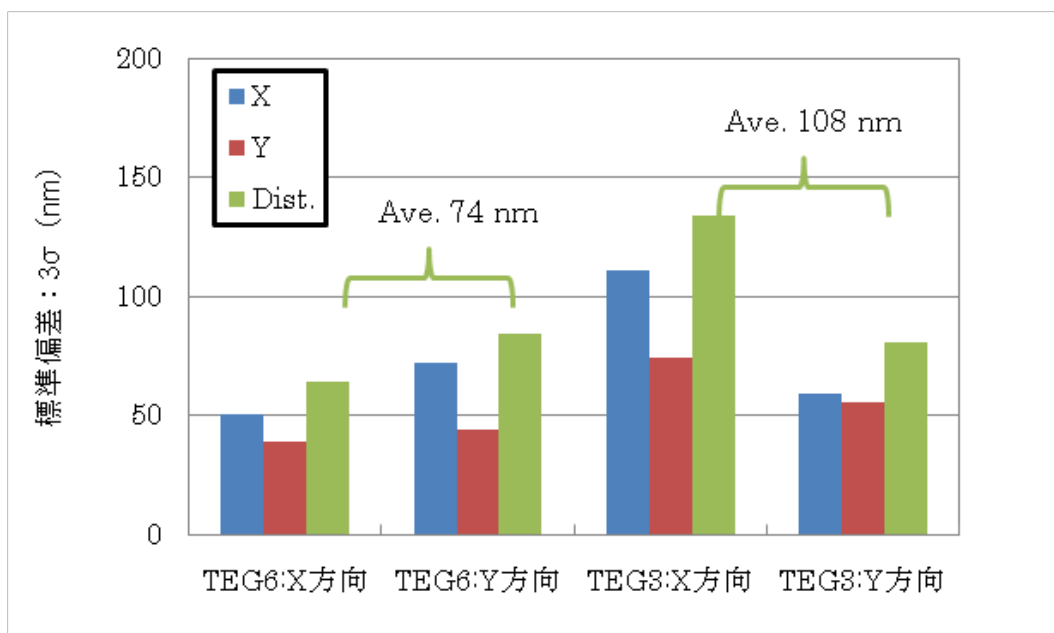


Fig. 5-6 Accuracy of photomasks

ンの x 方向ランダム誤差, y 方向ランダム誤差, およびそれらの二乗和の平方根 (距離) の 3 つの指標を示した. この図から, TEG6 は TEG3 に比べ誤差が小さくなっていることが分かる. その原因は, フォトマスク作製時の電子ビーム描画スポットサイズを, TEG3 の

250 nm から TEG6 では 100 nm に微小化して作製精度を向上させたためである。(その反面、描画に時間がかかりフォトマスクが高価になるというデメリットがある。) このグラフから、今回用いた TEG6 フォトマスクの座標誤差は、X 方向配列および Y 方向配列それぞれの平均をとり 74 nm、一方 TEG3 は 108 nm と言える。

TEG6 の座標誤差は標準偏差 3σ 値で 74 nm (1σ 値で 24.7 nm) であるので、フォトマスク上のパターンがリソグラフィー工程を経てドナー基板上的パターンに転写される時のリソグラフィー誤差は、残差として

$$32.6^2 - 24.7^2 = 21.3^2$$

から 21 nm と見積もられる。したがってセル内ランダム誤差をもたらす要因は Fig. 5-7 のように、最小二乗円法による計測誤差およびドナー基板のパターニング誤差 (フォトマスクの座標誤差とリソグラフィー誤差) の 3 要因にそれぞれ配分される。なお図において白枠で示した要因は誤差の実測値がある要因、灰色の枠で示した要因は、他の要因から見積もった残差としての推定値を示している。

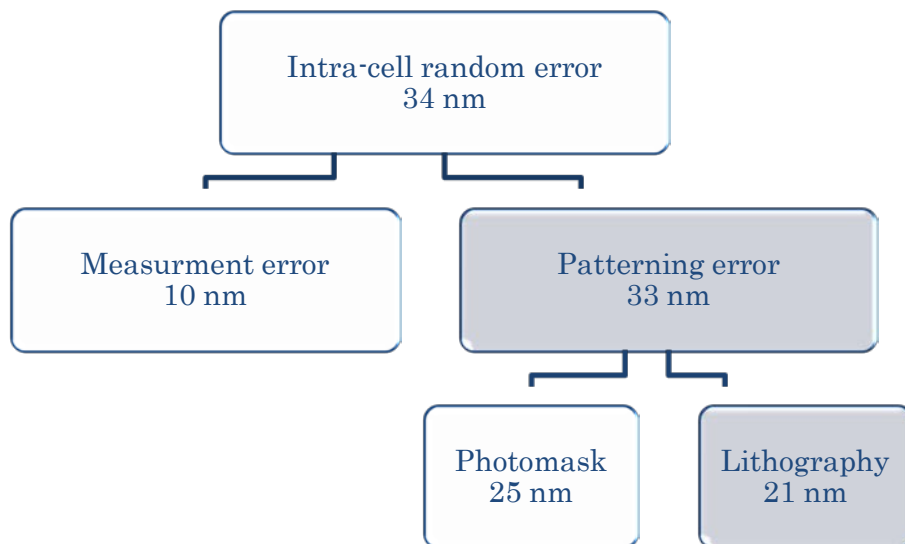


Fig. 5-7 Distribution of intra-cell random error (1σ)

5.5 セル間ランダム誤差の解析

Fig. 5-4 によれば、セル間ランダム誤差は最も大きな誤差要素であり、その平均は 1σ 値で 98 nm である。セル間ランダム誤差は、ある層から次の層にスタンプ位置を移動する際、その指示値と実際の座標値との偏差のばらつきである。

このようなばらつきを引き起こす要因として最初に考えられるものはステージの振動 (静止安定性) である。そこでまず XY ステージの静止安定性を装置に付属のレーザ干渉測長器で評価した。振動の評価に本レーザ干渉測長器を使用したのは、振動を変位として直接測定することが望ましいと判断したこと、レーザ干渉測長器は装置の位置決めのために

常時使用しており利用しやすいことにある。Fig. 5-8はX-Yステージの座標値を50 Hzのサンプリング周波数でモニタしたものである。この結果、Y座標の標準偏差は43 nmであることが分かった。同様にX座標は60 nmであったので、これら2成分を合成すると74 nmの静止安定性となった。(サンプリング周波数の是非に関しては追補 1 参照)

次にZ軸先端の振動を評価した。Z軸には装置内蔵の座標計測手段がないため、静電容量型変位計を取り付けたドナー基板をXYステージに固定し、Z軸先端のXY面内ブレを2方向同時に評価した。その結果をFig. 5-9に示す。これはXYステージとZ軸先端の相対変位を示すもので、比較のためターボ分子ポンプ(TMP)のon/off時ごとに計測した。その結果、TMP on時の相対変位量は、距離にして標準偏差(1 σ)は約46 nmであった。これ

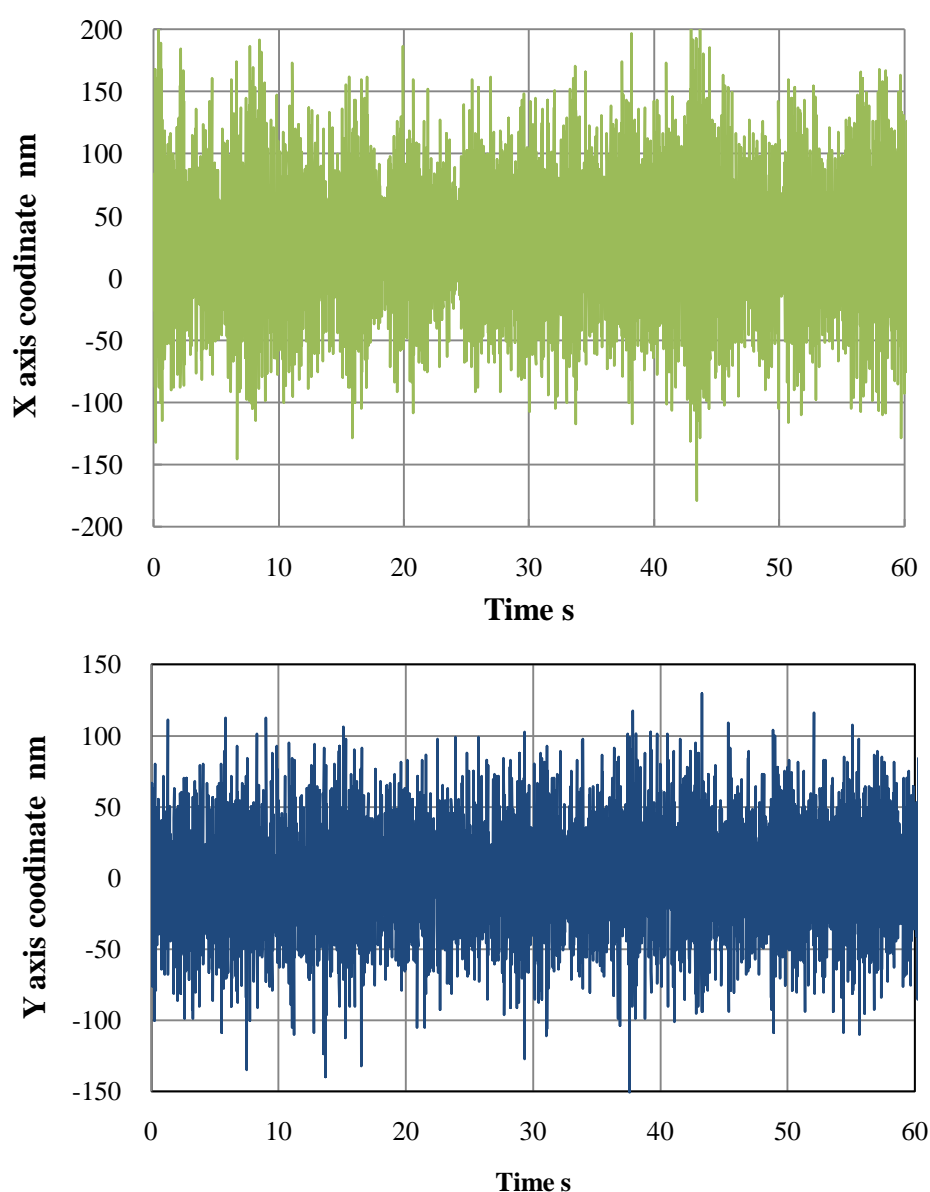


Fig. 5-8 Stability of X-Y stage measured by interferometer

は 3.3.5 節で示した Z ステージ単体の性能 (22 nm) よりも大きな値となっている。

本加工方式では、Z ステージの軸中心を XY 座標の原点としており、圧接動作において Z 軸先端 (ターゲット基板保持部) は常に原点に復帰することを前提として設計されているので、Z 軸には高剛性のリニアガイドを採用している。しかしながら圧接のため伸長した際、支持部から Z 軸先端までのオーバーハングが 150 mm と長く、また装置稼働状態で計測したことにより、TMP の振動の影響を受け、ブレ量が増加したものと考えられる。

加振源として考えられる TMP 以外の機器も ON/OFF させて原因機器を切り分けしたと

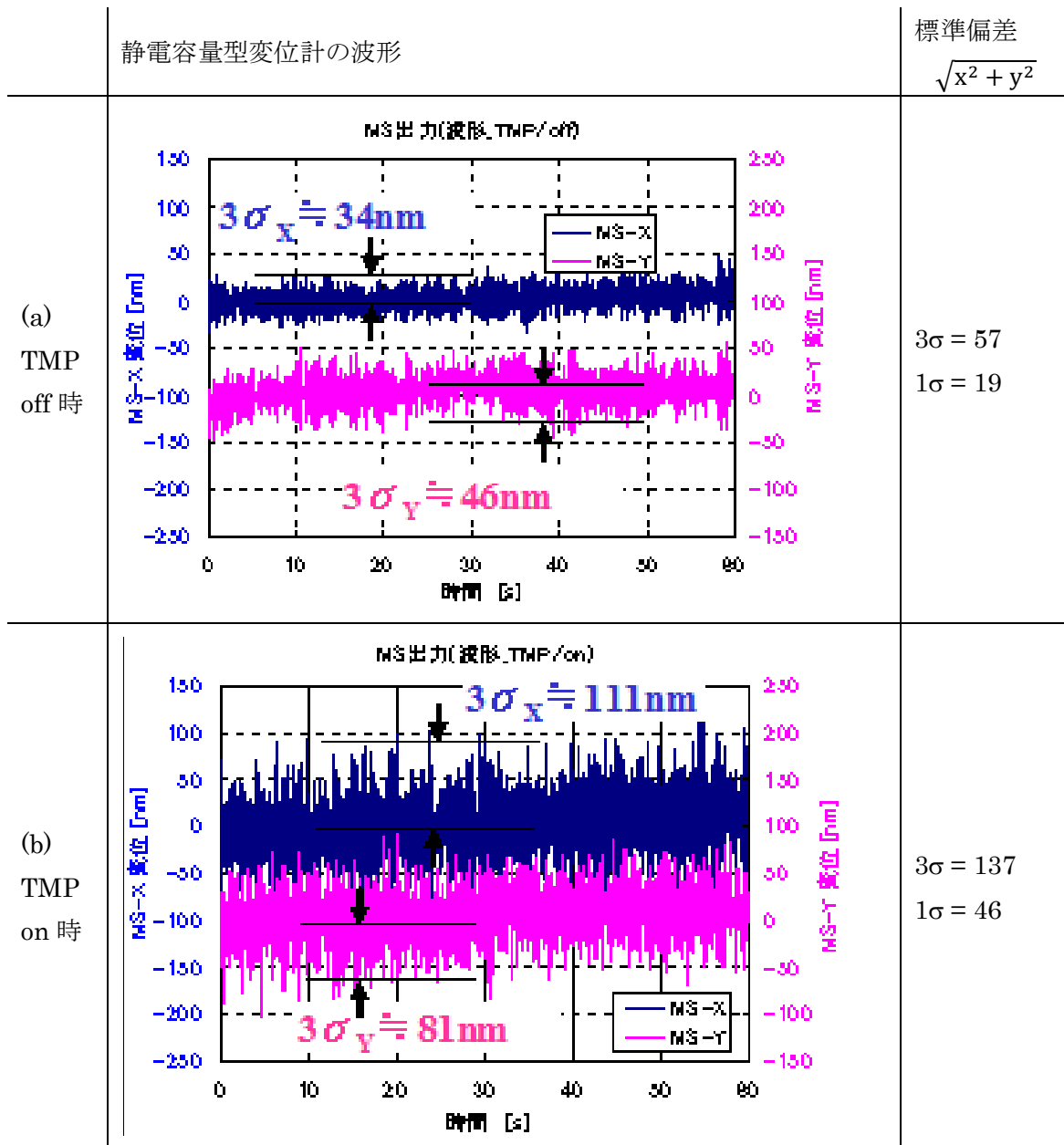


Fig. 5-9 Relative displacement error between X-Y stage and Z stage

ころ、主たる加振源はやはり TMP であることが判明した。これは接合チャンバーの主排気ポンプであり、Fig. 5-10 に示すようにベローズ継ぎ手を介してチャンバーに取り付けられている（排気系の詳細は 3.3.2 節参照）。振動の伝達経路は、床経由（Path 1）、ベローズ継ぎ手経由（Path 2）、TMP 支持台経由（Path 3）の 3 通りが考えられるが、除振台およびベローズ継ぎ手の振動減衰能力は個別に評価した振動伝播特性から判断して十分であることから、TMP 支持台経由が主たる伝播経路であることが明らかとなった。

以上の結果、セル間ランダム誤差の主要因は主排気ポンプの TMP であり、この振動が支持台を経由して XY ステージおよび Z 軸先端に伝搬していることが明らかとなった。両者の合計は

$$74^2 + 46^2 = 87^2$$

から 87 nm であり、セル間ランダム誤差 98 nm の大部分を占めていると言える。これらの改善には振動の絶縁の徹底や制振機構の導入[2]などが必要と考えられる。

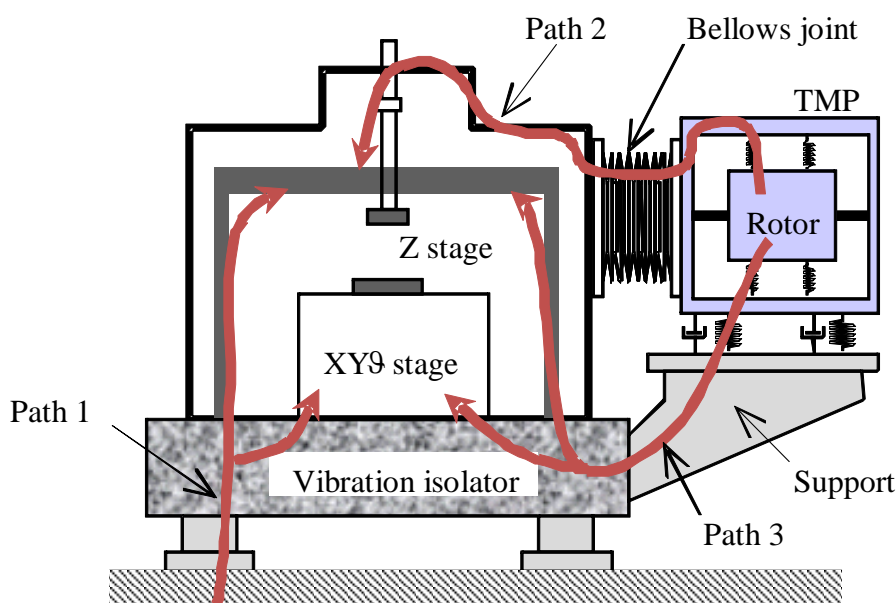


Fig. 5-10 Transmission paths of vibration from TMP

5.6 セル間系統誤差の解析

Fig. 5-4 によれば、セル間系統誤差の 5 バッチ平均は 32 nm/mm である。これは 1 mm 角のセルを 1 層積層するごとに 32 nm シフトすることを意味しているため 32 ppm (parts per million) とも表記でき、積層時のステージストロークに比例する。したがってセルのサイズが拡大され移動ピッチが大きくなったり積層数が増えたりした場合、大きな誤差要因となる。さらに Fig. 5-3 によれば、系統誤差はバッチごとにばらついているように見えるが、赤矢印の平均ベクトル（長さ 19 nm）で示される偏りが見られる、すなわち各バッチで同様に発生する成分があることも分かる。

このような系統誤差をもたらす原因としてまず考えられるのはステージ系の温度ドリフトである。そこでチャンバー内数か所に熱電対を取り付け、積層転写時の装置動作を模擬して運転し、温度変化を約 1 時間にわたり観察した。その結果を、最も温度上昇の大きかった FAB (Fast Atom Beam) 照射装置の筐体および最も少なかった天板について Fig. 5-11 に示す。FAB 照射装置は 3.3.7 節に示したように高電圧とアルゴンガスを用いたプラズマ発生装置であり水冷ジャケットにより冷却されているが、標準照射条件下では約 20 W の発熱源となり、この時筐体の温度は照射に伴い最大 56 °C まで上昇していることが分かる。また天板は質量の大きな鋼板であるが、その温度は FAB の照射に伴い、0.1 °C 上昇している。この温度上昇が測長系に及ぼすドリフト量は、天板の線膨張係数が $0.5 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ 、Z 軸中心から干渉計ミラーマウントまでの長さが X, Y 方向それぞれ 370 mm, 290 mm であることから、19 nm, 15 nm となる。この値は Fig. 5-3 に示した系統誤差の平均ベクトル（赤矢印）と概略一致し、また積層プロセスは 5 バッチとも同一であり熱履歴も同一であることから、この系統誤差の平均は、積層時の温度上昇によるものと考えられる。

本加工装置は、常温接合法を採用しており基板加熱ヒーターを必要としないこと、粗動ステージ駆動モータを真空チャンバー内に配置していないこと、チャンバー内の主要構造部材に低熱膨張率材料を用いていること、およびレーザー干渉測長器のビーム光路の大部分が真空チャンバー内にあることなど、温度ドリフトに配慮した設計としたが、FAB 照射による温度上昇対策は不十分であった。FAB 本体の水冷ジャケットの拡大や、天板に直接 FAB が照射されないようなシールド板の追加などが対策として考えられる。

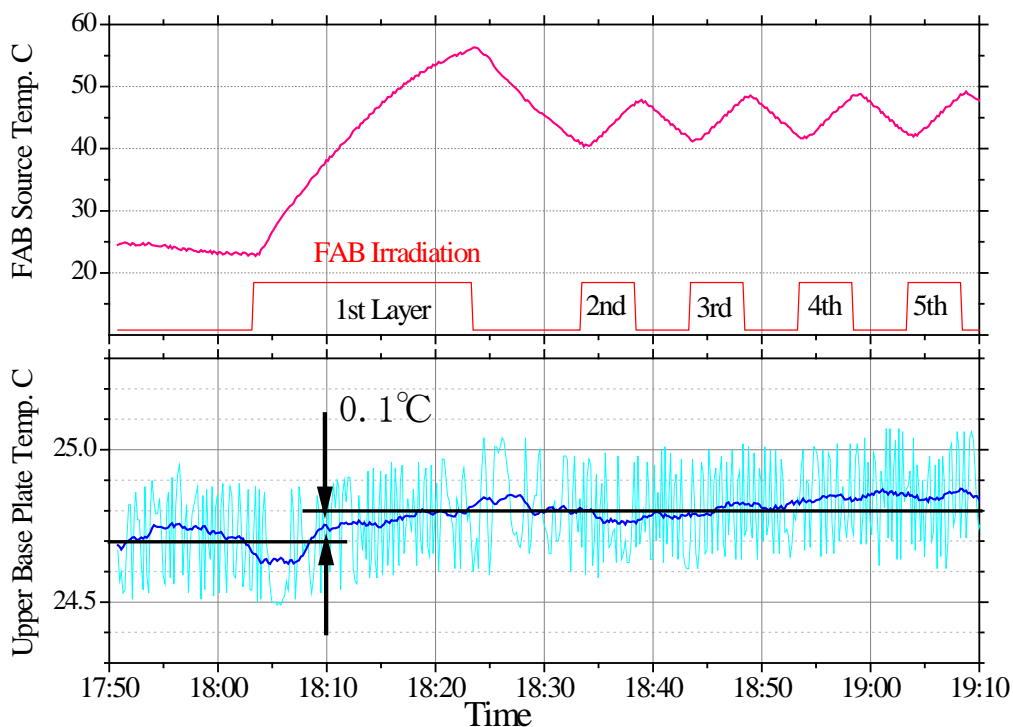


Fig. 5-11 Temperature rise in fabrication

次に Fig. 5-3 のセル間系統誤差のうち、バッチごとにばらつく黒ベクトルについて考察する。このベクトルの平均長さは 26 nm であり、毎回同様に発生する平均（赤ベクトル、長さ 19 nm）よりも大きい。これがバッチ毎に発生することに着目し、原因として装置のアライメント動作を抽出した。本装置では、XY ステージの座標系とドナー基板上に形成された断面パターンの xy 座標系間のスケーリング誤差や回転誤差等を補正するため、積層転写前にアライメントを実施している（詳細は 3.2.3 節参照）。しかしながら前述のように XY ステージの静止安定性が不十分でステージ座標がばらついている状態では、アライメントマーク読取座標に誤差が生じ得ると考えた。そこで装置のアライメント動作をシミュレーションし、アライメントマークの読取誤差が加工精度にどのように伝搬するかを求めることにした。

5.7 アライメント動作のシミュレーション

5.7.1 計算方法

F-1 機のアライメントの目的は、ドナー基板座標系におけるセル座標 (x, y) すなわち設計位置を、ステージ座標系におけるスタンプ位置座標(X, Y)すなわち加工位置に変換することである。アライメント動作はドナー基板が接合室に搬入された直後に行われ、第 3 章 Fig. 3-3 に示した 3 個のアライメントマーク (A2~A4 の十字マーク) を接合チャンバー内に取り付けられたアライメント顕微鏡で観察し、その中心座標をアライメントマーク座標と認識する。座標変換は第 3 章で示した式 3-1 を用いて行われる。

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} (1+\alpha)\cos\theta_x & -(1+\beta)\sin\theta_y \\ (1+\alpha)\sin\theta_x & (1+\beta)\cos\theta_y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \quad (5-1)$$

ここで (X₀, Y₀) はステージ座標系におけるドナー基板の原点位置座標、αおよびβは、ステージ座標系およびドナー基板座標系間のそれぞれ X 軸および Y 軸のスケーリング誤差、θ_x および θ_y はそれぞれ回転誤差と直交誤差であり、これら 6 個のアライメント係数は 3 個のアライメントマークの X,Y 座標、合計 6 個の値から第 3 章式 3-5 を用いて一義的に求められる。

本シミュレーションでは、Fig. 5-12 に示すように、3 個のアライメントマークの設計座標値に振動によるランダム誤差として正規分布誤差 (σ= 100~1000 nm) を加えてアライメントマーク読取座標とし、これらからアライメント係数を求め、これに 1 mm 角のセル 10 層分の設計座標 (構造体 1 セット分) を与えて式 (5-1) に基づきセル 10 層分のスタンプ位置座標を算出した。これと設計上のセル座標との変位をオーバーレイ誤差として見積もった。以上の計算を 10 回繰り返した。

この計算には行列計算ソフトウェア Scilab [3] を用いた。プログラムリストを追補 2 に示した。

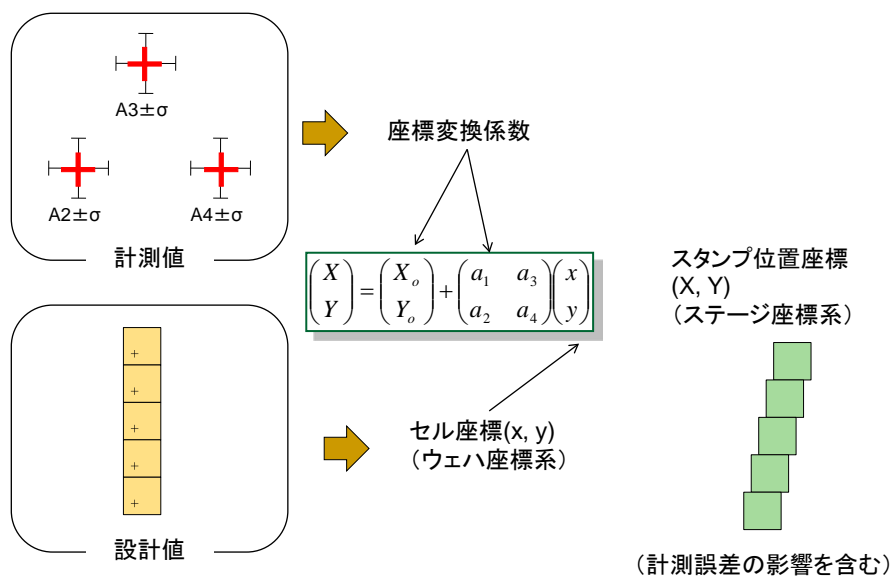


Fig. 5-12 Flow of alignment simulation

5.7.2 計算結果

Fig. 5-13 は、3つのアライメントマーク座標に加えられたランダム誤差の大きさ（正規分布誤差の標準偏差）と、アライメント係数のうち10回の計算における X_0 , Y_0 の標準偏差 (1σ) の関係を示す計算結果である。ランダム誤差の増加に伴い、 X_0 , Y_0 のばらつきはほぼリニアに増加する様子が分かる。図中の緑線は、 X_0 , Y_0 の実験値（標準偏差）であり、同一のドナー基板を用いて複数回アライメント動作を行い、その際に残る装置のログを読みとって算出した。F-1 機では、アライメントマーク認識後の読取座標そのものではなくアライメント係数 X_0 , Y_0 をログに記録するため、比較の対象をログに残る X_0 , Y_0 とした。

実験とシミュレーションとの比較の結果、アライメントマーク座標読取の誤差の標準偏差は 400 nm が妥当である。これは 5.5 節で述べたステージの振動（標準偏差 73.6 nm の静止安定性）よりも大きい。その原因として考えられるのは、アライメント顕微鏡の鏡筒や撮像ユニット部の振動である。これらはステージの振動とは独立であり、両者が加算されアライメントマーク読取座標のばらつきがステージ振動よりも大きくなったと思われる。

次にアライメントマーク読取誤差として 400 nm を導入して 1 mm 角セルのスタンプ位置を求め、これから系統誤差を算出した結果を Fig. 5-14 に示す。図中の 10 本の線は 10 回の計算結果（10 バッチに相当）であり、各線上のプロット点はセル番号（10 層積層時の各レイヤに相当）である。これは実験結果を示した Fig. 5-2 の各ベクトルの推移に対応するものであるが、セル間ランダム誤差を考慮していないので、セル番号の移動は直線的であ

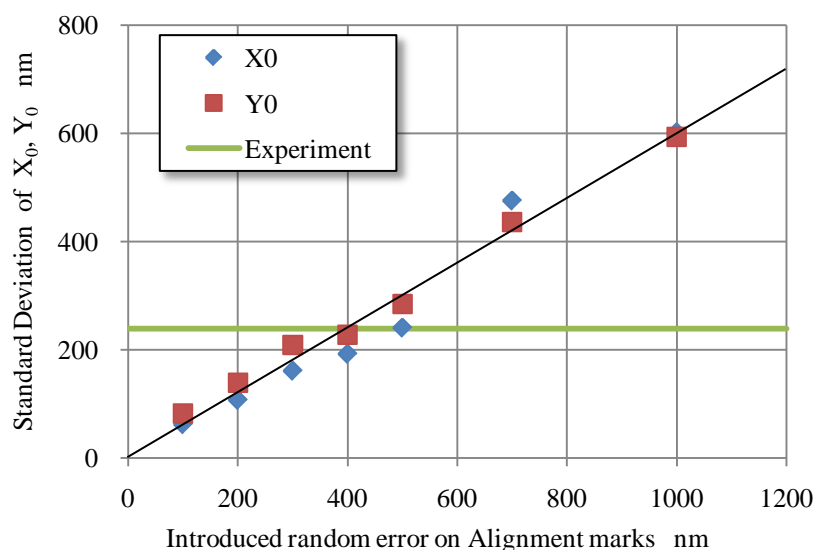


Fig. 5-13 Relation between conversion factors and random error

り，セル間系統誤差だけを分離して見ることができる．このグラフから，系統誤差は1セル当たり平均で9 nm/mm (10層目までの距離をステップ回数9で割る)，標準偏差6.6 nm/min, 最大時には20 nm/mm となり，距離だけでなくその方向も大きくばらつくことが確認できる．この結果は Fig. 5-3 の黒矢印に対応するもので，バッチごとに距離と方向が大きくばらつくことと一致している．

セル間系統誤差は，毎回同様に発生する繰返し成分（熱変位に起因）と加工バッチ毎にばらつく成分からなると述べたが，以上のことから，この系統誤差のばらつき成分がアライメントマークの読取座標のばらつきにより生じていると考えるのが妥当である．

Fig. 5-15 は，3つのアライメントマーク座標に加えられたランダム誤差の大きさと，Fig. 5-14 のように算出した系統誤差の関係（平均と標準偏差）を示す計算結果である．ランダム誤差の増加に伴い，系統誤差が線形的に増加していることが分かる．

本シミュレーションにより，アライメントマーク読取座標のランダム誤差が，オーバーレイ誤差の系統誤差に伝搬していることが明らかとなった．すなわち，ステージの振動に起因するアライメントマーク読取座標のランダム誤差がアライメント補正係数に伝搬し，その結果XY ステージのスタンプ位置座標の指令値に系統誤差をもたらす．Fig. 5-15 は，目標とする系統誤差を達成するために，アライメントマーク読取座標の繰返し性の指標となる．例えば，アライメントに伴う系統誤差を2 nm/mm 以下にしたければ，アライメントマーク読取座標のランダム誤差を $\sigma < 100$ nm とする必要がある．

以上の結果，3種類のオーバーレイ誤差とその主要因をまとめると Fig. 5-16 のようになる．

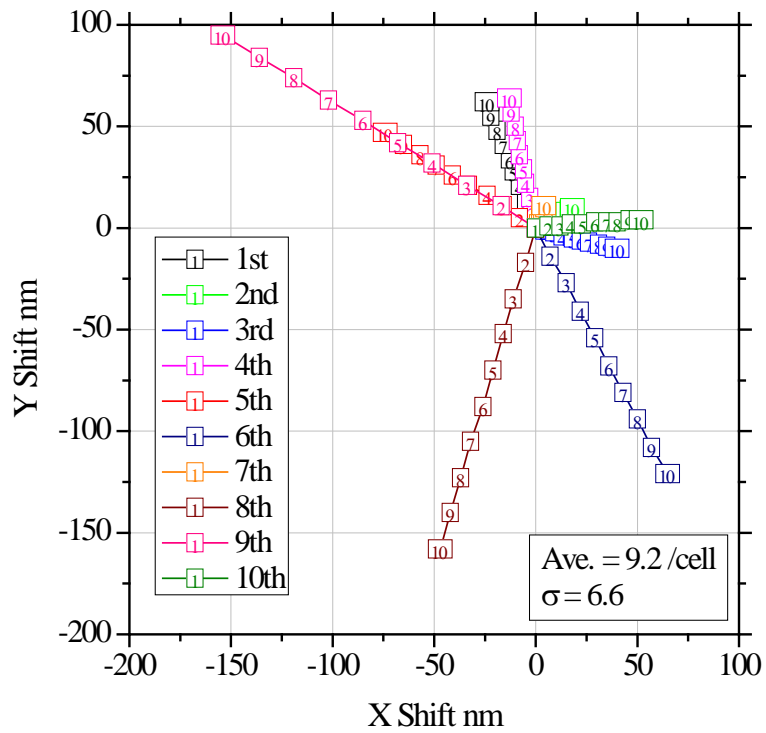


Fig. 5-14 Simulated overlay errors with random error of 400 nm

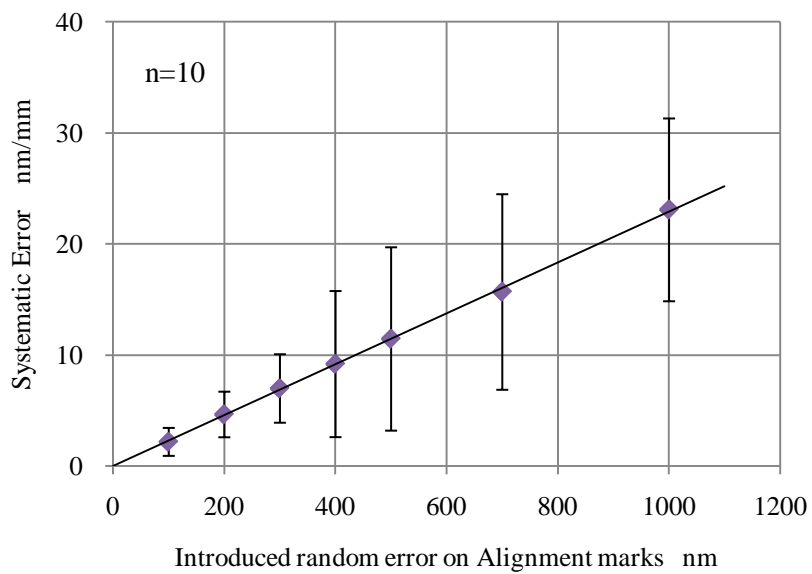


Fig. 5-15 Simulated systematic errors with random errors

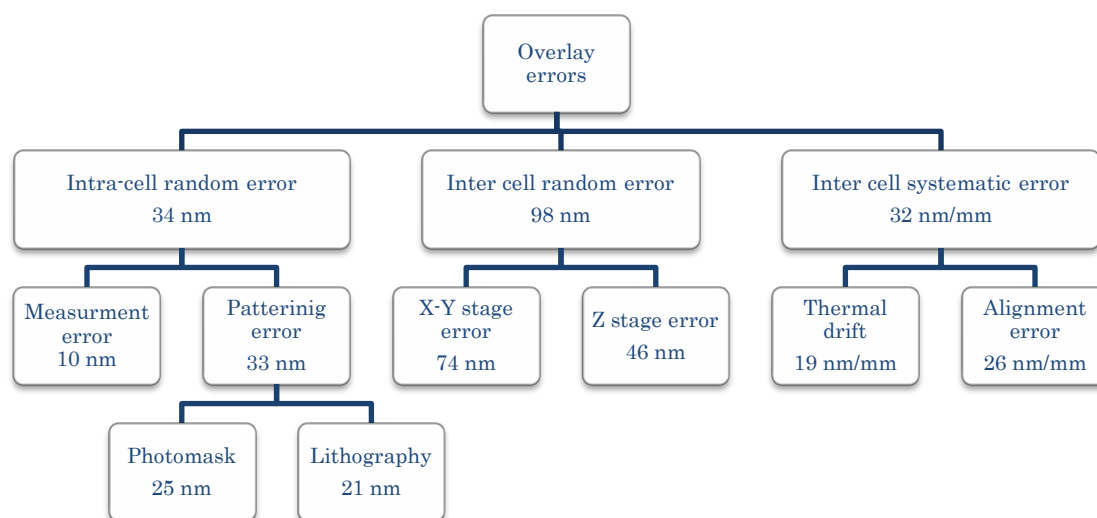


Fig. 5-16 Summary of overlay errors

5.8 セル間系統誤差の改善

これまでの解析により、F-1機のオーバーレイ誤差はセル内ランダム誤差、セル間ランダム誤差、およびセル間系統誤差の3つからなり、これらの原因は、それぞれ計測誤差とドナー基板のパターン誤差、TMPの振動に伴うステージの静止安定性、およびFAB照射による温度上昇とアライメント動作にあることが分かった。これらを改善するためにはTMPの振動対策や熱変位対策などのハード面の対策は必然であるが、装置構成や素材の変更が伴う大がかりな改修となる。そこで装置の運用によって対応可能なアライメントマーク読取誤差を軽減することにより、セル間系統誤差の改善が可能かどうかを試みた。

5.8.1 改善方法

アライメントマーク読取誤差を軽減するには2つの方法が考えられる。ひとつはステップに採用されているようなEnhanced Global Alignment法[4]、すなわち基板上に多数のアライメントマークを配し、基板の座標系だけでなく全体の歪まで検出し、補正する方法である。他の方法は1つのマーク座標を複数回読み込んで平均化する方法である。前者はドナー基板のレイアウトとアライメントシーケンスに大きな変更を伴うだけでなく、アライメント時に複数個所のマークを計測する必要があるため、本機に採用されている真空対応の高剛性ステージでは高速なステージ移動が困難であり、適用できない。一方後者は装置稼働シーケンスを少し変えることで対応可能なことから、後者を採用することにした。

積層実験は、F-1機のアライメントシーケンスを手動で操作することにより実施した。ドナー基板の搬入後、装置を手動操作に切り替え、3つのアライメントマーク読取り動作を6回繰り返して、平均座標をアライメントマーク座標値として入力した。その後自動運転に復帰させ、通常通り10層のセルの積層を行った。この実験を2バッチ実施した。

5.8.2 加工精度の評価

積層精度の評価結果を Fig. 5-17 に示す. これから分かることは, セル内ランダム誤差とセル間ランダム誤差はほとんど変化がないのに対し, セル間系統誤差が 9 nm/mm となり, 対策前の約 1/3 に大幅に改善されたことである. ランダム誤差に変化がないのは, 同一のドナー基板を用い, 同一の装置状態で加工を実施したためである. 一方, 系統誤差が改善されたのは, アライメントマーク座標の読取誤差が減り, 真値に近い座標値によりアライメント変換係数が算出されたためと考えられる.

本対策は F-1 機の手動操作を伴う試験的な方法であるが, 効果が確認できたことからアライメントマーク読取動作を複数回繰り返すプロセスをシーケンスに追加することにより, 自動化が可能である.

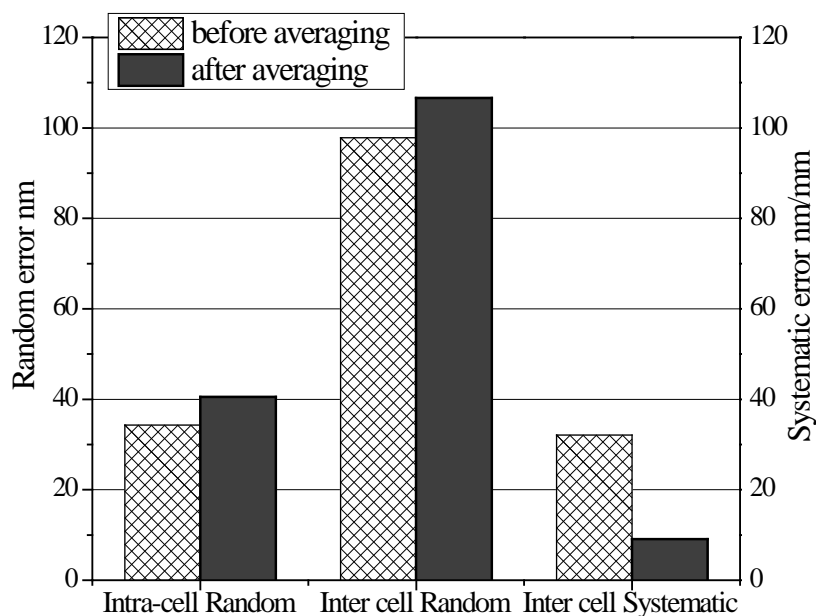


Fig. 5-17 Improvement of the systematic error by average reading method

5.9 結言

本章では、積層造形法の一つである FORMULA 技術を適用した生産対応機 F-1 機のオーバーレイ誤差を最小二乗円法で評価して、以下の結論を得た。

- (1) セル内ランダム誤差は標準偏差で 34 nm であり、その主要因はドナー基板上に形成された構造体の断面部材のパターニング誤差 33 nm と、計測誤差 10 nm であった。
- (2) セル間ランダム誤差は標準偏差で 98 nm であり、その主要因はターボ分子ポンプ (TMP) の振動に起因する XY ステージの位置決め誤差 74 nm と Z 軸の XY 面内ブレ 46 nm であった。
- (3) セル間系統誤差は 32 nm/mm であり、その原因はアライメントマーク位置座標読取時のランダム誤差のアライメント係数への伝搬および FAB 照射による機構部品の熱変位と判明した。前者はバッチごとにランダムに発生するが、後者はほぼ毎回同様に発生する。
- (4) セル間系統誤差を改善するため、アライメントマーク位置座標を複数回読み取り、平均値を用いる方式にしたところ、系統誤差は 9 nm/mm と約 1/3 に改善されることが明らかとなった。

オーバーレイ誤差のさらなる改善のためには、ランダム誤差の主要因である TMP からの振動の絶縁徹底と、ランダム誤差の系統誤差への伝搬を最小化するためのアライメントシークエンスの修正、および FAB 照射による発熱の絶縁の徹底が必要である。これらの知見は次世代装置（例えば F-2 機）の設計仕様に活用可能である。

追補

1. サンプリング周波数について

ステージの振動を計測するのに 50 Hz のサンプリングによる本計測方法では、サンプリング周波数が不足している懸念がある。そこで本計測方法とは別に、TMP や XY ステージに加速度センサを取り付け、サンプリング周波数 2 kHz で振動を計測した。その結果、起振源の TMP は 409 Hz (回転数 24,540 rpm に相当)、XY ステージは約 33 Hz で振動していることが分かった。したがってサンプリング定理からすると、XY ステージの振動を 50 Hz で計測するのはサンプリング周波数が不足している。しかしながら、加速度センサによる計測では、振動による変位量を直接計測することはできない。

Fig. 5-18 は 33Hz の正弦波をサンプリング周波数 50Hz でサンプルしたものを 20 秒間示したものである。サンプリング周波数が不足していることでエイリアシングが生じていることが確認できるが、XY ステージの静止安定性を示す Fig. 5-8 のように、レーザ干渉測長器による測定は数十秒にわたる長時間のものなので、P-V の振幅値および標準偏差 (Fig. 5-18 の場合は 0.7 と求まる) とともにほぼ正確に求められているものと考えられる。

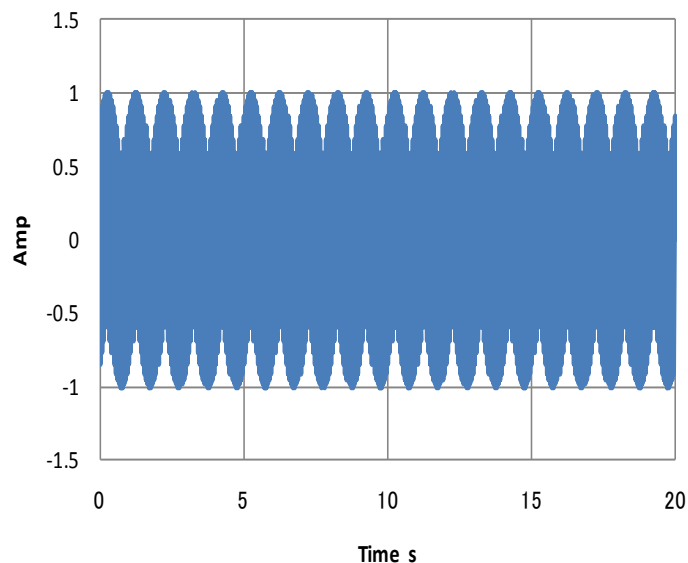


Fig. 5-18 Aliasing waveform generated by lower sampling frequency

2. シミュレーションプログラム

```

SciPad 7.18.1 - gosa35.sce
File Edit Search Execute Scheme Options Windows Help
1 function [kotae]=gosa(sigma_nm)
2 //誤差伝搬シミュレーション
3 // V1.0 2009/7/5(Sun)
4 // V1.1 2009/7/6(Mon) 誤差を加える
5 // V2.1 2009/7/14(Tue) スタンプ位置を配列にする
6 // V2.2 2009/07/15(Wed) 結果の書き込み
7 // V2.3 2009/07/17(Fri) フォーマットを整える
8 // V3.0 2009/07.20(Mon) sigmaを引数に、答えにAS マーク座標も返す
9 // V3.3 2010/02/16(Tue) X0,Y0の結果も返す、32行目
10 // V3.4 2010/02/16(Wed) X0,Y0,ex,eyの結果も返す
11 // V3.5 2010/02/16(Wed) 後処理しやすい出力フォーマットに変更
12 // T.Yamada
13 //単位はミリメートルmm,sigmaはnm
14 //
15 file_name=input("Type file name ?","string");
16 A2=[-50;0];A3=[0;50];A4=[45;0];
17 a=A4-A2;Ow=A2+50/95*a;b=A3-Ow;
18 ex=a/95;ey=b/50;
19 //Pstamp=Ow+[ex,ey]*Pcell;
20 //
21 sigma=sigma_nm/10^6;
22 gosa2=grand(2,10,'nor',0,sigma);
23 gosa3=grand(2,10,'nor',0,sigma);
24 gosa4=grand(2,10,'nor',0,sigma);
25 //
26 //A2にgosa2を加えた2行10列の行列を作る
27 A2gosa=A2*ones(1,10)+gosa2;
28 A3gosa=A3*ones(1,10)+gosa3;
29 A4gosa=A4*ones(1,10)+gosa4;
30 //
31 agosa=A4gosa-A2gosa;Owgosa=A2gosa+50/95*agosa;bgosa=A3gosa-Owgosa;
32 exgosa=agosa/95;
33 eygosa=bgosa/50;
34 //変換係数の書き出し;
35 keisuu=[Owgosa',exgosa',eygosa'];
36 //namae=file_name+"_keisuu.txt";
37 //write(namae,keisuu,'(10(X,6(F12.6,3X)))');
38 //
39 //ドナー基板上的セル座標10層分
40 Pcell=[1,2,3,4,5,6,7,8,9,10;1,1,1,1,1,1,1,1,1,1];//+X方向スキャン
41 Pstamp=zeros(2,10,10); //スタンプ位置のダミー配列
42 for L=1:10;
43 Trans=[exgosa(:,L),eygosa(:,L)];//L回目の座標変換ベクトル抜き出し
44 Pstamp(:,:,L)=Owgosa(:,L)*ones(1,10)+Trans*Pcell;
45 //write(file_name+string(L)+".txt",Pstamp(:,:,L));
46 end
47 //Pstamp //10回分のスタンプ位置座標
48 //stdev(Pstamp,'c')
49 //結果の出力
50 kotae=zeros(20,10);joken=zeros(10,8);
51 for M=1:10;
52 kotae(2*M-1,:)=Pstamp(1,:,M);
53 kotae(2*M,:)=Pstamp(2,:,M);
54 end
55 kotae_t=[Pcell',kotae'];
56 joken=[A2gosa',A3gosa',A4gosa',keisuu];
57 namae=file_name+".log";
58 write(namae,joken,'(10(X,14(F12.6,3X)))');
59 namae=file_name+".txt";
60 write(namae,kotae_t,'(10(X,22(F12.6,3X)))');
61 endfunction
62
Line: 20 Column: 1 Line 20 in gosa

```

誤差の標準偏差を入力変数とする

正規分布誤差の発生

誤差を加えたアライメントマーク座標

変換係数の決定

セル設計座標の定義 (1mm 角ピッチ)

10 回分のスタンプ位置 (各 10 セル分) の計算

結果ファイルの出力

Fig. 5-19 Scilab program

参考文献

- [1] 林茂雄, 馬場涼 訳: 計測における誤差解析入門, 東京化学同人 (2000).
- [2] 涌井伸二: 精密位置決めにおけるアクティブ除振装置の役割, 精密工学会誌, **73**, 4, (2007) pp. 405-409.
- [3] <http://www.scilab.org/>
- [4] 馬立稔和: 位置合わせ方法, 及び位置合わせ装置, 特開昭 61-44429, (1986)

第6章 結論

6.1 本研究の結論

筆者はまったく新規な 3 次元微細加工技術として、薄膜パターン部材を常温接合法で積層する FORMULA (Formation of μ -structures by Lamination) 技術を開発した。この加工技術は一種の積層造形法であり、フォトリソグラフィ法を用いて一括形成された薄膜パターン部材を、対向する別の基板上に常温接合法を用いて接合転写することを繰り返し、薄膜パターンの積層体からなる 3 次元構造体を形成する方法である。本研究では、この FORMULA 技術の提案および原理検証を行い、さらに生産対応機の加工精度の観点から考察することを目的とし、特に積層造形法において関心事となるオーバーレイ誤差の解析に焦点を当てた。

第 1 章では、本研究の背景として、3 次元微細加工技術の従来技術とその課題をレビューした。そして本研究の第 1 の目的が、FORMULA 技術の提案と検証にあること、第 2 に多層構造体のオーバーレイ誤差を解析するための評価手段の開発から着手し、その方法を用いて FORMULA 技術を具現化する生産対応機 F-1 機のオーバーレイ誤差の解析であることを述べた。

第 2 章では、全く新しい積層造形法として、「FORMULA 技術」を提案した。この方法は、真に 3 次元の形状自由度を有する微小構造体をサブミクロンの形状精度で作製でき、しかも金属や誘電体など各種材料が適用可能な 3 次元微細加工技術である。本加工技術が原理的に成立することを示すために原理検証機 (F-0 機) を製作し、その基本要素であるステージ系やアライメント系について説明した。さらにドナー基板とターゲット基板についてその特殊なレイアウト手法や作製プロセス、および離型性の制御について詳しく述べた。

そして、この F-0 機を用いて作製された各種構造体を示し、Al 製薄膜や Ni 製電鍍膜が転写積層可能であり、転写可能な膜厚範囲には実質的に制限がないこと、オーバーハング構造や中空構造など複雑な 3 次元構造が簡単に作製できること、接合界面はアモルファス層を介してボイドなしに直接接合可能であることが検証された。

また加工技術としての重要な課題として、積層パターン部材間の位置ずれ、すなわちオーバーレイ誤差が抽出され、これが主に常温接合装置の構成要素に起因することを明らかにした。

第 3 章では、第 2 章で示した F-0 機の特長解析を基に、新たな常温接合装置である生産対応機 (F-1 機) の仕様と構成、および性能について述べた。多くの構成要素は F-0 機の知見が生かされたが、特にデバイスサイズ拡大に対応するドナー基板サイズの拡大、圧接荷重の増加、自動運転化などに対応し、粗微動連動 X-Y ステージや自動制御システムを新た

に導入した。また F-0 機で明らかとなった積層精度に関しては、ステージの高剛性化や高精度化の対策を施した。

その結果、6 インチウェハ対応、デバイスサイズ 10 mm 角、最大圧接荷重 1 トン、積層精度 100 nm、積層タクトタイム 5 min/layer の全自動常温接合装置を得ることができた。また電鍍プロセスを用いて、10 mm 角の 3 次元マイクロ流路デバイスを作製し、これが高性能なマイクロクーラとして機能することを確認した。

F-1 機の課題はオーバーレイ誤差の要因解析である。目標とした積層精度を達成したが、その内訳は分離されて理解されていない。そのためにはオーバーレイ誤差を精度よく簡便に多数評価する方法が必要であることを述べた。

第 4 章では、積層造形法による 3 次元構造体のオーバーレイ誤差を評価する方法として、「最小二乗円法」を提案した。この方法は、多段の円錐状構造体を加工し、各段の円エッジ座標から最小二乗法により各円形パターンの中心座標を算出し、この変位をオーバーレイ誤差とするものである。同一 SEM 画像を複数回計測して得られた本計測法の繰返し性は、 3σ 値で計測画像の 1 pixel (29 nm) 以下である。これは従来の計測方法に対し繰返し性で優れるとともに、計測時間の大幅な短縮が可能となった。

本計測法を FORMULA 技術による加工精度の評価に適用したところ、オーバーレイ誤差は、(1) セル内ランダム誤差、(2) セル間ランダム誤差、(3) セル間系統誤差、の 3 種類に層別できることが明らかとなった。これは、最小二乗円法の適用により多数の位置ずれデータを簡便に取得できる点と、繰返し性の高い計測精度が得られる点による寄与が大きい。

第 5 章では、FORMULA 技術を適用した自動化加工装置 (F-1 機) に最小二乗円法を適用し、そのオーバーレイ誤差を評価した。その結果、上記 3 種類のオーバーレイ誤差の大きさと主要因は以下のようにまとめられる。

- (1) セル内ランダム誤差は標準偏差で 34 nm であり、その主要因はドナー基板上に形成された構造体の断面部材のパターニング誤差 33 nm と、計測誤差 10 nm であった。
- (2) セル間ランダム誤差は 3 種類の誤差の中で最大であり、その値は標準偏差で 98 nm であった。その主要因はターボ分子ポンプ (TMP) の振動に起因する XY ステージの位置決め誤差 74 nm と Z 軸の XY 面内ブレ 46 nm であった。
- (3) セル間系統誤差は 32 nm/mm であり、その原因はアライメントマーク位置読取座標のランダム誤差のアライメント係数への伝搬、および FAB 照射による機構部品の熱変位と判明した。前者はバッチごとにランダムに発生するが、後者はほぼ毎回同様に発生する。

さらにセル間系統誤差を改善するため、アライメントマーク位置座標を複数回読み取り平均値を用いる方式にしたところ、系統誤差は 9 nm/mm と約 1/3 に改善されることが明らか

かとなった。

オーバーレイ誤差のさらなる改善のためには、ランダム誤差の主要因である TMP からの振動の絶縁徹底と、ランダム誤差の系統誤差への伝搬を最小化するためのアライメントシーケンスの修正、および FAB 照射による発熱の絶縁の徹底が必要である。これらの知見は次世代装置（例えば F-2 機）の設計仕様に活用可能である。

6.2 今後の課題

本研究により、FORMULA 技術を具現化し微小部品の生産にも対応可能な加工装置 F-1 機の性能評価が完了し、特にオーバーレイ誤差に関してはその要因が定量的に把握できた。また第 3 章で述べたように、本加工技術を用いれば切削加工など他の加工方法では実現困難なマイクロ構造物の製作が可能である。今後は本技術の特長を生かした応用先を決め、その仕様に合致した加工装置に改修し、もしくは次世代機を製作し、本技術を実用化することが課題である。

謝辞

本研究は、著者が富士ゼロックス株式会社に在職中に本塾理工学部理工学研究科の三井公之教授のご指導のもとで行われたものである。本研究の遂行にあたり、多大なるご指導、ご助言を賜りました三井教授に深甚の謝意を表します。また、本論文の作成にあたり、ご査読の上、貴重なご指摘を賜りました本塾理工学部理工学研究科 菅 泰雄教授、三木 則尚准教授、柿沼 康弘准教授に心から感謝申し上げます。

本研究の対象となる FORMULA 技術の研究開発は、著者の勤務する富士ゼロックス株式会社において 1996 年から遂行されたものであり、微細加工技術に関する理解と支援を賜った光デバイス研究所の竹之内 睦男所長（所属および肩書きは当時、以下同様）、山田 真樹主任研究員、若林 公宏主任研究員に深く感謝します。また筆者の直属の上長であり良き助言者として終始多大なご指導を頂いた小澤 隆主幹研究員に深く感謝します。さらに本研究を終始共に実施した高橋 睦也所員および田畑 和章所員に感謝の意を表します。

FORMULA 技術の研究開発は 2001 年度から 2005 年度まで、NEDO（独立行政法人 新エネルギー産業技術総合開発機構）の基盤技術研究促進事業（民間基盤技術研究支援制度）に採択され、研究費の支援を受けました。生産対応機 F-1 機の開発を含め本技術の実用化推進に向けてこの支援は不可欠なものでありました。ここに深く感謝の意を表します。また F-1 機の製作等に関して、本事業遂行中に多大なご協力を賜った三菱重工業株式会社の関連諸氏に深く感謝します。

最後に、著者の現在の上長である富士ゼロックス株式会社 画形材研究開発部の松村 保雄部長には、会社業務と学位取得の両立について理解と支援を賜りました。ここに感謝の意を表します。

本論文に関わる公刊論文及び学会発表

1. 定期刊行誌掲載論文

著書、学術論文等の名称	単著、共著の別	発行又は発表の年月	発行所、発表雑誌等又は発表学会等の名称	概要
1. 薄膜の常温接合による微小 3 次元形状創成法の提案と検証	共著	2000年 8月	精密工学会誌 Vol. 66, No. 8, pp. 1265-1269	山田高幸、高橋睦也 FORMULA技術の提案と原理検証に関する最初の論文である。ドナー基板上に形成されたAl薄膜パターンをターゲット基板上に常温接合法により順次積層転写し、ピラミッド形状が作製可能であることを示した。 なお、本論文は財団法人工作機械技術振興財団より振興賞（論文賞）を受賞した。
2. 薄膜の常温接合による微小 3 次元形状創成法における薄膜パターンの転写性に関する検討	共著	2000年 7月	電気学会論文誌 E Vol.120-E, No. 7 pp. 333-338	山田高幸、高橋睦也 薄膜パターンがダメージなく歩留まりよくドナー基板から剥離転写されるために、離型層の接触角と圧接応力の観点から考察した。ポリイミド離型層のプラズマ処理により接触角が制御でき薄膜の密着力を所望の値にできること、および圧接応力を均等にするにはターゲット基板の形状や片当たり防止のための機構が重要であることを明らかにした。
3. 積層造形法におけるオーバーレイ誤差の評価方法の開発	共著	2009年4月	精密工学会誌 Vol. 75, No. 4, pp. 514-519	山田高幸、高橋睦也、三井公之 半径の異なる円形薄膜パターンを常温接合法により積層して、10層の円錐階段状の構造体を作製し、これを電子顕微鏡にて観察する。この画像から10個の円のエッジを抽出し、各円の中心をそれぞれ最小二乗法により求め、それらの変位をオーバーレイ誤差と定義した。その結果、(1)計測の繰返し性は1画素以下、(2)隣接レイヤー間のオーバーレイ誤差はランダム誤差と系統誤差に分離可能であることが分かった。
4. 常温接合を用いた積層造形法におけるオーバーレイ誤差の要因解析	共著	2011年2月	精密工学会誌 Vol. 77, No. 2, pp. 218-223	山田高幸、三井公之 積層造形法の1種であるFORMULA法（常温接合による薄膜パターンの転写積層法）のオーバーレイ誤差を最少二乗円法により解析し、誤差要因を明らかにした。10層からなる薄膜積層構造体を複数バッチ作製し、オーバーレイ誤差（層間の位置ずれ）を評価した結果、オーバーレイ誤差は(1)セル内のランダム誤差 $\sigma_1 = 34 \text{ nm}$ 、(2)セル間のランダム誤差 $\sigma_2 = 98 \text{ nm}$ 、および(3)セル間の系統誤差 32 nm/mm の3種類に層別できることが分かった。

2. 国際会議

著書、学術論文等の名称	単著、共著の別	発行又は発表の年月	発行所、発表雑誌等又は発表学会等の名称	概要
1. A Novel Fabrication Method for 3-D Microstructure Using Surface-Activated Bonding of Thin Films	共著 poster	2000年1月 Miyazaki, Japan	The 13 th IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS 2000)	山田高幸, 高橋睦也 FORMULA技術の提案と原理検証に関する最初の国際会議発表である。ドナー基板上に形成されたAl薄膜パターンをターゲット基板上に常温接合法により順次積層転写し、ピラミッド形状が作製可能であることを示した。
2. A New Fabrication Method for 3-D Microstructure Using Surface-Activated Bonding of Thin Films	共著 oral	2000年6月 Tokyo Japan	The 8 th International Conference on Rapid Prototyping	山田高幸, 高橋睦也 FORMULA技術をラビッドプロトタイプングの観点から考察し発表した。3次元オブジェクトの断面パターンを用意する点は他の積層造形法と同じであるが、このパターンをフォトマスクに展開しリソグラフィで一括形成する点と常温接合を用いて積層する点が異なることを示した。
3. Novel Fabrication Method for 3-D microstructures using Surface-Activated Bonding and its Application to Micro-mechanical Parts	共著 oral	2002年12月 Melbourne, Australia	SPIE's International Symposium on Smart Materials, Nano-, and Micro-Smart Systems	山田高幸, 高橋睦也, 小澤隆, 田原諭, 後藤崇之 FORMULA技術を用いて微小ギアやオーバーハング構造が簡単に作製できることを示した。またAl薄膜の常温接合界面をTEMで観察し、接合条件によってボイドが発生すること、および接合界面には10nm程度のアモルファス層が存在することを明らかにした。また接合界面の表面粗さが大きいと、圧接荷重を大きくする必要が生じ、その結果構造体の塑性変形を招くことを明らかにした。
4. 3D Microfluidic Device Fabricated by Using Surface Activated Bonding of Electroplated Ni Patterns	共著 poster	2005年6月 Seoul, Korea	The 13 th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems (Transducers '05)	山田高幸, 田畑和章 FORMULA技術を電鍍パターンの積層に拡張し、マイクロ流路デバイスを作製した。70 μ m幅の水平流路、直径100 μ mの垂直貫通孔からなる3次元流路が犠牲層を用いることなく作製できることを示した。またウッドパイル構造のような他の加工法では作製困難な構造体を実現できることを実証した。
5. High Performance Microcooler Fabricated by Multiple Stacking of Electroplated Metal Patterns	共著 poster	2007年6月 Lyon, France	The 14 th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems (Transducers '07)	山田高幸, 田畑和章, 長尾太介, 高橋睦也 電鍍パターンを常温接合により多層積層した高性能マイクロクーラを作製し性能を評価した。これは10mm角の大きさで内部に800本のマイクロ流路を有する。実験の結果、0.1MPaの圧損で150Wの冷却性能を確認した。
6. Analysis of an Overlay Error in 3D Microfabrication Technology using Surface Activated Bonding	共著 poster	2009年6月 San Sebastian, Spain	The 9 th European International Conference	山田高幸, 高橋睦也, 三井公之 積層造形法の1種であるFORMULA法(常温接合による薄膜パターンの転写積層法)のオーバーレイ誤差を最少二乗円法により解析し、誤差要因を明らかにした。

3. 国内会議

著書、学術論文等の名称	単著、共著の別	発行又は発表の年月	発行所、発表雑誌等又は発表学会等の名称	概要
1. 薄膜の常温接合による新しい微細 3 次元形状創成法の提案と検証	共著	1998年 10月 北海道大学	精密工学会秋季大会	山田高幸, 高橋睦也, 永田真生, 山田真樹 FORMULA技術の提案と原理検証に関する最初の社外発表である。ドナー基板上に形成されたAl薄膜パターンをターゲット基板上に常温接合法により順次積層転写し、ピラミッド形状が作製可能であることを示した。
2. 薄膜の常温接合による微細 3 次元形状創製	単著	2002年3月 日本大学	日本機械学会ワークショップ	山田高幸 FORMULA技術の紹介と、現状の課題および想定しているアプリケーションなどを示すレビュー的な内容。
3. 常温接合法により積層した薄膜の接合界面の断面TEM観察	共著	2002年3月 工学院大学	電気学会全国大会	高橋睦也, 山田高幸 常温接合を用いて接合したAl薄膜界面をTEMで観察し、ポイドやアモルファス層の存在を明らかにしたそしてこれらが薄膜の表面粗さや、表面活性化時のアルゴンイオンの照射によることを示した。
4. 薄膜の常温接合による微細 3 次元形状創成法におけるアライメント精度の改善	共著	2002年10月 熊本大学	精密工学会秋季大会	山田高幸, 高橋睦也 FORMULA技術における積層精度に及ぼす要因を分析し、ステージの剛性不足と真空ポンプの振動が主要因であることを示した。これらの対策により、多層積層時の精度が数 μm から 0.5 μm に改善できた。
5. FORMULA技術により作製した微小機械部品	共著	2003年 3月 東北学院大学	電気学会全国大会	高橋睦也, 堀田宏之, 山田高幸 FORMULA技術を用いて微小ギアやオーバーハング構造が簡単に作製できることを示した。オーバーハング形状を正しく作製するには、圧接荷重と離型層膜厚が重要なパラメータであることがわかった。
6. 薄膜の常温接合による微細 3 次元形状創成法における薄膜パターン転写性改善	共著	2003年 9月 富山大学	精密工学会秋季大会	山田高幸, 高橋睦也, 堀田宏之 有限要素法を用いてドナー基板とターゲット基板の圧接状態をシミュレーションし、ポリイミド離型層に薄膜が埋没することにより有効な圧接応力が印加されないことを明らかにした。この回避策として、ポリイミドのエッチバックプロセスを提案し、転写可能な膜厚下限を実質的に解消した。
7. 薄膜の常温接合による微細 3 次元形状創成法における異種薄膜接合・転写の実現 (第 1 報) - 異種金属薄膜の接合・転写の実現 -	共著	2004年 9月 島根大学	精密工学会秋季大会	山田高幸, 田畑和章, 高橋睦也 構造体材料に加え、犠牲層材料を導入したAdvanced FORMULAプロセスの検証に関する報告で、AlとCuを同一基板上に同一膜厚で形成し、これらをCuコートされたターゲット基板上に同時に転写できることを示した。

著書、学術論文等の名称	単著、共著の別	発行又は発表の年月	発行所、発表雑誌等又は発表学会等の名称	概要
8. 薄膜の常温接合による微細 3 次元形状創成法における異種薄膜接合・転写の実現 (第 2 報) - CuとAl接合界面の断面構造の解析 -	共著	2004年 9月 島根大学	精密工学会秋季大会	田畑和章, 高橋睦也, 山田高幸 上記のAlとCuの同時転写を実現した基板において, Cu同士の接合界面とAl/Cuの異種接合界面をTEMで観察し, 中間層の有無や不純物の存在においていくつかの差のあることを解明した.
9. 常温接合を用いた 3 次元マイクロデバイス製造装置の開発	共著	2005年 9月 京都大学	精密工学会秋季大会	木ノ内雅人, 後藤崇之, 田原諭, 津野武志, 浅野伸, 長谷川修, 高橋睦也, 山田高幸 FORMULA技術を実用化するための自動化接合装置を開発した. 6インチウエハ対応で最大 1 トンの圧接荷重を印加できる. 多層積層の結果, 積層精度 150nmを達成した.
10. ニッケル電鍍パターンを積層して作製した 3 次元マイクロ流路デバイスの作製	共著	2005年 9月 京都大学	精密工学会秋季大会	田畑和章, 山田高幸 FORMULA技術を電鍍パターンの積層に拡張し, マイクロ流路デバイスを作製した. ドナー基板には鏡面研磨したステンレス基板を用い, その表面粗さと電鍍条件により良好な剥離性を得ることができた.
11. 薄膜の常温接合界面のCMPによる平坦化	共著	2005年 9月 京都大学	精密工学会秋季大会	山田高幸, 高橋睦也, 山崎芳文, 田畑和章 常温接合の質を左右する薄膜の表面粗さを改善するためにChemical Mechanical Polishを適用し, Raの改善により圧接応力を低減でき, 塑性変形を防ぐことが可能であることを示した. また異種材料を同時研磨する際の研磨条件に関して指針を得た.
12. in-situ常温接合引張試験機の開発と接合強度の評価	共著	2006年 9月 宇都宮大学	精密工学会秋季大会	田畑和章, 高橋睦也, 山田高幸 真空チャンバ内で常温接合と引張試験を連続的に行うことが可能な装置を開発し, 金同士の接合強度を評価した. その結果, 破断は脆性的であり, 平均強度は 0.7 MPaであることが分かった.
13. 電鍍膜の積層による高性能マイクロクラの作製と評価	共著	2007年 9月 旭川市ときわ市民ホール	精密工学会秋季大会	田畑和章, 高橋睦也, 山田高幸, 長尾太介 電鍍パターンを常温接合により多層積層した高性能マイクロクラを作製し性能を評価した. これは 10mm角の大きさで内部に 800 本のマイクロ流路を有する. 実験の結果, 0.1MPaの圧損で 150Wの冷却性能を確認した.
14. 積層造形法におけるオーバーレイ誤差の評価方法の開発	共著	2008年9月 東北大学	精密工学会秋季大会	山田高幸, 三井公之 積層造形法におけるオーバーレイ誤差を正確に評価する方法を提案した. 半径の異なる円形薄膜パターンを常温接合法により積層して, 10 層の円錐階段状の構造体を作製し, これを電子顕微鏡にて観察する. この画像から 10 個の円のエッジを抽出し, 各円の中心をそれぞれ最小二乗法により求め, それらの変位をオーバーレイ誤差と定義した.