

(19) 日本国特許庁(JP)

## (12) 特許公報(B2)

(11) 特許番号

特許第4810057号  
(P4810057)

(45) 発行日 平成23年11月9日(2011.11.9)

(24) 登録日 平成23年8月26日(2011.8.26)

(51) Int.Cl.	F 1
HO 1 J 37/12 (2006.01)	HO 1 J 37/12
HO 1 J 37/05 (2006.01)	HO 1 J 37/05
HO 1 J 37/244 (2006.01)	HO 1 J 37/244
HO 1 J 37/28 (2006.01)	HO 1 J 37/28
HO 1 J 37/317 (2006.01)	HO 1 J 37/317

請求項の数 36 (全 30 頁)

(21) 出願番号	特願2003-288887 (P2003-288887)
(22) 出願日	平成15年8月7日(2003.8.7)
(65) 公開番号	特開2004-71573 (P2004-71573A)
(43) 公開日	平成16年3月4日(2004.3.4)
審査請求日	平成18年8月7日(2006.8.7)
(31) 優先権主張番号	60/401,718
(32) 優先日	平成14年8月7日(2002.8.7)
(33) 優先権主張国	米国(US)

前置審査

(73) 特許権者	501419107 エフ・イー・アイ・カンパニー アメリカ合衆国オレゴン州97124, ヒ ルズバラ, ノースイースト・ドーソンクリ ーク・ドライブ5350
(74) 代理人	100090376 弁理士 山口 邦夫
(72) 発明者	ロバート・エル・ゲーラック アメリカ合衆国, オレゴン州 97229 , ポートランド, エヌ ダブリュー トゥ ーハンドレッドフォース ブレイス 56 43

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】集束イオンビームと走査型電子顕微鏡との同軸鏡筒を備えた装置並びに像形成及び処理方法

## (57) 【特許請求の範囲】

## 【請求項 1】

1 次電子ビームの発生源と、  
イオンビームの発生源を含み、光軸を有するイオン光学鏡筒と、  
前記 1 次電子ビームを偏向して、前記 1 次電子ビームが前記イオンビームと同軸となる  
ように前記イオン光学鏡筒の光軸に沿って前記 1 次電子ビームを試料片に向けて進行させ  
る偏向手段と、  
前記 1 次電子ビーム及び前記イオンビームを試料片上に集束する非ユニポテンシャルの  
静電最終レンズであって、上部レンズ素子と下部レンズ素子を有すると共に上部レンズ素  
子又は下部レンズ素子の電位の独立調整を可能にして前記最終レンズと前記試料片の間の  
ワーキングディスタンスを変更することなく前記両ビームのエネルギーを変更するもの  
を備えることを特徴とする装置。

## 【請求項 2】

前記非ユニポテンシャルの静電最終レンズは、  
少なくとも 3 つのレンズ素子を含み、  
当該少なくとも 3 つのレンズ素子は、相互に絶縁されると共に、その他のレンズ素子に  
印加される電圧とは独立した電圧を印加するための電気的接続手段を含む  
ことを特徴とする請求項 1 に記載の装置。

## 【請求項 3】

前記 1 次電子ビームの発生源は、

10

20

集束距離を変更せずに当該1次電子ビームの発生源をバイアスするための電気的接続手段を含む

ことを特徴とする請求項1に記載の装置。

**【請求項4】**

前記偏向手段は、

前記1次電子ビームを偏向するために磁場を用いる

ことを特徴とする請求項1に記載の装置。

**【請求項5】**

前記偏向手段は、

ウェーンフィルタ又は静電偏向器を備える

ことを特徴とする請求項1に記載の装置。

10

**【請求項6】**

前記非ユニポテンシャルの静電最終レンズは、

前記1次電子ビーム及びイオンビームの両方を集束可能にする程度の高い正電位に保持される高電圧素子を含む

ことを特徴とする請求項2に記載の装置。

**【請求項7】**

前記非ユニポテンシャルの静電最終レンズにおいて、

前記偏向手段に最も近く配置されたレンズ素子は、当該偏向手段と同電位に保持される

20

ことを特徴とする請求項6に記載の装置。

**【請求項8】**

前記非ユニポテンシャルの静電最終レンズにおいて、

前記偏向手段に最も近く配置されたレンズ素子は、+500V乃至+5,000Vの間の電位に保持される

ことを特徴とする請求項7に記載の装置。

**【請求項9】**

前記最終レンズにおいて、

前記試料片に最も近く配置されたレンズ素子は、当該試料片と同電位に保持される

ことを特徴とする請求項6に記載の装置。

30

**【請求項10】**

前記最終レンズにおいて、

前記試料片に最も近く配置されたレンズ素子は、グラウンド電位である

ことを特徴とする請求項9に記載の装置。

**【請求項11】**

前記試料片から放出される2次電子を検出する電子検出手段を更に備える

ことを特徴とする請求項1に記載の装置。

**【請求項12】**

前記電子検出手段は、

前記最終レンズと前記試料片との間に配置される

ことを特徴とする請求項11に記載の装置。

40

**【請求項13】**

前記電子検出手段は、

前記最終レンズを介して集められた電子を検出する

ことを特徴とする請求項11に記載の装置。

**【請求項14】**

前記偏向手段は、

前記最終レンズを介して集められた2次電子を、前記光軸から遠ざけ前記電子検出手段に向けて偏向する

ことを特徴とする請求項13に記載の装置。

**【請求項15】**

50

前記最終レンズの少なくとも一つのレンズ素子は、当該試料片に対して正にバイアスされ、

前記試料片から放出された2次電子は、当該試料片から当該最終レンズを通って進行する

ことを特徴とする請求項13に記載の装置。

**【請求項16】**

前記最終レンズは、

下部レンズ素子、中央レンズ素子及び上部レンズ素子を含む  
ことを特徴とする請求項2に記載の装置。

**【請求項17】**

前記下部レンズ素子は、前記試料片と同電圧で1,000V以内に保持され、

前記中央レンズ素子は、+15,000Vより高い電圧で保持され、

前記上部レンズ素子は、当該下部レンズ素子の電圧を超え且つ当該中央レンズ素子の電圧未満の電圧で保持される

ことを特徴とする請求項16に記載の装置。

**【請求項18】**

前記下部レンズ素子は、グラウンド電位で保持され、

前記中央レンズ素子は、+30,000Vを超える電圧で保持され、

前記上部レンズ素子は、約+500V乃至約+5,000Vの間で保持される  
ことを特徴とする請求項17に記載の装置。

**【請求項19】**

イオンビーム鏡筒と電子ビーム鏡筒とを含む装置であって、

1次電子ビームの発生源と、

イオンビームの発生源を含むイオン光学鏡筒であって、光軸を有する当該イオン光学鏡筒と、

試料片に衝突する電子ビーム又はイオンビームにより生成される2次粒子を検出する検出手段と、

前記1次電子ビームを偏向して、前記1次電子ビームが前記イオンビームと同軸となる  
ように前記イオン光学鏡筒の光軸に沿って前記1次電子ビームを試料片に向けて進行させると共に、前記二次粒子を前記検出手段に向かって偏向する偏向手段と、

前記1次電子ビーム及びイオンビームの両方を試料片上に集束すると共に、当該1次電子ビームの逆進方向に当該レンズを介して2次粒子を引き出す非ユニポテンシャルの静電最終レンズであって、上部レンズ素子と下部レンズ素子を有すると共に上部レンズ素子又は下部レンズ素子の電位の独立調整を可能にして前記最終レンズと前記試料片の間のワーキングディスタンスを変更することなく前記両ビームのエネルギーを変更するもの  
を備えることを特徴とする装置。

**【請求項20】**

前記偏向手段は、

前記1次電子ビームを偏向するために磁場を用いる

ことを特徴とする請求項19に記載の装置。

**【請求項21】**

前記非ユニポテンシャルの静電最終レンズは、少なくとも3つ以上の奇数のレンズ素子を含み、

その中心のレンズ素子は、前記1次電子ビーム及びイオンビームを同時に集束可能にする程度に高い正電位にある

ことを特徴とする請求項19に記載の装置。

**【請求項22】**

電子ビーム及びイオンビームを用いて試料片の像を形成すると共に当該試料片を処理する方法であって、

イオン光学鏡筒の光軸沿いに試料片へ向けて進行する複数のイオンを含む集束イオンビ

10

20

30

40

50

ームを生成する工程と、

前記イオン光学鏡筒の光軸とは異なる方向に進行する複数の電子を含む電子ビームを生成する工程と、

前記電子ビームを前記イオンビームと同軸となるように偏向する工程と、

前記電子ビーム及びイオンビームを、単数の最終レンズであって上部レンズ素子と下部レンズ素子を含む少なくとも3つのレンズ素子を有するものを用いて試料片上へ集束する工程と、

上部レンズ素子又は下部レンズ素子の電位の独立調整によって前記イオンビームと前記電子ビームのエネルギーを調整して、前記最終レンズと前記試料片の間のワーキングディスタンスを変更することなく前記イオンビームと前記電子ビームのエネルギーを変更する工程と、

集束された前記イオンビーム又は電子ビームの前記試料片への衝突時に生成される2次粒子を加速して前記光軸沿いに逆進させる工程と、

前記2次粒子を電子検出手段へ向けて偏向する工程と

を備えることを特徴とする像形成及び処理方法。

#### 【請求項23】

前記電子ビーム及びイオンビームを単数の最終レンズを用いて集束する工程は、非ユニポテンシャルレンズを用いて当該電子ビーム及びイオンビームを前記試料片上に集束する工程を含む

ことを特徴とする請求項22に記載の像形成及び処理方法。

10

#### 【請求項24】

前記試料片若しくは当該電子の発生源又は当該試料片及び電子の発生源の両方の電位の変更によって、ワーキングディスタンスの変化を伴わずに、前記電子ビームに含まれる前記複数の電子の衝突エネルギーを調整する工程

を更に備えることを特徴とする請求項23に記載の像形成及び処理方法。

20

#### 【請求項25】

前記電子ビーム及びイオンビームを非ユニポテンシャルレンズを用いて前記試料片上に集束する工程は、少なくとも3つのレンズ素子を有する非ユニポテンシャルレンズを用いて当該電子ビーム及びイオンビームを当該試料片上に集束する工程を含み、

前記電子の発生源に最も近くに配置されたレンズ素子は、当該電子の発生源と同電位に設定され、

30

前記試料片に最も近く配置されたレンズ素子は、当該試料片と同電位に設定される  
ことを特徴とする請求項24に記載の像形成及び処理方法。

#### 【請求項26】

前記非ユニポテンシャルレンズの下部レンズ素子の開口の大きさを変更することによって、前記電子ビームに含まれる電子の衝突エネルギーの範囲を調整する工程

を更に備えることを特徴とする請求項23に記載の像形成及び処理方法。

#### 【請求項27】

電子ビーム及びイオンビームを用いて試料片の像を形成すると共に当該試料片を処理する方法であって、

40

イオン光学鏡筒の光軸沿いに試料片に向けて進行する複数のイオンを含む集束イオンビームを生成する工程と、

前記イオン光学鏡筒の光軸とは異なる方向に進行する複数の電子を含む電子ビームを電子発生源より生成する工程と、

前記電子ビームを偏向して前記イオンビームと同軸にする工程と、

前記電子ビーム及びイオンビームを、単数の非ユニポテンシャルの最終レンズであって上部レンズ素子と下部レンズ素子を含む少なくとも3つのレンズ素子を有するものを用いて試料片上に集束する工程と

上部レンズ素子又は下部レンズ素子の電位の独立調整によって前記電子ビームと前記イオンビームのエネルギーを調整して前記最終レンズと前記試料片の間のワーキングディス

50

タンスを変更することなく前記電子ビームと前記イオンビームのエネルギーを変更する工程

を備えることを特徴とする像形成及び処理方法。

**【請求項 28】**

前記単数の非ユニポテンシャルの最終レンズを用いて前記電子ビーム及びイオンビームを試料片上に集束する工程は、高電圧素子を含む非ユニポテンシャルの最終レンズの焦点を合わせる工程を含み、更に、

前記試料片の電圧を変更し、

前記非ユニポテンシャルの最終レンズにおいて、前記試料片に最も近くに配置された下部レンズ素子の電圧を変更して当該下部レンズ素子を当該試料片と同電位にし、

前記高電圧素子の電圧を調整して前記電子ビームを集束する

ことにより前記電子ビームに含まれる複数の電子の衝突エネルギーを調整する工程を備えることを特徴とする請求項27に記載の像形成及び処理方法。

**【請求項 29】**

前記イオンビームのビームエネルギーを調整して当該イオンビームを集束する工程を更に備えることを特徴とする請求項28に記載の像形成及び処理方法。

**【請求項 30】**

前記単数の非ユニポテンシャルの最終レンズを用いて前記電子ビーム及びイオンビームを試料片上に集束する工程は、高電圧素子を含む非ユニポテンシャルの最終レンズの焦点を合わせる工程を含み、更に、

前記電子発生源の電圧を変更し、

前記非ユニポテンシャルの最終レンズにおいて、前記電子発生源に最も近くに配置された上部レンズ素子の電圧を変更し、

前記高電圧素子の電圧を調整して前記電子ビームを集束する

ことにより前記電子ビームに含まれる複数の電子の衝突エネルギーを調整する工程を備えることを特徴とする請求項27に記載の像形成及び処理方法。

**【請求項 31】**

前記イオンビームのビームエネルギーを調整する工程

を更に備えることを特徴とする請求項30に記載の像形成及び処理方法。

**【請求項 32】**

前記非ユニポテンシャルの最終レンズを介して2次電子を集める工程

を更に備えることを特徴とする請求項27に記載の像形成及び処理方法。

**【請求項 33】**

前記単数の非ユニポテンシャルの最終レンズを用いて前記電子ビーム及びイオンビームを試料片上に集束する工程は、高電圧素子を含む非ユニポテンシャルの最終レンズの焦点を合わせる工程を含み、

前記電子ビームを偏向して前記イオンビームと同軸にする工程は、当該電子ビームを磁気偏向器を用いて偏向する工程を含み、更に、

前記試料片に最も近く配置されたレンズ素子の電位を当該試料片と同電位に設定すると共に、前記磁気偏向器に最も近くに配置されたレンズ素子の電位を当該磁気偏向器と同電位に設定する工程

を備えることを特徴とする請求項27に記載の像形成及び処理方法。

**【請求項 34】**

前記試料片に最も近くに配置されたレンズ素子の電位を当該試料片と同電位に設定する工程は、当該試料片に最も近くに配置されたレンズ素子の電位をグラウンド電位に設定する工程を含む

ことを特徴とする請求項33に記載の像形成及び処理方法。

**【請求項 35】**

前記最終レンズの幾何学的形状を変更することにより前記電子の衝突エネルギーの可変範囲を変更する工程

10

20

30

40

50

を更に備えることを特徴とする請求項 27 に記載の像形成及び処理方法。

【請求項 36】

前記最終レンズの幾何学的形状を変更する工程は、前記下部レンズ素子の直径を変更する工程を含む

ことを特徴とする請求項 35 に記載の像形成及び処理方法。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、電子ビーム像形成及び荷電粒子ビームを用いた微視構造のマイクロマシニングに関する。 10

【背景技術】

【0002】

各種のナノ加工、リソグラフィ、試料作成、測定又は検査への集束イオンビーム（FIB）の適用においては、FIBによるミリング用のビームの極めて正確な、ナノメートル・スケールでの位置決めが要求される。このFIBビームを試料片の像形成に用いてミリング用のビームの照準を合わせると、敏感な領域が高エネルギーのイオンビームに曝されることにより試料が損傷される可能性がある。

【0003】

従来、FIB及び走査型電子顕微鏡（SEM）を含むデュアル・ビーム・システムが、 20 SEMにより試料像を結像（形成）すると共に、FIBを用いて試料をミリングするシステムとして導入されてきた。いくつかのデュアル・ビーム装置では、同時入射するFIBビームとSEMビームとを利用するが、これらのビームは、ビーム間に大きな角度を持って試料表面上に入射する。この試料は、各種のSEM操作及びFIBによるミリング操作を容易にするために、各ビーム軸に向けて又は各ビーム軸から遠ざけるように傾けられる可能性がある。別のタイプのデュアル・ビーム装置は、平行又はビーム間に角度をもって隣接するFIBビームとSEMビームとを使用し、両ビーム間を移動する試料台を備える。いずれの場合においても、試料台が不正確であること、試料が平坦でないこと、また、同時入射ビームの場合は、ビーム入射角が相違することから、SEM像に対するFIBビームの位置決め精度には限界がある。 30

【0004】

SEM像を使用してミリング用のFIBの照準を合わせることができるように、従来のデュアル・ビーム構造における位置決め精度の不正確性を排除して、高品質かつ非破壊にて結像するSEMに、FIBシステムのマイクロマシニング機能を組み込む方法が必要とされている。このようなFIBとSEMとの組合せから、例えば、コンピュータのハード・ディスク・ドライブ（HDD）等に使用される薄膜磁気ヘッドの製造を含むナノデバイスの量産における多数の工程が利益を得られる。「ナノデバイスの量産」とは、上述したように、製造、ナノ加工、リソグラフィ、試料作成、測定及び検査への適用を含む。

【0005】

コンピュータ業界は、ハード・ディスク及びテープ・ドライブに対して、より一層の大容量化及び高速度化を要求し続けているため、所定の記憶媒体上に記憶可能なデータ量を増大するように、生産者に対する要求が増え続けている。このデータ量は、面積密度と呼ばれ、一般に、記憶媒体の1平方インチあたりのデータのビット数で表される。 40

【0006】

典型的なハード・ディスクでは、データは、通常、ガラス又はアルミニウム合金で製造されたプラタと呼ばれる平円形の円盤上に記憶される。プラタは、両面を極めて薄い磁性材料の層で覆われ、磁気パターンの形成により情報を記憶するように設計される。このプラタの中心を開孔してスピンドル上に数枚のプラタを積み重ねることによって、複数のプラタがハード・ディスクのカバー内部に装着される。これら複数のプラタは、スピンドルに接続されたモータにより高速度で回転され得る。ヘッドと呼ばれる特殊な電磁読出し / 50

書き込み装置が、このディスク上に情報を記録し又はこのディスクから情報を読み出すために複数使用される。これら複数のヘッドは複数のスライダ上に搭載され、これらのスライダは複数のアーム上に夫々搭載される。全てのアームは、機械的に接続されて1つに組み立てられ、アクチュエータと呼ばれる装置によりディスク表面の上方に配置される。このようにして、読み出し／書き込みヘッドは、これら複数のプラタ表面の上方に正確に配置される。

#### 【0007】

これらの読み出し／書き込みヘッドは、電気信号を磁気信号に変換すると共に、磁気信号を再び電気信号に戻す。記憶されるデータの各ビットは、「0」及び「1」を磁束の反転パターンに変換する特殊な符号化方法を用いることによりハード・ディスク上に記録される。

10

#### 【0008】

このディスク上の各プラタの各表面は、数百億個もの個別ビットのデータを保持できる。これらのデータは、便宜上、より大きな複数の「塊」にまとめられて、より簡単かつ迅速に情報にアクセスできるようになされる。各プラタは、その表面及び裏面上に夫々1つずつ、計2つのヘッドを有しているため、3枚のプラタを備えたハード・ディスクは、通常、6枚の面と6個のヘッドを有している。各プラタは、トラックと呼ばれる複数の同心円に記録された状態で情報を保持している。各トラックは、セクタと呼ばれるより小さな複数の部分に更に分けられる。これらセクタの夫々は、512バイト(byte)の情報を保持する。

20

#### 【0009】

書き込みヘッドにおいて、実際にディスク上にデータを書き込む部分は、書き込み素子と呼ばれる。この素子は、一般に、ギャップにより分離された2つの磁極から構成される。これらの磁極は、これらの磁極に磁気的に結合されたコイルにより励起されると、磁場を生成する。この書き込み素子がディスクに近接すると、これらの磁極により生成された磁場が、ディスク上の所定の位置での帯磁方向を設定する。これによりデータがディスク上に書き込まれる。

#### 【0010】

ハード・ディスクの面積密度を決定する重要な要因のひとつは、トラック密度である。このトラック密度は、複数の同心円状のトラックがディスク上に如何に緻密に詰め込まれ得るかの尺度である。

30

#### 【0011】

トラック密度は、ディスク上で書き込みヘッドにより影響を受ける面積の大きさにより概ね決定される。大きなヘッド構造は、より小さなヘッド構造と比較して、プラタ表面上のより広い領域に影響を与える。従って、書き込み先端部で書き込みヘッドの磁極を物理的に小型化することによって、プラタ表面上のより狭い領域に磁場を集中できるので、トラック幅を削減できるからトラック密度を増大することができる。

#### 【0012】

現在使用されている書き込みヘッドの大部分は、薄膜ヘッドである。この薄膜ヘッドという名称は、その製造方法に由来する。薄膜ヘッドは、集積回路の製造方法と同様のフォトリソグラフィ・プロセスを用いて製造される。この製造プロセスにおいて、基板となるウエハは、特定のパターンで堆積された合金材料の極めて薄い膜からなる単数又は複数の層で覆われる。この基板上には、絶縁材料の層も交互に堆積される。これらの堆積層を所望の幾何学的形状を有する磁極先端部のアセンブリにするために、リソグラフィ技術が用いられる。

40

#### 【0013】

しかしながら、リソグラフィ技術のみを用いて製造され得る書き込みヘッドでは、小型化に限界がある。より小さな書き込みヘッドは、多くの場合、集束イオンビーム装置によるマイクロマシニングを必要とする。

#### 【0014】

50

FIBシステムは、超微細構造を高精度に像形成し、エッチングし、ミリングし、堆積し及び分析する能力によって、微視的領域の製造工程で広く使用されている。ガリウムの液体金属イオン源（L M I S）を用いたFIBシステムでのイオン光学鏡筒は、例えば、5乃至7ナノメートル（nm）の空間分解能を備えることができる。集束イオンビームは、スパッタ、即ち、原子及び分子を試料表面から物理的に除去することによりミリングする。FIBシステムは、その汎用性及び精度の故に、データ記憶媒体への情報の書き込みに用いられる薄膜磁気ヘッドの製造に利用される。

#### 【0015】

FIBシステムは、イオンの集束ビームを試料片表面の上方へ、通常、ラスタパターンで導くことにより動作する。このイオンは、通常、液体金属イオン源（L M I S）から引き出される。ここで引き出されたイオンは、一連のアーチャ（aperture）及び静電レンズによって、加速され、平行にされて、試料片上に集束される。このイオンは、巨大すぎて一般的な大きさの磁気レンズでは集束することが困難であるため、静電レンズが用いられる。なお、ガリウムイオンは電子の約128,000倍も重い。イオンビームを集束するために用いられる一般的な静電レンズは、AINツェルレンズ（einzel lens）である。AINツェルレンズとは、3つの電極又は素子を備えたユニポテンシャルレンズ（unipotential lens）である。通常、中央の素子は高い正電位であり、上部及び下部の素子はグラウンド電位に保持される。

#### 【0016】

FIBシステムが用いられるとき、先ず、イオンビームが、通常、試料の表面をラスタパターンでスキャンすると共に、この試料表面の像を形成するために2次電子がを集められる。この像は、ミリングされる特徴部分を識別するために用いられ得る。次に、イオンビームのスキャンパターンが、このミリングされる特徴部分と一致するように調整され、このイオンビームがこの試料表面をミリングするために使用される。多くの場合、ガス材料がイオンビームの衝突点に置かれた試料片に向けられ、イオンは、使用されるガス化合物に応じて、エッチレート又は堆積物のいずれか一方を選択的に増大させる化学反応を誘発する。残念なことに、薄膜ヘッドのトリミング及び他のナノ加工では、FIBによる像形成中に試料が損傷する可能性がある。試料の損傷を抑制するためにFIBによる結像時間を短縮すると、雑音に対する像信号の比率（S/N比）が、ミリングの正確な位置決めには不十分となってしまう可能性がある。一方、敏感な特定構造にFIBビームを向けることは、常に望ましくない可能性がある。

#### 【0017】

FIBによる像形成とは対照的に、走査型電子顕微鏡（SEM）に使用される低エネルギーの電子ビームは、試料片に与える損傷が少なく、照準（アライメント：alignment）精度に優れる。走査型電子顕微鏡においては、微細に集束された複数の電子からなるビームが、試料片の表面を横切って走査される。この電子ビームは電子発生源（electron source）により発生し、複数の電子が、通常、0.2kV乃至30kVの間の電圧により試料片に向けて加速される。このビームは、一般に、複数の電磁コンデンサレンズにより平行にされ、対物レンズにより集束され、電磁偏向コイルにより試料片の表面を横切るように走査される。この電子ビームに含まれる電子が試料片表面に衝突すると、2次電子が放射される。FIBシステムと同様に、この2次電子は集められて試料片表面の像形成に用いられる。このとき、像上の各点の輝度は、1次電子ビームが衝突入射している間に放出された2次電子の数により決定される。SEMの微細に集束された電子ビームによれば、最も優れた光学顕微鏡よりも高倍率及び高分解能の像を形成できる。

#### 【0018】

電子は、静電力又は磁力のいずれか一方により集束されるので、静電レンズと磁気レンズとの両方がSEMに設置され得る。静電レンズは、一般に、磁気レンズよりも、特に高いビーム電圧に対して、収差が大きいので、あまり使用されない。

#### 【0019】

イオンビームによる像形成とは異なって、SEMによる像形成は、通常、試料片表面を

10

20

30

40

50

著しく損傷することがない。衝突入射粒子と基板粒子との間で衝突中に移転される運動量の量は、この衝突入射粒子の運動量のみに依存するのではなく、これら2つの粒子の相対質量にも依存する。これら2つの粒子が同質量である場合に、最大の運動量が移転する。衝突入射粒子の質量と基板粒子の質量とが一致しない場合、この衝突入射粒子の運動量の一部が基板粒子に移転される。集束イオンビームによるミリングに用いられるガリウムイオンの質量は、電子の質量の128,000倍である。従って、ガリウムイオンビームに含まれる粒子の運動量は、試料片表面から分子を叩き出すのに充分である。しかしながら、典型的なSEMの電子ビームに含まれる電子の運動量は、運動量の移転により表面から分子を除去するのに充分ではない。

## 【0020】

10

SEMのビームは、通常、イオンビームより格段に破壊力が低いが、ある種の集積回路のような特定の試料片は、高エネルギーの電子ビームにより損傷を受け易い。このため、この種の試料片の観察に電子ビームを使用する場合、特に比較的低い電圧領域において、電子の衝突エネルギーの可変性は重要である。

## 【0021】

現在使用可能なFIBとSEMとの複合システムは、イオンビーム及び電子ビームのために別個の鏡筒を使用しており、これら2つのビームの軸間には、一般に、約52°の角度がある。各システムの最終レンズと試料片との間の距離における軽微な違いが、2つのビームの相対的位置に影響を及ぼすため、これらのビームの切換時には、常に照準がずれる。試料に対する角度が夫々異なる2つの鏡筒を有するため、FIBからSEMへ又はSEMからFIBへと操作変更するために、試料は頻繁に傾斜されねばならない。試料の位置ずれは、試料台の傾斜中に必然的に発生する。この後に続く高精度のマイクロマシンニング等の全てのプロセスにおいて、ビームの位置決め精度は低下してしまう。この試料の位置ずれに関する問題が克服されたとしても、ビームは2方向から入射するので、電子ビームにより得られる像とイオンビームにより得られる像は依然として相違する。しかも、検出器が側方にある場合、像に影となる部分ができるシャドーイングが発生する結果となり望ましくない。

20

## 【0022】

30

FIBとSEMとの複合装置が薄膜磁気ヘッドのようなナノデバイスの量産に最適となるために、両ビームは、同軸状態で試料片の上方から入射することが望ましい。これによつて、試料片の最終レンズからの距離における軽微な変動は、同じ試料片上の2つのビームの相対的位置に影響しなくなる。高精度が要求されているため、試料片及び粒子ビーム発生源の両方に関して、如何なる位置ずれも回避されねばならない。

## 【0023】

同軸鏡筒のFIBとSEMとの複合システムが文献に記載されているが、現存する全てのシステムは、設計に問題があるため、高精度での利用価値又は大量生産への適用に限界がある。

## 【0024】

40

単鏡筒のFIB及び電子ビームのシステムが、「複合型荷電粒子装置」に対してTamuraに付与された米国特許第4,740,698号に記載されている。しかしながら、このシステムでは、分離されたイオン源と電子発生源とが、イオンビームと電子ビームとを切り換えるために設置された切換装置上に搭載されている。この切換に伴うイオン源又は電子発生源の位置ずれも、FIB像と電子ビーム像との間での相対的なずれを発生させる（特許文献1参照）。

## 【0025】

別の単鏡筒のFIB/電子ビーム装置が、澤良木による特開昭63-236251号公報「電子ビーム/イオンビーム複合装置」に記載されている。しかしながら、このシステムでは、分離された静電レンズがイオンビームを集束するために使用される一方で、電磁レンズが電子ビームを集束するために使用されている。電子ビームの使用時に、電子ビームを集束するために使用される電磁レンズが稼動されるが、静電レンズは停止される。イ

50

オンビームが使用される以前に、電子ビームが遮断されると共に、電磁レンズが停止される。そして、イオンビーム及び静電レンズが稼動される。従って、これらのビームを同時に操作することができない。レンズの稼動時には、このレンズを安定させるために所定時間をするため、このようなシステムは、高スループットの製造環境には不適である。また、磁気レンズが有するヒステリシス効果は、レンズ停止後におけるビームの位置決め精度を阻害する（特許文献2参照）。

#### 【0026】

別の単鏡筒FIB / 電子ビーム装置が、澤良木による特開平02-121252号公報「荷電粒子ビーム複合装置」（以下、「澤良木II」と記載）に記載されている。このシステムは、電子ビーム及びイオンビームを夫々集束するために、磁気レンズと静電レンズとを一列に組み合わせて使用している。このシステムによれば、両ビームの同時使用が可能ではあるものの、複数のレンズの一列での使用は集束距離の増大をもたらし、この集束距離の増大は、通常、FIBシステムの分解能を低下させる。この澤良木IIの特許も、ビームを配置するためにレンズ後方の偏向器を使用している。これによっても集束距離が増大すると共に、レンズ透過型の2次電子検出を適用する場合に、2次電子収集効率及び精度が制限される（この点については以下に詳述する）。従って、澤良木IIの特許の設計は、先端的な薄膜ヘッドのトリミング及び他のナノ加工への適用に要求される分解能を提供できない。また、複合レンズシステムは、必然的に、単レンズシステムよりも物理的に大きくなる。多くのシステムはクリーンルーム内に設置され、このクリーンルームでの空間は極めて高コストであるため、より小さなシステムが望ましい。更にまた、澤良木IIの特許で使用された複合レンズシステムは、単レンズシステムよりも複雑である。このため、このシステムの信頼性は低下しがちであり、大量生産に適しているとはいえない（特許文献3参照）。

#### 【0027】

また、別の単鏡筒のFIB / 電子ビーム装置が、Cleaverらにより「電子及びイオンビーム複合露光装置」（以下、「Cleaver」と記載）として、米国真空学会誌B（J.Vac.Sci.Technol）に記載されている。しかしながら、Cleaverで説明されたシステムは、イオンビーム及び電子ビームの両方を集束するために、ユニポテンシャルの静電レンズであるAINツェルレンズを使用している。このため、電子ビームエネルギーに対するイオンビームエネルギーの比は、これらのビームが集束される最終レンズからの距離により決定される。よって、どちらか一方のビームエネルギーを変更すると、そのビームのための新たな焦点へ試料片を移動させる必要が生じる。このCleaverのシステムは、異なる処理のためにビーム電圧を素早く調整する可変性（フレキシビリティ：flexibility）を備えていない。例えば、半導体への適用において、ユーザは、チャージングによる表面損傷を回避するために、低ビーム電圧のSEMを好む。また、ビーム電圧の調整は、AINツェルレンズの中央素子の電圧変更を必要とする。最終レンズにおける電圧の大きな変更は、約1秒間を要する可能性があるが、この1秒間という時間は、量産プロセスにおいては、かなり長い時間である（非特許文献1参照）。

#### 【0028】

【特許文献1】米国特許第4,740,698号明細書

40

【特許文献2】特開昭63-236251号公報

【特許文献3】特開平02-121252号公報

【特許文献4】米国特許出願番号第09/780,876号

【特許文献5】米国特許第6,218,664号明細書

【非特許文献1】Cleaver et al, "A Combined Electron and Ion Beam Lithography System", Journal of Vacuum Science Technology:B, 144(1985)

#### 【発明の開示】

#### 【発明が解決しようとする課題】

#### 【0029】

上述したように、ナノデバイスの高精度な量産のために、単鏡筒のFIBとSEMとの

50

複合システムが、未だに必要とされている。

【0030】

従って、本発明の目的は、FIBシステムのマイクロマシニング機能と、SEMの非破壊かつ高品質の像形成機能とを複合して、ナノデバイスの高精度な量産に適した1台の装置とすることにある。

【課題を解決するための手段】

【0031】

本発明に係る第1の装置は、1次電子ビームの発生源と、イオンビームの発生源を含み、光軸を有するイオン光学鏡筒と、この1次電子ビームを偏向してイオン光学鏡筒の略光軸沿いに試料片に向けて進行させる偏向手段と、これら1次電子ビーム及びイオンビームを試料片上に集束する非ユニポテンシャルの静電最終レンズとを備えることを特徴とするものである。

【0032】

本発明に係る第1の装置によれば、イオンビームの発生源からイオンビームが生成され、イオン光学鏡筒の光軸沿いに試料片に向けて進行する。一方、1次電子ビームの発生源により1次電子ビームが生成される。この1次電子ビームが、偏向手段により偏向されてイオン光学鏡筒の略光軸沿いに試料片に向けて進行する。これらイオンビーム及び1次電子ビームが、非ユニポテンシャルの静電最終レンズにより試料片上に集束される。よって、磁場に依存することのない静電最終レンズによって、2つのビームを同時に試料片上に集束できる。

【0033】

本発明に係る第2の装置は、イオンビーム鏡筒と電子ビーム鏡筒とを含む装置であって、1次電子ビームの発生源と、イオンビームの発生源を含むイオン光学鏡筒であって、光軸を有するイオン光学鏡筒と、試料片に衝突する電子ビーム又はイオンビームにより生成される2次粒子を検出する検出手段と、この1次電子ビームを偏向してイオン光学鏡筒の略光軸沿いに試料片に向けて進行させると共に、2次粒子を検出手段へ向けて偏向する偏向手段と、この1次電子ビーム及びイオンビームの両方を試料片上に集束すると共に、この1次電子ビームの逆進方向にこのレンズを介して2次粒子を引き出す非ユニポテンシャルの静電最終レンズとを備えることを特徴とするものである。

【0034】

本発明に係る第2の装置によれば、イオンビームの発生源からイオンビームが生成され、イオン光学鏡筒の光軸沿いに試料片に向けて進行する。一方、1次電子ビームの発生源により1次電子ビームが生成される。この1次電子ビームが、偏向手段により偏向されてイオン光学鏡筒の略光軸沿いに試料片に向けて進行する。これらイオンビーム及び1次電子ビームが、非ユニポテンシャルの静電最終レンズにより試料片上に集束される。ここで集束されて試料片に衝突する電子ビーム又はイオンビームにより生成された2次粒子が、最終レンズにより1次電子ビームの逆進方向に引き出され、偏向手段により検出手段に向けて偏向され、検出手段により検出される。よって、2つのビームを最終レンズにより同時に試料片上に集束できると共に、2次粒子のレンズ透過型検出を実現することができる。

【0035】

本発明に係る第1の像形成及び処理方法は、電子ビーム及びイオンビームを用いて試料片の像を形成すると共にこの試料片を処理する方法であって、イオン光学鏡筒の光軸沿いに試料片に向けて進行する複数のイオンを含む集束イオンビームを生成する工程と、このイオン光学鏡筒の光軸とは異なる方向に進行する複数の電子を含む電子ビームを生成する工程と、この電子ビームをイオンビームと略同軸となるように偏向する工程と、これら電子ビーム及びイオンビームを、単数の最終レンズを用いて試料片上へ集束する工程と、ここに集束されたイオンビーム又は電子ビームの試料片への衝突時に生成される2次粒子を光軸沿いに逆進させるように加速する工程と、この2次粒子を電子検出手段へ向けて偏向する工程とを備えることを特徴とするものである。

10

20

30

40

50

**【 0 0 3 6 】**

本発明に係る第1の像形成及び処理方法によれば、2つのビームを最終レンズにより同時に試料片上に集束できると共に、2次粒子のレンズ透過型検出を実現することができる。

**【 0 0 3 7 】**

本発明に係る第2の像形成及び処理方法は、電子ビーム及びイオンビームを用いて試料片の像を形成すると共に当該試料片を処理する方法であって、イオン光学鏡筒の光軸沿いに試料片に向けて進行する複数のイオンを含む集束イオンビームを生成する工程と、このイオン光学鏡筒の光軸とは異なる方向に進行する複数の電子を含む電子ビームを電子発生源より生成する工程と、この電子ビームをイオンビームと略同軸となるように偏向する工程と、これら電子ビーム及びイオンビームを、単数の非ユニポテンシャルの最終レンズを用いて試料片上に集束する工程とを備えることを特徴とするものである。10

**【 0 0 3 8 】**

本発明に係る第2の像形成及び処理方法によれば、2つのビームを最終レンズにより同時に試料片上に集束できるので、電子ビームによる試料片の像観察と、イオンビームによる試料片の処理とを同時に実施できる。

**【発明の効果】****【 0 0 3 9 】**

本発明に係る第1の装置並びに第2の像形成及び処理方法によれば、イオンビームと、偏向されてイオン光学鏡筒の略光軸沿いに試料片に向けて進行する1次電子ビームとを単数の非ユニポテンシャルの最終レンズにより試料片上に集束するので、電子ビームによる試料片の像観察とイオンビームによる試料片の処理とを同時に実施できる。従って、ビームの切換に伴う最終レンズの電位変更の必要がなくなるので、この最終レンズの電位変更に起因したビームの焦点位置の変動を排除できる。このため、電子ビーム及びイオンビームの照準精度を向上することができると共に、スループットも向上することができる。20

**【 0 0 4 0 】**

本発明に係る第2の装置並びに第1の像形成及び処理方法によれば、最終レンズにより試料片上に集束された1次電子ビーム又はイオンビームの試料片への衝突時に生成される2次粒子を最終レンズにより光軸沿いに逆進させて電子検出手段へ向けて偏向するので、2つのビームを最終レンズにより同時に試料片上に集束できると共に、2次粒子のレンズ透過型検出を実現することができる。従って、試料片を最終レンズの近くに置くことができるので、ワーキングディスタンスを短縮できる。よって、電子ビームによる解像度及びイオンビームの分解能を向上することができる。30

**【発明を実施するための最良の形態】****【 0 0 4 1 】**

本願明細書に記載され及び請求される本発明を実施するための最良の形態は、静電最終レンズを共有すると共に、両ビームが試料片に向けて進むときに共軸を有するFIBとSEMとの複合部を備える。

**【 0 0 4 2 】**

上記は、以下の本発明の詳細な説明をより深く理解できるように、本発明の特徴及び技術的利点について、むしろ大まかに、その概要を記載したものである。本発明の更なる特徴及び利点は以下に説明される。ここで開示される概念及び具体的な実施形態は、本発明と同じ目的を達成するために他の構造を改良又は設計するための土台として即座に利用可能であることを、当業者であれば理解できる。また、このような同等構成は、添付の特許請求の範囲に示す本発明の精神及び範囲から逸脱しないことを、当業者であれば理解できる。40

**【 0 0 4 3 】**

以下に説明する実施形態では、最終レンズを共有すると共に、試料片に向けて進行するように略同軸となされた2つのビームを有するFIB - SEM装置のための数種類の異なる設計目標を達成している。FIBミリング(milling)のSEM照準は充分正確なので50

、各種のナノデバイスの製造、改良、試料作成又は測定のような処理（プロセス）が可能であり、また、FIB像に起因する試料損傷を回避できる。2次電子のレンズ透過型検査を任意選択とすることによって、試料を最終レンズの近くに置くことができるので、ワーキングディスタンス（working distance）を短縮して性能を向上することができる。

#### 【0044】

ビームの切換時に最終レンズの高電圧を調整する必要がないので、スループットが向上する。改良、試料作成及び測定を含む大量生産では、必要なマイクロマシニングを極めて迅速に終了することが要求される。最終レンズでの電圧の大きな変更は、約1秒間も要する可能性がある。この1秒間という時間は、量産工程ではかなり長い時間である。従って、SEMからFIBへの操作切換時に大きな電圧変更を必要としない単鏡筒FIB-SEMが望ましい。10

#### 【0045】

本発明においては、磁場に依存しない静電レンズが、レンズを物理的に交換し又は最終レンズの電圧を変更することもなく両ビームを同時に集束する。正にバイアスされた最終レンズは、電子に対しては加速レンズとして、また、イオンに対しては減速レンズとして機能することによって、高エネルギーのイオンビームと比較的低エネルギーの電子ビームとの両方を集束する。静電レンズは、減速モードにおいて、より強力に焦点を結ぶので、正にバイアスされたレンズの集束力は、正電荷の1次イオンビームに対してよりも、負電荷の1次電子ビームに対して弱くなるため、高エネルギーのイオンビームと比較的低エネルギーの電子ビームと同じレンズで集束できる。比較的低エネルギーの電子ビームは、20高エネルギーのビームが試料片を損傷する可能性のある集積回路の製造工程のような多くの工程で利用価値がある。

#### 【0046】

また、イオンビームのエネルギーと電子ビームのエネルギーとを、ワーキングディスタンス、即ち、最終レンズから試料片までの距離を変えずに独立して調整することができる。従来技術によるユニポテンシャルの静電レンズにおいては、ビームエネルギーの比は、ユニポテンシャルの最終レンズの幾何学的形状及びワーキングディスタンスにより固定されていた。いずれかのビームエネルギーの変更は、高電圧の中央レンズ素子の電位を著しく変更する必要があり、焦点が変動していた。このため、ワーキングディスタンスを変更すること、即ち、レンズからの距離を違えて試料を置くことが必要であった。また、この高電圧を著しく変える場合、変更後の高電圧を安定化するための時間が必要であった。30

#### 【0047】

本発明の出願人は、最終レンズの上部レンズ素子又は下部レンズ素子の電位の独立調整を可能とすることによって、ワーキングディスタンスを著しく変えることなくビームのエネルギー、特に電子ビームのエネルギーを変更できる可変性を提供する。FIBのイオン銃のレンズ及び電子ビームの最終レンズとして複数の非ユニポテンシャルのレンズが使用されてきたが、出願人は、イオンビーム鏡筒の最終レンズとして非ユニポテンシャルのレンズを使用することを知らなかった。

#### 【0048】

本発明によれば、イオンビームへの影響を最小限に抑えて、電子ビームのエネルギーを変更できる。本発明によれば、電子銃と試料片との間の電位差の変更によって、特に比較的低電圧の領域、例えば、約200V乃至約3,000Vで電子ビームのエネルギーを変更する可変性を備えることができる。40

#### 【0049】

電子ビームの光路に配置された複数の素子は、最終レンズの高電圧素子より下方の第1グループと、この最終レンズの高電圧素子より上方の第2グループとに分けられる。この第1グループは、最終レンズの下部レンズ素子と試料片とを含む。第2グループは、最終レンズの上部レンズ素子と、静電ビーム制御電極と、電子ビーム偏向器と、電子銃とを含む。ここで「電子銃の電位」とは、電子が電子銃を離れる際に最後となる素子の電位を意味する。電子銃の内部にある複数の素子は、電子を引き出して加速するために、電子銃の50

電位とは異なる電位となっている。これによって、電子が電子銃を離れるときに、この電子に運動エネルギーを与えることができる。各グループ内では、複数の素子の電位は略同じである。即ち、下部レンズ素子及び試料片は、概ね第1の電位で保持され、上部レンズ素子、静電ビーム制御電極、電子ビーム偏向器及び電子銃は、概ね第2の電位で保持される。

#### 【0050】

電子銃を離れる電子の運動エネルギーと、第1の電位と第2の電位との差とが、1次電子ビームに含まれる電子の衝突エネルギーを決定する。いくつかの実施形態においては、第1の電位は略グラウンド電位であり、電子ビームのエネルギーは、第2の電位の変更により変えられる。他の実施形態においては、第2の電位が略グラウンド電位であって、電子ビームのエネルギーは、第1の電位の変更により変えられる。これら2つの実施形態は、ビームエネルギーに関して等価であるが、これらの実施形態のいずれか一方が、特定の処理（アプリケーション）に対する実施を容易とする可能性がある。10

#### 【0051】

最終レンズの素子の、例えば口径のような、幾何学的形状を変えることによって、到達可能な電子エネルギーの範囲は変更可能である。例えば、後述するように、中央レンズ素子を40,000eVとした場合、2mm口径の下部レンズ素子を用いたときは、1,000eV乃至4,100eVの範囲を超える電子ビームエネルギーにおいて、また、3mm口径の下部レンズ素子を用いたときは、250eV乃至3,000eVの範囲を超える電子ビームの衝突エネルギーにおいて、試料片及び最終レンズ素子の電圧を変えることにより、集束イオンビームのエネルギーを略一定に保ちながら、直径10nm未満の電子ビームを生成できる。20

#### 【0052】

本発明により提供される電子の衝突エネルギーにおける可変性は、ある種の集積回路のような高エネルギーの電子ビームにより容易に損傷される試料片を電子ビームを用いて観察するために重要である。本発明によれば、試料片に対する損傷の可能性が抑制されて適度の分解能が得られるビーム電圧を選択することができる。

#### 【0053】

両方のビームは同時に動作し得るが、電子ビームにより生成された2次電子からの信号を、イオンビームにより生成された2次電子からの信号より分離することは困難であることもある。適切なエネルギーフィルタにより混成信号の一部を除去できるが、全部ではない。同時稼動の場合、イオンビームと電子ビームとは、反対方向に走査される。また、本発明によれば、電子ビームとイオンビームとを極めて急速に切り換えて、連続して動作させることもできる。30

#### 【0054】

本発明によれば、従来技術によるシステムと比較して、FIB-SEM複合部を相対的に小さくできる。多くのシステムはクリーンルーム内に設置され、クリーンルームのコストが極めて高いため、より小さなシステムが望ましい。また、より小さなシステムは、より廉価に製造できる。静電レンズと磁気レンズとの組合せの代わりに静電レンズを用いることによって、システムの構成を簡素化できると共に、信頼性を向上することができる。40

#### 【0055】

図1は、最終レンズを介して中和電子を供給すると共に、この最終レンズを介して2次電子を集めることもできるFIB鏡筒を示す略式断面図である。このシステムは、Gershlarにより「集束イオンビームのための2次粒子のレンズ透過収集」として、米国特許出願番号第09/780,876号で詳細に説明されており、これを引用により具体的に、ここに組み入れたものである（特許文献4参照）。図1は、イオン光学鏡筒104のイオンビーム用の最終レンズ102を介して中和電子を導くことにより電荷中和を提供するシステム100を示す。最終レンズ102は3つの素子を含み、下部レンズ素子106は、好ましくは、試料片と同電位（略グラウンド電位）に保持され、中央レンズ素子108は、好ましくは、約+20,000Vに保持され、上部レンズ素子110は、好まし50

くは、約 + 500 V 乃至 + 5,000 V の間に、最も好適には、約 + 2,000 V に保持される。静電偏向器 112 は、好ましくは、上部レンズ素子 110 と同電位に保持され、約 + 2,000 V が最適である。

#### 【0056】

電子フラッド銃 (electron flood gun) 120 のような中和電子 118 の発生源が、2 次電子検出器 128 と対向して設置される。電子フラッド銃 120 からの中和電子 118 は、磁気偏向器 134 によって、1 次イオンビーム軸 138 に向かった後に試料片 142 に向けて下方へ偏向される。この磁気偏向器 134 又はこの磁気偏向器 134 内部の静電シールドは、およそ + 2,000 V の電位に保持され、試料片 142 は、略グラウンド電位に保持されることが好ましい。磁気偏向器 134 の代わりに、静電偏向器又はウィーンフィルタ (Wien filter) を使用することもできる。10

#### 【0057】

1 次イオンビームに含まれるイオン及び中和電子の衝突は、どちらも 2 次電子を放出させる。1 次イオンビームに含まれるイオンの試料片 142 上への衝突により放出された 2 次電子をイオンビーム起因 2 次電子 146 と呼び、中和電子の試料片 142 上への衝突により放出された 2 次電子を中和電子起因 2 次電子 148 と呼ぶ。

#### 【0058】

電子フラッド銃 120 内の電子発生源 (electron source) と試料片 142 との間の電位差が、この試料片 142 に到達する中和電子 118 が持つエネルギーを決定する。例えば、試料片 142 に対して - 10 乃至 - 500 V で保持された電子フラッド銃の電子発生源から生成される中和電子は、グラウンド電位である試料片 142 の表面と衝突するとき、- 10 乃至 - 500 V に相当するエネルギーを持っている。そして、この中和電子は、僅か 10 乃至 500 eV の最大エネルギーを持つ 2 次電子を生成し得る。20

#### 【0059】

中和電子起因 2 次電子 148 は、イオンビーム起因 2 次電子 146 と共に、鏡筒 104 の上方へ逆進して戻ってくる。この中和電子起因 2 次電子 148 は、検出前にイオンビーム起因 2 次電子 146 から分離されない場合、結像を阻害する。鏡筒を上方へ進行する 2 次電子 146, 148 は、磁気偏向器 134 により 2 次電子検出器 128 へ向けて曲げられる。妨害電界フィルタ (retarding field filter) 150 のような電子エネルギーに対するハイパスフィルタが、中和電子起因 2 次電子 148 を除去するために、2 次電子検出器 128 の前に設置される。30

#### 【0060】

図 2 は、集束イオンビーム 238 と集束電子ビーム 218 とを含むシステム 200 の略式断面図である。電子ビーム 218 及びイオンビーム 238 は、これらが試料片に向けて進むときに同軸となっている。図 2 のシステムは、最終レンズを介して 2 次電子を集めることもできる。ショットキー (Schottky) 電子銃のような電子銃 220 が、2 次電子検出器 228 と対向して設置され、電子ビームを供給する。電子銃 220 は電気的接続手段を含むので、電子銃 220 内での相対電圧を変えることも、集束距離を変えることもなく、その電圧を「フロート状態 (floated)」にできる。電子銃 220 は、約 - 2,000 V の電位で保持されることが好ましい。40

#### 【0061】

電子銃 220 からの電子ビーム 218 は、1 次イオンビーム軸 238 へ向けて、続いて磁気偏向器 234 により試料片 242 へ向けて下方へ偏向される。この試料片 242 は、好ましくは、略グラウンド電位に保持される。電子銃 220 は、磁気偏向器 234 の中心で焦点を結ぶことが望ましい。主に、ガリウムイオンと電子との間ににおける質量及びエネルギーの相違のために、以下に詳述するように、磁気偏向器 234 は、FIB ビーム 238 に対して、ほとんど影響を与えない。静電偏向器又はウィーンフィルタを磁気偏向器 234 の代わりに使用することもできる。しかし、静電偏向器は、レンズを介して集めた 2 次電子の分離と 1 次電子の偏向とを同時に実施できず、ウィーンフィルタは、本来の電子ビーム軸とイオンビーム軸との間に、より浅い角度を必要とする。50

## 【0062】

最終レンズ202は、試料片と同電位に保持された下部レンズ素子206、中央の高電圧レンズ素子208及び上部レンズ素子210の3つの素子を含むことが望ましい。この上部レンズ素子210は、下記に詳述するように、この上方に配置された光学部品と同電位に保持される。各レンズ素子は相互に絶縁されると共に、電気的接続手段を夫々含んでいるため、各レンズ素子に異なる電圧を印加することができる。更に複数のレンズ素子を追加して使用することも可能であって、例えば、高電圧素子の下方に追加の素子を設置したり、別の正電位の素子を追加したりできる。

## 【0063】

上述したように、下部レンズ素子206は、試料片242と若干相違するかも知れないが略同電位に保持され、中央レンズ素子208は、通常、高電圧に保持される。上部レンズ素子210、静電偏向器212及び磁気偏向器234は、全て略同電位に保持されることが好ましい。一実施形態においては、下部レンズ素子206及び試料片242は、略グラウンド電位に保持され、中央レンズ素子208は、望ましくは、約5,000V乃至約50,000Vの間に保持され、より望ましくは約40,000Vが好適であり、上部レンズ素子210、静電偏向器212及び磁気偏向器234は、電子銃の電位と同電位で、約+100V乃至約+5,000Vの間に保持されることが好ましく、より望ましくは約+2,000Vが最適である。

10

## 【0064】

他の実施形態においては、試料片242及び下部レンズ素子206は、約-100V乃至約-5,000Vの間に保持され、より望ましくは、約-2,000Vが最適であり、上部レンズ素子210、静電偏向器212、磁気偏向器234及び電子銃220は、略グラウンド電位に保持される。試料片242及び下部レンズ素子206をグラウンド電位以外の電位で保持する場合、ガス注入器のように、試料片242の近傍に設置された他のハードウェア（金属部分）を同電位にバイアスする必要がある。試料片242をグラウンド電位に保持すると近傍の他部材をバイアスする必要がなくなるが、鏡筒の上部素子に対する電気的バイアスを保持する必要がある。いずれの素子をバイアスするかは鏡筒の設計者が選択できる。

20

## 【0065】

電子銃220内の電子発生源221を離れる電子の運動エネルギー及び電子発生源221と試料片242との間の電位差が、電子ビーム218に含まれる電子が試料片242に達する際に持つエネルギーを決定する。上述したように、この電位差は、電子銃220若しくは試料片又はこれら両方をバイアスすることにより得られる。「電子銃へのバイアス」は、上述したように、電子銃の電位の変更、即ち、電子銃の全素子へのバイアス電圧の重畠を意味し、例えば、エミッタ(emitter)、サプレッサー(suppressor)及びエクストラクタ(extractor)がバイアス電圧を印加される。電子銃全体の全素子が均一にバイアスされるので、電子銃内の構成部品間の相対電位は変化しない。電子銃の構成素子は、このバイアス電圧で「フロート状態」となる。

30

## 【0066】

全素子が均一にバイアスされると、電子銃の焦点は変動しない。この電子銃は磁気偏向器234の中心で焦点を結ぶことが好ましい。電子銃を磁気偏向器と同電位に保持すると、電子銃を更に調整しなくても、ビームの焦点を磁気偏向器に維持することができる。コンデンサレンズ、加速素子又はオプションの制御板のように、エクストラクタより後方に設置される電子銃の構成要素は、磁気偏向器234、静電偏向器212及び上部レンズ素子210と同電位に保持されることが望ましい。エミッタでの負電位は、電子が試料片に到達するように、常に試料片の電位より高くする。このエミッタでの電位は、試料片の電位よりも高く、-20V乃至-10,000Vの間であることが望ましい。このフィラメントとエクストラクタとの間の電圧差は、ビームを形成するに足る運動エネルギーを電子に供給するのに充分である。

40

## 【0067】

50

上述したように、試料片へのバイアスは、この試料片の近傍にある他部材へのバイアスを必要とするので、多くの工程では、電子銃をバイアスすることが望ましい。例えば、試料片 242 に対して -2,000 V で保持された電子エミッタから生成された電子では、この電子が試料片 242 のグラウンド電位である表面に衝突する際に、約 2 keV のエネルギーを持っている。この電子ビーム 218 に含まれる電子による試料片 242 上での衝撃が、最大 2 keV のエネルギーを持つ 2 次電子 246 の放出を誘発する。

#### 【0068】

中央レンズ素子 208 の正電荷が、この 2 次電子 246 を引き寄せ加速して光学鏡筒 204 上方へ戻し、ここで 2 次電子 246 は、磁気偏向器 234 により 2 次電子検出器 228 へ向けて曲げられる。従来の側面搭載の 2 次粒子収集システムは、この粒子収集装置を 10 収容するために、最終レンズを試料片から充分離して配置する必要がある。最終レンズから試料片までの距離の増大は、より長い集束距離を有する最終レンズの使用を必要とするため、通常、FIB システムの分解能が低下する。本発明によれば、1 次ビームを通過させるアパーチャを有すると共に、試料片と最終レンズとの間に配置された導電板を用いることによって、2 次粒子を検出することもできる。

#### 【0069】

しかしながら、図 2 に示したシステムにおいては、2 次電子 246 は、イオン光学鏡筒の光軸に沿って集められる。2 次電子 246 は、FIB ビーム 238 の分解能が著しく低下しないように、最終レンズ 202 を通して加速されてから、イオン光学鏡筒の光軸より離れて 2 次電子検出器 228 に向かうように偏向される。 20

#### 【0070】

このレンズ透過型 (TTL : through-the-lens) 検出器の配置によって、試料片を最終レンズの近傍に置くことができるので、集束距離を短縮できると共に、同じビーム径で、より大電流となるように改良された鏡筒光学性能を備えることができる。2 次粒子のレンズ透過型検出器は、試料片の一側方向に 2 次粒子を集めることに起因するシャドーイングを排除することもできる。適切な電圧を用いることによって、2 次イオンも最終レンズを通して集めることができる。電子ビーム鏡筒におけるレンズ透過型電子検出器は知られており、例えば、「静電型対物レンズを備えた SEM 及び電気的走査装置」(以下「Krans」と記載) に対して Krans に付与された米国特許第 6,218,664 号に記載されている(特許文献 5 参照)。なお、この特許は、本発明の譲受人に譲渡されている。 30

#### 【0071】

この Krans の設計においては、中央レンズ素子及び上部レンズ素子(並びに状況に応じて下部レンズ素子)は、電子を試料片からレンズ上方へ引き上げるために、正電位にバイアスされ、このレンズ上方で、電子はチャネル・プレート電子増倍管 (channel plate electron multiplier) により検出される。このチャネル・プレート電子増倍管は、イオン光学鏡筒の軸に対して略垂直に配向され、その中心に 1 次ビームを通すための開孔を有する。しかしながら、FIB 鏡筒に必要な光学系は、Krans の設計のような低電圧 SEM の鏡筒とは著しく異なっている。よって、イオン光学鏡筒に TTL 機能を備えるためには、電子光学鏡筒として Krans により記載されたものとは異なるよう、イオン光学系への大幅な改良が必要となる。 40

#### 【0072】

FIB システムに採用されるイオンでは、その電荷に対する質量比は電子よりも桁数が大きく、加えて、エネルギーも極めて高い。本発明の出願人は、1 次及び 2 次電子ビームの進行路を横断する単純磁場を適用すると、1 次イオンビームへの外乱を最小限に抑えて電子を光軸から離すように偏向できることを発見した。

#### 【0073】

イオンビーム上の磁気偏向器の相対的效果を図示するために、出願人は、2 次電子を所望の屈曲半径を通して曲げるために必要な磁石の強度を計算した後、この磁場により生成されるイオンビームの屈曲半径を決定する。この屈曲磁石の強度は、サイクロトロン半 50

径方程式(1)により与えられる。

$$R = m v / B e \quad \dots \quad (1)$$

#### 【0074】

ここで、 $m$ は荷電粒子の質量であり、 $v$ は荷電粒子の速度であり、 $B$ は磁場強度であり、 $e$ は電子電荷である。(1)式に、荷電粒子のエネルギー及び質量を代入すると、(2)式が得られる。

$$R = (2 E m)^{1/2} / B e \quad \dots \quad (2)$$

#### 【0075】

電子に対しては、 $B \times R$  (gauss-cm) = 3.37  $E^{1/2}$  のように表すことができる。なお、ここでの  $E$  は、eV の単位である。従って、2 次電子のビームを 5 mm の半径を通して曲げるために  $R = 5 \text{ mm}$  を、また、最終レンズを超えて上方に向けて加速される 2 次電子の最大エネルギーとして  $E = 2000 \text{ eV}$  を用いると、 $B = 301 \text{ ガウス (gauss)}$  の磁場が必要であることが導出される。10

#### 【0076】

ガリウムの 1 次イオンは電子と同電荷を有するが、各ガリウムイオンは電子質量の約 128,000 倍の質量を有する。また、電子エネルギーは、一般的に、イオンエネルギーの約 15 倍も少ない。(2)式を用いると、1 次イオンに対するサイクロトロン半径は、通常、電子のサイクロトロン半径より約 1550 倍も大きく、約 7.75 メートルである。イオンは、磁場に極短時間しか支配されないので、1 次イオンビームの進行路への外乱は小さい。実際、この進行路の偏差は、僅か 1.2 ミリラジアン (milli-radians) 程度であり、ビーム制御で極めて容易に補正することができる。1 次イオンビームに磁場により導入される支配的な収差は色収差であって、ほとんど無視可能なことも示すことができる。20

#### 【0077】

図 3(A), 図 3(B) 及び図 3(C) は、カナダのマニトバ (Manitoba) 社のインテグレイテド・エンジニアリング・ソフトウェア (Integrated Engineering Software) より入手可能な 2 次元ローレンツ (Lorentz2D) プログラムを用いて夫々計算した 1 次電子、1 次イオン及び 2 次電子の軌道のシミュレーションである。このローレンツ (Lorentz) プログラムは、2 次元及び 3 次元のモード又は視野におけるイオン光学系を調査及び分析するために設計されたイオン光学系シミュレーションプログラムである。このプログラムを用いることによって、静電電位及び磁位がイオンの軌道に与える影響を判断するために、これら静電電位及び磁位の配列を、このソフトウェアにより検討することができる。これらの図は、図 2 に示したシステムにおいて、口径が 2 mm の下部レンズ素子を有する最終レンズの設計で光学鏡筒を通過する 1 次イオン、1 次電子及び 2 次電子の軌道のローレンツ・シミュレーションを夫々示す。この SEM 電子の被写体から結像までの距離は 53 mm である。30

#### 【0078】

図 3(A), 図 3(B) 及び図 3(C)において、シミュレーションは、下部レンズ素子 206 の電圧を -1 kV、中央レンズ素子 208 の電圧を +40,000 V、上部レンズ素子 210 の電圧をグラウンド電位に設定してプログラムした。40

#### 【0079】

図 3(A) は、図 2 に示したシステムの下部レンズ素子 206 の口径が 2 mm の場合における 1 次電子の軌道のコンピュータシミュレーションである。1 次電子の軌道 310 は、最終レンズ 202 により生成された等電位線 312 を通過している。図 3(A) では、上部レンズ素子の上端に近づいて行く電子のエネルギーは、4,300 eV にプログラムされているので、電子の衝突エネルギーは 3300 eV となっている。

#### 【0080】

このシミュレーションに示した進入電子の角度  $A_0$  は、 $A_0 = +0.05$  乃至  $-0.05$  ラジアン (radian) で変化し、射線 (rays) は 0.01 ラジアン間隔で示されている。球面収差の最小錯乱円 ( $D_{si}$ ) は、シミュレーションから 33.0  $\mu\text{m}$  と決定される。色50

収差の円 ( $D_{ci}$ ) は、 $100\text{ eV}$  のエネルギー偏差  $E$  を有する進入電子を用いて  $27.6\mu\text{m}$  と決定される。なお、 $A_o$  及び  $E$  の値は、計算の簡便化のために選択されたものであって、実際には両方の値はかなり低いものである。レンズを出る電子の半角  $A_i$  は  $0.160\text{ ラジアン}$  であるので、倍率は  $0.325$  である。

#### 【0081】

図3(B)は、図2に示したシステムの下部レンズ素子206の口径が  $2\text{ mm}$  の場合における1次イオンの軌道のコンピュータシミュレーションである。

1次イオンの軌道320は、最終レンズ202により生成された等電位線312を通過している。イオンは  $44\text{ keV}$  の進入運動エネルギー及び  $45\text{ keV}$  の衝突エネルギーを有する。この進入イオンは、光軸に平行であって、 $0.095\text{ ラジアン}$  の半角でレンズを出る。このビームは、 $30\mu\text{m}$  の最小錯乱円を有し、 $100\text{ eV}$  のエネルギー偏差により  $9.5\mu\text{m}$  の色収差の円を与える。  
10

#### 【0082】

図3(C)は、図2に示したシステムの下部レンズ素子206の口径が  $2\text{ mm}$  の場合における  $10\text{ eV}$  の2次電子の軌道のコンピュータシミュレーションである。2次電子の軌道340は、最終レンズ202により生成された等電位線312を通過し、図3(A)及び図3(B)での電子及びイオンの運動方向とは反対方向に、鏡筒上部へ戻って行く。

#### 【0083】

図2に示したシステムで下部レンズ素子206の口径が  $2\text{ mm}$  の場合における光学特性を概算して下記の表1に示す。なお、表1のための計算では、中央レンズ素子208は  $40\text{ kV}$  で保持され、SEMの電子発生源は  $12\text{ mm}$  であり、試料片は  $65\text{ mm}$  であるものとした。  
20

#### 【0084】

#### 【表1】

### ローレンツ・シミュレーションによる光学特性

試料片 の電圧 (kV)	SEM特性							FIB Ei (keV)	TTL2次電子		
	Eo (keV)	Ei (keV)	Ai (rad)	M2	Dsi (um)	Dc (um)	Cs (mm)	Cc (mm)	E (eV)	Amax (rad)	T (%)
-0.1	4.2	4.1	0.135	0.33	32.5	27.8	26.42	8.4	44.1	10-100	0.7
-1	4.3	3.3	0.16	0.32	33	27.6	16.11	5.7	45.0	10-100	1.4
-2	4.5	2.5	0.2	0.30	33	27.4	8.25	3.4	46.0	10-100	1.3
-3	4.9	1.9	0.27	0.29	37.6	28.3	3.82	2.0	47.0	10-100	1.4
-5	6.4	1.4	0.463	0.24	84.3	37.3	1.70	1.1			
-10	11.0	1	0.48	0.19	65.1	41.1	1.18	0.9	54.3	10-100	1.3
											85
Eo= 電子銃のエネルギー				Cs= 球面収差係数							
Ei= 試料片への衝突エネルギー				Cc= 色収差係数							
Ai= 試料片での電子の角度				FIB Ei= イオンの衝突エネルギー							
M2= 電子発生源の倍率				E= 集められた2次電子のエネルギー							
Dsi= 最小錯乱円				Amax= 集められた2次電子の半角							
Dc= 色収差の円				T= 集められた2次電子の百分率							

#### 【0085】

図4は、図2に示したシステムにおいて、下部レンズ素子206の口径が  $2\text{ mm}$  で試料片の電圧が変更された場合におけるSEMの電子発生源の電圧420及びSEMのビーム電圧440を示す。SEMのビーム電圧440(衝突エネルギー)は、SEMの電子発生源の電圧420と試料片の電圧との間の差である。図4に示すように、SEMの電子発生源の電圧420と試料片の電圧とを変更することによって、出願人は、衝突エネルギーを  $1\text{ kV}$  から  $4\text{ kV}$  より大きくすることができた。  
40

#### 【0086】

図5は、図2に示したシステムで下部レンズ素子206の口径が  $2\text{ mm}$  の場合に、いくつかの異なったSEMのビームエネルギーにおけるSEMのビーム径とビーム電流との関係を示している。図5に示すモデルは、ビームの分解能をより正しく概算するために、色  
50

収差の項を0.34倍する係数を用いている。試料片で4.1kVの電子ビームに対する計算において、電子被写体の最適な縮小率は、10nAでは0.4であり、1nAでは0.17であり、0.05nAでは0.05であった。1kVの電子ビームに対して、この縮小率の値は、10nAでは0.33であり、1nAでは0.15であり、0.05nAでは0.043であった。これらの計算には、ビームの相互作用及び電子ビーム上での屈曲磁石による収差は含まれていない。このグラフに示すように、10nAという比較的高いビーム電流であっても、ビーム分解能は10nm未満であり、試料片を正確に処理するのに充分である。よって、本発明によれば、高電圧の中央レンズ素子の電位を修正することなく、また、ワーキングディスタンスを変更することもなく、電子の衝突エネルギーを選択できると共に、ビーム径を10nm未満に保持できる。

10

#### 【0087】

図3(A)、図3(B)及び図3(C)のように、図6(A)、図6(B)及び図6(C)は、上述したローレンツ・プログラムを用いて準備されたものであり、図2に示したシステムの光学鏡筒を通過する1次電子、1次イオン及び2次電子の軌道のローレンツ・シミュレーションを示すが、この図6(A)、図6(B)及び図6(C)の軌道は、3mmのレンズ口径を有する下部レンズ素子を用いて計算されたものである。この設計は、より低いSEMのビーム電圧(250eV)を試料片で実現できるが、10nmの分解能を可能とする最大ビーム電圧を低下させる。この口径3mmの設計での光学特性を、表2並びに図7及び8に示す。この光学特性は、上述した口径2mmの設計で対応する表及び図と類似している。図6(A)、図6(B)及び図6(C)では、下部レンズ素子206の電圧を-5kVに、中央レンズ素子208の電圧を+40,000Vに、上部レンズ素子210の電圧をグラウンド電位に設定している。

20

#### 【0088】

図6(A)は、図2に示したシステムの下部レンズ素子の口径が3mmの場合における1次電子の軌道のコンピュータシミュレーションである。1次電子の軌道610は、最終レンズ202により生成された等電位線312を通過している。図6(A)では、最終レンズに進入する電子の運動エネルギーは、5250eVと仮定されているので、-5,000Vにバイアスされた試料片での電子の衝突エネルギーは250eVとなる。進入電子の角度Aoは、このシミュレーションに示すように、Ao = +0.025乃至-0.025ラジアン(radian)で変化し、射線は0.005ラジアン間隔で示されている。

30

#### 【0089】

最小錯乱円(Dsi)は7.0μmであると決定され、色収差(Dci)は、E=100eVを用いて27.6μmであると決定される。なお再び、Ao及びEの値は、計算の簡便化のために選択されたものであって、実際には両方の値はかなり低いものである。レンズを出る電子の半角Aiは0.302ラジアンであり、倍率は0.30である。

#### 【0090】

図6(B)は、図2に示したシステムの下部レンズ素子206の口径が3mmの場合における1次イオンの軌道のコンピュータシミュレーションである。1次イオンの軌道620は、最終レンズ202により生成された等電位線312を通過している。イオンは44keVの初期運動エネルギーを有し、平行化されたビームとして、即ち、光軸に平行に最終レンズに进入する。イオンは-5kVの試料片で49keVの衝突エネルギーを有する。この最終レンズ後のイオン円錐は、0.087の角度Aiを有する。その最小錯乱円は30μmであり、およそ100eVのエネルギーで7.4μmの色収差の円を与える。

40

#### 【0091】

図6(C)は、図2に示したシステムにおいて下部レンズ素子の口径が3mmの場合における2次電子の軌道のコンピュータシミュレーションである。2次電子の軌道640は、最終レンズ202により生成された等電位線312を通過し、図6(A)及び図6(B)での電子及びイオンの運動方向とは反対方向に、鏡筒上部へ戻って行く。

#### 【0092】

図2に示したシステムで下部レンズ素子206の口径が3mmの場合における光学特性

50

を概算して下記の表 2 に示す。なお、表 2 のための計算では、中央レンズ素子 208 は 40 kV で保持され、SEM の電子発生源は 12 mm であり、試料片は 65 mm であるものとした。

### 【0093】

【表 2】

## ローレンツ・シミュレーションによる光学特性

試料片 の電圧 (kV)	SEM 特性							FIB Ei (keV)	TTL2 次電子		
	Eo (keV)	Ei (keV)	Ai (rad)	M2	Dsi (μm)	Dc (μm)	Cs (mm)	Cc (mm)	E (eV)	Amax (rad)	T (%)
-1	4.00	3.0	0.133	0.36	36.1	31.0	30.69	7.0	44.9	10-100	1.0
-2	4.20	2.2	0.166	0.35	36	31.6	15.74	4.2	45.9	10-100	1.1
-3	4.40	1.4	0.211	0.34	36.5	32.2	7.77	2.1	46.9	10-100	0.9
-5	5.25	0.25	0.302	0.3	7	27.6	0.51	0.2	49.0	10-100	0.9
											41

### 【0094】

図 6(D) は、図 6(C) の試料片領域の拡大図であって、試料片から放射された 10 eV の 2 次電子が、中央レンズ素子の高電圧により加速されながら最終レンズを通過して上方へ戻って行く軌跡を示している。この図 6(D) 上の数字は、平坦な試料片 652 を超えて延在する光軸の延長部分 650 より測定された放射角度をラジアンで表している。光軸付近で 0.9 ラジアンの半角を有する円錐内に放射された電子は、加速され最終レンズを通過して上方へ戻る。光軸に対して大きな角度、即ち、試料片表面に対して小さな角度で放射された電子は、収集用の最終レンズを通過することはない。2 次電子のエネルギーが 10 eV から 100 eV に増加すると、極僅かの電子のみが加速されて収集用の最終レンズを上方へと通過するようになる。口径が 3 mm の設計では、40% 又はそれ以上の TTL 透過性が得られる。これは、ワーキングディスタンスの短い対物レンズを用いて光軸から離れて 2 次電子を集めることによる検出器と比較して、比較的高い透過効率であり、しかも、TTL 検出を用いることによっても、ワーキングディスタンスを短くできる。口径が 2 mm の設計では、100% に迫る透過性が得られる。光学鏡筒の設計によるが、他の電子は鏡筒を更に上昇して消滅する。即ち、2 次電子の透過限界角が、試料片又は鏡筒の上部に存在している。

### 【0095】

図 7 は、図 2 に示したシステムにおいて、下部レンズ素子の口径が 3 mm で試料片の電圧が変更された場合における SEM の電子銃の電圧 720 及び SEM のビーム電圧 740 を示す。SEM のビーム電圧 740 は、SEM の電子発生源の電圧と試料片の電圧との間の差である。口径が 3 mm の下部レンズ素子は、図 4 に示した 2 mm 口径の下部レンズ素子と類似の光学特性を有する。図 7 に示すように、SEM の電子発生源の電圧 720 及び試料片の電圧を変更することによって、出願人は、250 V 乃至 3 kV の衝突エネルギーを達成できた。よって、図 4 と図 7 との対比によって、3 mm 口径の下部レンズ素子は、試料片でのより低い SEM のビーム電圧 (250 eV) を実現できるが、最大ビーム電圧 (3 kV) を犠牲にする。

### 【0096】

図 8 は、図 2 に示したシステムで下部レンズ素子の口径が 3 mm の場合に、いくつかの異なった SEM のビームエネルギーにおける SEM のビーム径とビーム電流との関係を示している。図 5 と比較すると、図 8 は、3 mm 口径の設計と 2 mm 口径の設計とは類似の光学特性を有することを示している。このグラフにより示されるように、3 mm の口径を用いた場合であっても、10 nA でのビームの分解能は 12 nm 未満のままであって、試料片を正確に処理するのに充分である。6 nA 未満の電流では、ビーム径は 10 nm 未満である。

### 【0097】

図 9(A) は、図 2 に示したシステムの FIB - SEM 光学系を示す略式断面図である。

10

20

30

40

50

望ましい実施形態においては、イオン源 902 は、高輝度のガリウム (Ga) を用いた液体金属イオン源 (L M I S) である。このイオン源 902 から放射されたイオンは、コンデンサレンズ 904 及び FIB の対物レンズ 910 により試料片 912 上に集束される。

#### 【0098】

電子ビーム銃 916 は、ショットキー電界放射電子源のような電子放射源 (図示せず) と、電子をビームとなして、その電子を加速して所望のエネルギーにする複数の光学部品 (図示せず) とを備える。このような電子ビーム銃 916 は、例えば、本発明の譲受人である FEI 社 (米国オレゴン州ヒルズボロ) から商業的に入手することが可能である。

#### 【0099】

電子ビーム銃 916 の後方に配置された 3 つの素子からなるコンデンサレンズ 914 が 10 、屈曲磁石 906 の略中心にクロスオーバーを形成するように、1 次電子を更に加速する。このコンデンサレンズ 914 の第 1 及び第 3 の素子は、略 + 2 kV の電位で保持されることが好ましい。電子ビーム銃 916 からの電子は、略 + 2,000 V の電位で保持された磁気偏向器 906 又は磁気偏向器内部の静電シールドによって、1 次イオンビーム軸 (図示せず) に向けて偏向される。この電子ビームは、SEM の対物レンズ 908 により試料片 912 上へ集束される。

#### 【0100】

図 9(B) 及び図 9(C) は、図 2 に示したシステムの FIB - SEM 鏡筒を示す略式断面図である。イオン光学システム 920 は、イオン源 921 を含む。望ましい実施形態においては、イオン源 921 は、高輝度のガリウム (Ga) を用いた液体金属イオン源 (L M I S) である。イオンは、高電圧のエクストラクタ 922 によりイオン源 921 から引き出される。このイオンビームは、コンデンサレンズ 924 及び最終レンズ 952 により集束される。イオン源 921 を残りの真空チャンバから隔離するために、FIB アイソレーション・バルブ 928 が用いられ得る。FIB の自動変更アーチャ (FIB A V A : automatic variable aperture) 932 が、試料片に対して望ましい電流を得るために設定され得る。ビーム・プランカ (beam blanker) 934 は、ビームを空砲化してイオンが試料片を叩かない選択肢を与える。イオンビーム電流は、オプションのファラディ・カップ 936 の使用により測定され得る。最後に、イオンビームは、ビーム偏向板 942 により試料片 954 の表面を横切るように走査される。

#### 【0101】

電子光学システム 951 は電子銃 950 を含み、この電子銃 950 は、ショットキー電界放射電子源のような電子放射源 152 と、エクストラクタと、電子をビームとなし、その電子を加速して所望のエネルギーにする第 1 コンデンサレンズ 944 とを備える。このような電子銃 950 は、例えば、本発明の譲受人である FEI 社 (米国オレゴン州ヒルズボロ) から商業的に入手可能である。

#### 【0102】

コンデンサレンズ 944 は、略 + 2 kV の電位でバイアスされることが望ましい。電子ビーム源 950 は、電界電子エミッタからの安定的な電子放射を維持するために、超高真空間チャンバ (図示せず) 内に保持される。SEM のアイソレーション・バルブ 948 は、電子ビーム源 950 を残りの真空チャンバから真空隔離するために用いられる。電子光学システム 951 は、制御電極 (steering electrode) 及びプランギング電極 (blanking electrode) 946 も含む。電子発生源の縮小率を変えられるように、他のコンデンサレンズが付加され得る。

#### 【0103】

電子ビーム源 950 からの電子は、略 + 2,000 V の電位に保持された磁気偏向器 940 により 1 次イオンビーム軸 (図示せず) に向けて偏向される。この電子ビームは、上部レンズ素子 960 、中央レンズ素子 962 及び下部レンズ素子 964 を有する最終レンズ 952 によって、試料片 954 上に集束される。中央レンズ素子 962 の開口部は傾斜していることが好ましく、下部レンズ素子 964 の口径は上部レンズ素子 960 の口径より小さいか又は同じ大きさである。

10

20

30

40

50

## 【0104】

イオンビームに含まれるイオン及び電子ビームに含まれる電子による試料片での衝撃は、いずれも2次電子(図示せず)を放出させる。この2次電子は、光学鏡筒(図示せず)を上方へ逆進し、ここで磁気偏向器940により2次電子検出器938に向けて曲げられる。イオンポンプ970は、電子銃チャンバ953により支持され、この電子銃チャンバ953を超高真空とする。

## 【0105】

本発明に係るいくつかの実施形態での利点は、電子ビームのエネルギーを素早く変更できることである。図10は、上述のように、第2グループの素子が略グラウンド電位であって、第1グループの素子が電気的にバイアスされた実施形態において、電子の電圧を調整するための工程を示すフローチャートである。ステップ1002で、電子銃220からの電子が所望の衝突エネルギーを有するように、試料片の電圧が変更される。例えば、電子銃220を離れる電子が1000eVの運動エネルギーを有し、500eVの衝突エネルギーが要求されている場合、試料片の電位は-500Vに調整される。ステップ1004で、下部レンズ素子206の電位が、試料片242の電位と略一致するように調整される。ここで「略一致」とは、1,000V以内を意味し、より好ましくは100V以内であり、50V以内が最適である。任意選択可能なステップ1008で、電子ビームを試料片242上に集束するために、中央レンズ素子208の電圧が微調整される。電圧に関して極僅かの変更しか必要とされないため、この高電圧を変更後のレベルで安定させるのに最低限度の時間しか必要としない。任意選択可能なステップ1010で、中央レンズ素子208、下部レンズ素子206及び試料片242での電圧変更に起因した焦点変動を補正するために、イオンビームのエネルギーがイオン銃において調整される。このイオンビームのエネルギーが、イオン銃へのバイアス電圧の重畠により調整される。このとき、エミッタ、サプレッサ及び引出電極にバイアス電圧が均一に印加されるので、これらの素子間における相対電位の変動はない。第1イオンレンズでの電圧を微調整することも必要である可能性がある。よって、ステップ1002及び1004は、電子の衝突エネルギーを変更し、ステップ1008は、電子ビームが適切に集束されたままであることを確定し、ステップ1010は、イオンビームが適切に集束されたままであることを確定する。図10に示した工程が実行される順序は、この工程の実用性に影響を与えることなく変更可能である。

## 【0106】

試料片が略グラウンド電位である実施形態において、この工程は類似であって、所望の電子衝突エネルギーを供給するために、上部レンズ素子210、静電偏向器212、磁気偏向器234及び電子発生源221が適切な電位に調整される。そして、中央レンズ素子208での高電圧を調整することにより電子ビームが集束され、続いて、イオンビームエネルギーが調整されて、イオンビームが試料片242上の焦点に戻される。

## 【0107】

本発明の好適なシステムは多くの新しい側面を有し、本発明は異なる目的のためには異なるシステムで実施され得るため、あらゆる特徴が全ての実施形態に存在する必要はない。また、上述した実施形態の多くの側面は、別々に特許を受けることができる。

## 【0108】

本発明の好適な実施形態の一側面によれば、集束イオンビームシステムと走査型電子顕微鏡システムとが、2つのシステムの粒子ビームの間に同軸照準を備えて1台の装置に組み合わされる。

## 【0109】

本発明の好適な実施形態の他の一側面によれば、この装置は2次電子のレンズ透過型(TTL)検出を用いており、2次電子の収集効率を向上することができる。

## 【0110】

本発明の好適な実施形態の他の一側面によれば、正にバイアスされた静電最終レンズが使用され、電子ビームとイオンビームとの両方を、レンズの電圧を変更せずに集束する。

10

20

30

40

50

**【 0 1 1 1 】**

本発明の好適な実施形態の他の一側面によれば、この装置設計により S E M 及び F I B の交互稼動（操作）又は同時稼動が可能となる。

**【 0 1 1 2 】**

本発明の好適な実施形態の他の一側面によれば、イオンビーム電圧に対する影響を極力軽微に抑制して電子ビームの電圧を変えるために、試料片へのバイアスが利用される。

**【 0 1 1 3 】**

本発明の好適な実施形態の他の一側面によれば、電子ビームの鏡筒とイオンビームの鏡筒とは非ユニポテンシャルの最終レンズを共有する。

**【 0 1 1 4 】**

本発明の他の一側面によれば、このシステムによって、最終レンズの高電圧素子の電位の変更を必要とせずに、また、最終レンズと試料片との間のワーキングディスタンスを変更せずに、電子ビームのエネルギーを変更できる。

**【 0 1 1 5 】**

本発明の他の一側面によれば、本発明は、比較的小面積の製造領域を使用する小型設計である。

**【 0 1 1 6 】**

本発明及びその利点を詳細に説明してきたが、本願明細書での実施形態に対して、添付の特許請求の範囲により規定された本発明の精神及び適用範囲から逸脱せずに多様な変更、置換及び改変をなし得ることが、理解されるべきである。また、本願の適用範囲は、プロセス、機械、製造物、組成物、手段、方法及び本願明細書に記載された工程の特定の実施形態に制限されることを意図したものではない。所謂当業者であれば、本発明の開示事項から即座に判ることであろうが、本願明細書に記載された実施形態に対応する部分と実質的に同じ機能を果たし若しくは実質的に同じ結果を達成する現存又は今後に開発されるであろうプロセス、機械、製造物、組成物、手段、方法又は工程が、本発明に基づいて利用される可能性がある。従って、添付の特許請求の範囲は、その適用範囲内に、そのようなプロセス、機械、製造物、組成物、手段、方法又は工程を含むことを意図している。

**【 図面の簡単な説明 】****【 0 1 1 7 】**

【図1】最終レンズを介して中和電子を供給すると共に、この最終レンズを介して2次電子を集めることができ可能なFIB鏡筒を示す略式断面図である。

【図2】最終レンズを介して2次電子を集める同軸FIB-SEM鏡筒を示す略式断面図である。

【図3(A)】図2に示したシステムの下部レンズ素子の口径が2mmの場合における1次電子の軌道のコンピュータシミュレーションである。

【図3(B)】図2に示したシステムの下部レンズ素子の口径が2mmの場合における1次イオンの軌道のコンピュータシミュレーションである。

【図3(C)】図2に示したシステムの下部レンズ素子の口径が2mmの場合における2次電子の軌道のコンピュータシミュレーションである。

【図4】図2に示したシステムの下部レンズ素子の口径が2mmの場合におけるSEMの電子銃電圧及びビーム電圧を試料片電圧の関数として示すグラフである。

【図5】図2に示したシステムの下部レンズ素子の口径が2mmの場合におけるSEMのビーム径とビーム電流との関係を示すグラフである。

【図6(A)】図2に示したシステムの下部レンズ素子の口径が3mmの場合における1次電子の軌道のコンピュータシミュレーションである。

【図6(B)】図2に示したシステムの下部レンズ素子の口径が3mmの場合における1次イオンの軌道のコンピュータシミュレーションである。

【図6(C)】図2に示したシステムの下部レンズ素子の口径が3mmの場合における2次電子の軌道のコンピュータシミュレーションである。

【図6(D)】図6(C)の試料片領域の拡大図である。

10

20

30

40

50

【図7】図2に示したシステムの下部レンズ素子の口径が3mmの場合におけるSEMの電子銃電圧及びビーム電圧を試料片電圧の関数として示すグラフである。

【図8】図2に示したシステムの下部レンズ素子の口径が3mmの場合におけるSEMのビーム径とビーム電流との関係を示すグラフである。

【図9(A)】図2に示したシステムのFIB-SEM光学系を示す略式断面図である。

【図9(B)】図2に示したシステムのFIB-SEM鏡筒を示す略式断面図である。

【図9(C)】図2に示したシステムのFIB-SEM鏡筒の側方向略式断面図である。

【図10】本発明の実施形態において電子の衝突エネルギーの変更のために望ましい方法を示すフローチャートである。

【符号の説明】

10

【0118】

100 FIB鏡筒

102 イオンビーム用の最終レンズ

106, 206 下部レンズ素子

108, 208 中央レンズ素子

110, 210 上部レンズ素子

112, 212 静電偏向器

120 電子フラット銃

128, 228 2次電子検出器

134, 234 磁気偏向器

20

138, 238 1次イオンビームの光軸

142, 242 試料片

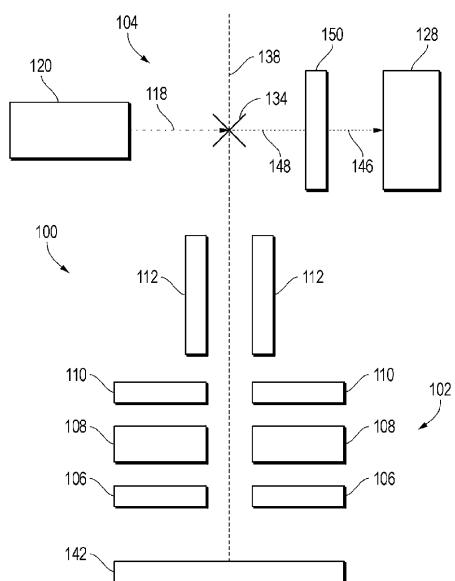
200 FIB-SEM同軸鏡筒

202 最終レンズ

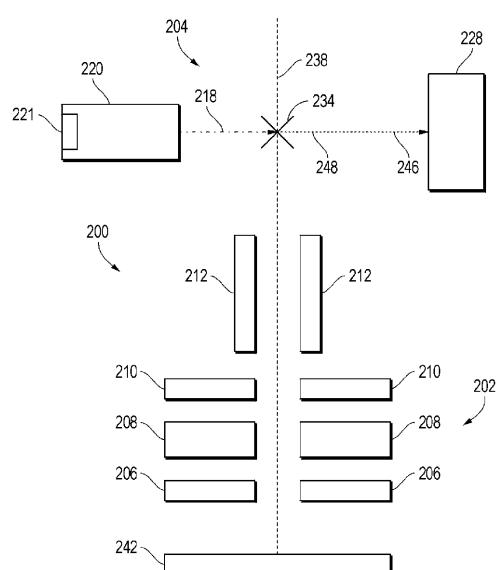
220 電子銃

221 電子発生源

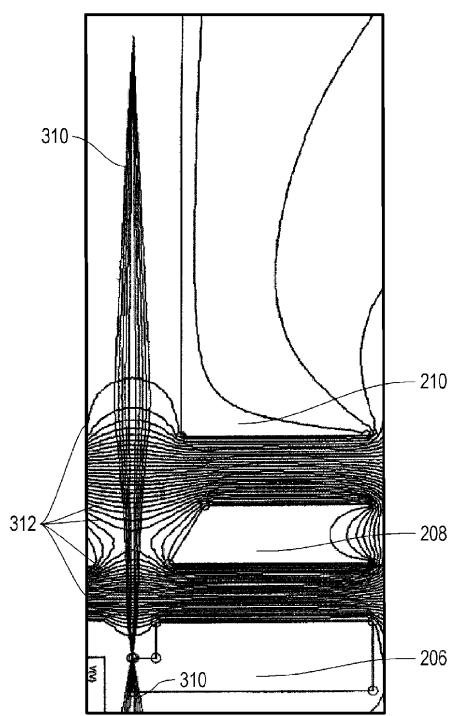
【図1】



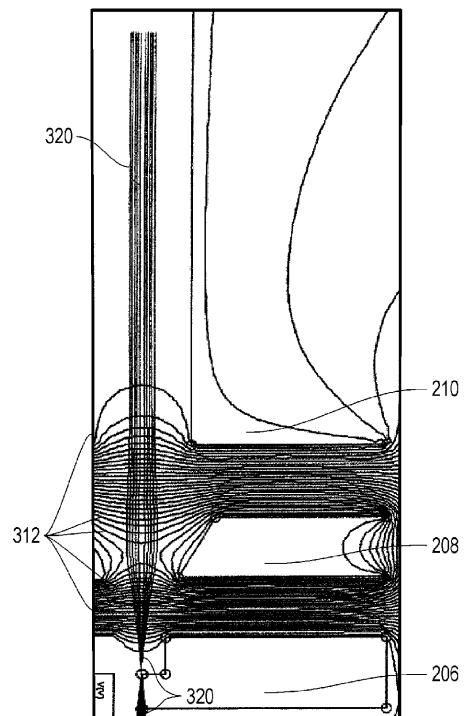
【図2】



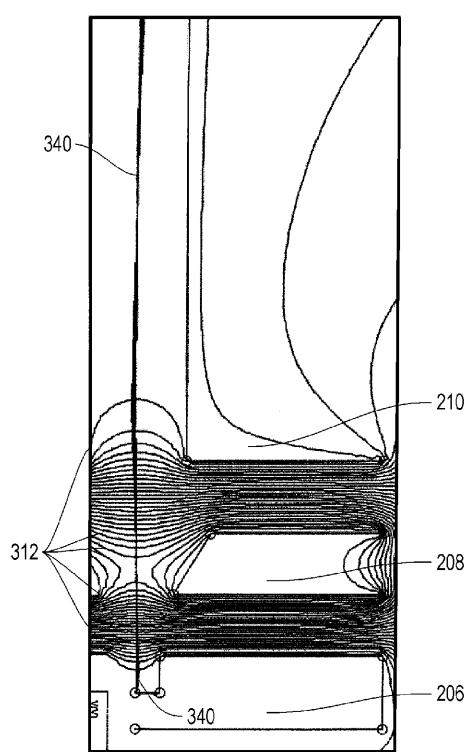
【図3(A)】



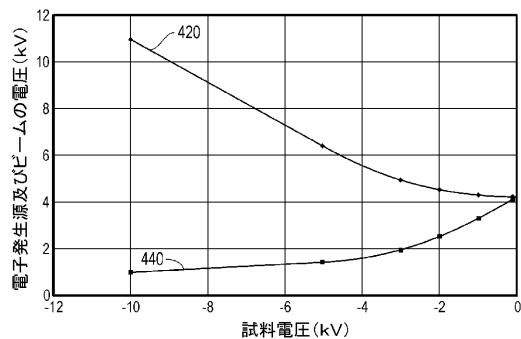
【図3(B)】



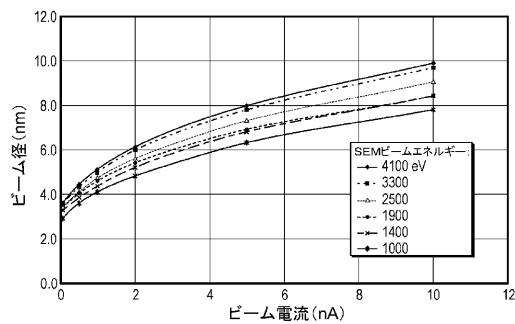
【図3(C)】



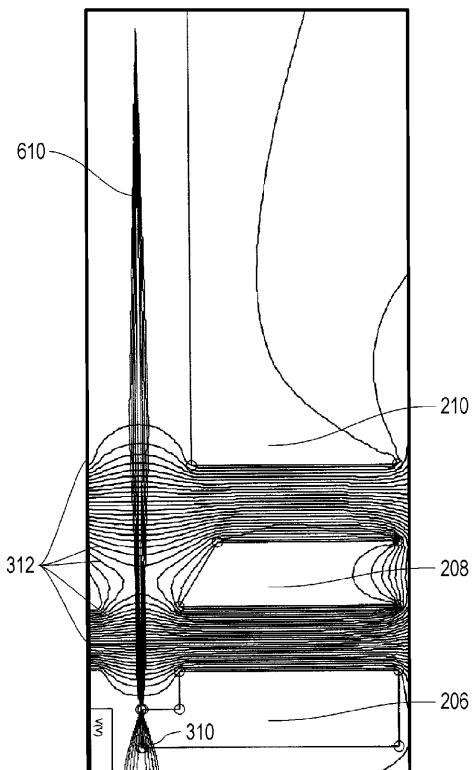
【図4】



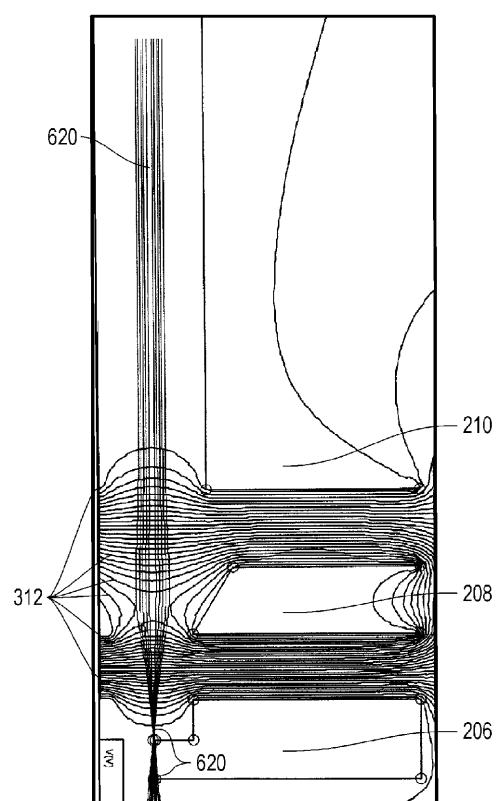
【図5】



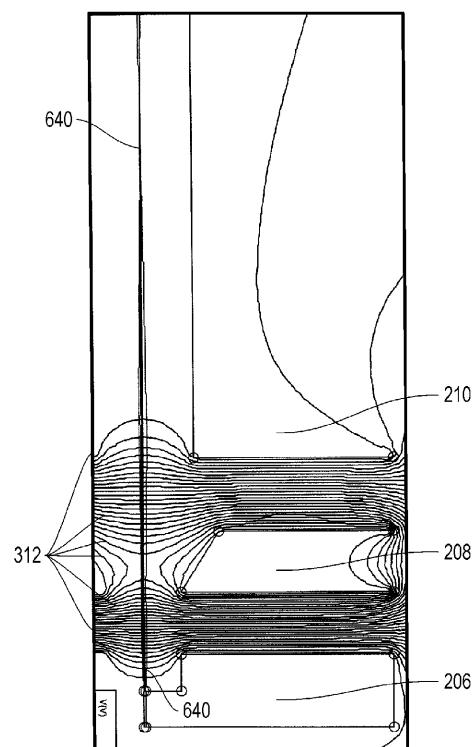
【図6(A)】



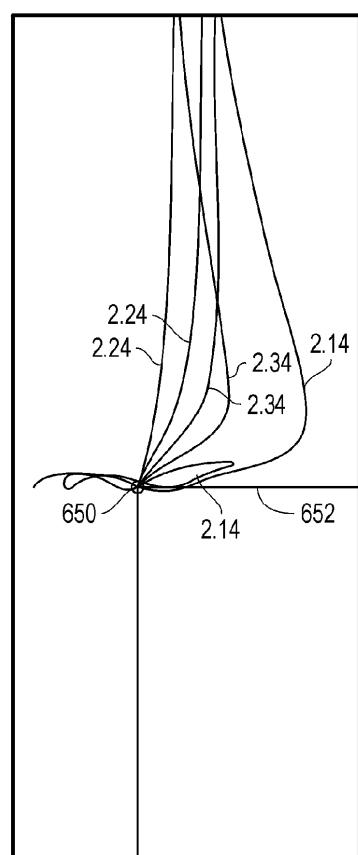
【図6(B)】



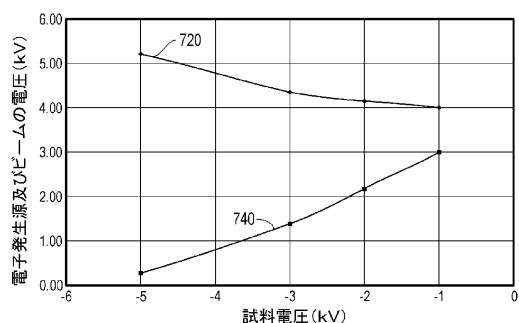
【図 6 ( C )】



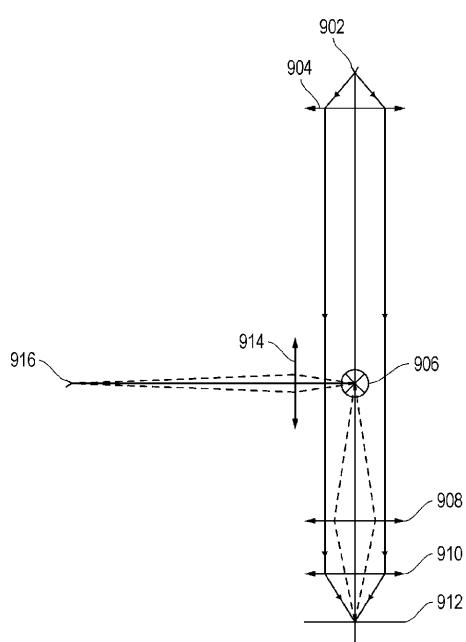
【図 6 ( D )】



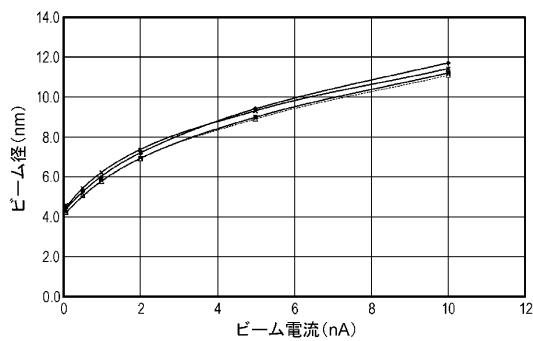
【図 7】



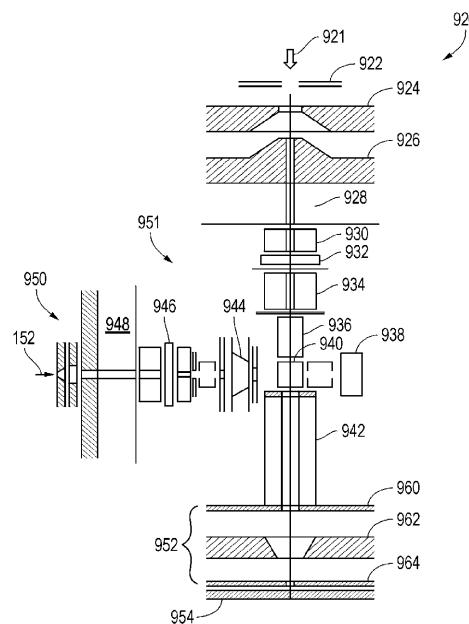
【図 9 ( A )】



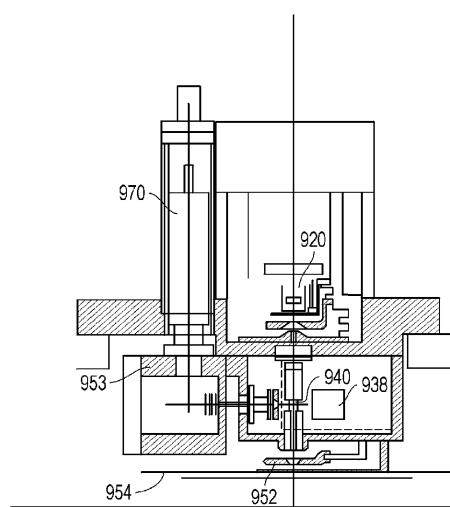
【図 8】



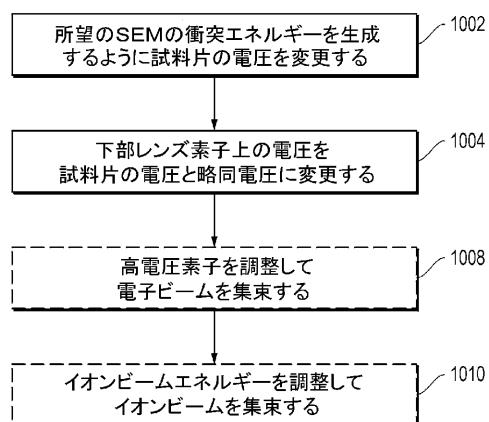
【図 9 (B)】



【図 9 (C)】



【図 10】



---

フロントページの続き

(72)発明者 マーク・ダブリュー・ウトラウト

アメリカ合衆国、オレゴン州 97056, スキップーズ, ダッチ キャニオン ロード 29  
430

(72)発明者マイク・シャインファイン

カナダ、ブリティッシュ コロンビア州 V7W 2Vg, ウエスト バンクーバー, ガルフ ブ  
レイス 5210

審査官 佐藤 仁美

(56)参考文献 特開平04-033326(JP,A)

特開平02-121252(JP,A)

特開昭60-154442(JP,A)

特開昭60-232653(JP,A)

国際公開第01/059805(WO,A1)

特開昭63-236251(JP,A)

特開平02-005337(JP,A)

米国特許第03617739(US,A)

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

H01J 37/00 - 37/02、37/05、37/09 - 37/18、  
37/21、37/24 - 37/244、  
37/252 - 37/36