

(19) 日本国特許庁 (JP)

(12) 特 許 公 報 (B2)

(11) 特許番号

特許第5702552号

(P5702552)

(45) 発行日 平成27年4月15日 (2015. 4. 15)

(24) 登録日 平成27年2月27日 (2015. 2. 27)

(51) Int. Cl.

F I

H O 1 J 37/317 (2006. 01)

H O 1 J 37/317

D

H O 1 J 37/28 (2006. 01)

H O 1 J 37/28

B

請求項の数 7 外国語出願 (全 18 頁)

(21) 出願番号	特願2010-120088 (P2010-120088)	(73) 特許権者	501233536
(22) 出願日	平成22年5月26日 (2010. 5. 26)		エフ イー アイ カンパニ
(65) 公開番号	特開2010-278004 (P2010-278004A)		F E I C O M P A N Y
(43) 公開日	平成22年12月9日 (2010. 12. 9)		アメリカ合衆国 オレゴン 97124-
審査請求日	平成25年5月14日 (2013. 5. 14)		5793 ヒルズボロ ドーソン・クリー
(31) 優先権主張番号	61/181, 989		ク・ドライブ 5350 エヌイー
(32) 優先日	平成21年5月28日 (2009. 5. 28)		7451 NW Evergreen P
(33) 優先権主張国	米国 (US)		arkway, Hillsboro,
前置審査			OR 97124-5830 USA
		(74) 代理人	100123858
			弁理士 磯田 志郎
		(72) 発明者	トム ミラー
			アメリカ合衆国 97229 ポートラン
			ド ラ・キャッセル クレスト レーン
			10810 エヌダブリュー
			最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 デュアルビームシステムの制御方法

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項 1】

デュアルビームシステムの制御方法において、

電子ビームを生成し、電子ビームを試料に向けて集束させるための電子カラムであって、前記試料表面において少なくとも 0.025 テスラの強さを有する磁場を形成する磁気対物レンズを含む電子カラムと、

前記磁場が存在する中で集束イオンビームを前記試料表面に指向させる際に、前記集束イオンビームの前記磁場による変位量を補償する静電偏向器とを設け、

前記集束イオンビームを一定の時間、表面に指向して形成されるスポットサイズの増加分として測定される分解能低下が 50%未満となるように、前記集束イオンビームの入射エネルギーまたは前記静電偏向器の電圧を設定して前記集束イオンビームの前記磁場による変位量を補償し、

前記試料表面における前記集束イオンビームのスポットサイズが 90 ナノメートル未満であることを特徴とするデュアルビームシステムの制御方法。

【請求項 2】

前記試料表面における前記集束イオンビームのスポットサイズが 50 ナノメートル未満であることを特徴とする請求項 1 に記載の制御方法。

【請求項 3】

前記磁場が前記試料表面において少なくとも 0.05 テスラの強さを有することを特徴とする請求項 1 又は 2 に記載の制御方法。

【請求項 4】

前記磁場が前記試料表面において少なくとも 0.1 テスラの強さを有することを特徴とする請求項 3 に記載の制御方法。

【請求項 5】

前記集束イオンビームを前記試料表面に指向させるのと同時に、前記電子ビームを前記試料に指向させることを特徴とする請求項 1 乃至 4 の何れか 1 項に記載の制御方法。

【請求項 6】

前記電子ビームと前記集束イオンビームとが 500 ミリ秒未満の間隔で交互に入れ替わるような状態で、前記電子ビームを試料に指向させることを特徴とする請求項 1 乃至 4 の何れか 1 項に記載の制御方法。

10

【請求項 7】

前記磁場が存在する中で前記集束イオンビームを前記試料表面に指向させる際に、モノアイソトピックガリウムのビームを前記試料表面に指向させることを特徴とする請求項 1 乃至 6 の何れか 1 項に記載の制御方法。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、複数の荷電粒子ビームカラムを含む荷電粒子ビームシステムに関する。

【背景技術】

【0002】

20

荷電粒子ビームシステムは、小型のデバイス（例えば、集積回路、磁気記録ヘッド、フォトマスク等）の製造、修理及び検査等の様々な用途に使用される。デュアルビームシステムは、走査型電子顕微鏡（SEM）及び集束イオンビーム（FIB）カラムを含むことが多い。SEMは、観察対象に対して殆ど損傷を与えることなく高分解能の画像を得ることができる。FIBは、像を観察したり、ミリング又は局所成膜によって基板を加工したりするために使用することができる。ほとんどの場合、SEMとFIBとは機構的に同じ場所で行われる。即ち、双方のビームの照射点は、ほぼ同じである。

【0003】

デュアルビームシステムの一般的な用途の一つは、基板の内部を露出させ、次いで露出された表面の画像を形成することである。例えば、イオンビームは、集積された表面を構成する積層構造の断面を露出させるために、基板に垂直な切断部を形成し、その後、新たに露出された断面表面の像を形成するためにその表面で電子ビームを走査する。「Slice and View（商標）」と称される技術では、電子ビームで各断面の像を形成しながら、イオンビームによって連続的に複数の断面が露出される。「Slice and View」によると、試料の微小な欠陥を探して観察することができる。また、その欠陥についての 3 次元情報を得るためにも使用できる。デュアルビームの他の一般的な用途は、透過型電子顕微鏡での像観察のために、試料の切出し加工及び薄膜化加工を行うことである。

30

【0004】

高分解能のSEMは、微小な特徴部位の像を生成することができるが、収差によって分解能は制限される。収差が生ずる要因の一つに「ビーム相互作用」がある。すなわち、負に帯電している電子の反発力によって、ビーム中の電子が拡散するのである。ビーム相互作用を最小限にするためには、通常、電子がより短時間で集束するように、対物レンズと試料との間の距離、すなわち、作動距離（Working Distance）を最小にするのがよい。作動距離を短くする方法は、SEMの対物レンズである磁場を試料に一層近づけることである。図 1 に概略的に示されたアキシャルギャップ型のレンズにおいて、レンズ 100 は、試料 108 の上方において、レンズ磁極 104 とレンズ磁極 106 との間に磁場 102 が形成される。このアキシャルギャップ型のレンズでは、電子ビームを集束させる磁場は、試料のかなり上方に発生する。

40

【0005】

50

他のタイプのレンズである図2に概略的に示されたシュノーケル型のレンズにおいて、レンズ200は円錐形であり、磁場202が試料204により近いので、より高い分解能を得ることができる。さらに、第3のタイプのレンズである図3に概略的に示されたイマージョンレンズ (immersion lens) において、レンズ300は、試料306まで及ぶ強力な磁場302 (例えば、約0.025テスラより大きい) を生じさせるので、より高い分解能を得ることができる。なお、本明細書において、「イマージョンレンズ」という用語は、特定のレンズ構造に限定されず、試料に対して強力な磁場を与えることができるいずれのレンズをも含む。イマージョンレンズを「超高分解能レンズ」ということもある。また、イマージョンレンズを用いたSEM制御を「超高分解能モード」「UHRモード」による制御ということがある。

10

【先行技術文献】

【特許文献】

【0006】

【特許文献1】米国特許第7411192号明細書

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0007】

FIBによって試料が作成されると、すぐにSEM像を形成することができるため、イオンビームカラムと電子ビームカラムとが同時又はほぼ同時に制御できるのが好ましい。

【0008】

20

しかしながら、ローレンツ力がイオンに作用するので、電子レンズによって生成された磁場が、イオンビームを所定の軌道から偏向してしまう。このローレンツ力は、磁場とイオンの速度との両方に対して垂直の向きに作用する。イオンカラム内部及び外部の何れにおいても磁場による偏向によって、イオンビームの照射点が数百ミクロンの範囲で移動されることがある。イマージョンレンズを使用する場合は、強力な磁場が試料にまで及ぶため、特にこの偏向が強くなる。デュアルビームシステムにおいては、イマージョンモードでレンズに電圧を印加して動作させながら、イオンビームを動作させることはできなかった。図4は、標準的な作動の範囲における標準的なFIBビームの変位量と電子ビームカラムの標準的な磁気レンズの励磁電流との関係を示す説明図である。図4に示したように、変位量は線形であり、数百ミクロンになり得る。

30

【0009】

磁場によるイオンビームの偏向を解消する方法の一つは、単にFIB使用する時はイマージョンモードで電子レンズを作動させないことである。しかし、非イマージョンモードでは、一般的に低い分解能しか得られない。もう一つの方法は、イオンビームを使用する時にはSEMの磁気レンズをオフとし、電子ビームが必要な時には磁気レンズをオンとすることである。しかしながら、SEMレンズのオンとオフとを切り換えると、さらなる問題を引き起こす。レンズがオフとなった時、残留磁場が残り、消えるまで時間がかかる。この時間に依存する磁場がイオンの軌道を変えてしまうので、FIBの使用を困難にするのである。また、SEMの磁気対物レンズはかなりの電流を使用するため、大量の熱が発生し、その熱は電流の二乗に比例する。SEMによって熱が生じると、デュアルビームシステムの構成部品を熱膨張させる。SEMの分解能は、ナノメートル単位で表される程度の大きさであるので、非常に安定した物理的プラットフォームを必要とする。このため、システムは、電源が投入された後、熱平衡に到達して安定した状態になるまで十分な時間を必要とする。システムの分解能が高くなるにつれて、安定性は一層重要となり、より長い待機時間が必要とされる。例えば、前述した「Slice and View」技術では、イオンビームと電子ビームとを頻繁に切替える必要がある。各像を形成した後、システムが安定するのを待たなければならないので、処理時間は大きく増すことになる。

40

【0010】

イマージョンレンズを備えないデュアルシステムのFIBカラムでは、電子レンズをオンとしたまま使用されてきたが、そのシステムの分解能は、イマージョンレンズを備え

50

たシステムの分解能より低い。竹内ほかによる米国特許第7, 411, 192号（以下「竹内」という。）（特許文献1）では、シュノーケルレンズの磁場を補償する磁気コイルをイオンカラムに採用した補償システムが提案されている。しかしながら、シュノーケルレンズが試料の周囲に形成する磁場は、イマージョンレンズが形成する磁場より弱く、また、シュノーケルレンズの分解能は低い。ほとんどのイオンビームシステムは磁気偏向レンズを持たない。このため、竹内の方法を採用するには、FIBカラムに磁気レンズを組み込むための大幅な再設計をすることが必要であるが、その再設計は別の問題をもたらす。また、竹内は、磁場を補償することが、ビーム中のガリウム同位体の分離を著しく悪化させる可能性があることを教示している。

【0011】

従来から、磁気イマージョンモードのSEMを備えたデュアルビームシステムは利用されてきたが、これらのシステムでは、SEMをイマージョンモードで作動させている時は、FIBを作動させることができなかった。

本発明の目的は、複数の荷電粒子ビームカラムを備えたシステム、及びそのシステムを容易に制御する方法を提供することである。

【課題を解決するための手段】

【0012】

電子ビームを集束するイマージョンレンズによって形成された磁場を補償するための偏向場がイオンビームに適用される。偏向場は、イオンの照射点を試料上の所定の点に変位させることが好ましい。所定の点とは、通常、電子レンズの磁場がない場合においてイオンが照射される点である。

【0013】

以下に詳述する本発明の実施形態の理解を容易にするために、上記説明においては、本発明の特徴及び技術的利点を幾分広く概説した。本発明のさらなる特徴と利点は以下において記述される。なお、以下に開示する特定の実施形態は、これを基礎として、他の構成に容易に変形又は変更することができる。また、これらの変形又は変更された態様も、添付された特許請求の範囲によって明らかになる本発明の趣旨及び範囲に含まれる。このことは、当業者にとっては明らかである。

【図面の簡単な説明】

【0014】

【図1】従来の走査型電子顕微鏡のアキシアルギャップ型の電子レンズの概略図

【図2】従来の走査型電子顕微鏡のシュノーケル型の電子レンズの概略図

【図3】従来の走査型電子顕微鏡のイマージョン型の電子レンズの概略図

【図4】イオンビームの変位量と電子イマージョンレンズの励磁電流との関係を示すグラフ

【図5】本発明のデュアルビームシステムの好ましい実施形態の概略図

【図6】図4の好ましい実施形態におけるイオン軌道の概略図

【図7】図4の好ましい実施形態における別のイオン軌道の概略図

【図8】ポストレンズ偏向器を使用した場合の本発明のデュアルビームシステムの他の実施形態の概略図

【図9】本発明の実施形態における二次的荷電粒子の収集動作を示す図

【図10】非点補正を修正した場合と修正をしない場合の集束イオンビームのスポットを示す図

【図11】A及びBは、それぞれ、イマージョンレンズからの磁場がある場合とない場合の集束イオンビームのスポット

【図12】イオンビームの変位量と電子ビームの入射エネルギーとの関係を示すグラフ

【図13】本発明の好ましい方法を示すフローチャート

【発明を実施するための形態】

【0015】

SEMレンズの磁場によって生じた偏向を補償するためにイオンビームを意図的に偏向

10

20

30

40

50

させるが、ビームを偏向させると、通常、ビームの収差が大きくなる。すなわち、ビームを偏向させることは、ビームを分散させるため、集束ビームのスポットサイズが変形又は拡大するのである。イオンビーム中のすべてのイオンが同じエネルギーを有することが理想的であるが、実際のイオン源の性質としては、ビーム中のイオンの間にはエネルギーの僅かな拡がりがある。イオンがそれぞれ異なるエネルギーを持つので、磁場による偏向も各イオンで異なってくる。エネルギーの違いによって生じる偏向の違いは、色収差を引き起こし、ビームを拡散し、対象の異なる位置に照射される。また、イオンがそれぞれ異なるエネルギーを持つので、静電場による偏向も異なってくる。磁力は速度に依存するが静電力はそうでないため、イオンエネルギーの拡がりによって生ずる磁場における偏向ビームの分散は、イオンエネルギーの拡がりによって生ずる静電場における分散とは異なる。したがって、静電力によってイオンビームが初期の軌道に戻るよう偏向された場合、ビーム収差はそのまま残る。磁場によって生じるイオンビームの分散は、他の磁場によって十分に補償することができるが、以下の式に示すように、静電場の適用によっては十分に補償することができない。なお、実際の各イオンの偏向は、力だけではなく、力が作用する時間、力を受ける方向、及び力が作用した後の移動距離にも依存する。

10

【0016】

磁場による偏向の分散は、おおよそ下記式のとおり見積もることができる。

【0017】

【数1】

20

$$\frac{\Delta d}{d} = \frac{1}{2} \frac{\Delta E}{E_0}$$

【0018】

Δd は、距離 d における偏向されたビームの位置分散であるのに対し、 ΔE は、ビームのエネルギーの拡がりであり、 E_0 は、ビームの公称エネルギーである。

【0019】

同様に、静電場による偏向の分散は、おおよそ下記式のとおり見積もることができる。

【0020】

【数2】

30

$$\frac{\Delta d}{d} = \frac{\Delta E}{E_0}$$

【0021】

磁場による偏向と修正用の静電場による偏向との組み合わせは下記式のとおりである。

【0022】

【数3】

$$\frac{\Delta d}{d} = \frac{1}{2} \frac{\Delta E}{E_0}$$

40

【0023】

磁気イマージョン電子レンズによって生じる偏向は大きいので、従来では、これを修正する手段は実用的でないか、又は FIB の分解能を大きく低下させると考えられていた。出願人は、 FIB の性能を大きく低下させることなく、イマージョンレンズの磁場を補償する偏向修正システムを実現した。本発明の実施形態では、 FIB と超高分解能 SEM とを同時に作動させるか、又は、切換え時間が約ミリ秒単位であるインターレースモードで作動させることができる。インターレースモードで作動している間は、イオンビームを観察対象に指向させる時、電子ビームを遮った状態でイマージョンレンズを作動させたまま

50

とすることが好ましい。他の実施形態において、イオンビームが照射されている時は、イマージョンレンズをオフとしてもよい。しかし、この場合、イマージョンレンズの電流を切った後は、残留磁気が十分に消えるまで、時間をとる必要がある。

【0024】

好ましい実施形態において、イマージョンレンズによって形成された磁場に対してイオンビームを補償するために、偏向場が適用される。本発明は、特に、試料表面で0.025 T、0.05 T又は0.1 T以上の磁場を形成する磁気レンズに対して有用である。好ましい実施形態では、イオンビームが対物レンズの中心付近を通過するようにイオンビームを偏向させる。また、磁場がない場合の照射点と同じ点にイオンビームが照射されるようにビームを偏向させる。ビームは、また、基板の像観察又は処理をするための走査、例えば、ラスターパターンに従って、偏向されてもよい。

10

【0025】

好ましい実施形態では、二つの静電偏向器を使用する。第1偏向器は、イオンカラムの静電対物レンズの中心に向けてビームを偏向させるために使用される。第2偏向器は、ビームの照射点を、電子レンズの磁場がなかった場合に照射される点に戻すために使用される。また、第2偏向器はビームの走査及び非点収差の修正に使用されることが好ましい。別の実施形態として、一つの偏向器を使用して、ビームを対物レンズの中心に指向させ、磁場を補正するためにビームを偏向させ、処理パターンに基づいてビームを走査し、及び非点補正 (stigmatism) を修正する構成としてもよい。本明細書において、「偏向器」とは、一対の平行板でもよいし、各々がビームを偏向させる多極の素子 (例えば、複数対の四極子又は八極子) を含む組立部品であってもよい。

20

【0026】

通常の高分解能FIBでは、イオンビームは、試料表面において、わずか数十 μm の範囲で走査される。イオンビームの分散は、ビームに関する他の収差と比べると相対的に小さいので許容できる。イマージョンレンズによって形成される磁場によるイオンの偏向は500 μm を超えることがある。このような大きな偏向によって生じる偏向分散は、さらに大きくなる。

【0027】

いくつかの実施例において、偏向分散は非対称となることがある。すなわち、偏向によって、イオンビームが第一の方向に沿って速く進む一方で、第一の方向に対して垂直な方向にはよりゆっくり進むようにイオンビームを変えるのである。いくつかの用途において、一つの方向への大きな拡がりには許容できる。何故なら、ビームの端は、その拡がりに対して垂直な方向については、未だ比較的鋭いからである。そのため、ビームは、一つの方向についてのみ鋭い端が求められる構造を処理するために使用することができる。例えば、イオンビームは、分散に対して平行な切断面の断面又は薄片を切出すために使用することができる。また、出願人は、偏向によって生ずるビームの拡がり、小さな電流を用いてビームを出射した場合はスポットサイズに大きな影響を与えるものとなるが、より大きな電流を用いてビームを出射した場合は原則的にビームスポット内に平均化されることを見出した。したがって、通常のミリングで大きな電流が使用される場合には分散は重要ではない。

30

40

【0028】

本発明の好ましい実施形態では、実用的かつ実現可能な方法によって、偏向力によって生じたイオンビームの偏向を補正する。現在利用されているイオンビームシステムは、通常、静電偏向器を備えているので、本発明の好ましい実施形態では、既存のイオンビームシステムに、必要に応じて、比較的小さな変更をすることで実現することができる。

【0029】

本実施形態では、イオンカラム内部とイオンカラム外部との両方の偏向を取り扱う。イオンカラム外部とは、すなわち、カラム内の終端レンズと加工対象物との間の領域である。以下、(1)カラム内部及び(2)カラム外部の二つの領域におけるFIBの偏向につ

50

いて説明する。当業者であれば、問題を「カラムの内部」と「カラムの外部」に分離することは、議論を容易にするものであるが、幾分人為的なものであり、カラム内部の偏向がカラム外部の軌跡に影響することが分かる。

【0030】

カラム内部の修正：磁気イマージョンSEMによって形成された磁場は、シールドされない限り、FIBカラム内部においてビームを偏向させる。いくつかの実施例において、「mu-metal」（Ni-Fe合金）のような磁気シールド材料が電子対物レンズの磁場からFIBカラム内部のイオンビームをシールドするために使用される。かかるシールドは、磁場によって生じるイオンの偏向を低減させるが、その現象は多くの用途にとって不十分である。いくつかの用途において、シールドは実用的でないか、又は電子レンズの磁気イマージョンモードの動作に影響することがある。カラム内部の偏向は、FIBカラムに内部に備えられたカラム上部偏向器を使用し、且つFIBビームを最終FIB対物レンズのほぼ中心に偏向するような修正偏向を適用することにより、偏向を補償する。

10

【0031】

カラム外部の修正：磁気イマージョンSEMによって形成された磁場は、試料平面上に非常に大きな偏向を生じさせる。この偏向は、FIBビームを動かし、SEMビームの照射点から外れる。ある場合には、偏向は500 μm を超えることがある。磁場による偏向を修正するため、SEMイマージョンモード磁場から磁氣的に励起された偏向を修正するように、試料平面上で所望のビームシフトを生じさせる偏向システムが提供される。この修正は、一つの好ましい実施形態において、通常、FIB対物レンズのレンズ面（又はその付近）のピポット点のカラム中部偏向器によって実現される。「カラム中部偏向器」という用語は、イオン源と対物レンズとの間に配置された偏向器を指すものである。偏向は、また、FIB対物レンズの下にある専用の偏向器によって、又は対物レンズの上及び下にある偏向器の組み合わせによっても実現することができる。

20

【0032】

図5は、デュアルビームシステム500の概略を示す図である。デュアルビームシステム500は、電子銃504、コンデンサーレンズ506、偏向器508及び説明を簡単にするため接続が省略されて図示されているが、上部及び下部の磁極を有する対物レンズ（例えば、イマージョンレンズ510）を備えた電子ビームカラム502を含んでいる。電子ビームカラム502は、さらに、レンズを通過した2次電子を検出する検出器512を備える。この検出器512は、選択的な偏向器、例えば、ウィーンフィルタ（Wien filter）514、及び2次電子検出部516を含む。ウィーンフィルタ514は、対物レンズ510を通過して2次電子検出部516に向かう2次電子を偏向させる。2次電子検出部516には、例えば、シンチレータ光電子倍增管（ET検出器：Everhart-Thornley detector）、マイクロチャンネルプレート（MCP：Micro-Channel Plate）、CDEM検出器（Continuous Dynode Electron Multiplier）等を使用することができる。対物レンズ510の上部磁極部524と下部極局部526との間では、磁場520が試料522を通るように形成される。試料522は、傾斜角を変えられるX-Yステージに配置される。また、対物レンズ510、540の形状は、いずれのビームに対しても試料が垂直に向けられることができるように、X-Yステージが十分傾斜できるようにされている。

30

40

【0033】

イオンカラム530は、イオン源532、ブランカー534、カラム上部静電偏向器536、カラム下部偏向器538A、538B、及び静電対物レンズ540を備える。カラム上部偏向器536は、例えば、ビームをx方向に偏向させる第一の一对の平行平板と、ビームをy方向に偏向させる、第一の一对の平行平板と直交する第二の一对の平行平板とすることができる。対となる各平板には、一般的には、大きさが等しいが極性が異なるポテンシャルが供給される。また、偏向器536は、単一又は一組の八極子又は四極子によって構成されてもよい。カラム上部偏向器536の主な機能は、イオンビームを対物レン

50

ズの中心に向けて送ることである。「中心に向ける」とは、ビームが偏向なしの軌道より対物レンズの中心近くを通過するように偏向することを意味する。収差を最小にするため、ビームが最終イオンレンズのできるだけ中心近くを通過することが望ましい。そして、カラム下部偏向器538A及び538Bは、処理パターンに従ってビームを走査し、イオンカラム外部の磁場を補償し、非点補正(stigmatism)を修正する。図5に示されたようなカラム上部偏向器及びカラム下部偏向器を使用する実施形態において、イオンビームが対物レンズと交差する点を決定するのは、偏向の組み合わせであって、必ずしも上部カラム偏向器のみからの偏向ではない。他の実施形態として、カラム上部偏向器536を除去して、偏向器538A及び538Bを使用して、ビームをスキャンし、かつイオンカラムの内部及び外部の双方において磁場を補償するものもある。

10

以下に詳細に述べる別の実施形態では、対物レンズの中心にイオンビームを向けるためにカラム中部偏向器を使用し、次いでビームをスキャンしカラム外部の磁場を修正するためにイオン対物レンズの下部に設けられた偏向器を使用する。本発明は、いずれの特定の偏向器の構成、及び偏向器の機能に限定されない。つまり、走査及びカラム内外の磁場の補償は、いずれかの偏向器又は偏向器の組み合わせによって実現されればよい。

【0034】

カラム上部偏向器536に必要とされる電圧は、イオンのエネルギー、カラムの配置、及び電子レンズの電流によって変わる。ある実施形態では、電子レンズの励磁電流1アンペアにつき、FIB対物レンズにおけるビーム位置において、約150 μ mの変位量を生じさせた。そして、FIBを再度対物レンズの中心に合わせるため、イマージョンレンズの励磁電流1アンペアに対して、カラム上部偏向器に約4ボルトの電圧が必要であった。なお、当業者であれば、イオンビームを試料に向け、試料に照射されたスポットの位置と形状を観察することによって適正な電圧を設定することができる。静電対物レンズ540は、例えば3万ボルトの高電圧が印加される中心電極544と、アース電位に保たれアース電位に保たれている二つの周囲電極546及び548を有する、単電位レンズ又はアインツェルレンズ(Einzel Lens)であることが好ましい。

20

図6、7及び8は、本発明を具体化した様々なイオンカラムにおけるイオン軌道の概略を示す説明図である。分かりやすくするためにカラムは簡略化して示されており、光軸からのビームの偏差は誇張されている。当業者であれば、磁気レンズから離れているカラム上部において、イオンの偏向が比較的小さいことに気付く。図6は、上部カラム静電偏向器536が、偏向器538A及び538Bがない場合に対物レンズ540の中心近くを通過するような軌道にイオンビームを偏向させることを示している。新たな軌道は、カラム内部の磁場によって偏向されるイオンを対物レンズ540の中心を通過するように向けることが好ましい。下部偏向器538A及び538Bは、試料上の所望の照射点に向けてビームを偏向させる。図7に示した変形例では、下部偏向器538A及び538Bは、図6に示されるように反対方向ではなく、同じ方向にビームを偏向させるように操作される。

30

【0035】

下部偏向器538A及び538Bは、すでに従来技術において知られているように、まずビームを一つの方法に偏向させ、次いでビームがレンズ540の中心を通過するようにビームを反対方向に偏向させる制御をすることによって、収差を減少させる。また、下部偏向器538A及び538Bは、ビームを走査する機能、非点補正する機能のほかに、イマージョンレンズ510によって生じたイオンカラム外部の磁場を補償するためビームを偏向させる機能も実現できる。一つの偏向器を全ての目的に使用することは可能であるが、偏向器を駆動する電子機器は、大きな補償偏向、及びスキャン偏向と非点補正を得るために偏向器に十分な電圧を供給できなければならない。一つの実施形態において、偏向器は、非点補正するための十分な能力を維持したまま、100 μ m以上の走査パターンによってビームを走査し、磁場によって生じたシフトを補償するため500 μ mまで変位させる性能を有する。

40

【0036】

偏向器538A及び538Bからのビームには「ピボット点」、すなわち、偏向点に対

50

物レンズの近くにおいて、ビームがカラム上部偏向器 536 によって対物レンズの中心に向けて偏向された後、対物レンズ 540 の中心近くを通過することが好ましい。図 8 は、最終レンズ 540 の後方（下方）に配置された偏向器 804 を使用した別の実施例を示す図である。偏向器 804 は、レンズの上方（前方）のカラム下部偏向器 538A 及び 538B に加えて使用することもできるし、レンズの上方のカラム下部偏向器の代わりに使用することもできる。偏向器 538A 及び 538B は選択的な構成であるので、点線で示されている。例えば、カラム上部偏向器 536 は、イオンビームを最終レンズの中心に向けるために使用することができる。そして、ビームは、最終レンズ 540 の後方に配置された偏向器 804 を使用して、試料上の所望のスポットに偏向される。最終レンズ 540 の後方に偏向器を配置することの利点は、偏向によりビームがレンズの中心から外れることがないということである。他方、レンズ後の偏向の不利な点は、通常、偏向器をレンズと対象物の間に配置する必要があるので作動距離が増加してしまうことである。レンズ前の偏向器とレンズ後の偏向器の組み合わせを使用することができる。

10

【0037】

図 9 は、本発明の実施形態における二次電子 902 を収集する動作を示す説明図である。当業者であれば、イマージョンレンズ 904 の作動中に、従来の FIB の二次電子検出器 906（例えば、CDEM）を使用することが実用的でないことを理解することができる。なぜなら、二次電子が検出器 906 へ到達するのを磁場が妨げるからである。電子カラム 908 の「レンズを通過する」検出器は、SEM 観察の一次電子ビームによって生成される二次電子はもちろんのこと、FIB カラム 912 から照射されたイオンビーム 910 によって生成される二次電子を収集し、検出するために使用することができる。例えば、試料に対して正となる数百ボルトの電圧が SEM 対物レンズに印加されると、電子は対物レンズ 904 の開口部に引き寄せられる。電子は、イマージョンレンズ 904 の磁場の存在下で、らせん軌道を描いて進む。電子カラム 908 は、自身を通過する一次電子ビーム 914 への影響を最小限にしつつ、二次電子 902 を二次検出器 922 に偏向させる偏向器（例えば、ウィーンフィルタ 920）を備える。

20

【0038】

イオンビームは、非点収差を引き起こす非対称な状態で磁場を通過するため、ビームは、再非点補正、すなわち、非点補正収差を取り除くために「捻じ曲げられる」ことが好ましい。ビームは、下部の偏向器 538A 又は 538B（図 5～8）に使用される四極子又は八極子によって再非点補正することができる。図 10 は、収差を除くための再非点補正がされていないイオンビームの照射によって形成されたスポット 1012、及び収差を除くための再非点補正がされたイオンビームの照射によって形成されたスポット 1014 を示す。図 10 に示したとおり、ビームを再非点補正することが望ましい。SEM のイマージョンによる磁場は、FIB カラムを通過するイオンビームの新たな軌道と同様に、更なる焦点誤差を生じさせる。この誤差は、新たに設けられる又は既存の焦点補正の装置を使用することによって補正することができる。

30

【0039】

図 11A 及び図 11B は、イマージョンレンズからの磁場がない場合のイオンビームのスポット 1102（図 11A）及び本実施形態を使用したイマージョンレンズからの磁場がある場合のイオンビームのスポット 1104（図 11B）の比較を示す。いずれのスポットも、ビーム電流 96 pA、ビームエネルギー 30 keV で 10 秒間照射されたイオンビームによって形成されたものである。本実施形態に従って形成されたスポット 1104 は、磁場がない場合に形成されたスポット 1102 よりも大きくなく、歪みのない対称性のある円形である。

40

【0040】

1 次ビームの電子の入射エネルギーを変更するためには、電子を集束するイマージョンレンズによる集束させる力を変更しなければならない。そのため、入射エネルギーを変更すると、イマージョンレンズの磁場の力を変更することになり、これに対応してイオンビームに必要な補償用の偏向も変更する必要がある。電子の入射エネルギーが増大すると、

50

電子ビームを集束させるためにより強い磁場が必要となり、イオンビームの補償用の偏向をさらに大きくしなければならない。電子の入射エネルギーをFIBビームの変位量との相関関係を得れば、いずれの電子の入射エネルギーにおいても、FIBの変位量をあらかじめ決定することができる。図12は、入射エネルギーとFIBのスポットとの関係を示す図である。本実施形態では、FIB及びSEMの入射エネルギーの範囲を制限することによって単純化することができる。例えば、FIBを30keV、SEMを10keV未満に保つと共に、FIBの電流を、例えば約100pAに限定してもよい。イオンビームの偏向を増やす方法には、より高い電圧を偏向器に印加してもよいし、作動距離を大きくしてもよいし、偏向器を長くしてもよい。また、対物レンズ平面にピポット点を配置せずに各偏向器を個別に制御してもよいし、レンズ後の偏向器を使用してもよい。

10

【0041】

また、FIBの入射エネルギーを変更すると、磁場から受けるイオンビームの偏向も、補償用の静電偏向器から受けるイオンビームの偏向も変わる。磁場から受けるイオンの偏向は、イオンの入射エネルギーの平方根の逆数にほぼ比例する。一方、八極子の偏向器による偏向は、イオンの入射エネルギーにほぼ反比例する。このため、静電偏向器は、イオンの入射エネルギーが小さいほど大きく補償することができる。しかしながら、偏向が大きくなると、色収差も大きくなるので、FIBの入射エネルギーは、約15keVから45keVの間に維持するのが好ましく、約30keVに維持するのがより好ましい。

【0042】

磁場による偏向の分散は、静電偏向による偏向の分散と等しくないため、静電偏向では、偏向の分散を完全に除去することができない。しかしながら、出願人は、ビーム電流及びスポットサイズが大きくなると、偏向の分散は有意でなく、検出されないことを発見した。偏向によって生じる分散に起因する分解能低下については、異なる複数の方法によって明らかにすることができる。イオンビームの分解能を明らかとする方法の一つは、一定の時間、ビームを表面に指向して、「バーンスポット」の直径を測定することである。まず、磁気レンズを作動させない場合にスポットを形成し、その直径を測定し、次に、磁気レンズを作動させ、本発明に従ってイオンの軌道が補正された場合に他のスポットを形成し、その直径を測定する。分解能低下は、磁気レンズが作動していないときと対比して、磁気レンズに電圧が加えられて本発明が使用されるときに、バーンスポットの直径における増加分として測定することができる。本実施形態では、ビーム電流及びスポットサイズに応じて、スポットサイズの増加分を約50%未満、25%、約10%未満、約5%未満又は約2%未満とすることができる。

20

30

【0043】

例えば、いくつかの実施例において、本出願人は、イオンビームのスポットサイズが約20nmを超える場合、偏向による劣化は許容できるレベルであることを発見した。すなわち、分散がスポットサイズの約70%以下であった。いくつかの実施例においては、スポットサイズが40nmを超える場合には劣化が非常に小さくなった。すなわち、分散がスポットサイズの50%以下であった。また、スポットサイズが90nm以上の場合には劣化は認められなかった。したがって、像観察に使用する低いビーム電流ではビーム劣化の影響が大きい、ミリング及び成膜に使用する標準的なビーム電流では、ビーム劣化の影響は小さい。通常のアプリケーションにおいて、イオンのスポットサイズの約50%以下の分散は無視することができる。スポットサイズはビーム電流と相関する。例えば、ビーム電流が100pAである場合、また、ある実施例ではビーム電流が50pA以下の場合、イオンスポットの劣化はほとんど観察されなかった。ビーム電流及びスポットサイズが小さくなると、何らかの劣化が観察されることがある。

40

【0044】

液体金属イオン源に使用されるガリウムは、通常、主に、約60%の原子質量が約69amuのガリウムと、約40%の原子質量が約71amuのガリウムとの二つの同位体の混合物として発見される。モノアイソトピックガリウムは、FIB源用として市販されており、ビームが二つに分離するのを防ぐために、本発明において使用することが好ましい

50

。

【0045】

必要なビームの偏向は、イオンの入射エネルギー及びイマージョンレンズの磁場によって変わり、イマージョンレンズの磁場は、電子の所望の入射エネルギーによって変化するので、FIBカラムの偏向器に必要な電圧を決定するために、イオン及び電子の所望の入射エネルギーに対する対応表又は解析的關係を作成することができる。

本発明の実施形態における利点の一つは、FIBを同時に又はほぼ同時に交互的に作動させるので、例えば、繰り返し像観察することによってミリング加工の進行を確認し、ミリング加工の終点を確認することができる。交互に作動させる場合、操作者は、一定の時間ミリングした後、FIBを遮ることによってミリングを中止することができる。そして、操作者は、イマージョンレンズへの電流を増大させることによって、SEM像を取得することができる。操作者は、SEM像を観察して、ミリング加工が完了していなければ、イマージョンレンズへの電流を切り、ミリング加工を継続することもできる。ミリング加工が完了していれば、ミリング加工を終了する。

【0046】

図13は、本発明による方法を示すフローチャートである。ステップ1303において、イマージョンレンズを有する電子カラムを準備する。イマージョンレンズは、例えば、試料の表面上において、0.025テスラ以上、0.05テスラ以上、0.075テスラ以上又は0.1テスラ以上の磁場を形成する。ステップ1305において、イオンビームを試料表面に指向させる。イオンビームのイオンは、通常、15keVから45keVのエネルギーを有している。ステップ1307において、イオンビームは、イオンカラム内部の磁場を補償するように偏向され、イオン対物レンズの中心又は中心近くを通過する。ステップ1309において、イオンビームは、カラム外部の磁場を補償するように偏向され、所望の照射点に向けられる。ステップ1311において、イオンビームは、試料を処理するために走査される。例えば、ビームは、ミリング、成膜又は像観察のためにラスタースタートされてもよいし、ラスタースタートされずに点から点へ向けられてもよい。選択的なステップ1313において、ビームは、非点補正を取り除くために適切な電圧を四極子又は八極子に印加することによって、非点補正を除去される。ステップ1307、1309、1311及び1313は、同時に実行されてもよいし、順番に実行されてもよい。これらのステップは、一組の偏向器によって実行されてもよいし、イオンカラムに沿って異なった位置に設けられた複数の偏向器によって実行されてもよい。これらのステップのうちの複数のステップを、一組の偏向器によって実行してもよいし、一つのステップを複数の偏向器によって実行してもよい。選択的なステップ1315において、イオンビームは遮られ、ステップ1317において、高分解能の像を形成するために電子ビームが試料に指向される。選択的なステップ1319において、電子ビームは遮られ、ステップ1305から処理が繰り返される。すなわち、試料は、イオンビームによる処理、電子ビームによる観察、イオンビームによる処理、イオンビームによる観察等がなされる。いずれかのビームが遮られる時でも、隠されたビームの粒子源は荷電粒子を放出し続け、レンズは電圧が印加されたままである。ビームは、1秒未満、500ms未満、100ms未満、10ms未満又は1ms未満の間隔で、交互に入れ替えられる。電子ビームは、いずれのビームも遮ることなく、イオンビームと同時に試料に向けられることがある。

【0047】

本発明の実施形態においては、電子ビームを生成し、集束させる電子カラムは、試料表面に到達し、試料表面で少なくとも0.025テスラの強さを有する磁場を生成する磁気対物レンズを設けること、磁場、補償可能なイオンビームの磁場による変位量及びビームのスポットサイズを50%未満増加させる補償の存在下で集束イオンビームを試料表面に指向させることが含まれる。

【0048】

本発明の実施形態として、ビームスポットのスポットサイズが基板表面で90nm未満、より好ましくは50nm未満となるように、集束イオンビームを基板表面に指向させる

ことが好ましい。また、試料表面に、少なくとも0.05テスラ、より好ましくは少なくとも0.1テスラの強さの磁場を形成することが好ましい。

【0049】

本発明の実施形態として、集束イオンビームを表面に指向すると同時に、電子ビームを試料に指向することが好ましい。あるいは、電子ビームとイオンビームとが500ms未満の間隔で交互に入れ替わるような状態で、電子ビームを試料に指向させてもよい。磁場の存在下でモノアイソトピックガリウムの集束イオンビームを基板表面に指向してもよい。

【0050】

また、好ましい実施形態又は本発明は、電子イマージョンレンズからの磁場が存在する中で集束イオンビームカラムを制御する方法であって、試料まで届く磁場を形成する磁気イマージョン対物レンズによって集束される電子ビームを試料に指向させ、電子イマージョンレンズからの磁場が存在する中で、イオンビームを試料表面の一点に指向させ、磁場が存在する中で、サブミクロンの精度をもって試料を処理するために、イオンビームに作用する磁場の影響を補償するようにイオンビームを偏向させることを含む。

【0051】

本発明の実施形態として、イオンビームに作用する磁場の影響を補償するようにイオンビームを偏向させる際に、イオンビームカラム内部でイオンビームを偏向させることによって、磁場が存在する中でイオンビームの補償がない場合に比べて、対物レンズの中心の近くを通過させること、試料を処理するパターンに従ってイオンビームを走査すること、ビームが対物レンズを通過する前に、イオンビームを偏向させること、及び／又はビームを第1及び第2偏向器を使用して偏向させ、第1偏向器は、イオンビームカラム内部でイオンビームを偏向させることによって、磁場が存在する中でイオンビームの補償がない場合に比べて、対物レンズの中心の近くを通過させ、第2偏向器は、イオンビームカラム外部の磁場を補償し、イオンビームの照射点を、磁場がない場合に照射される点に移動することが好ましい。

【0052】

本発明の実施形態として、第2偏向器は、ビームが対物レンズを通過した後に、イオンビームを偏向させること及び／又は平行電極板、四極子又は八極子を用いてイオンビームを偏向させることが好ましい。本発明の実施形態として、イオンビームに作用する磁場の影響を補償するようにイオンビームを偏向させる際に、イオンビームを分散させて、磁場がない場合に試料表面に形成されるスポットよりも50%未満大きなスポットを形成すること、及び／又は第1の方向についてはビーム強度が急激に下降し、第1の方向とは垂直な第2の方向についてはビーム強度がより緩やかに下降するようにビームを成形することが好ましい。さらに、構造をミリングする際に、急激に下降するビームの端を使用して鋭利な断面を形成することが好ましい。

【0053】

本発明の実施形態として、イオンビームを試料表面の一点に指向させる際に、試料の構造をミリングすることが好ましい。さらに、イオンビームの非点補正を修正することが好ましい。さらに、試料上において0.025テスラより大きい強さを有する磁場を生成するレンズを使用して、電子ビームを集束することが好ましい。さらに、磁場が存在する中で、イオンビームを試料表面の一点に指向させる際に、モノアイソトピックガリウムイオンのビームをカラム中部の偏向器に指向させることが好ましい。

【0054】

本発明の試料上の微細構造を処理及び観察するデュアルビームシステムの好ましい実施形態としては、試料に届く磁場を形成する磁気イマージョンレンズを含む電子ビームカラムと、イオンビームカラムとを備える。さらに、イオンビームカラムは、イオン源と、静電対物レンズと、イオンビームを静電対物レンズの中心に向けて偏向させることによって、イオンビームカラム内部に存在する磁場を補償するための第1偏向器と、磁気イマージョンレンズが作動していない場合の照射点と同じ位置にイオンビームを試料に照射するた

めに、磁場によって生じたイオンビームの変位量を補償するようにイオンビームを偏向させるための第2偏向器とを有することを含む。

【0055】

本発明の実施形態として、第1及び第2偏向器は、何れも静電偏向器を含むことが好ましい。第2偏向器は、平行電極板、四極子又は八極子を含むこと及び／又は静電対物レンズより前に又は後に設けられたことが好ましい。イオン源には、モノアイソトピックガリウム源が含まれることが好ましい。

【0056】

本発明の試料上の微細構造を処理及び観察するデュアルビームシステムの好ましい実施形態としては、試料に届く磁場を形成する磁気イマージョンレンズを含む電子ビームカラムと、イオンビームカラムと、を備え、イオンビームカラムは、静電対物レンズと、イオンビームを偏向させる一つ以上の偏向器と、を有し、偏向器には、偏向によって増大するイオンビームのスポットサイズの増加分が50%未満となるように、磁気イマージョンレンズの磁場を補償するための電圧が印加されることを含む。

10

【0057】

本発明の実施形態として、一つ以上の偏向器のうちの第1偏向器が、静電対物レンズの中心近くを通過するようにイオンビームを偏向させることによって、イオンビームカラム内部の磁場を補償し、一つ以上の偏向器のうちの第2偏向器が、イオンカラム外部の磁場を補償するように、イオンビームの照射点を調整することが好ましい。さらに、イオンビームカラムが、モノアイソトピックガリウム源を含むこと及び一つ以上の偏向器が、静電偏向器であることが好ましい。

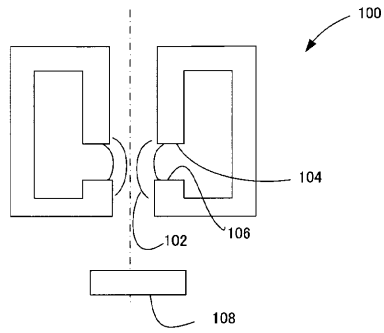
20

【0058】

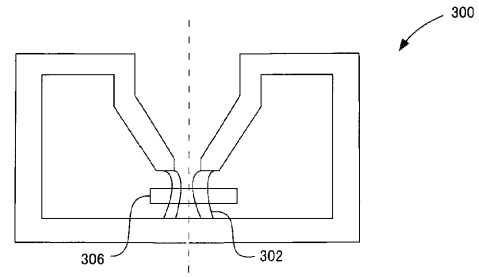
以上、本発明とその利点について詳細に説明したが、本明細書で述べた実施形態には、添付した特許請求の範囲に示された本発明の趣旨及び範囲から逸脱しない限り、様々な変更、置換及び修正を加えることができる。さらに、本発明の範囲は、本明細書に記載された特定の実施形態におけるプロセス、機構、製品、構成物、手段、方法及びステップに意図的に限定するものではない。当業者であれば、本発明、プロセス、機構、製品、構成物、手段、方法又はステップの開示によって、本明細書に記載された対応する実施形態と実質的に同一の機能を果たす、又は実質的に同一の結果を実現する既存の又は将来開発されるものが、本発明に従って利用できることを容易に理解できる。したがって、添付された特許請求の範囲は、上記のようなプロセス、機構、製品、構成物、手段、方法及びステップをその範囲に含むのである。

30

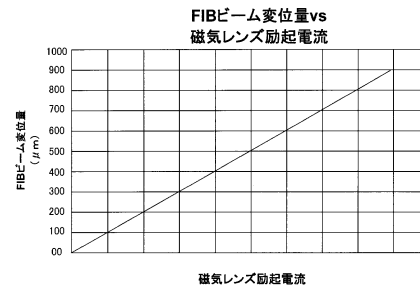
【図 1】



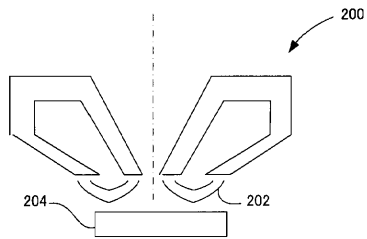
【図 3】



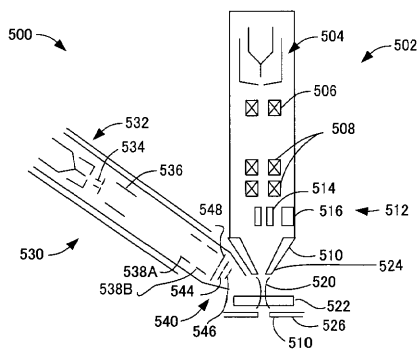
【図 4】



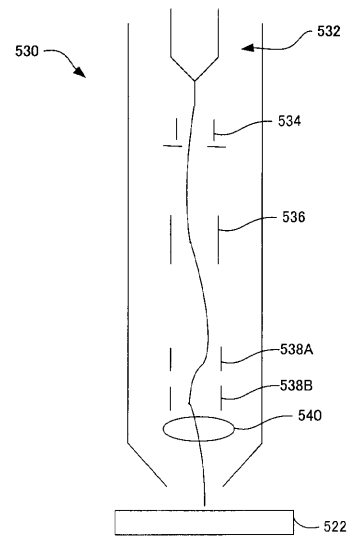
【図 2】



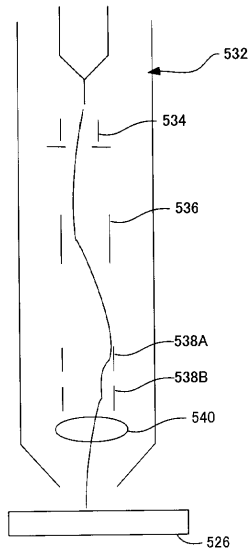
【図 5】



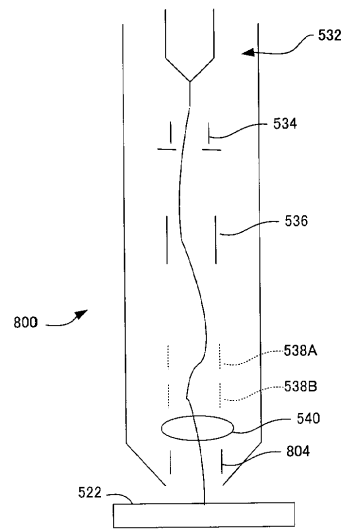
【図 6】



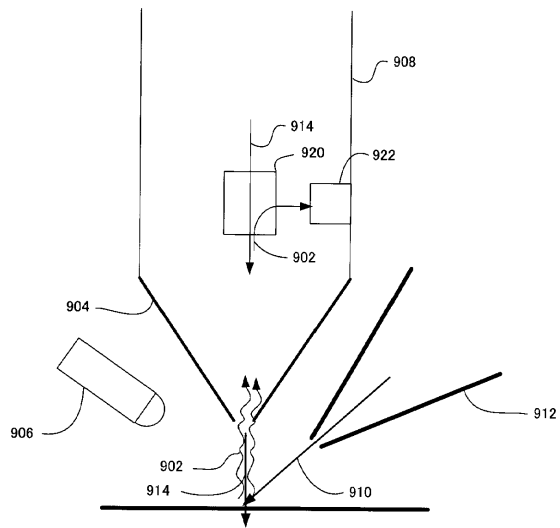
【図 7】



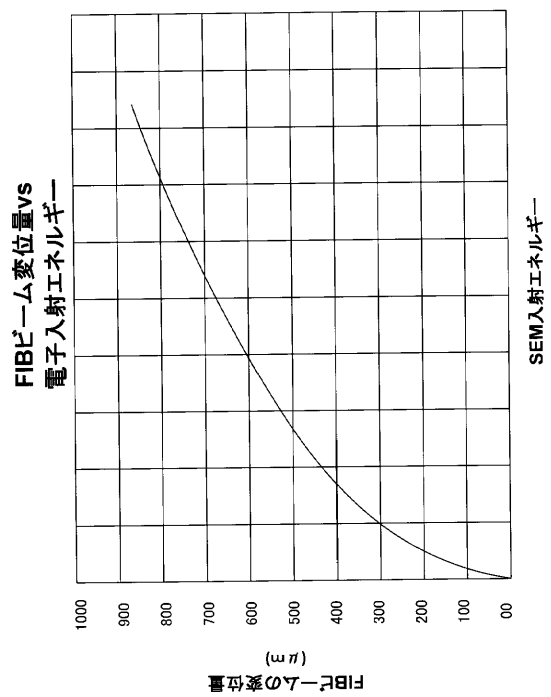
【図 8】



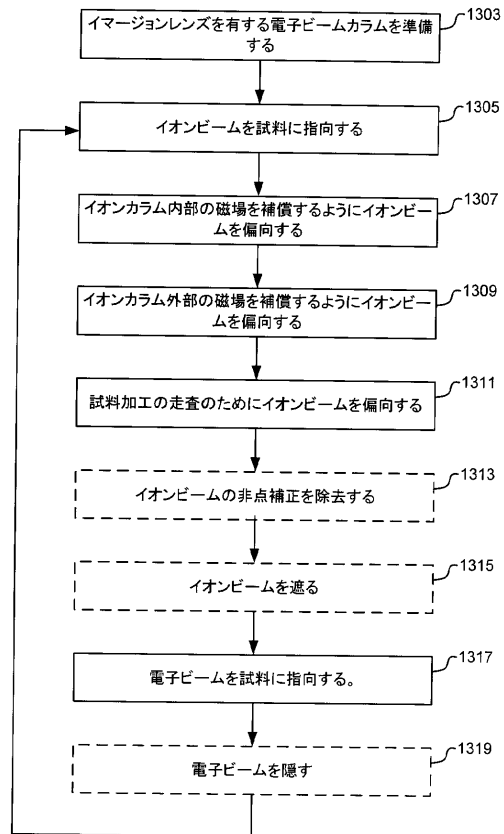
【図 9】



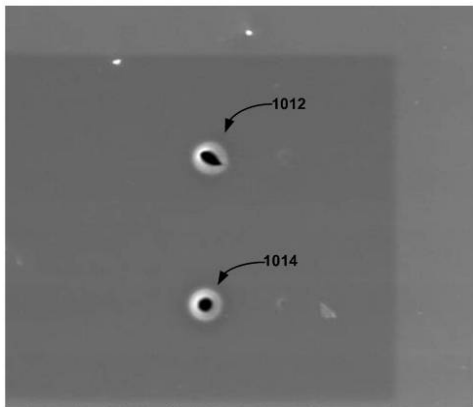
【図 12】



【図 13】

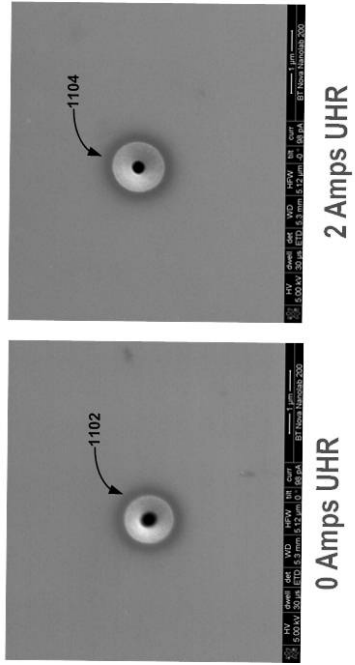


【図 10】



【図 11】

10秒間のイオンビーム照射で形成されたスポット
(ビーム電流96pA、ビームエネルギー30keV)



フロントページの続き

審査官 桐畑 幸▲廣▼

- (56)参考文献 特表2000-500265 (JP, A)
特開平07-230784 (JP, A)
特開2006-040809 (JP, A)
特開2007-287561 (JP, A)
特開昭64-038700 (JP, A)
特開平03-263746 (JP, A)
特開2006-128068 (JP, A)

- (58)調査した分野(Int.Cl., DB名)
H01J 37/317
H01J 37/28