マイクロシステムと放射 X 線応用 3 次元微細加工技術

田 畑 修*

1. はじめに

マイクロメータあるいはナノメータオーダの 3 次元構造体、マイクロセンサ、マイクロアクチュエータ、LSI などを集積化したマイクロシステムは、機能は生物のもつ多様さ・複雑さにはまだ及ばないものの、サイズはすでに昆虫や微生物と同程度まで小さくすることが可能である。MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) あるいはマイクロマシンとも称されるマイクロシステムは、電磁コイルなどの電気部品、マイクロプロセッサなどのエレクトロニクス部品、ばねなどの機械部品、ミラーなどの光学部品など、多種多様な機能を有する要素部品の集積化によって、機械・電子・光・化学・物理などの多くの現象を微小チップ内で複雑に相互作用させることによって高度な機能を発現させることが可能である。その応用分野は計測制御、情報通信、バイオテクノロジー、化学分析、医療など幅広く、実用化への期待が高まっている。マイクロシステムの日本国内市場は 2010 年に 230 億ドル、2015 年には 460 億ドルになるとマイクロマシンセンタは予測しており、21 世紀のナノテクノロジーの進化を支える基盤産業としての役割を担っている。

1960 年代にスタートした初期のマイクロシステムではシリコン (Si) 単結晶が基板および構造体として用いられ、LSI の製造で培ったシリコン微細加工技術を駆使して製作された。その後、1990 年代になって材料および微細加工技術の両面における技術革新が急速に進むと同時に、マイクロシステムの実用化が進んだ。現在の研究および技術開発は、(1) バイオ・化学分野への応用展開を中心としたシステムの複雑化、(2) マイクロ領域からナノ領域へのスケールダウン (NEMS: Nano Electro Mechanical Systems)、(3) 無機から金属、有機への材料の多様化、の 3 つの方向で活発に行われている。特に、マイクロシステムへの有機材料の応用は、高機能化、大面積化、製造コスト低減、環境負荷低減などの多くのニーズに応え得るアプローチとして期待されており、有機材料とこれに適した微細加工技術の研究開発に対する要求はますます高まっている。本報では、従来のシリコン半導体微細加工技術を基礎とするマイクロシステム用加工技術 (シリコンマイクロマシニング技

術) を概説した後、放射 X 線を応用した高分子材料の 3 次元加工技術としてシンクロトン放射 X 線を用いた高アスペクト比加工技術 (LIGA: Lithographie GALvanoformung Abformtechnik プロセス) および、これを発展させた放射 X 線応用 3 次元微細加工技術 (M²DXL: Moving Mask Deep X-Ray Lithography) について概説する。

2. シリコンマイクロマシニング技術¹⁾

シリコンマイクロマシニング技術は半導体微細加工技術に種々の特殊加工技術を組み合わせたものである。半導体プロセス技術は大別して、(a) エッチングによる材料除去 (除去加工)、(b) 不純物ドーピング、薄膜形成、めっきなどの材料付加 (付加工)、(c) 紫外線、電子ビーム、X 線などを用いたリソグラフィーによるパターン形成、から成っており、半導体デバイスはこれらの基本加工技術の繰り返りで形成される。これらの基本加工技術は全てシリコンマイクロマシニング技術に適用可能である。さらにシリコンマイクロマシニング技術では、3 次元構造を形成するために、(d) 基板の接合、および (e) 成形加工、が基本加工技術として加わる。成形加工は、利用できる材料が限られていたシリコンマイクロマシニングにおいて、材料の選択肢を広げ、生産コストを下げる手法として、近年注目されつつある。シリコンマイクロマシニングはこれらの基本加工技術の組み合わせ方によって図 1 に示す 3 種類の基本プロセス、

図 1 シリコンマイクロマシニングの基本加工技術

* Tabata, Osamu
立命館大学理工学部
滋賀県草津市野路東 1-1-1 (〒525-8577)
2003. 2. 17 受理

(1)バルクマイクロマシニング、(2)サーフェスマイクロマシニング、(3)LIGA プロセス(後述)に大別できる。マイクロシステムに特徴的な3次元構造はこれらの基本プロセスによって形成できる。

シリコンマイクロマシニング技術と従来の半導体プロセス技術を比較すると、構造と材料の両面に相違点がある。構造面では、半導体プロセスがほぼ2次元構造を扱うのに対し、シリコンマイクロマシニングでは3次元構造を扱う。シリコン基板を深さ数10 μm 以上、ときには貫通するまでエッチングを行い、シリコン単結晶よりなる3次元構造を形成する。あるいは表面に薄膜の積層構造を形成した単結晶シリコン基板を用い、基板表面または薄膜の一部をエッチングすることによって、基板から部分的にあるいは完全に分離された薄膜の3次元構造を形成する。また、これらの方法によって加工した基板を互いに貼り合わせる(接合)ことによって複雑な3次元構造を形成する場合もある。材料面では、半導体微細加工技術がシリコン基板や薄膜材料を機能材料として用いるのに対し、シリコンマイクロマシニング技術はこれらを構造材料として用いる。単結晶シリコンが構造材料として、特に弾性体として優れていることは良く知られている²⁾。多結晶シリコン(poly-Si)、シリコン酸化膜(SiO_2)、シリコン窒化膜(Si_3N_4)などの薄膜材料も、基板と共にではなく基板から分離された状態で構造材料として利用されている。

シリコンマイクロマシニング技術の特徴は以下の3点である。(1)サブミクロンオーダーの寸法制御により構造体の小型化が可能である。小型化により表面積と質量の比が大きくなり外界との相互作用が大きくなる。例えば、熱容量や慣性力等の影響は小さくなり、静電力や粘性力の影響が大きくなる。その結果、熱的および機械的な応答性が向上する。また、従来の機械では無視してきた気体との相互作用などの現象を、センサやアクチュエータに積極的に用いることが可能になる。(2)バッチ・プロセスによるデバイスコストの削減とプリアセンブルが可能である。3mm角のチップであれば5インチのウェハ1枚から1000個以上が同時に製造できる(バッチプロセス)。また、例えば直径が100 μm のマイクロギヤと軸径10 μm のマイクロ軸受けを別々に作り、後で組み付けるのではなく、軸受けにギヤが組み付けられた(プリアセンブル)状態の構造物を、一度に大量に形成できる。すなわち従来の機械における部品加工工程と組立工程を同時にしかも大量に行うことが可能である。(3)同一シリコン基板上に電子回路、センサ、アクチュエータを集積化することが可能である。センサ、アクチュエータおよび電子回路をシリコン基板上に集積化したマイクロシステムは、制御システムを低価格でありながら高機能化、高信頼化することが可能である。

近年、マイクロシステムに要求される構造が複雑になるに従って、従来の加工技術では対応できなくなりつつある。そこで基本プロセスを融合した複合プロセスの研究も活発に行われつつある。今後のマイクロシステムの製作プロセスは、2通りに分化すると予測される。一つは標準化した基本プロセスを用いて設計期間の短縮と生産コストの低減を実現し、製品を低コストで早期に市場に出すことを狙いとするアプローチである。もう一つはコストより機能を重

視し、独自の複合プロセスや3次元加工プロセスを確立し、これを用いた製品開発を目指すアプローチである。次章では独自の3次元加工プロセスとして位置付けられるシンクロトロン放射X線を応用した微細3次元加工技術の概要を述べる。

3. 放射 X 線応用 3 次元加工

3.1 LIGA プロセス

X線と呼ばれる波長数百 $\text{\AA}$ ~0.01 $\text{\AA}$ の光(電磁波)は、波長が短く物質に対する透過能が高いため、これらの特徴を利用して様々な分野で応用されている。医療分野で行われているレントゲン撮影やX線断層像撮影などはその一例である。一方、産業界への応用は、プラスチックあるいは蛋白質などの高分子の構造解析に代表される物質の組成分析・構造解析、およびLSIのゲート加工に代表される微細加工に大別できる。本稿で述べる放射X線応用3次元加工は後者の微細加工の中でも特徴的な、X線を応用したマイクロ・ナノオーダーでの3次元微細構造体の加工技術である。

X線を用いた微細加工の基本は通常のリソグラフィである。すなわちX線マスクを通してレジストにX線を照射することによってX線マスク上のパターンをレジストに転写し、このレジストを用いて被加工材料の微細加工を行う。X線を用いることによるメリットは、(1)リソグラフィの光源として紫外線より波長の短いX線を利用することにより、回折によるパターン解像度(加工可能な最小線幅)の劣化を低減した微細パターンが実現できる、(2)物質に対する透過能が高いことを利用して厚いレジストが露光できる、の2点である。深さが数十 μm から数百 μm の3次元微細加工にはX線の有する高い透過能が重要な役割を果たすが、LSIの微細加工では必要とされるレジストの加工深さが高々数 μm であるためこのメリットはあまり活かされていない。

これに対し1970年、IBMのRomankiwらは磁気ヘッド用のマイクロコイルの製作にX線を用いた3次元微細加工プロセスを応用した³⁾。彼らはX線を用いて厚膜レジストを露光した後、レジストを型にして電気めっきによって金属を埋め込んでマイクロコイルを製作した。その後、1982年にドイツ、カールスルーエ研究センターのEhrfeldらは、ウラン同位体分離用ノズルを製作するためにX線リソグラフィと電気めっきに射出成形を組み合わせたプロセスを開発した⁴⁾。彼らはこのプロセスをドイツ語のリソグラフィ(Lithographie)、電気めっき(Galvanoförmung)、成形(Abformtechnik)を意味する頭文字をとってLIGAプロセスと名付けた。

LIGAプロセスの流れを図2に示す。X線マスクに対向させてレジストを配置し、波長数 $\text{\AA}$ のX線を照射する。X線マスクはX線に対する透過能が高い材料(例えば SiC 、 SiN 、 C 、 Si など)で製作された厚さ数 μm ~数十 μm の薄膜上に、X線に対する透過能が低い材料(例えば Au 、 Ta 、 W など)でパターンが形成されている。レジストにはpolymethylmetacrylate (PMMA、通称アクリル)を主体にした高分子材料が用いられる。マスクを通してシンクロトロンから放射されるX線をレジストに照射すると、X

図2 LIGA プロセスの概要

線照射された部分のレジストは分子鎖が切断されて分子量が低下する。分子量が1万以下に低下したレジストは現像液（60%2-(2-butoxy-ethoxy) ethanol, 20% tetra-hydro-1, 4-oxazine, 5%2-amino-ethanol-1, and 15% water）に対する溶解度が急速に増加する。従って、レジストを現像液に浸漬するとX線マスクに形成されたパターンで垂直方向に厚みのある3次元微細構造体が現れる。形成された3次元微細構造体は垂直な側壁で構成されるため、数百という高いアスペクト比（構造体の最大高さと最小幅の比）を実現できる。

形成したレジストの微細構造体はそのまま3次元微細部品として利用することができるが、シンクロトロン放射光設備の使用により製造コストが高価となるため、一般には低コスト化のために次の金型製作とマイクロモルディング工程を組み合わせる。レジストを型として電気めっき（例えばNiめっき）を行い、レジストを除去して金属の微細構造を有する精密金型を製作する。この精密金型を鋳型として用いれば、マイクロモルディングによって3次元微細構造体を形成することが可能となる。

レジストを現像液に溶解させるためには、レジストがある閾値 E_{min} 以上のX線エネルギーを吸収する事が必要である。レジストで吸収されるX線エネルギーは、透過する深さに対して指数関数的に減少する。通常のLIGAプロセスでは、レジストの底部における吸収エネルギーが E_{min} 以上であるように露光時間を設定する。後述する3次元加工においては、加工できる深さは閾値以上のエネルギーを吸収したレジストの深さとなることを利用し、照射時間によって加工深さを制御して3次元立体加工を行う。

X線光源にはシンクロトロン装置が用いられる。シンクロトロンは強い磁場中で高速円運動している電子の円軌道接線方向に放射される電磁波を利用する。LIGAプロセスに用いられている代表的な放射光源とその仕様を表1に示す。シンクロトロンから放射される電磁波にはX線から

表1 LIGA プロセスに用いられているSR光源例と仕様

光源名	所在国	軌道電子エネルギー (GeV)	軌道直径 (m)	ビーム電流 (mA)	限界波長 (nm)
AURORA	日本	0.575	1	300	1.5
CAMD	米国	1.3	6	300	0.75
ANKA	独	2.5	35	400	0.63

図3 小型シンクロトロン放射光源“AURORA”

可視光までが含まれ、シンクロトロンのサイズは電子軌道直径35mのANKAから、立命館大学に設置されている直径1mの超小型シンクロトロン“AURORA”(図3)まで様々である。放射光のスペクトルと強度は、軌道上の電子のエネルギー、電子の軌道直径（電子を偏向させる磁場強度）、軌道上の電子ビーム電流によって決まる。放射光強度は高い方が加工プロセスのスループットが大きくなるため望ましい。しかし光源の仕様により決まる値であるため、露光装置側では制御できない。一方使用するX線波長は、光源とX線マスク間の光路中に適切なフィルタを設置することによって制御することが可能であり、目的とする加工深さによって選択する必要がある。深い加工をするためには、単に露光時間を増やしてレジスト下部における吸収エネルギーを E_{min} としただけでは不十分である。レジスト表面における吸収エネルギーをレジストの損傷するエネルギー E_{max} 以下にしなければならない。すなわち深い加工をするためには、レジストの吸収係数が小さく透過率の高い短波長のX線を用いることによって、長時間の露光においても表面での吸収エネルギーを E_{max} 以下に保つことが必要となる。これらの検討を行うために開発したシミュレータの入出力画面を図4に示す。放射光源パラメータ、光源とX線マスク間に挿入した光学フィルタの材質と膜厚、X線マスクを構成するメンブレンと吸収材の材質と膜厚を入力すると、PMMAレジスト内における吸収X線エネルギー分布が出力されるため、表面での吸収エネルギーや加工深さを評価できる。

近年、従来のX線露光法を発展させた技術（移動X線マスク露光法）によって、超微細構造体の側壁の傾斜角度や曲率を自由に制御することが可能になりつつある。このアプローチについて述べる前に、従来のX線露光法をベースにしたLIGAプロセスをその他の技術と比較する。

LIGA技術が提案された1980年代前半から1990年代前

図4 露光 X 線エネルギーシミュレータの入出力画面

半においては、深さ数十～数百 μm の垂直壁を有する微細構造体を加工できる手法は LIGA 以外にない、他のプロセスに対する LIGA プロセスの優位性は明確であった。一方、1990 年代に放射光科学の進歩と相俟ってシンクロトロン施設数が増加して LIGA プロセスを実施できる施設が増加した。その結果、産業界からの微細加工の要求に応えられる体制が整いつつあった。しかし、1990 年代半ばになって、シリコンのドライエッチング技術の進歩および紫外線照射を用いた厚膜レジスト加工技術の進歩によって、従来は LIGA の独壇場であった加工分野の多くがこれらの加工技術によって代替可能になった。必然的に LIGA プロセスは、単なる垂直壁で構成される高アスペクト比加工技術としてではなく、X 線光源を用いるが故に可能となる微細加工技術としての特徴を明確にすることが求められた。

これに対する答えは、(1)最小加工寸法がサブミクロンである微小構造体の高アスペクト比 (>10) 加工⁵⁾、(2)難加工性材料の高アスペクト比微細加工⁶⁾、(3)自由曲面よりなる 3 次元微細構造加工⁷⁾、である。(1)は X 線の短波長性と高透過性を利用するものであり、ドライエッチングや厚膜 UV レジストでは実現できない。ただしパターン解像度の下限は 2 次電子による拡散によって律速されるために、波長の数百倍の $0.1 \mu\text{m}$ 程度である。フォトリソグラフィや干渉フィルタなど光関連分野への応用などが期待できる。(2)は X 線によって励起された光反応を利用する手法で、難加工性材料であるポリテトラフルオロエチレン (PTFE、テフロン) を 200°C 近くに加熱して真空中で X 線を照射することによって、サブミクロンオーダーで直接フォトリソグラフィ加工できる。医療関連分野や化学分析用デバイス加工分野への応用が期待される。本稿では (3) について次に詳細に述べる。

図5 移動 X 線マスク露光法の概念

図6 円形吸収パターンによる移動 X 線マスク露光例

3.2 移動 X 線マスク露光法による 3 次元微細構造加工^{7)~9)}

図 5 に移動 X 線マスク露光法 (M²DXL: Moving Mask Deep X-Ray Lithography) を用いた自由曲面よりなる 3 次元微細構造加工の概念図を示す。前節で述べたように、レジストを現像液に溶解させるためには、閾値 E_{min} 以上の X 線エネルギーを吸収させる事が必要である。換言すれば、レジスト面内で位置によって照射される X 線エネルギー量を制御すれば、側壁の傾斜角度や曲率を自由に制御した 3 次元微細加工ができる。X 線露光中に X 線マスクと基板を相対的に移動させることによって、レジスト上に照射される X 線エネルギー分布を制御する。X 線マスクのパターン、マスクとレジスト間の相対的な移動パターンを組み合わせることによって、レジスト中で吸収される X 線エネルギー量を自由に制御できる⁷⁾。

応用例としてマイクロレンズアレイの加工について述べる。円形吸収パターンを形成した X 線マスクを円形軌跡で移動させて露光後、現像したレジストに形成される形状を図 6 に示す。円形マスクパターンの直径 D_{mask} と駆動円直径 D_{move} との大小関係によって種々の異なる形状が実現できる⁸⁾。マイクロレンズアレイを製作する場合、円形パターンアレイが形成された X 線マスクを用い、種々の異なる D_{move} を組み合わせることによって目的とする曲率のレンズ形状を製作できる。図 7 に製作したレンズの SEM 写真と断面形状を示す。使用する駆動円直径の組み合わせ数を 7 から 19 に増やすことによって、より滑らかで高精度な加工が実現できることが確認できた。凹レンズは、吸

マスク回転直径:12 μ m~80 μ m,使用直径数:7

マスク回転直径:12 μ m~80 μ m,使用直径数:19

図7 移動X線マスク露光法のマイクロレンズアレイ製作への応用。レンズ直径155 μ m,焦点距離300 μ m

図8 移動X線マスク露光法のマイクロ回折格子製作への応用。ピッチ50 μ mで深さが連続的に変化

表2 3次元微細加工法

断面形状	LIGA	傾斜露光	移動マスク	TEIGA
高アスペクト加工	◎	○	△	◎
傾斜加工	×	◎	○	×
自由曲面加工	×	×	◎	×
材料	PMMA	PMMA	PMMA	PTFE
露光雰囲気	He 1 気圧	He 1 気圧	He 1 気圧	真空
基板加熱	不要	不要	不要	200℃

収膜に円形孔を形成したX線マスクを用いることによって加工できる。非球面レンズも加工可能であり、小さな D_{mask} を用いるほど加工時間は延びるが加工自由度は高まる。

照射X線エネルギー分布はマスクパターンの設計に

図9 マルチステージX線露光システム

図10 マルチステージX線露光システム

よって制御することもできる。図8は三角形の抜きパターンを用いて深さを連続的に変化させた回折格子を製作した例である。

3.3 マルチステージX線露光システム

X線露光を用いた3次元加工方法として提案されている手法を表2にまとめた。レジストに垂直にX線照射するLIGAプロセスに対し、X線の入射角度を制御する傾斜露光、3.1で述べた移動X線マスク露光、真空雰囲気中で200℃に加熱したPTFEをX線照射によってフォトリソ加工するプロセスなどが提案されている⁶⁾。

これらの加工を組み合わせた複合加工が可能なマルチステージ露光システムの構成図と写真を図9、図10に示す⁸⁾。2つのリニアステージによるレジストのスキニング（移動範囲： ± 25 mm）、2つの回転ステージによるX線の入射角度制御（全方向、分解能 $0.01^\circ \sim 0.02^\circ$ ）、X-YステージによるX線マスクの移動制御（移動範囲： ± 40 μ m, 分解能10 nm）を自由に組み合わせたX線露光が可能であり、3次元微細加工の自由度は飛躍的に高まる。露光雰囲気は1気圧He雰囲気から 10^{-6} Torr, レジスト温度は室温から250℃の範囲で制御可能である。

図11に吸収膜の線幅と線間隔が共に50 μ m, および20 μ mと50 μ mのX線マスクを用い、斜めX線露光, 移動X線マスク露光と斜めX線露光の組み合わせ, の両手法でPMMAレジストを加工した例を示す。

図12には直径20 μ mの円形吸収膜パターンを40 μ m

図 11 マルチステージ X 線露光システムを用いた傾斜露光および傾斜と移動 X 線マスクの組み合わせ露光

図 12 マルチステージ X 線露光システムを用いて作製した PTFE のマイクロ突起アレイ

ピッチで格子状に配置した X 線マスクを用い、移動 X 線マスク露光によって PTFE にマイクロ突起アレイを作製した例を示す。

5. 結 言

以上述べてきた放射 X 線を応用して加工されたマイクロ 3 次元構造体を母型として製作した精密金型を鋳型とし、最新のマイクロモルディング技術を用いることによってプラスチックのみでなく、金属、セラミックスなど多様な材料で 3 次元微細構造体を形成することが可能となると期待される。金属やセラミックスなどの成形には MIM

(Metal Injection Molding) あるいは CIM (Ceramics Injection Molding) などの微粉末を用いる粉末射出成形 (PIM: Powder Injection Molding) の適用が検討されつつある。これらの新規なマイクロモルディング法の研究開発に加え、マイクロモルディングによって実現可能なアスペクト比、最小寸法などのマイクロ構造体の成形加工限界を明らかにすることが重要である。我々の提案した移動 X 線マスク露光法を用いれば、精密金型に離型を容易にするための抜き勾配を付与することは可能である。しかし、最適な抜き勾配を決めるための設計基準はまだない。また、マイクロモルディングによって実現可能なマイクロ構造体の成形加工限界は抜き勾配のみでなく、パターン密度、離型のための金型表面処理、成形材料、マイクロモルディング条件など多くの要因が関わっており、マイクロモルディングの加工限界とこれらの要因との因果関係を明らかにしていく地道な努力が求められている。X 線を応用した 3 次元超微細加工の可能性を示した本稿が、マイクロモルディングへの期待と課題を示す一助となれば幸いである。

参 考 文 献

- 1) 田畑 修, 佐藤一雄訳: シリコンマイクロ加工の基礎 (2001), シュプリンガー・フェアラーク東京
- 2) Petersen, K. E.: *Proc. of the IEEE*, **70**(5), 420 (1982)
- 3) Romankiw, L. T. et al.: *IEEE Trans. Magn.*, MAG-6, 597 (1970)
- 4) Becker, E. W. et al.: *Naturwissenschaften*, **69**, 520 (1982)
- 5) Ueno, H. et al.: *Twelfth IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems*, 23 (1999)
- 6) Katoh, T.: *The Transaction E of The Institute of Electrical Engineering of Japan*, 120-E (7), 375, (2000)
- 7) Tabata O. et al.: *Twelfth IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems*, 252 (1999)
- 8) Tabata, O. et al.: *The 14th IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems*, 94, (2001)
- 9) Tabata O. et al.: *The 15th IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems*, 180 (2002)