

(19) 日本国特許庁 (JP)

(12) 特 許 公 報 (B2)

(11) 特許番号

特許第5647220号  
(P5647220)

(45) 発行日 平成26年12月24日 (2014. 12. 24)

(24) 登録日 平成26年11月14日 (2014. 11. 14)

(51) Int. Cl.	F I
HO 1 J 37/30 (2006. 01)	HO 1 J 37/30 A
HO 1 J 37/305 (2006. 01)	HO 1 J 37/305 A

請求項の数 13 (全 21 頁)

(21) 出願番号	特願2012-502763 (P2012-502763)	(73) 特許権者	511232352
(86) (22) 出願日	平成22年3月29日 (2010. 3. 29)		ザ セクレタリー オブ ステイト フォー
(65) 公表番号	特表2012-522346 (P2012-522346A)		ー ビジネス イノベーション アンド
(43) 公表日	平成24年9月20日 (2012. 9. 20)		スキルズ オブ ハー マジェスティズ
(86) 国際出願番号	PCT/GB2010/000599		ブリタニック ガバメント
(87) 国際公開番号	W02010/112827		THE SECRETARY OF ST
(87) 国際公開日	平成22年10月7日 (2010. 10. 7)		ATE FOR BUSINESS IN
審査請求日	平成25年3月29日 (2013. 3. 29)		NOVATION AND SKILLS
(31) 優先権主張番号	0905571.6		OF HER MAJESTY' S B
(32) 優先日	平成21年3月31日 (2009. 3. 31)		RITANNIC GOVERNMENT
(33) 優先権主張国	英国 (GB)		イギリス国 ロンドン エスダブリュー 1
			0イーティ ビクトリア ストリート
			1

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 マイクロ及びナノスケールの3次元構造の製造方法並びに製造装置

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項 1】

物体 ( 2 0 ) の 3 次元構造を製造するために 3 次元形状物体にミリングする方法であって、

イオンビームの強度及び滞留時間により、ミリングされる材料のミリング量を決定するステップと、

前記決定されたミリング量を基に、前記材料で作られた前記物体をイオンビームミリングによりミリングするステップとを含み、

前記ミリングするステップは、様々な 3 次元形状を形成するために、前記物体の隣接領域を異なる深さでミリングする複数のミリングパスを含み、

前記ミリングする方法は、

ミリングされた構造内の実際のミリング深さを測定するステップと、

測定されたミリング深さを基にミリング強度及び / 又はミリング滞留時間を調整するステップと、

少なくとも一つの後続のパスが、以前にミリングされたパスの一部に部分的に重なるようにミリングするステップと、を含むことを特徴とする、

ミリング方法。

【請求項 2】

連続するミリングパスの少なくともいくつかは同心円上にミリングし、及び / 又は連続するミリングパスの少なくともいくつかは非同心円上にミリングする、請求項 1 に記載の

ミリング方法。

【請求項 3】

前記イオンビームの強度及び／又は前記ミリング滞留時間は、前記ミリングステップ内の前記複数のミリングパスを構成する個々のパスについて設定される、請求項 1 又は請求項 2に記載のミリング方法。

【請求項 4】

前記ミリング深さは、原子間力顕微鏡（26）により測定される、請求項 1 から請求項 3のいずれか一項に記載のミリング方法。

【請求項 5】

前記ミリング深さは、前記ミリングステップ中に測定される、請求項 1 から請求項 4のいずれか一項に記載のミリング方法。

10

【請求項 6】

前記ミリングされる領域の深さは、前記ミリングステップ内で後続の領域をミリングする前に測定される、請求項 1 から請求項 5のいずれか一項に記載のミリング方法。

【請求項 7】

前記方法は、3次元物体をミリングする、請求項 1 から請求項 6のいずれか一項に記載のミリング方法。

【請求項 8】

孔のアレイを生成するために前記物体上にエッチングパスを少なくとも一つもたらしステップ及び前記3次元構造のアレイを生成する前記孔をミリングするステップを含む、請求項 1 から請求項 7のいずれか一項に記載のミリング方法。

20

【請求項 9】

物体（20）の3次元パターンにミリングする装置（10）であって、  
物体をミリングするイオンビームを生成するイオンカラム（12）と、  
イオンビームの強度及びイオンビームの滞留時間を基に、前記物体の材料のミリング量を決定又は取得する診断装置と、

前記決定されたミリング量及びミリングされる前記3次元パターンを基に前記イオンカラム（12）を制御する制御装置（22）を含み、

前記制御装置（22）は、前記ミリングされる前記3次元パターンを形成するために、前記イオンカラムを制御し、複数のミリングパスにおいて、前記物体の隣接領域を異なる  
深さでミリングし、

30

前記ミリング装置は、

前記イオンカラム（12）によるミリング深さを測定する測定装置（26）を含み、

前記測定装置（26）は、フィードバックできる態様で前記制御装置（22）に連結されており、

前記制御装置（22）は、測定されたミリング深さを基にミリング強度及び／又はミリング滞留時間を調整し、

前記制御装置（22）は、少なくとも一つの後続のパスが以前にミリングされたパスの一部に部分的に重なって前記物体をミリングするように、前記イオンカラムを制御することを特徴とする、

40

ミリング装置。

【請求項 10】

一つ以上の材料に関するミリング深さ、ビーム強度、及びビーム滞留時間のデータベースを含み、

前記データベースは、ルックアップテーブル形式である、請求項 9に記載の装置。

【請求項 11】

前記測定装置は、原子間力顕微鏡チップ（28）を含む、請求項 9 又は請求項 10に記載の装置。

【請求項 12】

S E Mカラム（14）、及び／又はミリングするために物体（20）を固定する真空チ

50

ヤンバ(16)、及び/又は前記3次元構造のアレイを生成する孔をミリングする前に前記孔(48)のアレイを生成するための前記物体に少なくとも1つのエッチングパスをもたらしエッチングステーション及び少なくとも一つのエッチングマスク(40)を含む、請求項9から請求項11のいずれか一項に記載の装置。

【請求項13】

請求項9から請求項12のいずれか一項に記載の装置によりミリングされた3次元パターン又は3次元構造を有するデバイス。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

10

本発明は、マイクロ及びナノスケールの3次元構造の製造方法並びに製造装置に関し、また、そのような構造に関する。

【背景技術】

【0002】

近年、マイクロメートル又はナノメートルスケールに小型化されたデバイス産業への期待が高まっている。そのようなデバイス製品は、特に、高い信頼性と精度によって製造されることが課題となっている。

【0003】

出願人は、以前、英国特許出願第2,438,241号において、SQUID又はサーモカップルなどの装置をイオンビームミリングにより機械加工する方法を開示している。スライバを露出するために材料に対してイオンビームミリングが行われる。そして、鋭角なプローブを、例えばタングステン溶接による堆積によって、スライバに付着させる。さらに、材料からスライバを分離させるために、イオンビームミリングが行われる。スライバはイオンビームミリングされ、デバイスが製造される。ある態様において、サーモカップルは、集積信号処理回路を有するシリコンウエハなどの基板に搭載されている。この方法によれば、小さな素子を、典型的なリソグラフィの制約によって制限されることなく正確に製造することができる。

20

【0004】

出願人による以前の英国特許出願は特に、基板の2次元切削や3次元構造を作製するのに適している。

30

【先行技術文献】

【特許文献】

【0005】

【特許文献1】英国特許出願第2,438,241号

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0006】

本発明は、確実かつ高精度でナノメートル及びマイクロメートル構造を製造することができるように改良された製造方法並びに製造装置を提供すること、そして、そのような構造を提供することを目的としている。

40

【課題を解決するための手段】

【0007】

本発明の側面によると、3次元構造を製造するために3次元形状にミリングする方法が提供される。本方法は、イオンビームの強度及び滞留時間によりミリングされる材料のミリング量を決定するステップと、決定されたミリング量を基に、前記材料から作られる物体をイオンビームミリングによりミリングするステップとを含み、ミリングステップでは、物体の隣接領域を異なる深さでミリングし、様々な3次元形状を形成する。

【0008】

好ましくは、ミリングステップは複数のミリングパスを含む。

【0009】

50

好ましくは、本方法は、複数のパスをミリングする際に、一連の複数のパスの内、後続のパスの少なくとも1つが以前のパスでミリングした領域をミリングするステップを含む。

【0010】

好ましい態様として、後続のミリングパスは以前にミリングされたパスの一部をミリングする。

【0011】

好ましくは、一連のミリングパスの少なくともいくつかは、同心円上にミリングする。加えて又は代替的に、一連のミリングパスの少なくともいくつかは、非同心円上にミリングする。

10

【0012】

好ましくは、本方法は、構造内の実際のミリング深さを測定するステップを含む。ミリングの深さは、原子間力顕微鏡によって測定されてもよい。好ましくは、ミリング深さはミリングステップ中に測定される。深さは、ミリングステップ内の後続の領域をミリングする前に測定されてもよい。

【0013】

好ましい態様として、本方法は3次元物体をミリングする。他の態様として、物体のレプリカがミリングされる。レプリカは、3次元構造を有し物体を製造する後続の製造ステップで使用される。

【0014】

20

好ましい態様として、本方法は、ナノメートル及び/又はマイクロメートル程のサイズの3次元構造にミリングする。例えば本方法は、レンズ又は鏡等として用いられる、直径及び深さがマイクロメートル又はナノメートルの凹状構造にミリングしてもよい。本方法は同様に凸形状にミリングしてもよい。

【0015】

好ましくは、本方法は実質的に平滑な表面の物体をミリングする。

【0016】

本発明の他の側面として、装置内で3次元パターンにミリングする装置が提供される。この装置は、対象物をミリング可能なイオンビームを生成するイオンカラムと、イオンビームの強さ及びイオンビームの滞留時間を基にデバイス材料のミリング量を取得又は決定可能な診断装置と、決定したミリング量及びミリングされる3次元パターンを基にイオンカラムを制御する制御装置とを含み、制御装置は、パターンにミリングして3次元形状を形成するために、デバイスの隣接領域を異なる深さでミリングするように操作することができる。

30

【0017】

好ましくは、制御装置は、複数のミリングパスでデバイスをミリングするためにイオンカラムを制御することができる。

【0018】

好ましくは、制御装置は、イオンカラムによって生成されるイオンビームの強度、及び/又はイオンビームの滞留時間を制御することができる。

40

【0019】

好ましくは、この装置は、1つ以上の材料に関するミリング深さ、ビーム強度及びビームの滞留時間のデータベースを含む。データベースは、ルックアップテーブルの形式でもよい。

【0020】

本発明の他の側面は、マイクロメートル又はナノメートルオーダーの3次元構造を有するキャリブレーション用の基準を提供することである。本発明の他の側面として、マイクロメートル又はナノメートル程の大きさにミリングされた3次元パターン又は3次元構造を有するデバイスを提供する。

【発明の効果】

50

## 【 0 0 2 1 】

本発明の製造装置及び製造方法により、ナノメートル及びマイクロメートルスケールの3次元構造を確実かつ高精度に製造することができる。

## 【 0 0 2 2 】

本発明の態様は、以下で示される図を参照して説明される。

## 【図面の簡単な説明】

## 【 0 0 2 3 】

【図 1】図 1 は、ピッチ及びスポットサイズで表わされるビームの重複部分の概略図である。

【図 2】図 2 は、試料台及び走査コイルをコンピュータ制御する典型的な集束イオンビーム装置の概略図である。

【図 3】図 3 は、ミリング量のフィードバックを提供する、試料台に取り付けられた A F M の概略図である。

【図 4】図 4 は、ビーム条件の変動における、100 p A でのミリング深さのグラフである。

【図 5】図 5 は、ビーム条件の変動における、100 p A での標準的なミリング量のグラフである。

【図 6】図 6 は、焦点距離 10  $\mu$  m 及び直径 10  $\mu$  m の皿型放物面の出力モデルである。皿型放物面は、28 個のサークルで定義されている。

【図 7】図 7 は、3次元構造の製造において、ビームの円運動により外側部からミリングされる第 1 のサークル（第 1 のパス）を示す概略図である。

【図 8】図 8 は、図 7 の態様における、第 2 のミリングパスを示している。

【図 9】図 9 は、部分的にミリングされた図 8 の構造における、第 2 のミリングパス以降の影響の詳細を示している。

【図 10】図 10 は、図 7、図 8 及び図 9 のミリング工程の拡大図である。

【図 11】図 11 は、シリコンを異なる焦点距離でミリングした場合の、4 つの皿型放物面の S E M 顕微鏡写真を示している。

【図 12】図 12 は、ミリングデータの生成に使用される M A T L A B マップを示している。

【図 13】図 13 は、M A T L A B で表わされた“ギブス効果”の2次元ラインプロットである。

【図 14 a】図 14 a は、ギブス効果における最初の連続する 9 つの周期を 3 次元プロットにしたもの、及びそれをカラーマップ“w i n t e r”に変換したものを示している。

【図 14 b】図 14 b は、ギブス効果における最初の連続する 9 つの周期を 3 次元プロットにしたもの、及びそれをカラーマップ“w i n t e r”に変換したものを示している。

【図 15】図 15 は、画像の緑（G）及び青（B）の強度が高さを表すカラーマップ“w i n t e r”により変換された 2 次元プロットを示している。

【図 16】図 16 は、3 つの異なるミリング部分のビットマップパターンによる S E M 顕微鏡写真を示している。試料は形態を示すためにビームに対して傾斜して表わされている。

【図 17】図 17 は、大まかに皿型放物面を形成するために、簡略したマスクの例の概略平面図である。

【図 18】図 18 は、ウエハ基板上に位置するパターン化されたエッチストップの断面図である。アライメントマークは明確には示されていない。

【図 19】図 19 は、エッチングされたウエハ基板の例の断面図である。

【図 20】図 20 は、皿型放物面を形成する所望の最終形状を示す破線とともに個々のエッチング孔の正面及び平面からの断面図である。

## 【発明を実施するための形態】

## 【 0 0 2 4 】

本発明者は、ナノ及びマイクロ構造の加工と変形にとって、イオンミリングが非常に効

10

20

30

40

50

果的な手段であることを発見した。例えば、最も簡単な実施の一つであるプロセスとして、部位特異的 (site-specific) TEM 薄膜を作成するのに使用することができる。複雑な例では、イオンミリングは MEMS デバイスの製造に使用することができる。ただし、このプロセスの性質として、イオンミリングを行う時、製造される構造は、ビームと垂直にミリングされることから、ミリングされた最終的な表面は元の表面と平行になる。つまり、孔の底は平らである。イオンビームを走査する時、一連の走査コイルはビームを試料にくまなく導く。走査コイルに適用する電圧を決定することで、視野の範囲内のいずれにもビームを配置することができる。これにより、長方形や円形などの構造をイオンミリングにより製造することができるという特徴を有する。さらにビームは、何千ものイオンビームのパスによって、一定の条件下 (固定されたイオン放射量) で定められた領域全体をミリングする。この時ミリングされた形状の深さは、ビームの条件及びパスの数によって定まる。この特徴として、ミリングされた形状は平底となる。従来のどのイオンミリングにおいても、曲面や質感等の複雑な表面を製造する試みは行われていない。本方法では、このような制限事項に対処する試みが行われている。

#### 【0025】

本明細書で使用される用語の説明

ミリング量は、ビーム条件の所定の設定のもとで、所定の時間内にイオンビームにより取り除かれる材料量を意味する。ビームの多重パスは、単一のパスとして実質的に同じ重複部分の材料を取り除くものとする。ビームの条件は、i) ビーム電流 (これは所定時間におけるビーム内のイオン数で考えることができる)、ii) ビームのスポットサイズ (試料表面上の集束ビームの直径であり、ビーム電流と密接に関連している)、iii) ビーム滞留時間 (試料表面上の固定された位置でビームが存在している時間)、iv) ステップサイズ (試料上を通過する時のビームが作る刻み幅であり、一般的にビーム x とビーム y のピッチ (間隔幅) と見なされる。ビームの動きは、滞留時間中に各ステップで停止しながら、x と y のピッチの一連のステップである。)、v) ビームの重複 (これは単にピッチ及びスポットサイズの作用である。例えば 50 nm のステップで 100 nm のスポットでは、50 % の重複結果となる。)、vi) パスの数 (ビームが試料上の同一の場所を再訪する回数)、として表わされる。

#### 【0026】

ピッチ及びスポットサイズの簡単な図が図 1 に示されており、これは、ピッチ及びスポットサイズで表わされた、ビームの重複の概略図である。

#### 【0027】

本方法と本装置は、高い分解能と精度を有する複雑な 3 次元構造を形成することができるように 2 次元イオンミリングを拡張する。これは選択される材料のミリング量を決定し、適用することにより行われる。本明細書に示される好ましい態様は、通常の電子カラムの代わりにイオンカラムの走査コイルが駆動するように改良された電子ビームリソグラフィを含む付加的なソフトウェア及びハードウェアを有効に利用するものである。電子ビームリソグラフィは、レジストで被膜された試料に電子ビームをくまなく導くのと同様のプロセスとして考えることができる。レジストは、パターンの各地点で所定の時間、電子ビームが滞留することにより硬化する。このような装置は、集束イオンビーム装置により提供される単純なパターン発生器よりもはるかに複雑なパターンを可能にする。これらの (電子ビーム) パターンは、はるかに高い複雑性と生産性を可能にし、CAD プログラムで描画することができる。

#### 【0028】

図 2 は、装置の好ましい態様の概略図を示している。

#### 【0029】

装置 10 は、イオンカラム 12 及び任意の走査型電子顕微鏡 (SEM) カラム 14 を有する。イオンカラム 12 及び SEM カラム 14 は、真空チャンバ 16 内にある。真空チャンバ 16 内には試料台 18 が配置され、試料台 18 の上にはミリングされる試料 20 が配置されている。パターンニングコンピュータ 22 は、装置台 18 の動きとともにイオンカラ

10

20

30

40

50

ム 1 2 及び任意の S E M カラム 1 4 を制御することができ、これにより装置 1 0 内に位置する試料 2 0 へのミリングを制御することができる。また本装置は、試料 2 0 をミリングするために、3 次元パターンをパターンニングコンピュータ 2 2 に入力するパターン入力装置 2 4 を含む。本態様において、パターン入力装置 2 4 はミリングパターンが格納された C A D ファイルを有する。

【 0 0 3 0 】

本装置は、選択された基板材料のミリング量、及びその材料のミリング量に基づく 3 次元パターンの展開を利用して、リソグラフィパターンを生成する。

【 0 0 3 1 】

好ましい態様として、所定の材料のミリング量は、選択材料を、一辺数マイクロメートルの複数の単純な矩形の幾何学パターンにミリングし、さらに取り除かれた材料量を決定するために原子間力顕微鏡 ( A F M ) でミリング深さを測定することにより、決定されるものである。ビーム電流、ピッチ、滞留時間、及びパス数の組み合わせはほぼ無限であるため、全ての変化に対応してミリングする矩形領域を生成することは現実的ではない。しかし、好ましい態様においては、迅速な順序でミリング量に到達するのに利用できるいくつかのショートカットを採用することができる。ユーザがイオンビーム装置の使用について合理的な理解を有していると想定すると、その当業者の能力の範囲内で、所望の結果を得るために必要なビームの値の適当な範囲を推定することになる。例えばイオンビーム電流の典型的な範囲は、1 p A から 2 0 n A である。この範囲は、所望の形状のサイズに幅広く適用することができる。当業者であれば、2 0 n A で 1 0 0 n m 構造にミリングしようとは考えないだろう (この電流ではビームスポットサイズはおおよそ 4 2 5 n m である)。同様に、1 p A で 1 0 0 μ m 構造にミリングしようとも考えないだろう。また、ピッチに関して、当業者は、所望の領域で材料の完全な除去を確実にするためにビームの重複率を数 1 0 % 台にすることを目的とする。このことから、当業者であれば、ミリングする矩形領域をほんの数例製造することにより、適切な校正結果を生成することができる。加えて、図 1 の装置の連続使用は、異なる材料のミリング条件のデータベースを作成するのに使用することができ、最適な場合には、矩形にミリングされる単一の試料のみが校正を確立するのに必要となってもよい。

【 0 0 3 2 】

このような校正は、ビームの強度及び滞留時間に依存するミリング量と材料の種類の簡単なルックアップテーブルを生成するのに使用することができる。したがって、このようなルックアップテーブルは、各材料における異なるビーム条件下でミリング量の範囲を提供し、取り除かれる量、最少形状の大きさ等の特定のミリングパターンの基準でビーム条件を推奨することになる。

【 0 0 3 3 】

また好ましい態様として、校正が A F M (原子間力顕微鏡)からのフィードバックと同時に又はその場で行うことができるように、真空チャンバに A F M が組み込まれてもよい。そのため本装置は、試料が最終的な幾何学形状にミリングされる時、リアルタイムで効果的に校正を行うことができる。試料台に取り付けられた A F M が、図 3 に示されている。

【 0 0 3 4 】

図 3 を参照すると、示される態様は、図 2 の態様としてイオンビームカラム 1 2 , 電子ビームカラム ( S E M カラム ) 1 4 , 及び試料台 1 8 を含む。試料の真空チャンバ 1 6 内での固定、2 つのイオンビームカラム 1 2 と電子ビームカラム 1 4 の制御及び試料台の移動は、パターンニングコンピュータ 2 2 とパターンニング入力装置 2 4 の制御により行われることが理解される。本態様では、試料台 1 8 上にプローブチップ 2 8 を含む A F M プローブ 2 6 が備え付けられている。プローブチップ 2 8 は、ミリングが行われているのとほぼ同時に試料 2 9 のミリング量を測定することができる。あるいは、A F M チップ 2 8 は、ミリング時点より実際には若干遅れるとしても、原子間力顕微鏡 2 6 からの読み込みは実際にミリングを行うのと実質的に同時となる、言い換えると、事実上リアルタイムになると想定される。

## 【 0 0 3 5 】

また、A F Mチップ 2 8 からの測定値は、パターンニングコンピュータ 2 2 に提供される。これにより、パターンニングコンピュータ 2 2 は、カラム 1 2 及び 1 4 からの特定のビーム特性を基に、試料 2 0 の実際のミリング量を決定することができる（この場合、任意のカラム 1 4 が含まれる）。したがって、ミリング量を調節するためにカラム 1 2 及び 1 4 からのビーム特性を調整することができ、これにより 3 次元パターンが試料 2 0 において形成される。

## 【 0 0 3 6 】

また、A F Mチップ 2 8 の測定値は、現在のミリング工程だけでなく後続のミリング工程での較正を行うために、パターンニングコンピュータ 2 2 内のルックアップテーブルでミリングデータとの相関関係において使用できることが想定される。

10

## 【 0 0 3 7 】

図 3 に示される装置は、選択される試料材料の較正データを生成する手段を提供することができる。実際、ミリング量のフィードバックを提供する A F M 2 6 により最終的な所望のミリング形状に、慎重に形成することができる。

## 【 0 0 3 8 】

いくつかの態様において、A F Mチップ 2 8 は、ビーム 1 2 及び 1 4 のいずれの動きにも遅れることなく、ビーム 1 2 及び 1 4 が試料 2 0 をミリングする位置に正確に配置されることが想定する。このような態様において、ミリング中にビームの軌道から A F Mヘッド 2 8 を後退させる仕組みを備えることが理解される。これに続いて、A F Mヘッド 2 8 が挿入される場所でのパターンの停止、及び取得されたミリング量の測定が行われることになる。その後、ミリングモデルが、所望のミリング量を生成するように検証又は調整された時に、A F Mヘッド 2 8 が後退し、ミリングを再開することができる。

20

## 【 0 0 3 9 】

他の態様では、外付け A F Mを利用する。しかし、試料 2 0 を外付け A F Mに移動させる必要性を伴う場合には、このような態様は好ましくない。つまり、測定ごとに試料を A F Mにアライメントする必要がある、さらに試料チャンバ 1 6 内でのさらなるミリングを行うために再アライメントする必要がある。試料チャンバ 1 6 内で再アライメントした後、同じ領域をミリングすると誤差が起こりやすくなる。アライメントマークは試料に予めパターン化できるが、ミリングに要する時間を全体として増加させることが想定される。

30

## 【 0 0 4 0 】

実用的な例として、純粋な単結晶シリコンにおいて、多量の  $10 \mu\text{m}^2$  の矩形及び 3 0 0 回の実行深さでミリングしたいと仮定する時、当業者は  $100 \text{ pA}$  のビーム電流を使用してもよい。スポットサイズは、ビーム電流を必要な値に制限する絞り値により固定されているため、この電流における典型的なビームのスポットサイズはおおよそ  $23 \text{ nm}$  となる。一辺が  $1 \mu\text{m}^2$  の一連の較正用矩形領域をミリングし、滞留時間などの他のパラメータを変化させた時、パスとピッチについて、図 4 及び図 5 に示されるデータが生成される。

## 【 0 0 4 1 】

図 4 は様々な較正条件に対する  $100 \text{ pA}$  でのミリング深さのプロットである。ダイヤ印は  $x$  と  $y$  のピッチが  $5 \text{ nm}$ 、四角印は  $7 \text{ nm}$  のピッチ、三角印は  $10 \text{ nm}$  のピッチ、バツ印は  $15 \text{ nm}$  のピッチでのミリングを表わす。

40

## 【 0 0 4 2 】

図 4 に見られるように、滞留時間とピッチを変化させた 1 2 点の矩形領域におけるミリングは、4 つのミリング量で表わされている。滞留時間の変化に見られるように、ミリング量のモデルをかなり単純化すると、ミリング量は直線的に変化し、ミリング深さがパス数に対して直線的に変化することを明らかにしている。実際の滞留時間は制限範囲を超えて目盛があるが、これはミリングプロセスで最も使用される可能性がある。非線形の範囲に拡張する必要がある場合には、より簡単な選択としてビーム電流又はパス数を増やす必要がある。

50



## 【 0 0 4 3 】

ピッチの効果に目を向けると、ミリング深さは、図5に見られるように、ピッチの変化に比例して変化していない。さらに、適切なビーム条件の情報によると、較正をかなり単純化することができ、所定の100 pAのビーム電流において、12 nmから18 nmの範囲のピッチを選択することになる。その理由は、100 pAでスポットサイズが23 nmとなるため、この幅のピッチでおおよそ50%から75%の重複率が得られるからである。この場合、15 nmでの較正データを有するために、おおよそ65%の重複率に応じたサイズを使用することになる。

## 【 0 0 4 4 】

図5において、ビーム条件に対する100 pAでのミリング深さの正規化された座標が示されている。ダイヤ印は2 usでパス数10のミリング、四角印は2 usでパス数20のミリング、三角印は2 usでパス数50のミリングを表わしている。すべてのデータは各パスについて正規化されている。

## 【 0 0 4 5 】

ここで、選択される条件の組み合わせにおけるミリング量の正確な値により、3次元ミリングに必要なパターンを生成し始めることができる。

## 【 0 0 4 6 】

正確な3次元構造を形成するために、パターン生成のアプローチが以下に示されている。前述したように、パターンングに関する好ましい実施形態は、改良された電子ビームリソグラフィ装置である。3次元ミリングに適するパターンを生成するために、この装置を使用して、2つの異なる手法を採用することができる。1つ目は、“ネストパターン”を使用することであり、2つ目は、ビットマップ画像でRGB値を使用することである。

## 【 0 0 4 7 】

ネストパターンのアプローチを説明するために、皿型放物面を形成する例を使用する。シリコンを使用して、直径10 μmのくぼみを焦点距離10 μmで形成したいと仮定すると、式

$$y = a x^2 + c$$

に従って、放物曲線を有する深さ625 nmのくぼみとなる。ここでyは深さ、a及びcはこの特定のくぼみに関連する定数である。図6に示されるように、半径の中心を共有する、重ねてネストされた一連のミリングシリンダとしてくぼみを考える場合、MATLABコードにより全ての計算を行うとき、各シリンダの高さは上記式に従うことになる。シリンダ数を決定するための関数は、

$$\text{number of cylinders} = 10 + \text{round}((\text{diameter} - 1) / 0.5)$$

が適用され、直径1 μmで100 nmごとに1つ又は直径2 μm以上で500 nmにつき1つに10を加えたシリンダ数が得られる。この関数は試行錯誤のアプローチで見出されているが、確実さを有している。皿型放物面が直径10 μmの場合、28個のシリンダが提供される。CADパッケージにより独立した描画層で描かれた各サークル、又はソフトウェアの場合、異なる色で任意に描かれた各サークルで28個のネストサークルを描画することにより、一連のミリングパラメータを定めることができる。このミリングパラメータにより、各サークルの深さに対応する材料のシリンダを順にミリングすることになる。

## 【 0 0 4 8 】

このモデルのサークル数を計算する時、最も内側のサークルの外側から、上記放物線型方程式に従って、各サークルの深さも以下のように計算される。

深さ 0.797194 nm

深さ 2.391582 nm

深さ 3.985969 nm

深さ 5.580357 nm

深さ 7.174745 nm

深さ 8.769133 nm

10

20

30

40

50

深さ 10 . 3 6 3 5 2 0 n m  
 深さ 11 . 9 5 7 9 0 8 n m  
 深さ 15 . 1 4 6 6 8 4 n m  
 深さ 13 . 5 5 2 2 9 6 n m  
 深さ 16 . 7 4 1 0 7 1 n m  
 深さ 18 . 3 3 5 4 5 9 n m  
 深さ 19 . 9 2 9 8 4 7 n m  
 深さ 21 . 5 2 4 2 3 5 n m  
 深さ 23 . 1 1 8 6 2 2 n m  
 深さ 24 . 7 1 3 0 1 0 n m  
 深さ 26 . 3 0 7 3 9 8 n m  
 深さ 27 . 9 0 1 7 8 6 n m  
 深さ 29 . 4 9 6 1 7 3 n m  
 深さ 32 . 6 8 4 9 4 9 n m  
 深さ 31 . 0 9 0 5 6 1 n m  
 深さ 34 . 2 7 9 3 3 7 n m  
 深さ 35 . 8 7 3 7 2 4 n m  
 深さ 37 . 4 6 8 1 1 2 n m  
 深さ 39 . 0 6 2 5 0 0 n m  
 深さ 40 . 6 5 6 8 8 8 n m  
 深さ 42 . 2 5 1 2 7 6 n m  
 深さ 43 . 8 4 5 6 6 3 n m

10

#### 【 0 0 4 9 】

上記に見られるように、各サークルの深さは、放物線型方程式に従うと増加しており、この場合、くぼみの端部では曲線は最も急になり、中心で最も浅くなっていることが示される。各サークルの深さを知ることにより、100 nAのビームで15 nmのピッチに基づく滞留時間を定めることができ、正確な深さでミリングされる同心円を生成することができる。しかし、単一のパスをミリングすることは、ミリングされた材料の再堆積が起こり、最終的な構造が不正確になる傾向にあるため、パスの数を割り当てることも必要となる。次式は比較的浅い構造について信頼して使用することができる。

30

$$p a s s e s = r o u n d ( 1 0 + ( d e p t h - 1 ) / 0 . 1 )$$

#### 【 0 0 5 0 】

これは、全体の深さが1 μm以下の場合、10個のパスが使用され、さらに、追加されるパスは、追加の深さ100 nmごとに1つ使用されることを示している。このモデルをミリングするには、特に浅い又は非常に深い場合には、いくつかの修正が必要となる。

#### 【 0 0 5 1 】

ミリング深さとパス数を設定することにより、くぼみ構造を形成するのに必要な滞留時間を計算することができる。さらにこの例において、MATLABコードを使用することにより、所定のビーム電流、ピッチ及びパス数に対する滞留時間を以下のように計算することができる。

40

パス数10におけるミリング時間

ミリング時間 0 . 7 3 1 u s  
 ミリング時間 2 . 1 9 4 u s  
 ミリング時間 3 . 6 5 7 u s  
 ミリング時間 5 . 1 2 0 u s  
 ミリング時間 6 . 5 8 2 u s  
 ミリング時間 8 . 0 4 5 u s  
 ミリング時間 9 . 5 0 8 u s  
 ミリング時間 10 . 9 7 1 u s  
 ミリング時間 12 . 4 3 3 u s

50

ミリング時間 1 3 . 8 9 6 u s  
ミリング時間 1 5 . 3 5 9 u s  
ミリング時間 1 6 . 8 2 2 u s  
ミリング時間 1 8 . 2 8 4 u s  
ミリング時間 1 9 . 7 4 7 u s  
ミリング時間 2 1 . 2 1 0 u s  
ミリング時間 2 2 . 6 7 2 u s  
ミリング時間 2 4 . 1 3 5 u s  
ミリング時間 2 5 . 5 9 8 u s  
ミリング時間 2 7 . 0 6 1 u s  
ミリング時間 2 8 . 5 2 3 u s  
ミリング時間 2 9 . 9 8 6 u s  
ミリング時間 3 1 . 4 4 9 u s  
ミリング時間 3 2 . 9 1 2 u s  
ミリング時間 3 4 . 3 7 4 u s  
ミリング時間 3 5 . 8 3 7 u s  
ミリング時間 3 7 . 3 0 0 u s  
ミリング時間 3 8 . 7 6 3 u s  
ミリング時間 4 0 . 2 2 5 u s

【 0 0 5 2 】

これにより、リソグラフィプログラムに適用するのに必要な全てのデータが得られ、所望の焦点距離の皿型放物面を形成するために 2 8 個の同心円をミリングする。当業者であれば、上記の方法では、段差のあるくぼみが生じ、滑らかな表面にはならないと考えるかもしれない。好ましい実施形態では、ミリングされネストされた一連のシリンダを滑らかな表面に生成する方法を採用しているので、この考えは誤りである。皿型放物面において、中心が最も小さいサークルの外側端部から、らせん状にミリングが行われ、次に 2 番目のサークルがミリングされ、そして、3 番目のミリングというように同じ方法で行われる場合、ビームは最後のサークルの外側端部まで、小さな段差で絶えずミリングする。これは、図 7 と図 8 に示されている。

【 0 0 5 3 】

図 7 において、最初のサークル（第 1 のパス）は、ビームが円を描くように外側端部からミリングされる。次に図 8 では、好ましくは、第 2 のサークル（第 1 のパス内）は、同様にビームが円を描くように外側端部からミリングされ、図 8 の色が塗られた部分の第 1 のパスをオーバーライドする。このプロセスは、好ましいサイクル数及びパス数まで続けられる。

【 0 0 5 4 】

さらに、このミリング方法は、ビームが通過するときにそのビームに続いていくつかの材料を再堆積させる。これは、ミリングされた外側端部を丸める面取りの効果がある。また、正確な深さを達成するためにサークルを何度もミリングするよう、パターンを設定することを忘れてはならない。その結果、各サークルの各パスの深さはわずかな数 nm である。サークルを非常に浅くミリングするプロセスと再堆積プロセスの組み合わせは、いずれの寸法誤差も生じさせることなく段差を滑らかにする効果がある。これは、図 9 及び図 10 に記載されている。

【 0 0 5 5 】

図 9 を参照すると、中心のサークルの外側端部から移動するため、最初、ビームにより端部はほとんど直角にミリングされるが、より少ない量の材料がビームに続いて堆積され、角に丸みのある“すみ肉半径 (fillet radii)” の効果を生じさせる。次に図 10 を参照すると、前のサークルにわたってさらに大きなサークルがミリングされており、既存のすみ肉半径は、ミリングにより取り除かれているが、それでもなお材料はミリングされたサークルの外側端部に沿って再堆積する。これは、同心円上にミリングされる

一連のサークルから生じることになる段差を取り除く効果がある。

【 0 0 5 6 】

また、他の 2 次元形状のネストパターンも、中心に向かってビームが移動するパターンで初めに最外側端部がミリングされるのと同様の方法でミリングされる。

【 0 0 5 7 】

図 1 1 は、このような方法でミリングされた、異なる焦点距離の一連の 4 つの放物面鏡の電子顕微鏡写真を示している。見られるように、鏡は実際に滑らかである。共焦点顕微鏡と光学的方法の両方によるさらなる検証により、これらのくぼみが寸法的に非常に正確であることを示している。確かに、光学的方法は、集束スポットを結像する非接触的な方法であり、くぼみが不正確な寸法精度であった場合、そのような集束スポットは存在しないことになる。端部の段差を滑らかにするさらなる方法は、各サークルにおける滞留時間を非常に控えめすることになるが、その結果、全体形状における段差をミリングする単一のパスを全体構造にわたって加えることになる。

【 0 0 5 8 】

これは同様の効果を達成するが、最高の精度を得るには少しの試行錯誤を必要とする傾向にある。

【 0 0 5 9 】

ネストパターンミリングの使用は、皿型放物面、円錐、ピラミッド型のインデントなどの規則的な幾何学形状に、理想的に適しているが、それ以上の任意表面には理想的に適していない。そこで、あらゆる数学的に定義された表面又は 3 次元表面データを上記の皿型放物面と同様のスケール長さで再現することができる第 2 の方法が開発された。

【 0 0 6 0 】

本方法の第 2 の態様は、これから説明されるように、数学的関数又は表面データのいずれかの表面プロットを基板にミリングできるように開発された。MATLAB のような数学的コンピュータコードを使用することにより、3 次元表面プロットを生成することができる。これは、プロットの高さを表現するいわゆるカラーマップを定義するのに使用される。カラーマップは、ビットマップをリソグラフィソフトウェアに直接に読み込み可能な RGB ビットマップに変換させることができる。

【 0 0 6 1 】

MATLAB は、かなりの数のカラーマップを提供する。RGB 画像は、RGB 値が制限される範囲内でのバリエーションがある。例えば、図 1 2 は MATLAB のカラーマップである “winter” を示している。赤 3 0 は範囲全体にわたって水平であり、緑 3 2 及び青 3 4 は直線的に変化している。これは、このカラーマップを使用して変換された全ての画像が、最終的な画像に赤の要素を含んでいないことを意味している。変換は、画像内のすべての画素の RGB 値を取得すること、及び新しい画像を形成するために変換係数を乗じることを含み、3 次元データによる 2 次元プロットの場合、RGB の構成要素の値を増やすことにより高さ Z を再現することを含む。

【 0 0 6 2 】

その他多くのカラーマップは、R、G、B をそれぞれ変化させることにより同様のことを行うことができる。

【 0 0 6 3 】

本方法は、範囲にわたって変化するように、深さ Z を割り当て、ピクセルごとの G ( 緑 ) 値 ( この特定のカラーマップの場合 ) を使用することにより、表面プロットを新しいカラーマップに変換することを含む。つまり、G 値が 2 5 5 の時、深さは 0 であり、G 値が 0 の時、深さはユーザにより定められる。つまり、G / 2 を有する場合、Z / 2 等を有する。また、ラウンド関数の使用によりカラーマップにおける分解能を定義することができ、最大 2 5 6 値まで所望の水準の深さを生成することができる。

【 0 0 6 4 】

これを説明するために、“正弦波から矩形波へ” と呼ばれる標準的な MATLAB “デモ ( demo ) ” を使用する。これは、ギブス効果として知られる奇数調波の和から成る

10

20

30

40

50

矩形波に対するフーリエ級数展開の説明である。例えば、この級数は、

$$y = \sin(t) + \sin(3 * t) / 3 + \sin(5 * t) / 5 + \sin(7 * t) / 7 + \sin(9 * t) / 9 \dots$$

として表わされる。

【0065】

初めの19周期について2次元プロットとして表示すると、図13のようになる。

【0066】

これを3次元プロットに生成するために、“正弦波から矩形波へ”の遷移における最初の連続する19周期をグラフにより表現することができる。また図14a及び図14bに示されるように、同一のプロットは、カラーマップ“winter”が割り当てられ、さらにトポグラフィを示すために、少し回転されている。この画像において、緑の構成要素はZの高さの増加とともに増加するが、青の構成要素は減少する。

【0067】

次に、このプロットを2次元プロットに変換し直すと、つまり真上から見ると、図15で示される2次元ビットマップ画像を生成することができる。ここでは、各ピクセル画像のRGB値によってトポグラフィの高さが表されている。画像は、高さを表わす緑と青の強度分布を提供する。

【0068】

そして、画像とともに、深さに基づくRGB値の1つ（この場合G値）に関数を割り当てることができる。さらに、所望の量を設定し、ミリングすることができる。念のため繰り返しておくが、全体が緑色で表示される画像は深さがなく、全体が青で表示される画像（つまり、緑はない）はミリングされる最大の深さとして我々が設定する深さを有する。次に、各ピクセルの緑の内容が、ピクセルが有する55階調の範囲で深さを示すために提供される。言い換えれば、最大の深さは、ゼロから指定した最大深さまで、55段階に分けられる。リソグラフィのソフトウェアでは、ビットマップをすぐにインポートすることができ、容量（材料のミリング量に基づいた）をそのRGB値に基づく各ピクセルの階調に割り当てることができる。もちろん、他のカラーマップも使用することができる。ここで、MATLABの“winter”カラーマップが使用される理由は、全範囲においてG値が線形の変化をしているためである。

【0069】

ステップサイズの最終的なパラメータは、このパターンにミリングする前に考慮する必要がある。その際、較正データに基づいて、ビットマップ画像のサイズはステップサイズの整数倍になるように理想的に調整される。前記のようにステップサイズを15nmで使用する時、各ピクセルを15nm、30nm、45nm等となるように選択することができる。これは、もとのパターンデータを設定する時に考慮する必要があるが、画像処理パッケージ内に多くの単純な補間関数が存在し、所望のサイズになるように画像のピクセルサイズを調整できる。例えばミリングされた構造が10×10μmであって、15回操作する工程の場合、画像を666.6ピクセルの幅と高さになるように調整することになる。もちろん、画像内のピクセルはほんの少しであるはずがないため、ステップサイズを12.5回操作分に变化させ、このステップサイズのミリング量を較正することになるか、又は666ピクセル若しくは667ピクセルの幅と高さを使用することにより、15nmのステップサイズに対する非常に小さな誤差を想定することになる。結果としてミリング領域は9.99又は10.005μmの幅と高さとなる。また、例えば2667ピクセルの幅と高さの場合、もちろんピクセル数を整数倍することもでき、15nmのステップサイズに対する誤差を軽減することもできる。これは、装置の分解能誤差を越えるおそれがあることから、技術の精度と考えることができる。

【0070】

図16は、シリコンのミリングパターンの一連のSEM顕微鏡写真である。見られるように、もとのデータはナノメートルスケールで詳細に再現されている。この例では、ビットマップ画像の幅をわずかに軽減することにより、パターンが最大限の深さまでミリング

10

20

30

40

50

されるのを防いでおり、また、分かりやすくするために構造の周りのフレームをSEMでミリングしている。図16の視点はミリングされたトポグラフィをより良く説明するためにビームに対して傾けられていることに留意する必要がある。

#### 【0071】

上記態様は、そのプロセスが、シリコンや石英ウエハのような平らな面から始まることを前提としている。このような技術の制限の1つとして、これが連続して行われることである。つまり、1つの構造は、提供されるミリングビームごとに1度処理される。これはもちろんゆっくりであるが、相変わらず技術的には重要である。

#### 【0072】

類似する構造の多くのアレイを生成するために、今のところ2つの好ましい製造手段がある。行われる方法は、アレイをわずかに作製し、これをインプリントスタンプに変化させる。さらにこのスタンプは、要求されるサイズの最終的なアレイを生成するまで、より多くのアレイを作製するのに使用することができる。各工程で寸法精度の損失が多少あるかもしれないが、これを許容した場合には、容易に行われることになる。このアプローチの考えられる1つの欠点は、アレイの各形状のサイズ又は間隔のいずれかにおいて、多くの不規則なアレイが必要とされるか否かということである。これは、スタンプとして最小限のアレイを生成し、さらにこれを拡張することを困難にさせる。

#### 【0073】

別の好ましい方法では、規則的なアレイであろうと不規則的なアレイであろうと、従来のエッチング技術により必要な量の一部を取り除くことができ、さらに本明細書に記載の3次元ミリング技術により最終的な形状を形成することができる。これは、大まかなアレイを同時に生成する。このアレイは、連続的なミリングにより仕上げがなされる。

#### 【0074】

従来の複合エッチングステップに続く3次元ミリング工程の例が、図17から図20を参照して以下で説明される。この例は皿型放物面のアレイを生成する。この方法は、以下の根本的なステップを含む。

i) 光学系リソグラフィにより従来のマスクを生成する。このマスクは、典型的にはサークルとアライメントマークから成る。

ii) 次に、このマスクをレジストの硬化に使用する。レジストは、エッチストップとして使用されるか又はエッチストップとして使用可能な後続の金属膜堆積に使用される。サークルパターンはエッチストップの孔を形成するため、ウエハ材料の無被覆部分を露出している。

iii) 例えば誘導結合プラズマ(IPC)エッチャーを使用して所定の時間で孔をエッチングする。このタイプでのエッチングは非常に優良な垂直側壁を形成させ、ミリング量を非常に正確に制御することができる。これは平底のエッチング孔のアレイを形成し、その後、最終的な所望の形状を形成するようにミリングされる。

#### 【0075】

図17は、6つの大まかな皿型放物面42のアレイを形成する簡略化したマスク40の例を示している。マスクは、複数のアライメントマーク44を有している。図18に示されるように、マスクはウエハ基板46上に配置され、処理される。簡潔にするために、アライメントマークは図18には記載されていない。ウエハ基板は、マスク40の孔と一致する大まかな孔48のアレイを形成するために従来の方法でエッチングされる。図20は、側面の断面図とウエハ基板46でエッチングされた孔48の1つの平面図を示している。破線は、放物線状の構造の所望の最終形状を示している。これらの構造は、エッチング孔を本明細書により開示された方法でミリングすることにより形成される。これにより、後続のミリングステップが、基板表面における孔の程度を考慮して制御され、行われ、そして、例えば、原子間力顕微鏡を用いた測定によって、又は経験的に決定されることが理解される。

#### 【0076】

実用的な方法の1つとして、あらかじめエッチングされた孔48の正確な形状と深さの

10

20

30

40

50

測定値を取得することが好ましい。幸いにも I C P は、非常に垂直な側壁と平底の孔を形成する傾向があり、心配する必要はない。また、同じ操作で実施されれば、あらゆる面で非常に十分な同一性が全ての孔で期待することができる。慎重にリソグラフィを行って、孔の x 軸及び y 軸の寸法を非常に高い精度で再現することができる。とは言うものの、この寸法を明らかにするために、少数の孔 4 8 の最終的な深さ ( z ) の測定値を得ることが好ましいことがある。これは、任意の適切な空中測定技術により容易に実現することができる。アライメントは、表面にある適切な基準マークで実現される。最新装置の試料台によれば、孔 4 8 ごとではなく、試料 4 0 上のほんの数点にのみそのようなマークが必要になる。

#### 【 0 0 7 7 】

パターンの修正は、原則的に容易である。ほとんどの場合で必要なことは、平面設計されたパターンから空孔体積を減算することである。

#### 【 0 0 7 8 】

上記のエッチング方法は、I P C エッチング用のネスト孔を形成するために、複合的なマスクであるグレースケールマスクを使用するように拡張することもできる。これは、イオンミリングに関する上記方法の初期工程とみなすことができる。この初期工程では、多くの体積が取り除かれ、イオンミリング時間をさらに縮小することができる。さらにイオンミリングのパラメータを調整するために生成されるピットのサイズと形状の測定値が、イオンミリングする前に、経験的に又は測定により得られる。これにより最終的なミリング構造が形成される。

#### 【 0 0 7 9 】

上記態様は、イオンビーム強度、イオン滞留時間、及びミリングされる材料の性質に基づいて、デバイス材料のミリング量を測定、取得する手段を提供することを理解されたい。この必要な手段は、装置又は方法であってもよく、診断システムや診断装置として説明することができる。

#### 【 0 0 8 0 】

上記態様及び図において、主に平面軸に対称な構造が示されているが、これは説明の簡略化のために行われている。明細書に開示されている本方法及び本装置は、同様に非対称な 3 次元構造を形成することができる。これらは、数、位置、そして側面の範囲によりミリングパスを変化させることにより形成される。例えば、いくつかの用途として、軸外し鏡又はレンズを生成するように望まれる可能性がある。これは、例えば軸外しシーケンスでミリングすることにより容易に実現できる。当業者は、規則的なパターンと形状を含む上記のミリング技術により複雑な 3 次元構造を形成することができることを理解するだろう。

#### 【 0 0 8 1 】

上記態様は、3 次元構造の製造を述べている。いくつかの例として、代わりに所望の構造の作製に使用されるレプリカ又は鏡像を上記方法により製造することが望まれるかもしれない。このようなレプリカは、ミリング量が確実に又は容易に決定できない材料で 3 次元構造を形成する場合に製造される。そのような材料の例は金属膜である。これらは、膜内の個々の粒子のランダム配向により、非常に不均一なミリングになることが知られている。イオンビームに対する種々の配向は、各粒子配向によって非常に異なるミリング量を生じさせる。平坦な膜で始まり、平底をミリングする時でさえ、粒子配向により平坦性は非常に早く逸脱する。問題のある材料の例は、誘電体であり、ミリングされた最終的な構造に誤差が生じる。試料の帯電はイオンビームのドリフトを引き起こす可能性がある。

#### 【 0 0 8 2 】

上記のような問題のある材料の表面を形成するため、又は単純なステップで大量生産可能なプロセスに拡張するために、ナノインプリントを使用することになる。このプロセスにおいて、スタンプ又はモールドは、基板上に塗布した P M M A などの材料のフォトリソに押しつけられる。その後、モールドと基板は加熱処理又は特定の放射波長の照射のいずれかにより硬化する。いったん硬化したモールドは、基板にインプリントを残して取

10

20

30

40

50

り除かれる。その後このインプリントは、当初にミリングされたマスターの表面を残したまま、さらなるモールドやスタンプとして使用され、又は後に分離される材料でコーティングされる。このようなプロセスは、以下のステップのいずれかに使用することができる。ネガ型マスターを適切な材料（例えばシリコン）で作成し、ポジ型レプリカをこのマスターで作成する。又はポジ型マスターをシリコンで作成し、ネガ型レプリカを作成する。最終的に、材料は、ネガの上にコーティングされ、選択材料でポジを再度作製するために分離される。

#### 【 0 0 8 3 】

レプリカ技術のさらなる例として、適切な光を通す材料でマイクロレンズを作製することがある。一連の皿型放物面は、シリコン内でミリングされ、P M M A 膜（P M M A は優れた光学特性を有する）が基板全体に正確な厚さで塗布される。さらに、P M M A は、熱作用により硬化し、基板から分離される。分離した P M M A 膜は、レンズのアレイで構成されている。

#### 【 0 0 8 4 】

上記の方法で作られた 3 次元構造について幅広い用途があり、そのうちのいくつかを以下に開示する。

#### 【 0 0 8 5 】

一つの用途は、様々な種類の光学、電子及び走査型プローブ顕微鏡に関する、非常に精密な顕微鏡標準器の製造、又は試験片の製造にむけたものである。それぞれのケースでは、非常に精密な格子、段差及び傾斜などの構造の範囲を含むことから、異なる幾何学様式を必要としてもよく、又は理想的には単一の統一された規格が製造されてもよい。現在の顕微鏡技術のほぼすべての規格は、リソグラフィとエッチング又は堆積プロセスによって作られており、その結果非常に限られた幾何学形状となる。

#### 【 0 0 8 6 】

本方法で示しているように、非常に正確なマイクロレベルのレンズ及び鏡の製造は、光コンピューティング、不正防止などの光学的応用、又はチップ向けコンピュータチップや M E M s デバイスによる光通信の導波管などの他の光学的応用での幅広い用途を見出すかもしれない。実際に現在、量子コンピューティングの Q b i t への応用につながる原子トラッピング及びイオントラッピングに適用される放物面鏡の使用を検討している。この用途では、軸外し鏡のアレイは、単一のレーザービームからの光を集中させて多重ビームを作り出すのに使用される。多重ビームは、個々の原子やイオンをトラッピングすることができるボックスを形成する明確に定義された焦点距離を有する。同様の軸外し鏡のアレイは、光ピンセット装置の基礎を形成することができる。

#### 【 0 0 8 7 】

また、これらの構造の用途は、プラズマ装置及び構造材料（メタ材料）のような化学的関心が高まっている分野でもある。これらの装置や材料において、材料と表面形態の組み合わせは、負の屈折率、光の減速や閉じ込め、又は光の強化や遮りのような異常な特性に結び付き、特に光コンピューティングの可能性を開く。

#### 【 0 0 8 8 】

また、本明細書に記載された技術は、レンズのアレイ（例えば  $10 \times 10$ ）で製造されるスーパーレンズの製造に使用されてもよい。このレンズは、本ミリング技術によりガラス（又は類似のもの）に直接ミリングさせるか又は本明細書に記載の 3 次元ミリングによりミリングした金型で形成させるかのいずれかにより製造される。このようなアレイは、ナノメートルスケールの分解能を実現することができる非近接場の光学顕微鏡で使用することができる。レンズは光を散乱させるために、放物線状に形成された誘電体層として作用することができる。

#### 【 0 0 8 9 】

最後に、ナノインプリント用の特注スタンプは非常に重要な市場である。この技術による現在の特注スタンプは、実際に 1 スタンプあたり数千ユーロの値がつけられている。

#### 【 符号の説明 】



## 【 0 0 9 0 】

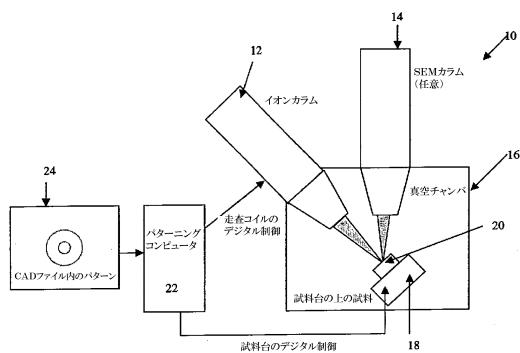
- 1 0 装置
- 1 2 イオンカラム
- 1 4 S E M カラム
- 1 6 真空チャンバ
- 1 8 試料台
- 2 2 パターニングコンピュータ
- 2 4 パターン入力装置
- 2 6 原子間力顕微鏡 ( A F M )
- 2 8 A F M チップ
- 3 0 赤色 ( R )
- 3 2 緑色 ( G )
- 3 4 青色 ( B )
- 4 0 マスク
- 4 2 皿型放物面
- 4 4 アライメントマーク
- 4 6 ウエハ基板
- 4 8 孔

10

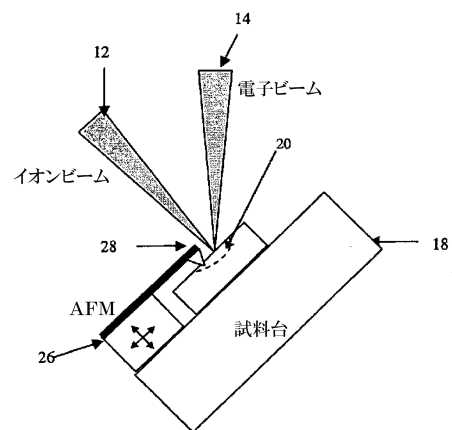
【 図 1 】



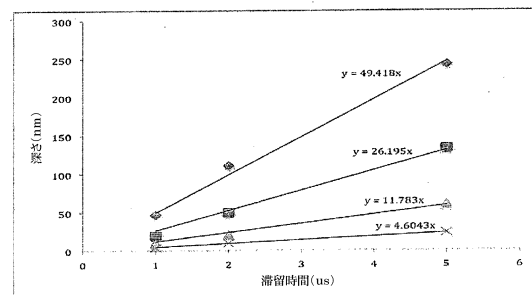
【 図 2 】



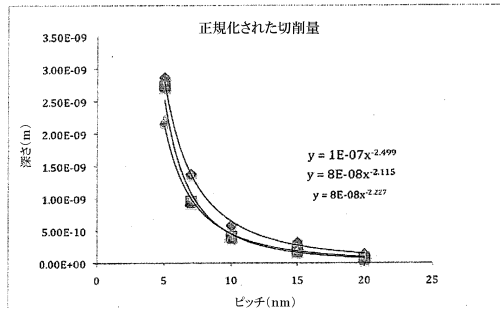
【 図 3 】



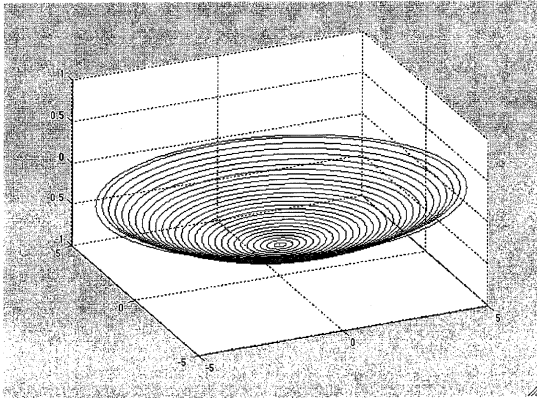
【 図 4 】



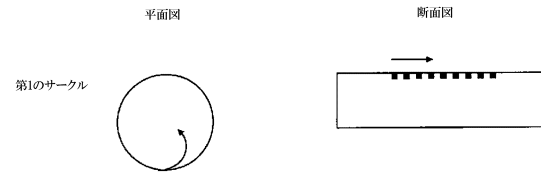
【図 5】



【図 6】



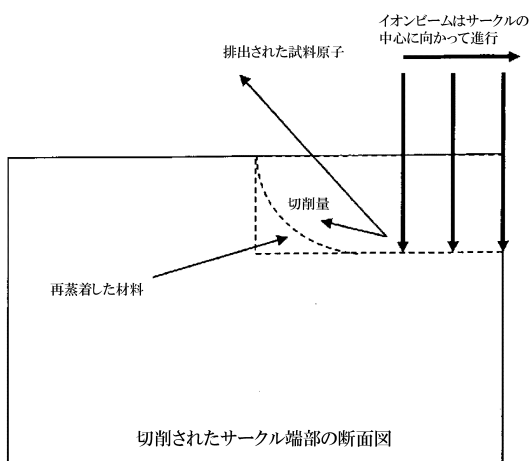
【図 7】



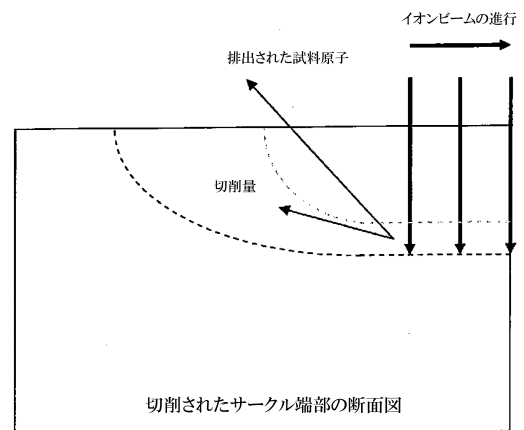
【図 8】



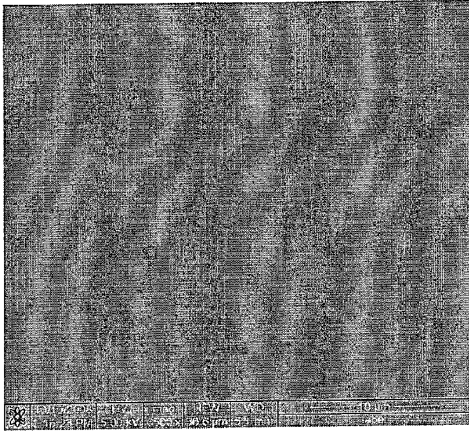
【図 9】



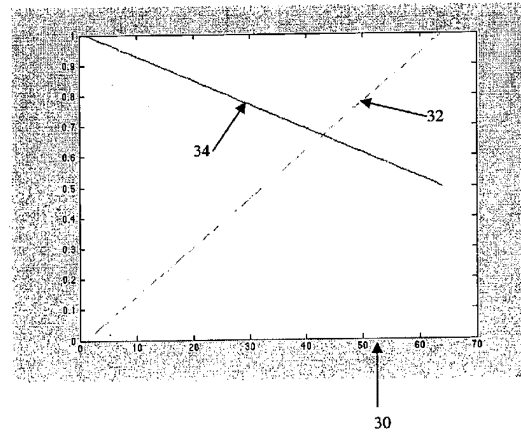
【図 10】



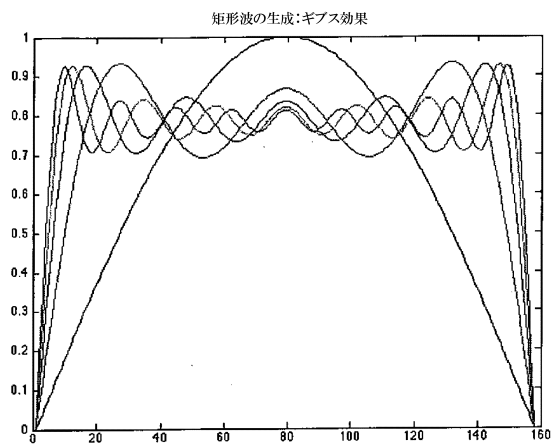
【図 1 1】



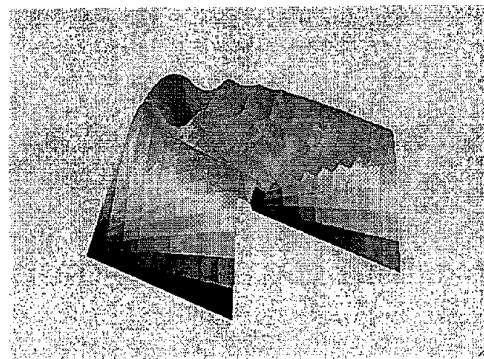
【図 1 2】



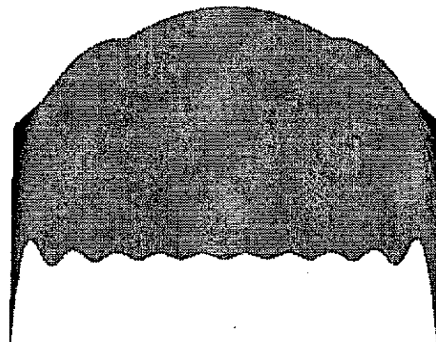
【図 1 3】



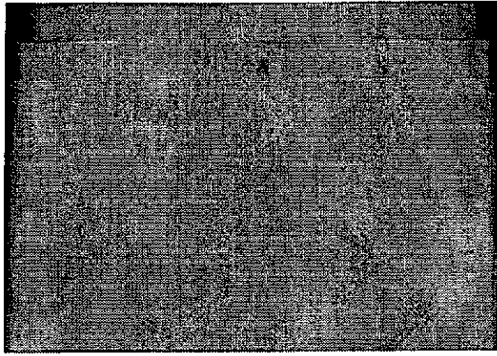
【図 1 4 a】



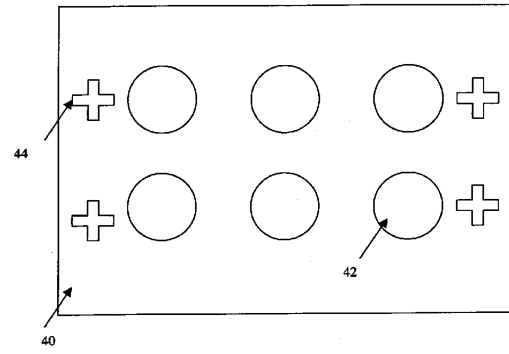
【図 1 4 b】



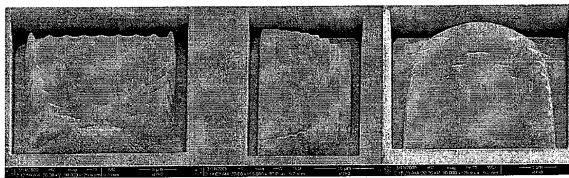
【図 15】



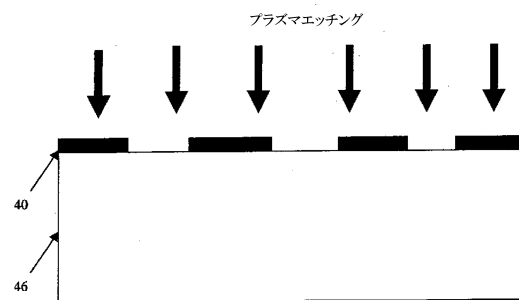
【図 17】



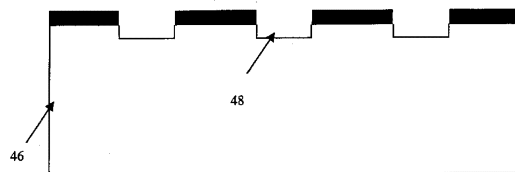
【図 16】



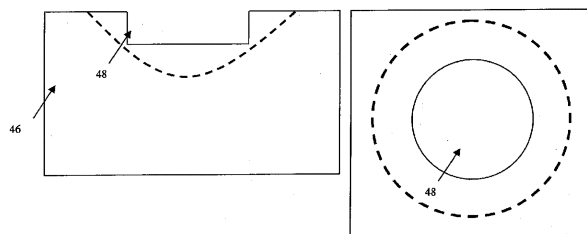
【図 18】



【図 19】



【図 20】



---

フロントページの続き

(73)特許権者 511232684

ユニバーシティ オブ サレー

UNIVERSITY OF SURREY

イギリス国 ジーユー 1 7 エックスエイチ ギルフォード サレー

(74)代理人 100116850

弁理士 廣瀬 隆行

(72)発明者 コックス デヴィッド

イギリス国 ジーユー 1 5 4 ジェーダブリュー キャンバリー サレー アップランド ロード  
1 8

審査官 遠藤 直恵

(56)参考文献 特開 2 0 0 5 - 1 7 7 8 7 8 ( J P , A )

特開 2 0 0 9 - 0 0 4 1 2 6 ( J P , A )

(58)調査した分野(Int.Cl. , D B 名)

H 0 1 J 3 7 / 3 0 - 3 7 / 3 6

B 2 3 K 1 5 / 0 0

C 2 3 F 1 / 0 0 - 4 / 0 4

H 0 1 L 2 1 / 3 0 2