

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 公開特許公報(A)

(11) 特許出願公開番号

特開2013-149507
(P2013-149507A)

(43) 公開日 平成25年8月1日(2013.8.1)

(51) Int.Cl.	F I	テーマコード (参考)
HO1J 37/20 (2006.01)	HO1J 37/20	5C001
HO1J 37/26 (2006.01)	HO1J 37/20	5C033
	HO1J 37/26	

審査請求 未請求 請求項の数 15 O L (全 27 頁)

(21) 出願番号 特願2012-9554 (P2012-9554)
(22) 出願日 平成24年1月20日 (2012.1.20)

(71) 出願人 501387839
株式会社日立ハイテクノロジーズ
東京都港区西新橋一丁目24番14号
(74) 代理人 100100310
弁理士 井上 学
(74) 代理人 100098660
弁理士 戸田 裕二
(74) 代理人 100091720
弁理士 岩崎 重美
(72) 発明者 常田 るり子
東京都国分寺市東恋ヶ窪一丁目280番地
株式会社日立製作所中央研究所内

最終頁に続く

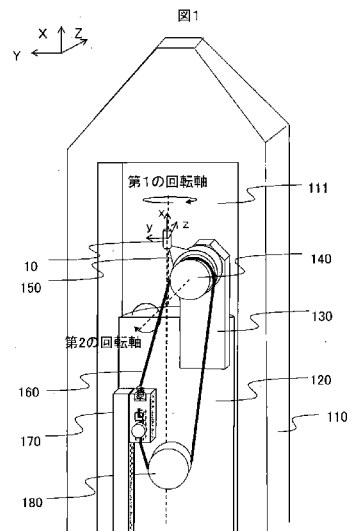
(54) 【発明の名称】 荷電粒子線顕微鏡、荷電粒子線顕微鏡用試料ホルダ及び荷電粒子線顕微方法

(57) 【要約】

【課題】 観察領域のx軸周り - 180°から+180°の回転シリーズ像と、y軸周り - 180°から+180°の回転シリーズ像を撮影できる装置を提供する。

【解決手段】 先端部に試料を取り付ける取付部を有する試料取付台と、前記試料取付台を保持する取付台保持部を有する回転治具と、前記回転治具を保持する保持部を有する試料保持棒と、前記保持棒の延在方向を軸として - 180°から+180°の第1の回転を前記試料保持棒に与える第1の回転制御部と、前記第1の回転の回転軸に直交する方向を軸として ±45度以上の第2の回転を前記回転治具に与える第2の回転制御部と、を有し、前記試料取付台は円錐状または多角錐状の形状であることを特徴とする。

【選択図】 図1



【特許請求の範囲】

【請求項 1】

先端部に試料を取り付ける取付部を有する試料取付台と、
 前記試料取付台を保持する取付台保持部を有する回転治具と、
 前記回転治具を保持する保持部を有する試料保持棒と、
 前記保持棒の延在方向を軸として -180° から $+180^\circ$ の第 1 の回転を前記試料保持棒に与える第 1 の回転制御部と、
 前記第 1 の回転の回転軸に直交する方向を軸として ± 45 度以上の第 2 の回転を前記回転治具に与える第 2 の回転制御部と、
 を有し、
 前記試料取付台は円錐状または多角錐状の形状であること
 を特徴とする荷電粒子線顕微鏡用試料ホルダ。

10

【請求項 2】

請求項 1 において、
 前記試料保持棒は、前記第 1 の回転軸及び第 2 の回転の回転軸のそれぞれに直交する軸の方向に前記回転治具を移動させる回転治具移動部
 を有する荷電粒子線顕微鏡用試料ホルダ。

【請求項 3】

請求項 2 において、
 前記回転治具移動部は、前記試料保持棒と前記回転治具との位置の定めるスライド溝を有し、
 前記スライド溝に沿うようにして、前記それぞれに直交する軸の方向に前記回転治具をスライドさせること
 を特徴とする荷電粒子線顕微鏡用試料ホルダ。

20

【請求項 4】

請求項 1 において、
 前記試料取付台の前記円錐状の先端角度または前記多角錐状の先端角度は 45 度以内であることを特徴とする荷電粒子線顕微鏡用試料ホルダ。

【請求項 5】

請求項 1 において、
 前記回転治具と前記第 2 の回転制御部とはワイヤで接続され、
 前記第 2 の回転制御部は前記第 2 の回転制御部に接続された前記ワイヤの移動を行うことにより、前記第 2 の回転の制御を行うこと
 を特徴とする荷電粒子線顕微鏡用試料ホルダ。

30

【請求項 6】

請求項 1 において、
 前記回転治具は、前記第 2 の回転の回転軸にて回転する第 1 の歯車部を有し、
 前記荷電粒子線顕微鏡用試料ホルダは、前記第 1 の歯車と接続された第 2 の歯車部を有し、
 前記第 2 の回転制御部は前記第 2 の歯車部を回転し、前記第 1 の歯車の回転動作を行うことにより、前記第 2 の回転の制御を行うこと
 を特徴とする荷電粒子線顕微鏡用試料ホルダ。

40

【請求項 7】

試料に荷電粒子線を照射する照射光学系と、
 前記荷電粒子線に対する試料の位置と角度を設定する試料ホルダと、を有し、
 前記試料ホルダは
 先端部に前記試料を取り付ける取付部を有する試料取付台と、
 前記試料取付台を保持する取付台保持部を有する回転治具と、
 前記回転治具を保持する保持部を有する試料保持棒と、

50

前記荷電粒子線の照射軸と直交する方向を軸として -180° から $+180^{\circ}$ の第 1 の回転を前記試料保持棒に与える第 1 の回転制御部と、
 前記荷電粒子線の照射軸と並行する方向を軸として ± 45 度以上の第 2 の回転を前記回転治具に与える第 2 の回転制御部と、を有し、
 前記試料取付台は円錐状または多角錐状の形状であることを特徴とする荷電粒子線顕微鏡。

【請求項 8】

請求項 7 において、
 前記試料保持棒は、前記第 1 の回転軸及び前記第 2 の回転軸のそれぞれに直交する軸の方向に前記回転治具を移動させる回転治具移動部
 を有することを特徴とする荷電粒子線顕微鏡。

10

【請求項 9】

請求項 8 において、
 前記回転治具移動部は、前記試料保持棒と前記回転治具との位置の定めるスライド溝を有し、
 前記スライド溝に沿うようにして、前記それぞれに直交する軸の方向に前記回転治具をスライドさせること
 を特徴とする荷電粒子線顕微鏡。

【請求項 10】

請求項 7 において、
 前記試料取付台の前記円錐状の先端角度または前記多角錐状の先端角度は 45 度以内であることを特徴とする荷電粒子線顕微鏡。

20

【請求項 11】

請求項 7 において、
 前記回転治具と前記第 2 の回転制御部とはワイヤで接続され、
 前記第 2 の回転制御部は前記第 2 の回転制御部に接続された前記ワイヤの移動を行うことにより、前記第 2 の回転の制御を行うこと
 を特徴とする荷電粒子線顕微鏡。

30

【請求項 12】

請求項 7 において、
 前記回転治具は、前記第 2 の回転の回転軸にて回転する第 1 の歯車部を有し、
 前記荷電粒子線顕微鏡用試料ホルダは、前記第 1 の歯車と接続された第 2 の歯車部を有し、
 前記第 2 の回転制御部は前記第 2 の歯車部を回転し、前記第 1 の歯車の回転動作を行うことにより、前記第 2 の回転の制御を行うこと
 を特徴とする荷電粒子線顕微鏡。

【請求項 13】

試料に荷電粒子線を照射する照射光学系と、
 前記荷電粒子線に対する前記試料の位置と角度を設定する試料ホルダとを有する荷電粒子線顕微鏡における荷電粒子線顕微法であって、
 前記荷電粒子線の照射軸と直交する方向を軸とする第 1 の回転を前記試料に与え観察領域の x 軸回り -180° から $+180^{\circ}$ の回転シリーズ像を得る第 1 の工程と、
 前記荷電粒子線の照射軸と並行する方向を軸として ± 45 度以上の第 2 の回転を前記試料に与える第 2 の工程と、
 前記荷電粒子線の照射軸と直交する方向を軸とする第 3 の回転を前記試料に与え観察領域の y 軸回り -180° から $+180^{\circ}$ の回転シリーズ像を得る第 3 の工程と、
 を有することを特徴とする荷電粒子線顕微法。

40

【請求項 14】

請求項 13 において、

50

前記第1の工程と前記第3の工程との間に、
前記第1の回転軸及び前記第2の回転軸のそれぞれに直交する軸の方向に前記試料を移動させる第4の工程と、
を有することを特徴とする荷電粒子線顕微法。

【請求項15】

請求項14において、
前記試料ホルダは、前記第1の回転軸及び前記第2の回転軸のそれぞれに直交する軸の方向に前記試料を移動させる位置の定めるスライド溝を有し、
前記第4の工程は、前記スライド溝に沿うようにして、前記それぞれに直交する軸の方向に前記試料をスライドさせること
を特徴とする荷電粒子線顕微法。

10

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、荷電粒子線を用いて試料の電磁場構造を解析する顕微鏡及び方法に関する。

【背景技術】

【0002】

透過電子顕微鏡像から試料の電磁場構造を3次元的に解析する技術として、非特許文献1に記載のベクトル場トモグラフィがある。ベクトル成分、すなわち各画素に割り当てられた直交3成分(x, y, z)を再構成するには、観察領域のx軸周り任意角度すなわち -180°から+180°の回転シリーズ像と、y軸周り任意角度すなわち -180°から+180°の回転シリーズ像が必要であることが記載されている。また、本分野に関連する技術として、以下の公報、及びその記載箇所を挙げる。

20

【0003】

まず、特許文献1(特表2004-508661号公報)には、次のように記載されている。「分析すべき試料(13)を支持するようにされた試料グリッド(14)をもつ試料クレードル(12)を備えた試料ホルダーと；試料(13)の平面において試料ホルダー内で試料クレードル(12)を回転する移行機構(16)と；試料クレードル(12)を傾斜させる機構と；クライオ移動中試料を保護しそして試料を覆う第1位置から後退位置へ移動できるクライオシャッターとを有する。」(図1及び[0012]参照)。そして、「第1セットのデータは、試料(13)を第1方向決めし、そして試料クレードル(12)をほぼ±70°傾斜させて採取される。そして試料(13)は、運動移行機構(16)を用いて試料(13)の平面において好ましくは90°回転され、そして第2セットの傾斜データはほぼ±70°を通して採取される。」とも記載されている([0015]参照)。

30

【0004】

次に、特許文献2(特開2007-188905号公報)には、次のように記載されている。「試料ホルダ8には、先端と連結されたホルダ軸31自体が回転する機構、傘歯車32と38が設けられている。ホルダ8先端部全体は軸周りに360°回転可能である。試料回転軸33の先端には、傘歯車32が備え付けられている。また、傘歯車32と傘歯車38は噛み合うように接しているので、試料回転軸33を動作させることにより、傘歯車38を360°回転させることができる。試料台35は傘歯車38上の固定台39に装着する。微小試料片36は試料台35の先端に取り付けられている。」(図7及び[0019]参照)。また、「透過電子顕微鏡1試料室にホルダ8を挿入し、試料台35の側面から電子線17を入射させる。すなわち、紙面に垂直方向から電子線17を入射させて透過像を観察する。この際、試料回転軸33を動かすことにより、傘歯車34が回転し、試料36の周囲360°の方向から観察することが可能である。」とも記載されている(図5及び[0016]参照)。

40

【0005】

また、特許文献3(特開2001-256912号公報)には、次のように記載されて

50

いる。「試料ホルダ1の先端部には球体5と、球体5の中心に貫通して固定された試料保持棒6と、球体5を保持する球面座を有する回転内筒3と、球体5の傾斜操作を行なう傾斜用ロッド4とが設けられており、先端部は電子顕微鏡の電子レンズ11の間に挿入されている。試料7は試料保持棒6の電子ビーム12側に保持される。試料保持棒6の一端に傾斜用ロッド4の先端の斜面を押し付けてZ軸とY軸の傾斜を操作し、傾斜用ロッド4を退避させ所定の傾斜方向に斜面を回転させて所定の傾斜角まで再び押し付けて傾斜方向を変更する。」(図1及び[要約]の[解決手段]参照)。また、「試料ホルダ1の大气側にはユーセントリック型の移動機構を具備するサイドエントリー型の試料移動装置の二つの回転駆動機構と一つの直進駆動機構が設けられている。このうち一つの回転駆動機構は360度のX軸の回転 x (シータ x) に用いられ、回転内筒3に接続されている。また、他の一つの回転駆動機構と直進駆動機構とはZ軸、Y軸の傾斜操作 z (シータ z)、 y (シータ y) に用いられ、回転内筒3の内部に設置された傾斜用ロッド4に接続されている。」とも記載されている([0013]参照)。

10

20

30

40

50

【0006】

そして、特許文献4(特開平8-304243号公報)には、次のように記載されている。「試料固定棒11の先端部にはリング16と円板17とが設けられている。リング16は、図5(b)の矢印Kに示されるように試料固定棒11の軸線に直交する軸線回りに傾動可能に、試料固定棒11の先端部に二点で支持されており、図に示されるように試料固定棒11の軸線をX軸とした場合のX軸を含む面に対して90度まで傾斜可能にされている。また円板17は、リング16に回転機構を介して装着され、リング16の端面内で360度の回転が可能にされている。」(図5及び[0023]参照)。

【先行技術文献】

【特許文献】

【0007】

【特許文献1】特表2004-508661号公報

【特許文献2】特開2007-188905号公報

【特許文献3】特開2001-256912号公報

【特許文献4】特開平8-304243号公報

【特許文献5】特開2010-198985号公報

【特許文献6】特許第3547143号公報

【特許文献7】特開2009-110734号公報

【非特許文献】

【0008】

【非特許文献1】C. Phatak, M. Beleggia and M. De Graef: Ultramicroscopy, Vol. 108, (2008) 503-513.

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0009】

本発明の目的は、観察領域のx軸周り-180°から+180°の回転シリーズ像と、y軸周り-180°から+180°の回転シリーズ像を撮影できる装置を提供し、観察領域の電磁場構造解析精度を大幅に向上させることにある。その撮影手順としては、以下の手順がある。(a)顕微鏡光軸と直行する第1の回転軸と試料のx軸とを平行に設定する。(b)第1の回転角度制御機構を用い、観察領域のx軸回り-180°から+180°の回転シリーズ像を撮影する。(c)第1の回転軸と試料のy軸とを平行に設定する。(d)第1の回転角度制御機構を用い、観察領域のy軸回り-180°から+180°の回転シリーズ像を撮影する。なお、上記の手順を行うとき、前述した従来技術においては目的を達成することができない。以下にその理由を説明する。

【0010】

まず、特許文献1の図1に示す試料ホルダーを用いた場合について考察する。(a)試

料クレードル(12)の傾斜軸を顕微鏡光軸と直行する第1の回転軸とし、これに試料のx軸を合わせることにはできる。しかし、(b)試料クレードル(12)を傾斜させても観察領域のx軸周り $\pm 70^\circ$ 範囲の回転シリーズ像しか得られず、 -180° から $+180^\circ$ の回転シリーズ像を得ることはできない。 $\pm 70^\circ$ 以上回転させるとクレードル(12)や移動機構(16)などが入射電子線もしくは透過電子線の光路を塞ぐためである。

【0011】

次に、特許文献2の図7に示す試料ホルダを用いた場合について考察する。(a)ホルダ31の回転軸を顕微鏡光軸と直行する第1の回転軸とし、これに試料のx軸を合わせることにはできる。しかし、(b)ホルダ31を回転させても観察領域のx軸周り -180° から $+180^\circ$ の回転シリーズ像を得ることはできない。傘歯車34などが入射電子線もしくは透過電子線の光路を塞ぐ角度範囲が存在するためである。そして、同特許文献2の図5に示す試料ホルダを用いた場合についても考察する。(a)傘歯車34の回転軸を顕微鏡光軸と直行する第1の回転軸として用い、これに試料のx軸を合わせることができる。そして、(b)傘歯車34を回転させることで、観察領域のx軸周り -180° から $+180^\circ$ の回転シリーズ像を得ることができる。しかし、(c)ホルダ31の回転軸は顕微鏡光軸と直交する方向に固定されているため、試料のy軸を傘歯車34の回転軸と平行に設定することが出来ない。

10

【0012】

また、特許文献3の図1に示す試料ホルダを用いた場合について考察する。(a)xの回転軸を顕微鏡光軸と直行する第1の回転軸とし、これに試料のx軸を合わせることができる。(b)回転内筒3を回転させることでxを 360° 変化させることができるので、観察領域のx軸周り -180° から $+180^\circ$ の回転シリーズ像を得ることができる。しかし、(c)試料のy軸を第1の回転軸と平行に設定することができない。なぜなら、y及びzは \pm 数 10° しか変化できないからである。y及びzの変化範囲は球体5を支える回転内筒3に試料保持棒6が接触する角度で制限される。y及びzの回転角度範囲を $\pm 45^\circ$ まで拡大するために、回転内筒3先端の穴径を大きくすると、試料を傾斜させるために傾斜用ロッド4を押しつけると球体5が飛び出すことになる。したがって、試料を顕微鏡光軸と平行な軸回りに $\pm 45^\circ$ 回転できないので、試料のy軸と第1の回転軸を平行に設定することができない。

20

【0013】

そして、特許文献4の図5に示す試料ホルダを用いた場合について考察する。(a)試料固定棒11の軸線を顕微鏡光軸と直行する第1の回転軸とし、これに試料のx軸を合わせることができる。(b)試料固定棒11を回転させることで、観察領域のx軸周り -180° から $+180^\circ$ の回転シリーズ像を撮影することができる。ただし、撮影できるのは円板17の法線が第1の回転軸と平行な場合のみである。(c)試料固定棒11を回転させることで、図5(b)で矢印Kに示される回転の回転軸を顕微鏡光軸と平行に設定した後、円板17をK方向に 90° 回転させることで、試料のy軸を第1の回転軸に合わせることができる。しかし、この回転によって円板17の法線が第1の回転軸と直行してしまう。(d)試料固定棒11を回転させると、円板17が試料に入射する電子線もしくは試料から透過する電子線の光路を塞ぐため、観察領域のy軸周り -180° から $+180^\circ$ の回転シリーズ像を得ることはできない。

30

40

【0014】

以上、従来技術では観察領域のx軸周りの -180° から $+180^\circ$ の回転シリーズ像と、y軸周りの -180° から $+180^\circ$ の回転シリーズ像を撮影できず、本願発明のように3Dベクトル場トモグラフィを好適に解析することが困難であった。

【課題を解決するための手段】

【0015】

上記課題を解決するために、本願における荷電粒子線顕微鏡用試料ホルダは、先端部に試料を取り付ける取付部を有する試料取付台と、前記試料取付台を保持する取付台保持部を有する回転治具と、前記回転治具を保持する保持部を有する試料保持棒と、前記保持棒

50

の延在方向を軸として -180° から $+180^\circ$ の第1の回転を前記試料保持棒に与える第1の回転制御部と、前記第1の回転の回転軸に直交する方向を軸として ± 45 度以上の第2の回転を前記回転治具に与える第2の回転制御部と、を有し、前記試料取付台は円錐状または多角錐状の形状であることを特徴とする。

【0016】

また別の一例として、本願における荷電粒子線顕微鏡は、試料に荷電粒子線を照射する照射光学系と、前記荷電粒子線に対する試料の位置と角度を設定する試料ホルダと、を有し、前記試料ホルダは先端部に前記試料を取り付ける取付部を有する試料取付台と、前記試料取付台を保持する取付台保持部を有する回転治具と、前記回転治具を保持する保持部を有する試料保持棒と、前記荷電粒子線の照射軸と直交する方向を軸として -180° から $+180^\circ$ の第1の回転を前記試料保持棒に与える第1の回転制御部と、前記荷電粒子線の照射軸と並行する方向を軸として ± 45 度以上の第2の回転を前記回転治具に与える第2の回転制御部と、を有し、前記試料取付台は円錐状または多角錐状の形状であることを特徴とする。

【0017】

また別の一例として、本願における荷電粒子線顕微鏡は、試料に荷電粒子線を照射する照射光学系と、前記荷電粒子線に対する前記試料の位置と角度を設定する試料ホルダとを有する荷電粒子線顕微鏡における荷電粒子線顕微鏡であって、前記荷電粒子線の照射軸と直交する方向を軸とする第1の回転を前記試料に与え観察領域のx軸回り -180° から $+180^\circ$ の回転シリーズ像を得る第1の工程と、前記荷電粒子線の照射軸と並行する方向を軸として ± 45 度以上の第2の回転を前記試料に与える第2の工程と、前記荷電粒子線の照射軸と直交する方向を軸とする第3の回転を前記試料に与え観察領域のy軸回り -180° から $+180^\circ$ の回転シリーズ像を得る第3の工程と、を有することを特徴とする。

【発明の効果】

【0018】

本装置及び方法を用いることで、測定試料における観察領域の電磁場構造解析精度を大幅に向上させることができる。

【図面の簡単な説明】

【0019】

【図1】実施例1で用いた試料ホルダの構成図である。

【図2】電子線干渉顕微鏡の構成図である。

【図3】針状試料台の構成図である。

【図4】試料の観察方向と観察領域11を示す説明図であり、(a)は実際の試料に近い形状における説明図、(b)は説明用に簡素化した形状における説明図である。

【図5】試料ステージの構成図である。

【図6】実施例1で用いた試料ホルダの構成図であり、(a)は試料のx軸回りの回転シリーズ像を撮影する際の、(b)は試料のy軸回りの回転シリーズ像を撮影する際の、(c)は試料を狭ギャップレンズに挿入して観察する際の、(d)は試料加工装置で使用する際の各部品の配置を示している。

【図7】(a)は実施例1、2、(b)は実施例3、(c)は実施例4で用いた第1の回転治具の構成図である。

【図8】実施例1で用いた試料ホルダの構成図である。

【図9】実施例1で用いた試料ホルダの構成図であり、(a)は試料のx軸回りの回転シリーズ像を撮影する際の、(b)は試料のy軸回りの回転シリーズ像を撮影する際の、(c)は試料を狭ギャップレンズに挿入して観察する際の、(d)は試料加工装置で使用する際の各部品の配置を示している。

【図10】スライド棒の構成図である。

【図11】試料のx軸回り及びy軸回りの回転シリーズ像を撮影するためのフローチャートである。

10

20

30

40

50

【図 1 2】実施例 2 で用いた試料ホルダの構成図である。

【図 1 3】実施例 3 で用いた試料ホルダの構成図である。

【図 1 4】実施例 3 で用いた試料ホルダの構成図であり、(a)は試料の x 軸回りの回転シリーズ像を撮影する際の、(b)は試料の y 軸回りの回転シリーズ像を撮影する際の、(c)は試料を狭ギャップレンズに挿入して観察する際の、(d)は試料加工装置で使用する際の各部品の配置を示している。

【図 1 5】(a)は第 2 の回転冶具の、(b)は第 3 の回転冶具の、(c)は第 4 の回転冶具の構成図である。

【図 1 6】実施例 4 で用いた試料ホルダの構成図である。

【図 1 7】実施例 4 で用いた試料ホルダの構成図であり、(a)は試料の x 軸回りの回転シリーズ像を撮影する際の、(b)は試料の y 軸回りの回転シリーズ像を撮影する際の、(c)は試料を狭ギャップレンズに挿入して観察する際の、(d)は試料加工装置で使用する際の各部品の配置を示している。

【図 1 8】実施例 5 で用いた試料ホルダの構成図である。

【図 1 9】実施例 6 で用いた試料ホルダの構成図であり、(a)は試料の x 軸回りの回転シリーズ像を撮影する際の、(b)は試料の y 軸回りの回転シリーズ像を撮影する際の、(c)は試料を狭ギャップレンズに挿入して観察する際の、(d)は試料加工装置で使用する際の各部品の配置を示している。

【図 2 0】イオンビーム加工装置の構成図である。

【図 2 1】走査透過電子顕微鏡の構成図である。

【発明を実施するための形態】

【実施例 1】

【0020】

実施例 1 では、突起状に加工された試料を図 1 の試料ホルダに装着し、観察領域の x 軸回り - 180° から + 180°、及び y 軸回り - 180° から + 180° の回転シリーズ像を電子線干渉顕微鏡で撮影する事例を示す。

【0021】

図 2 に 2 段電子線パイプリズム干渉光学系を構成した電子線干渉顕微鏡を模式的に示す。電子源としての電子銃 1 が電子線の流れる方向の最上流部に位置し、電子線は加速管 40 にて所定の速度にされた後、照射光学系（第 1 照射（コンデンサ）レンズ 41、第 2 照射（コンデンサ）レンズ 42）を経て試料ホルダ 100 に載置された試料 3 に Z 方向から照射される。試料 10 を透過した電子線は、対物レンズ 5 にて結像される。対物レンズ 5 の下側に第 1 の電子線パイプリズム 91 が配置され、第 1 の結像レンズ 61 を介した下側に第 2 の電子線パイプリズム 93 が配置されている。第 1、第 2 の電子線パイプリズム（91、93）により干渉縞間隔 s や干渉領域幅 W が定まった電子線干渉顕微鏡像は、第 2、第 3、第 4 の結像レンズ（62、63、64）を経て所定の倍率に調整され、観察記録面 89 で画像観察・記録媒体 79（例えば TV カメラや CCD カメラ）により記録される。その後、演算処理装置 77 により振幅像、位相像などに再生され、例えばモニター 76 などに表示される。図 2 の装置を用いた電子線干渉顕微鏡像の撮影方法、及び電子線干渉顕微鏡像からの振幅像、位相像の再生方法は、例えば、特許文献 5（特開 2010 - 198985 号公報）に記載されている。

【0022】

図 3 に試料 10 の形状と、試料 10 を設置する針状試料台 150 の構造を示す。試料 10 は台座部 13 と観察領域 11 を内包する突起部 12 とを持ち、針状試料台 150 の先端に設置される。針状試料台 150 のテーパ角は好ましくは 45 度以下、今回は 30° の円錐状もしくは多角錐状になっているテーパ部 151 と、針状試料台 150 をピンセットなどでハンドリングする際に用いるグリップ部 152 と、針状試料台 150 と第 1 の回転冶具 140 との脱着に用いるネジ部 153 と、ネジ部 153 の直径よりも小さい直径を持つ円柱状もしくは多角柱状のガイド部 154 とを持つ。汎用のピンセットはピンセット先端の内側は平面になっているが、針状試料台 150 のグリップ部 152 に適合する溝が

10

20

30

40

50

ピンセット先端の内側に作成された専用ピンセットを用いると、針状試料台 150 のハンドリングが容易になる。また、針状試料台 150 を第 1 の回転治具 140 に挿入する際、ネジ部 153 よりも直径の小さいガイド部 154 を先にネジ穴 142 に挿入することで、ネジ部 153 の挿入が容易になる。

【0023】

なお、針状試料台 150 の円錐状もしくは多角錐状とは、針状試料台 150 の試料側先端部が、ネジ部 153 側よりも細くなる形状を示している。これは、観察領域に入射または出射する荷電粒子線の行路を妨げないようにするためである。

【0024】

また、針状試料台 150 のテーパ角を 45° 以下にするのは、図 4 にて後述するように、観察領域の x 方向投影領域 14 及び y 方向投影領域 15 に台座部 13 や針状試料台 150 が入り込まないようにするためである。すなわち、突起部 12 を延長するなどの対策をすれば、テーパ角 45° 以上でも台座部 13 や針状試料台 150 を投影領域の範囲外にすることが可能である。一方、針状試料台 150 のテーパ角を 45° 以下にすれば、突起部 12 の延長が抑制され、試料破損の可能性を低減することが出来る。

【0025】

図 4 (a) に、試料 10 の観察方向と観察領域 11 を示す。試料 10 に固定された座標系 x y z (他の図面でも同様とする) は、突起部 12 長軸と x 軸のなす角が $+45^\circ$ に、突起部 12 長軸と y 軸のなす角が -45° に、突起部 12 長軸と z 軸のなす角が垂直になるように設定する。なお、透過電子像を良好に得るために、突起部 12 の直径は 100 nm から 300 nm の範囲内に細線化されているのが好ましい。また、x 軸周り及び y 軸回りの回転シリーズ像撮影中に台座部 13 や針状試料台 150 が入射電子線もしくは透過電子線の光路を塞がないように、すなわち、観察領域の x 方向投影領域 14 及び y 方向投影領域 15 に台座部 13 や針状試料台 150 が入り込まないように、観察領域 11 と針状試料台 150 の距離を充分離しておく必要がある。なお、台座部 13 や針状試料台 150 が入り込んでしまった場合は、FIB (集束イオンビーム加工装置、試料加工については実施例 5 に記載) にて入り込む箇所を除去することでも解消が可能である。

【0026】

実際の観察では、図 4 (a) に示すように、突起部 12 長軸と針状試料台 150 長軸は平行に設定されているが、以後の説明で試料 10 の xyz 方向を明示する際には、図 4 (b) に示す円柱で、すなわち円柱の長軸が x 軸、短軸が y 軸になっている円柱で試料 10 を示す。

【0027】

針状試料台 150 を装着する試料ホルダ 100 の先端部の構造を図 1 に示す。筐体に固定された座標系 X Y Z (他の図面でも同様とする) は、電子線の入射方向を Z 方向に、試料ホルダ 100 の挿入方向を X 方向に設定する。試料ホルダ 100 は、保持筒 110 と、保持筒の内部に配置された保持棒 120 と、保持棒の先端に配置されたスライド治具 130 と、スライド治具の先端に配置された第 1 の回転治具 140 と、回転治具の外周に試料を設置させる針状試料台 150 から構成される。保持筒 110 は電子線が通過できる開口部 111 を持つ。保持棒 120 は、保持筒 110 とは独立に、保持筒 110 内で、第 1 の回転軸回りに 360° 回転可能である。保持棒 120 の回転を制御する第 1 の回転制御機構には、例えば保持棒 120 を回転させるパルスモータ (図示せず) を用いる。また、第 1 の回転治具 140 は保持筒 110 内で、第 1 の回転軸と直交する第 2 の回転軸回りに少なくとも 90° の回転 (本実施例では $\pm 90^\circ$ 以上の回転構造で説明している) が可能である。第 1 の回転治具 140 の回転を制御する第 2 の回転制御機構は、第 1 の回転治具 140 の外周に掛けられたワイヤー 160 と、ワイヤー 160 が掛けられた第 2 の回転治具 180 と、ワイヤー 160 の一部が固定されたスライド棒 170 から構成され、スライド棒 170 を X 方向に移動させることで第 1 の回転治具 140 および第 2 の回転治具 180 を回転させる。スライド棒 170 の移動には、例えばリニアアクチュエータ (図示せず) を用いる。

10

20

30

40

50

【 0 0 2 8 】

次にスライド治具 1 3 0 の役割を説明する。スライド治具 1 3 0 は試料 1 0 を第 1 の回転軸上に設置するために用いる。スライド治具 1 3 0 が必要になる理由を以下に示す。試料 1 0 の x 軸もしくは y 軸を第 1 の回転軸と平行にするために、第 1 の回転治具 1 4 0 を回転させて試料 1 0 の方向を変化させる。現在の機械加工技術では、第 1 の回転治具 1 4 0 の直径を数 mm 以下にすることは困難であり、第 2 の回転軸回りに試料 1 0 を回転させると、試料 1 0 と第 1 の回転軸との距離が 1 mm 以上変化することがわかる。試料 1 0 を第 1 の回転軸上に設置しないと、第 1 の回転軸回りの回転によって試料 1 0 が Y Z 面内で移動し、視野から外れてしまう。数 1 0 μm の視野外れは試料ステージの Y Z 移動で補正することは可能であるが、汎用電子顕微鏡用の試料ステージ構造では Y Z 方向に 1 mm 以上の移動させることは困難である。そこで、スライド治具 1 3 0 を付加し、スライド治具 1 3 0 を用いて試料 1 0 を第 1 の回転軸上に移動させる構造にした

図 5 は、試料ステージの平行移動機構の構成図である。試料ステージで試料 1 0 を Y Z 方向に 1 mm 以上移動させることが困難な理由を、図 5 を用いて説明する。試料 1 0 の X、Y、Z 方向の位置はパルスモータ及びエンコーダ（図示せず）からなる 3 個のリニアアクチュエータ 1 0 1 ~ 1 0 3 を用いて制御する。試料 1 0 の X 方向移動は、試料ホルダ全体 1 0 0 をリニアアクチュエータ 1 0 1 で平行移動させることで実行される。試料 1 0 の Y 方向移動は、試料ホルダ先端のピボット 1 0 4 を支点にし、試料ホルダ 1 0 0 の他端をリニアアクチュエータ 1 0 2 で Y 方向に移動させることで実現する。

【 0 0 2 9 】

そのため、リニアアクチュエータ 1 0 2 を動作させると、Y 方向移動だけでなく試料傾斜が発生する。Z 方向移動も、試料ホルダ先端のピボット 1 0 4 を支点にし、試料ホルダ 1 0 0 の他端をリニアアクチュエータ 1 0 3 で移動させるため、Z 方向移動と共に試料傾斜が発生する。汎用の試料ホルダではピボット 1 0 4 から試料 1 0 までの距離は 1 0 mm 程度であることから、Y 方向もしくは Z 方向に試料を 1 mm 移動させると、試料 1 0 が $\sin^{-1}(1/10) = 5.7^\circ$ も傾斜する。

【 0 0 3 0 】

トモグラフィでは、試料の回転軸が顕微鏡光軸と直行していることを仮定しており、撮影中の回転軸ずれは再構成像のアーティファクトの原因になる。また、汎用の試料ステージは対物レンズ内に試料ホルダ 1 0 0 を挿入することを想定して設計されており（実施例 7 参照）、X 方向及び Y 方向の移動範囲は ± 1 mm 程度、Z 方向の移動範囲は ± 0.5 mm 程度に制限されている場合が多い。試料回転による視野にげを試料ステージの X Y Z 移動機構のみで補正するには、試料ステージの大幅な改造が必要になる。

【 0 0 3 1 】

図 6 (a) に x 軸回りの - 1 8 0 ° から + 1 8 0 ° の回転シリーズ像を撮影する際の、試料ホルダ先端部の各部品の配置を示す。まず、試料 1 0 が固定された針状試料台 1 5 0 を第 1 の回転治具 1 4 0 に装着する。試料 1 0 に固定された座標系 x y z における x 軸が第 1 の回転軸 (X 軸) と平行になるように、第 1 の回転治具 1 4 0 を第 2 の回転軸回りに回転させた後、スライド治具 1 3 0 を用いて試料 1 0 を第 1 の回転軸上にスライドして移動させる。第 1 の回転軸回りに試料 1 0 を回転させることで、観察領域 1 1 の x 軸回りの - 1 8 0 ° から + 1 8 0 ° の回転シリーズ像を撮影する。図 6 (b) に y 軸回りの - 1 8 0 ° から + 1 8 0 ° の回転シリーズ像を撮影する際の、試料ホルダ先端部の各部品の配置を示す。試料 1 0 の y 軸が第 1 の回転軸 (X 軸) と平行になるように、第 2 の回転軸回りに試料 1 0 を回転させた後、スライド治具 1 3 0 を用いて試料 1 0 を第 1 の回転軸上にスライドして移動させる。第 1 の回転軸回りに試料 1 0 を回転させることで、観察領域 1 1 の y 軸回りの - 1 8 0 ° から + 1 8 0 ° の回転シリーズ像を撮影する。

【 0 0 3 2 】

次に以下、各部品の詳細を示す。

【 0 0 3 3 】

第 1 の回転治具 1 4 0 は回転治具の回転軸に用いるピボット部 1 4 1 と、針状試料台 1

10

20

30

40

50

50の脱着に用いるネジ穴部142と、ワイヤーをかける溝部143を持つ(図7(a)参照)。第2の回転治具180は回転治具の回転軸に用いるピボット部181と、ワイヤーをかける溝部183を持つ(図15(a)参照)。スライド治具130は、第1の回転治具140のピボット部141を受ける軸受け部131と、スライドガイド凸部132とを持つ(図8参照)。支持棒120はスライドガイド凸部132を受けるスライドガイド部121と、第2の回転治具180のピボット部181を受ける軸受け部122を持つ。スライド治具130と支持棒120との角度を一定に保つために、スライドガイド凸部132及びスライドガイド部121は平面で接触している。また、回転治具の角度 θ_2 が 0° のときにはスライド凸部132がスライドガイド部121の右端に(図9(a)参照)、 90° のときには左端に(図9(b)参照)接触させると、試料が第1の回転軸上に配置されるように設計されている。

10

【0034】

また図9から、スライド治具130と移動させるとワイヤ-160の経路が変化することが分かる。したがって、ワイヤ-160に伸縮部材を取り付け、ワイヤーの弛みや切断を防止すると良い。そこで一例として、ワイヤ-160の一端を伸縮部161(ここではばね材)に接続し、伸縮部161をスライド棒170に接続する構成にした(図10参照)。またワイヤ-160の他端をスライド棒に設けられた穴部171に通し、ワイヤ-160の長さを微調整した後、ワイヤ抑えネジ172で抑え込む構造にした。

【0035】

最後に撮影手順を説明する。撮影手順は図11に示す、4つの手順から構成される。(a)顕微鏡光軸と直行する第1の回転軸と試料のx軸とを平行に設定する。(b)第1の回転角度制御機構を用い、観察領域のx軸回り -180° から $+180^\circ$ の回転シリーズ像を撮影する。(c)第1の回転軸と試料のy軸とを平行に設定する。(d)第1の回転角度御機構を用い、観察領域のy軸回り -180° から $+180^\circ$ の回転シリーズ像を撮影する。

20

【0036】

まず、(a)の手順の詳細を説明する。ここでは試料ホルダ100に試料10が装着された状態から開始する。針状試料台150の長軸と第1の回転軸とのなす角がほぼ -45° になるように、第1の回転治具140を第2の回転軸回りに回転させる。スライド治具130を用い、試料10をほぼ第1の回転軸上に移動させた後、試料ホルダ100を試料室内に挿入する。試料室内での試料10の位置を確認し、まず、第2の回転軸が顕微鏡光軸と平行になるように調整する。こうして調整された試料10において、試料10に固定されたxyz方向は、筐体に固定されたXYZ方向と一致する。また、この時の支持棒120の回転角度 θ_1 を 0° 、第1の回転治具140の回転角度 θ_2 を 0° とする。なお、この時の試料10の透過像を幾つかの倍率で撮影しておく、あとで試料10のyを第1の回転軸と平行に設定する時の確認に用いることができる。そして、(b)の手順として、支持棒120を第1の回転軸回りに回転させ、観察領域のx軸回りの -180° から $+180^\circ$ の回転シリーズ像を撮影する。

30

【0037】

次に(c)の手順の詳細を説明する。試料ホルダ100を試料室から取り出し、針状試料台150の長軸と第1の回転軸とのなす角がほぼ $+45^\circ$ になるように、すなわち第1の回転治具140を第2の回転軸回りにほぼ 90° 回転させる。スライド治具130を用い、試料10をほぼ第1の回転軸上に移動させた後、試料ホルダ100を試料室内に挿入する。なお、本実施例ではスライド治具130の移動を試料室外で行っているが、この理由としては、試料室内でスライド治具130を移動させる機構を省略し、試料室内のスペースを確保する為である。すなわち、設置するスペースが確保できる場合は、スライド治具130の移動を試料室内で実行してよい。試料室内での試料10の位置を確認した後、(a)と同じく、第2の回転軸が顕微鏡光軸と平行になるように調整する。そして、試料10のy軸が第1の回転軸と平行になるように、第2の回転制御機構を用いて微調整する。微調整において、 $\theta_1 = 0^\circ$ 、 $\theta_2 = 0^\circ$ で撮影した画像を参照画像にし、現設定で撮影

40

50

された画像の回転角度を画像処理で測定し、 2 が 90° になるように調整する。なお、この微調整を試料室外で光学顕微鏡を用いて実行することもできるが、試料ホルダを出し入れする際に試料ホルダ先端の各 부품の配置がずれてしまう可能性があるため、回転シリーズ像を撮影する直前に試料室内で微調整することが望ましい。微調整後、(d)の手順として、支持棒120を第1の回転軸回りに回転させ、観察領域のx軸回りの -180° から $+180^\circ$ の回転シリーズ像を撮影する。

【0038】

x軸周りの -180° から $+180^\circ$ の回転シリーズ像と、y軸周りの -180° から $+180^\circ$ の回転シリーズ像から観察領域の3次元磁場構造を再構成する技術は、例えば、非特許文献1に記載されている。なお、非参照文献1ではローレンツ像から再生した回転シリーズ位相像を用いて3次元磁場構造を再構成する技術を示しているが、同じ技術を電子線干渉顕微鏡像から再生した回転シリーズ位相像に適用することは可能である。また、ベクトル場トモグラフィ以外の、x軸周りの -180° から $+180^\circ$ の回転シリーズ像と、y軸周りの -180° から $+180^\circ$ の回転シリーズ像から観察領域の3次元構造を解析する他の解析法にも本発明を用いることも可能である。

【実施例2】

【0039】

実施例1で用いた試料ホルダは最小限の部品で構成された構成である。実施例2では、回転角度の制御性を向上させるために、実施例1で用いた試料ホルダに幾つかの部品を付加した図12の試料ホルダを用いる。なお、試料ホルダ以外、すなわち観察試料、電子線干渉顕微鏡などは実施例1と同じものを用いるので、詳細な記述は省略する。

【0040】

まず、図1では第1の回転治具140のピボット部141をスライド治具130の軸受け部131に差し込んである構造である。それに対して図12では、スライド治具130を複数の部品130₁、130₂、130₃に分け、第1の回転治具140を両サイドから挟み込む構造にした。スライド治具130₁及び130₂は第1の回転治具140のピボット部141を受ける軸受け部131₁、131₂を各々持ち、第1の回転治具140を両サイドから挟み込む。スライド治具130₁と130₂の間には、両者の距離を規定するスライド治具130₃が設けられている。スライド治具130₁にはネジ穴133₁が、スライド治具130₂、130₃には穴133₂、133₃が各々設けられており、ネジ134を用いてスライド治具130を組み立てることができる。このように、両サイドから挟み込むことにより、図1において第1の回転治具140がスライド治具130から抜け落ちる可能性を低減できる。また、回転治具141の回転軸すなわち第2の回転軸がワイヤ-160の張力で傾き、第1の回転軸と第2の回転軸が直交しなくなることを、軸受け部131₁、131₂を有することにより防止することができる。

【0041】

支持棒120も複数の部品120₁、120₂に分け、スライド治具130を両サイドから挟み込む構造にした。各々の支持棒120₁、120₂にはスライドガイド部121₂、121₂が設けられ、各々に対応するスライド凸部132₁、132₂がスライド治具130₃に設けられている。また、支持棒120₁にはネジ穴123₁が、支持棒120₂には穴123₂が設けられており、ネジ124を用いて組み立てることができる。回転治具の角度 2 が 0° のときにはスライド凸部132がスライドガイド部121の右端に、 90° のときには左端に接触させると、試料が第1の回転軸上に配置されるように設計されている。ネジ124を緩めてスライド治具130を移動させた後、ネジ124を締めてスライド治具130の位置を規定する。また、支持棒スライド治具130を移動させてもスライド治具130と支持棒120の角度が一定に保たれるように、スライドガイド凸部132及びスライドガイド部121は平面で接触している。また、スライド治具130₁、130₂の下面と支持棒120₁、120₂の上面が平面で接触しており、これもスライド治具130と支持棒120の角度を一定に

保つ機能を持つ。

【0042】

なお、回転治具・スライド治具・支持棒の構造以外は実施例1と同様であるので、撮影手順などの説明は省略する。

【実施例3】

【0043】

実施例3では、突起状に加工された試料を図14の試料ホルダに装着し、観察領域のx軸回り-180°から+180°、及びy軸回り-180°から+180°の回転シリーズ像を電子線干渉顕微鏡で撮影する事例を示す。なお、試料ホルダ以外、すなわち観察試料、電子線干渉顕微鏡などは実施例1と同じものを用いている。

10

【0044】

実施例1、実施例2では第1の回転治具140の外周に掛けたワイヤ-160で第1の回転治具140を回転させる構造を用いた。それに対し、図14の構造では第1の回転治具140をワイヤ-160ではなく歯車で回転させる構造を用いている。具体的には第1の回転治具140の外周に第1の歯車部144を設けた(図7(b)参照)。更に、第1の歯車部144と噛み合うように加工された第3の歯車部191-2を持つ第3の回転治具191(図13(a)参照)と、第3の歯車部191-2と噛み合うように加工された第4の歯車部192-2を持つ第4の回転治具192(図13(b)参照)を用いる。第4の回転治具192にはワイヤ-160が掛けられる溝部192-3も設けられている。ワイヤ-160は第4の回転治具192と第2の回転治具180に掛けられており、ワイヤ-160の一部が固定されたスライド棒170をX方向に移動させることで第4の回転治具192および第2の回転治具180を回転させる。第4の回転治具192の回転が歯車を介して第3の回転治具を回転させ、これが第1の回転治具140を回転させる。本構成により、第1の回転治具140の半径が非常に小さい場合において、第1の回転治具140に掛けたワイヤ-160の曲率が高くなり、ワイヤ-160が切断する可能性を低減することができる。

20

【0045】

次に以下、各部品の詳細を示す。

【0046】

スライド治具130は、第1の回転治具140のピボット部141を受ける軸受け部131と、第3の回転治具191のピボット部を受ける軸受け部135と、ガイド穴137とを持つ。支持棒120は第1の回転治具140のピボット部141を受け、かつピボット部の位置をスライドさせるスライド軸受け部129と、第2の回転治具のピボット部181を受ける軸受け部122と、第3の回転治具191のピボット部191-1を受ける軸受け部125、第4の回転治具192のピボット部192-1を受ける軸受け部126と、ガイド穴127を持つ。第1の回転治具140の角度 θ_2 が0°のときには第1の回転治具140のピボット部141が軸受け部129の右端に(図14(a)参照)、90°のときには左端に(図14(b)参照)接触させると、試料10が第1の回転軸上に配置されるように設計されている。今回の試料ホルダではスライド治具130の位置をネジ締めで規定できないため、ガイドピン128を支持棒120のガイド穴127-1とスライド治具130のガイド穴137に通すことで、スライド治具130の位置を規定することにした。

30

40

【0047】

図12(a)の配置($\theta_2 = 0^\circ$)ではスライドピン128はガイド穴137-1に、図12(b)の配置($\theta_2 = 90^\circ$)ではガイド穴137-3に、図12(c)の配置($\theta_2 = 45^\circ$)ではガイド治具127-2に通される。

【0048】

回転治具、スライド治具、支持棒の構造以外は実施例1と同様であるので、撮影手順などの説明は省略する。

【実施例4】

50

【0049】

実施例4では、突起状に加工された試料を図16の試料ホルダに装着し、観察領域のx軸回り-180°から+180°、及びy軸回り-180°から+180°の回転シリーズ像を電子線干渉顕微鏡で撮影する事例を示す。なお、試料ホルダ以外、すなわち観察試料、電子線干渉顕微鏡などは実施例1と同じものを用いている。

【0050】

実施例1、2、3では図5の試料ステージ、すなわちY微動範囲及びZ微動範囲が±1mm以下に制限された試料ステージの使用を想定し、スライド治具130を用いて試料10を第1の回転軸上に設置する機能を付加した試料ホルダを用いた。別の構造として、Y微動範囲及びZ微動範囲が±1mm以上の試料ステージを用いた場合、試料ホルダ先端の構造を図16のように簡素化することができる。図16は第1の回転治具140を傘歯車で回転させる例である。第1の回転治具140の外周に加工された第1の歯車部145(図7(c)参照)と、第1の傘歯車部145と噛み合うように設置された第5の歯車部193-1を持つ第5の回転治具193と、第5の回転治具193を回転させるモーター(図示せず)から構成される。モーターを回転させることで第5の回転治具193を回転させ、この回転で第1の回転治具140を回転させる。なお、回転治具、スライド治具、支持棒の構造以外は実施例1と同様であるので、撮影手順などの説明は省略する。

10

【実施例5】

【0051】

実施例5では、突起状に加工された試料を図18の試料ホルダに装着し、観察領域のx軸回り-180°から+180°、及びy軸回り-180°から+180°の回転シリーズ像を電子線干渉顕微鏡で撮影する事例を示す。なお、試料ホルダ以外、すなわち観察試料、電子線干渉顕微鏡などは実施例1と同じものを用いた。

20

【0052】

実施例1、2、3、4で示した試料ホルダでは、第2の回転制御機構を用い、第1の回転治具140の第2の回転軸回りの回転角度 θ_2 を微調整することができる。しかしながら、必要な角度設定精度が得られれば、試料室外で θ_2 を設定した試料ホルダを試料室に挿入し、そのまま回転シリーズ像を撮影することも可能である。例えば、図18に示す試料ホルダを用いた場合、回転軸140に設けられたガイド穴147とスライド治具130に設けられたガイド穴137にガイドピン146を通すことで、 θ_2 を設定する。図19に示すように、 $\theta_2 = 0^\circ$ の時は147-1に、 $\theta_2 = 90^\circ$ の時は147-3に、 $\theta_2 = +45^\circ$ の時は147-2に、 $\theta_2 = -45^\circ$ の時は147-4にガイドピン146を通すことで所定の角度に設定できる。

30

【0053】

そして、図には示さないが、ガイドピン146を用いて第1の回転治具の回転角度 θ_2 を設定する方式は、第1の回転治具140を両サイドから挟み込む構造でも利用できる。また、図18では第1の回転治具140に複数のガイド穴147を設け、スライド治具130に一つのガイド穴137を設けているが、第1の回転治具140に一つのガイド穴147を設け、スライド治具130に複数のガイド穴137を設けても同じことが実行できる。

40

【0054】

なお、今回の試料ホルダでは非常に小さい部品を用いているため、部品サイズに対する交差の割合が大きいと考えられる。 θ_2 の角度誤差1°以下を目指すのであれば、実施例1、2、3、4で示した第2の回転制御機構を用いて θ_2 を微調整する方式の方が好ましい場合もある。しかし、本実施例を適用することで、試料室外で θ_2 を設定した試料ホルダを試料室に挿入し、そのまま回転シリーズ像を撮影することが可能である。

【実施例6】

【0055】

実施例6では、実施例1、2、3、4、5で示した試料ホルダを用い、図20に示す試料加工装置を用いて試料を突起状に加工する事例を示す。

50

【 0 0 5 6 】

イオンビーム加工装置（以後、略してFIB）の構成図を図20に示す。半導体ウェハや半導体チップ等のウェハ試料203にイオンビーム204を照射するイオンビーム照射光学系240，ウェハ試料203を載置し、イオンビーム照射領域にウェハ試料203の加工領域を移動させるウェハ試料ステージ271，ウェハ試料ステージ271の位置を制御するウェハ試料位置制御装置271'、プローブ281を保持して移動させるプローブ駆動装置282，プローブ駆動装置282を制御するプローブ駆動制御装置182'，ウェハ203から摘出された試料10を載せる試料ホルダ100、試料ホルダ100の位置を制御する試料ホルダ位置制御装置272'、ウェハ試料203及び試料10の観察領域近傍に堆積性ガス（デポガス）を供給するためのデポガス供給源283，デポガス供給源283を制御するデポガス供給制御装置283'，ウェハ試料203及び試料10に1次電子ビーム201を照射するための電子ビーム照射光学系260，および、ウェハ試料203及び試料10から放出される2次電子202を検出する2次電子検出器263を含んで構成されている。

10

【 0 0 5 7 】

所定の方向にウェハ試料203を設置するために、ウェハ試料ステージ271にはXY面内の回転機構が備わっている。なお、イオンビーム照射光学系240，ウェハ試料ステージ271，試料ホルダ100、プローブ駆動装置282，デポガス供給源283，電子ビーム照射光学系260，および2次電子検出器283は、高真空排気される真空容器220内に配置されている。制御コンピュータ230はイオンビーム加工装置全体の制御を行なう。そのため、制御コンピュータ230は、接続された各構成部品を制御するソフトウェアを格納するための記憶手段235と、ユーザーが装置の設定パラメータを入力するためのユーザーインターフェース237、各種の操作画面やSEM像を表示するための表示装置236を備える。試料加工手順は、例えば、特許文献6（特許第3547143号公報）に記載されている。

20

【 0 0 5 8 】

実施例1、2、3、4、5で示した試料ホルダ100はFIBでも、試料の脱着なく、共通使用できるように設計されている。FIBで試料を加工する際の、実施例1の試料ホルダ先端部の各部品の配置を図6（c）及び図9（d）に示す。まず、針状試料台150を第1の回転治具140に装着し、針状試料台150の長軸がX軸（試料ホルダ挿入方向）とほぼ直交するように、すなわち第1の回転治具140の角度 θ がほぼ 45° になるように第1の回転治具140を回転させる。そして、針状試料台150の先端が第1の回転軸上に近づくように、図9（d）の場合は右端に、スライド治具130を移動させる。なお、スライド治具130を移動させても試料10は第1の回転軸上には設置できないが、試料と第1の回転軸との距離は0.5mm程度であり、試料ホルダ100のZ位置を調整することで試料10をレンズ焦点に移動させることは可能である。このように設定された試料ホルダ100をFIB筐体に挿入する。

30

【 0 0 5 9 】

試料加工を始める前に、針状試料台150と観察領域11との間に必要な距離を見積もる。実施例1にて図4を用いて説明したように、観察領域のx軸周り及びy軸回りの回転シリーズ像撮影中に針状試料台150が入射電子線もしくは透過電子線の光路を塞がないように、観察領域11と針状試料台150の距離を充分離しておく。どの程度離すかを見積もるために、まず、針状試料台150の長軸とFIB光軸がほぼ直行する状態（ $\theta = 0^\circ$ ）で針状試料台150の先端を観察し、針状試料台150先端の半径を測定し、観察領域11と針状試料台150観察領域との間に必要な距離を計算する。少なくとも、先端の半径に $\tan(45^\circ)$ を掛けた距離以上離す必要がある。今回は、先端の半径に $\tan(60^\circ)$ を掛けた距離だけ離すことにした。観察領域11と針状試料台150観察領域との距離が計算された値になるように、ウェハ試料から試料10を切り出す。なお、試料10の大きさは、通常、数 $10\mu\text{m}$ であるので、観察視野11と針状試料台150と距離が数 $10\mu\text{m}$ 見上必要な場合は、針状試料台150先端に適当なサイズの基板チップを固定し

40

50

、試料 10 と針状試料台 150 先端の距離をあらかじめ離しておいても良い。

【0060】

次に、針状試料台 150 の先端にサンプルチップを固定する。サンプルチップを固定する際には、試料ホルダ先端を図 6 (d) に示す設定にする。針状試料台 150 の長軸が Z 軸 (FIB 光軸) とほぼ平行になるように、すなわち支持棒 120 の回転角度 θ_1 がほぼ 90° になるように支持棒 120 を回転させる。保持筒 110 は回転させず、支持棒 120 のみを回転させることで、針状試料台 150 の上方が開口される。試料 10 を針状試料台 150 の先端に固定し、突起の粗加工をする。突起を細線化する前に、支持棒 120 を回転させて $\theta_1 = 0^\circ$ に設定し、観察領域 11 の x 軸周り及び y 軸回りの回転シリーズ像撮影中に針状試料台 150 や試料台座部 12 が入射電子線もしくは透過電子線の光路を塞がないかを確認する。光路を塞ぐ箇所があればイオンビームでその箇所を除去する。光路の確認をした後、支持棒 120 を回転させて $\theta_1 = -90^\circ$ に設定し、突起部を透過像が得られるまで、具体的には直径が 100 nm から 300 nm になるまで細線化し、試料加工を完了する。

10

【0061】

実施例 2、3、4、5 で示した試料ホルダを用い、FIB を用いて試料を突起状に加工することも当然可能である。FIB で使用する場合、実施例 2 の試料ホルダでは図 9 (d)、実施例 3 の試料ホルダでは図 14 (d)、実施例 4 の試料ホルダでは図 17 (d)、実施例 5 の試料ホルダでは図 19 (d) の設定で使用する。実施例 1、2、3、4、5 の試料ホルダは、回転治具、スライド治具、支持棒の構造が異なるだけなので、これらの試料ホルダを用いた試料加工手順の説明は省略する。

20

【実施例 7】

【0062】

実施例 7 では、実施例 1、2、3、4、5 で示した試料ホルダを用い、汎用の走査透過電子顕微鏡 (以下、略して STEM) で試料を観察する事例を示す。本装置では、対物レンズのレンズギャップに試料を挿入し観察する。レンズギャップ内は強磁場になっており、この磁場によって試料の磁場構造が変化する可能性があるため、本装置で磁場構造を解析することはほとんどない。本装置は試料加工状態の確認や、試料の組成構造を高分解能で解析する場合に用いる。具体的には、試料 10 の突起 12 を細線化する際、観察領域 11 が突起 12 の中央にくるように徐々に削り込んでいく。どの面を削るかを、本装置の観察結果から判断する。また、試料の電磁場構造を解析した後、試料の組成構造を高分解能で 3 次元解析し、磁場構造との対応を考察する場合に用いる。組成構造、すなわちスカラー場トモグラフィでは各画素に割り当てられた 1 つの強度を求めるので、1 軸回りの回転シリーズ像で 3 次元構造を再構成できる。すなわち、本装置で 2 軸回りの回転シリーズ像をする必要はない。

30

【0063】

まず、汎用の走査透過電子顕微鏡の構成を図 21 に示す。1 次電子線 331 を発生する電子銃 311 及びその制御回路 311'、1 次電子線 331 を収束する照射レンズ 312 及びその制御回路 312'、1 次電子線 331 の拡がり角を制御する絞り 313 及びその制御回路 313'、試料 10 に対する入射角度を制御する軸ずれ補正用偏向器 314 及びその制御回路 314'、試料 10 に入射する 1 次電子線 331 のビーム形状を補正するスティグメータ 315 及びその制御回路 315'、試料 10 に入射する 1 次電子線 331 の照射領域を調整するイメージシフト用偏向器 316 及びその制御回路 316'、試料 10 に入射する 1 次電子線 331 をラスタ走査する走査用偏向器 317 及びその制御回路 317'、1 次電子線 331 の試料 10 に対する焦点位置の調整する対物レンズ 318 及びその制御回路 318'、試料 10 の入射電子線 331 に対する位置及び傾斜角度を設定する試料ステージ 319 及びその制御回路 319'、試料 10 から発生する電子線 332 を検出する電子検出器 322 及びその制御回路 322'、電子線 332 を電子線検出器 322 に投影する投影レンズ 320 及びその制御回路 320'、電子線 332 を偏向する偏向器 321 及びその制御回路 321'、電子線 332 の拡がり角を制御する絞り 323 及び

40

50

その制御回路 3 2 3'、電子線検出器の出力信号とラスタ走査信号から STEM / SEM 像を形成する画像形成回路 3 2 8、制御ソフト及び画像処理ソフトを搭載した計算機 3 2 9 から構成される。各制御回路、画像形成回路は計算機 3 2 9 によってコマンド制御される。本装置には複数の電子線検出器 3 2 2 が搭載されており、試料 1 0 前方に出射した電子線のうち、低角散乱電子を検出する明視野検出器 3 2 2 - 1、高角散乱電子を検出する暗視野検出器 3 2 2 - 2、試料 1 0 後方に出射した反射電子及び 2 次電子を検出する検出器 3 2 2 - 3 が搭載されている。試料 1 0 前方に出射した電子で形成された画像を STEM 像、試料 1 0 後方に出射した電子で形成された画像を SEM 像と呼ぶ。以後、簡単のために STEM 像のみを説明する。鏡体の光軸とほぼ平行な方向を Z 方向、光軸とほぼ直交する面を XY 平面とする。図 1 6 の装置を用いて STEM 像を撮影するまでの工程は、例えば、特許文献 7 (特開 2 0 0 9 - 1 1 0 7 3 4 号公報) に記載されている。

10

【 0 0 6 4 】

また、図 2 1 に示す装置の試料室の Z 方向のサイズは、図 2 及び図 2 0 に示した装置と比較して狭いという特徴がある。図 2 1 の装置では試料をインレンズ型の対物レンズの間に挿入する。インレンズ型の対物レンズにおけるレンズギャップは 5 mm 程度である。さらに X 線発生抑制の軽元素カバーが装備されていると、レンズギャップに挿入可能な厚さは 3 mm 程度になってしまう。一方、図 2 の装置では試料ホルダ 1 0 0 は対物レンズの外側に設置されている。図 2 0 の装置では試料 1 0 の上側のみにレンズを持つ、アウトレンズ型の対物レンズを用いている。試料室の Z 方向のサイズは 1 0 mm 以上ある。

20

【 0 0 6 5 】

試料ホルダ 1 0 0 先端の部品配置が図 9 (a) 及び図 9 (b) に設定されていると、第 1 の回転治具 1 4 0 はその直径を半径にして第 1 の回転軸回りに回転する。第 1 の回転治具の直径が 2 mm の場合、試料室の Z 方向のサイズは 4 mm 以上にする必要がある。すなわち、図 2 1 の装置の試料室内で試料 1 0 を第 1 の回転軸回りに $- 1 8 0 ^{\circ}$ から $+ 1 8 0 ^{\circ}$ 回転させることができない。

【 0 0 6 6 】

そこで、本装置で試料 1 0 を観察する際は、試料ホルダ先端の部品配置を図 6 (c) に示す設定にすることにした。第 1 の回転軸と針状試料台 1 5 0 の長軸を平行にし、すなわち第 1 の回転治具 1 4 0 の角度 α がほぼ $+ 4 5 ^{\circ}$ になるように第 1 の回転治具 1 4 0 を回転させる。そして、試料 1 0 を第 1 の回転軸上に近づくように、スライド治具 1 3 0 をスライドガイド 1 2 1 の中央に移動させる。この配置では、第 1 の回転治具 1 4 0 はその半径を半径にして第 1 の回転軸回りに回転する。第 1 の回転治具の直径が 2 mm の場合、試料室の Z 方向のサイズが 2 mm 以上あれば試料室内で試料 1 0 を第 1 の回転軸回りに $- 1 8 0 ^{\circ}$ から $+ 1 8 0 ^{\circ}$ 回転させることができる。このように設定を持つことで、FIB で加工した試料 1 0 や、電子線干渉顕微鏡で解析した試料 1 0 を、試料 1 0 の脱着なく、本装置で解析することが可能になる。

30

【 0 0 6 7 】

実施例 2、3、4、5 で示した試料ホルダを用い、図 2 1 に示す STEM で試料を観察することも当然可能である。実施例 2 の試料ホルダでは、スライド治具 1 3 0 をスライドガイド 1 2 1 のほぼ中央に設置した後、ネジ 1 2 4 を締めこむことにより、スライド治具のグラツキを固定し、試料室に挿入する (図 9 (c) 参照)。実施例 3 の試料ホルダでは、第 1 の回転治具 1 4 0 がスライド軸受け部 1 2 9 の中央にくるようにスライド治具 1 3 0 を移動させて図 1 4 (c) の配置にし、ガイドピン 1 2 8 を支持棒 1 2 0 のガイド穴 1 2 7 とスライド治具 1 3 0 のガイド穴 1 3 7 2 に通した後、試料ホルダを試料室に挿入する。実施例 4 の試料ホルダにはスライド治具 1 3 0 を持たないので、第 1 の回転治具 1 4 0 の回転角度 α を $+ 4 5$ 度に設定したホルダをそのまま試料室に挿入する (図 1 7 (c) 参照)。なお、実施例 4 の場合、試料ホルダ 1 0 0 の出し入れする前に、試料ホルダ 1 0 0 の位置を必ず試料ステージ原点に戻す必要がある。これを実施しないと、試料ホルダ 1 0 0 挿入の際に試料ホルダ先端が対物レンズに衝突する可能性が高くなる。実施例 5 の試料ホルダでは、第 1 の回転治具 1 4 0 を $\alpha = + 4 5 ^{\circ}$ になるように回転させ、ガイ

40

50

ドピン 1 4 6 をガイド穴 1 4 7 2 とガイド穴 1 3 7 に通して回転角度 2 を規定する。試料 1 0 が第 1 の回転軸上に来るようにスライド治具 1 3 0 を移動させた後、試料ホルダを試料室に挿入する。なお、実施例 1、2、3、4、5 で示した試料ホルダはインレンズ型の対物レンズのレンズギャップに試料を挿入して観察する他の装置、例えば汎用の透過電子顕微鏡でも、当然、使用することができる。

【 0 0 6 8 】

最後に、今回は子線干渉顕微鏡（図 1）、F I B（図 1 5）、S T E M（図 1 6）で共通使用可能な試料ホルダ 1 0 0 について説明したが、各々専用の試料ホルダを設け、針状試料台 1 5 0 を共通にして使用することで、試料加工、加工形状観察と追加工、回転シリーズ像撮影という手順を実行することも可能である。すなわち、装置選択の範囲が広がるというメリットがある。

10

【符号の説明】

【 0 0 6 9 】

- 1 0 ... 試料、
- 1 1 ... 試料の観察領域、
- 1 2 ... 試料の突起部、
- 1 3 ... 試料の台座部、
- 1 4 ... 観察領域の x 方向投影領域、
- 1 5 ... 観察領域の y 方向投影領域、
- 1 0 0 ... 試料ホルダ、
- 1 0 1 ... X 方向移動用リニアアクチュエータ、
- 1 0 2 ... Y 方向移動用リニアアクチュエータ、
- 1 0 3 ... Z 方向移動用リニアアクチュエータ、
- 1 0 4 ... 試料ホルダ先端のピボット部、
- 1 1 0 ... 保持筒、
- 1 1 1 ... 保持筒の開口部、
- 1 2 0 ... 保持棒、
- 1 2 1 ... 保持棒のスライドガイド部、
- 1 2 2 ... 第 2 の回転治具のピボット部の軸受け部、
- 1 2 3 ... 支持棒組み立て用のネジ穴もしくは穴、
- 1 2 4 ... 支持棒組み立て用のネジ、
- 1 2 5 ... 第 3 の回転治具のピボット部の軸受け部、
- 1 2 6 ... 第 4 の回転治具のピボット部の軸受け部、
- 1 2 7 ... 保持棒に対するスライド治具の位置を規定するガイド穴、
- 1 2 8 ... 保持棒に対するスライド治具の位置を規定するガイドピン、
- 1 3 0 ... スライド治具、
- 1 3 1 ... スライド治具の軸受け部、
- 1 3 2 ... スライド治具のスライドガイド凸部、
- 1 3 3 ... スライド治具組み立て用の穴、
- 1 3 4 ... スライド治具組み立て用ネジ、
- 1 3 5 ... 第 3 の回転治具のピボット部を受ける軸受け部、
- 1 3 7 ... 保持棒に対するスライド治具の位置を規定するガイド穴、
- 1 3 8 ... スライド治具に対する第 1 の回転治具の位置を規定するガイド穴、
- 1 4 0 ... 回転治具、
- 1 4 1 ... 回転治具のピボット部、
- 1 4 2 ... 回転治具のネジ穴部、
- 1 4 3 ... 回転治具の溝部、
- 1 4 4 ... 回転治具の第 1 の歯車部、
- 1 4 5 ... 回転治具の第 1 の歯車部、
- 1 4 6 ... スライド治具に対する第 1 の回転治具の位置を規定するガイドピン、

20

30

40

50

1 4 7 ... スライド治具に対する第 1 の回転治具の位置を規定するガイド穴、	
1 5 0 ... 針状試料台、	
1 5 1 ... 針状試料台のテーパ部、	
1 5 2 ... 針状試料台のグリップ部、	
1 5 3 ... 針状試料台のネジ部、	
1 5 4 ... 針状試料台のガイド部、	
1 6 0 ... ワイヤー、	
1 6 1 ... ワイヤーの伸縮部、	
1 7 0 ... スライド棒、	
1 7 1 ... スライド棒の穴部、	10
1 7 2 ... スライド棒のワイヤー抑えネジ、	
1 8 0 ... 第 2 の回転治具、	
1 8 1 ... 第 2 の回転治具のピボット部、	
1 8 3 ... 第 2 の回転治具の溝部、	
1 9 1 ... 第 3 の回転治具、	
1 9 1 1 ... 第 3 の回転治具のピボット部、	
1 9 1 2 ... 第 3 の回転治具の溝部、	
1 9 2 ... 第 4 の回転治具、	
1 9 2 1 ... 第 4 の回転治具のピボット部、	
1 9 2 2 ... 第 4 の回転治具の第 4 の歯車部、	20
1 9 2 3 ... 第 4 の回転治具の溝部、	
1 9 3 ... 第 5 の回転治具、	
1 9 3 1 ... 第 5 の回転治具の傘歯車部、	
1 ... 電子源もしくは電子銃、	
1 8 ... 真空容器、	
1 9 ... 電子源の制御ユニット、	
2 ... 光軸、	
2 7 ... 電子線の軌道、	
3 9 ... 試料ステージの制御ユニット、	
4 0 ... 加速管、	30
4 1 ... 第 1 照射 (コンデンサ) レンズ、	
4 2 ... 第 2 照射 (コンデンサ) レンズ、	
4 7 ... 第 2 照射レンズの制御ユニット、	
4 8 ... 第 1 照射レンズの制御ユニット、	
4 9 ... 加速管の制御ユニット、	
5 ... 対物レンズ、	
5 1 ... 制御系コンピュータ、	
5 2 ... 制御系コンピュータのモニタ、	
5 3 ... 制御系コンピュータのインターフェース、	
5 9 ... 対物レンズの制御ユニット、	40
6 1 ... 第 1 結像レンズ、	
6 2 ... 第 2 結像レンズ、	
6 3 ... 第 3 結像レンズ、	
6 4 ... 第 4 結像レンズ、	
6 6 ... 第 4 結像レンズの制御ユニット、	
6 7 ... 第 3 結像レンズの制御ユニット、	
6 8 ... 第 2 結像レンズの制御ユニット、	
6 9 ... 第 1 結像レンズの制御ユニット、	
7 6 ... 画像観察・記録装置のモニタ、	
7 7 ... 画像記録装置、	50

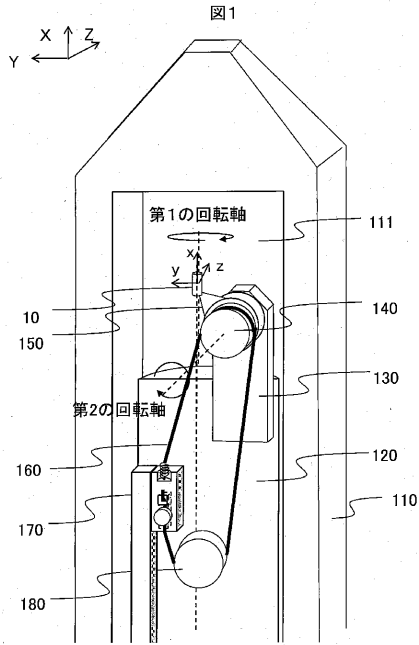
7 8 ... 画像観察・記録媒体の制御ユニット、	
7 9 ... 画像観察・記録媒体（例えばTVカメラやCCDカメラ）、	
8 ... 干渉縞、	
8 9 ... 観察・記録面、	
9 1 ... 第1の電子線バイプリズムの中央極細線電極、	
9 3 ... 第2の電子線バイプリズムの中央極細線電極、	
9 7 ... 第2の電子線バイプリズムの制御ユニット、	
9 8 ... 第1の電子線バイプリズムの制御ユニット、	
2 0 1 ... 1次電子ビーム、	
2 0 2 ... 2次電子ビーム、	10
2 0 3 ... ウェハ試料、	
2 0 4 ... 集束イオンビーム、	
2 2 0 ... 真空容器、	
2 3 0 ... 制御コンピュータ、	
2 3 5 ... 記憶手段、	
2 3 6 ... 表示装置、	
2 3 7 ... ユーザーインターフェース、	
2 4 0 ... イオンビーム照射光学系、	
2 4 0 ' ... イオンビーム制御装置、	
2 4 1 ... イオン源、	20
2 4 2 ... ビーム制限アパーチャー、	
2 4 3 ... 集束レンズ、	
2 4 4 ... 偏向器、	
2 4 5 ... 対物レンズ、	
2 6 0 ... 電子ビーム照射光学系、	
2 6 0 ' ... 電子ビーム駆動装置、	
2 6 1 ... 電子源、	
2 6 2 ... 偏向レンズ、	
2 6 3 ... 2次電子検出器、	
2 6 3 ' ... 2次電子検出器制御装置、	30
2 7 1 ... ウェハ試料ステージ、	
2 7 1 ' ... ウェハ試料位置制御装置、	
2 7 2 ... 試料ホルダ位置制御装置、	
2 8 1 ... プローブ、	
2 8 2 ... プローブ駆動装置、	
2 8 2 ' ... プローブ駆動制御装置、	
2 8 3 ... デポガス供給源、	
2 8 3 ' ... デポガス供給制御装置	
3 1 1 ... 電子銃、	
3 1 1 ' ... 電子銃制御回路、	40
3 1 2 ... 照射レンズ、	
3 1 2 ' ... 照射レンズ制御回路、	
3 1 3 ... コンデンサ絞り、	
3 1 3 ' ... コンデンサ絞り制御回路、	
3 1 4 ... 軸ずれ補正用偏向器、	
3 1 4 ' ... 軸ずれ補正用偏向器制御回路、	
3 1 5 ... スティグメータ、	
3 1 5 ' ... スティグメータ制御回路、	
3 1 6 ... イメージシフト用偏向器、	
3 1 6 ' ... イメージシフト用偏向器制御回路、	50

- 3 1 7 ... 走査用偏向器、
- 3 1 7 ' ... 走査用偏向器制御回路、
- 3 1 8 ... 対物レンズ、
- 3 1 8 ' ... 対物レンズ制御回路、
- 3 1 9 ... 試料ステージ、
- 3 1 9 ' ... 試料ステージ制御回路、
- 3 2 0 ... 投影レンズ、
- 3 2 0 ' ... 投影レンズ制御回路、
- 3 2 1 ... 軸ずれ補正用偏向器、
- 3 2 1 ' ... 軸ずれ補正用偏向器制御回路、
- 3 2 2 ... 電子検出器、
- 3 2 2 ' ... 電子検出器制御回路、
- 3 2 3 ... 散乱角度制限絞り、
- 3 2 3 ' ... 散乱角度制限絞り制御回路、
- 3 2 4 ... 対物絞り、
- 3 2 4 ' ... 対物絞り制御回路、
- 3 2 5 ... 制限視野絞り、
- 3 2 5 ' ... 制限視野絞り制御回路、
- 3 2 6 ... 電子線検出カメラ、
- 3 2 6 ' ... 電子線検出カメラ制御回路、
- 3 2 8 ... 画像形成回路、
- 3 2 9 ... 制御ソフトおよび画像処理ソフトを搭載した計算機、
- 3 3 1 ... 1次電子線、
- 3 3 2 - 1 ... 低角散乱電子、
- 3 3 2 - 2 ... 高角散乱電子、
- 3 3 2 - 3 ... 2次電子。

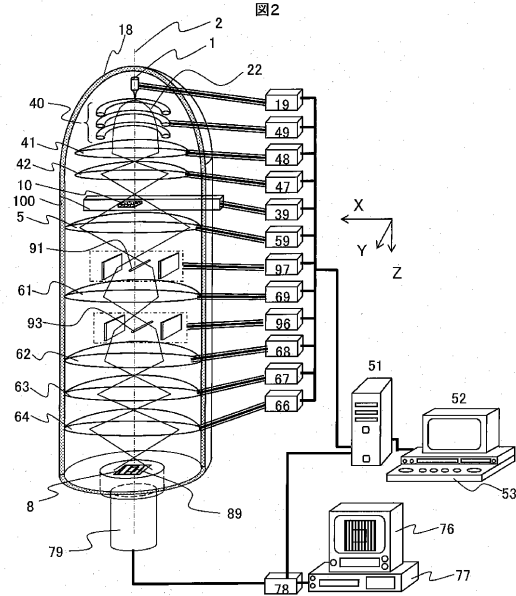
10

20

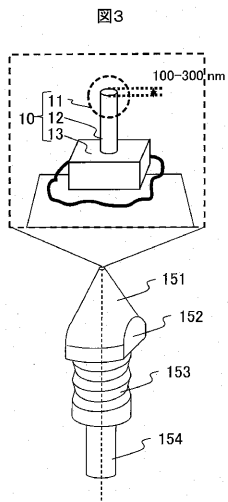
【 図 1 】



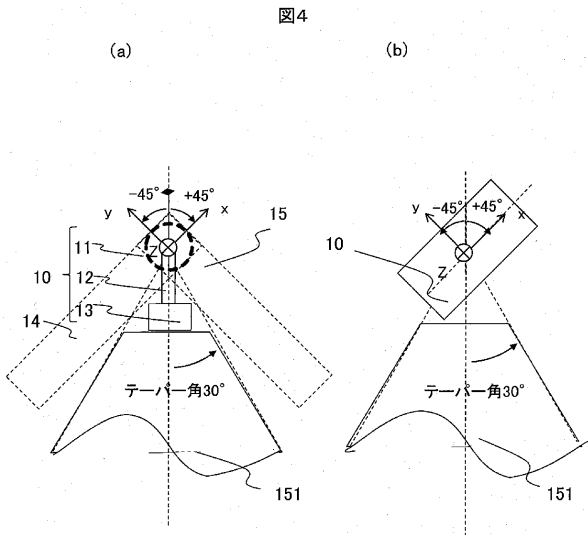
【 図 2 】



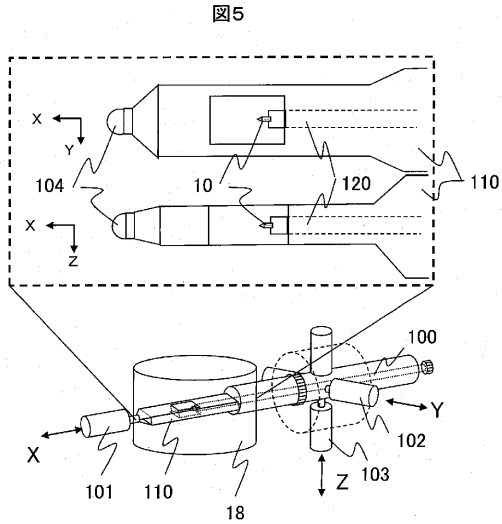
【 図 3 】



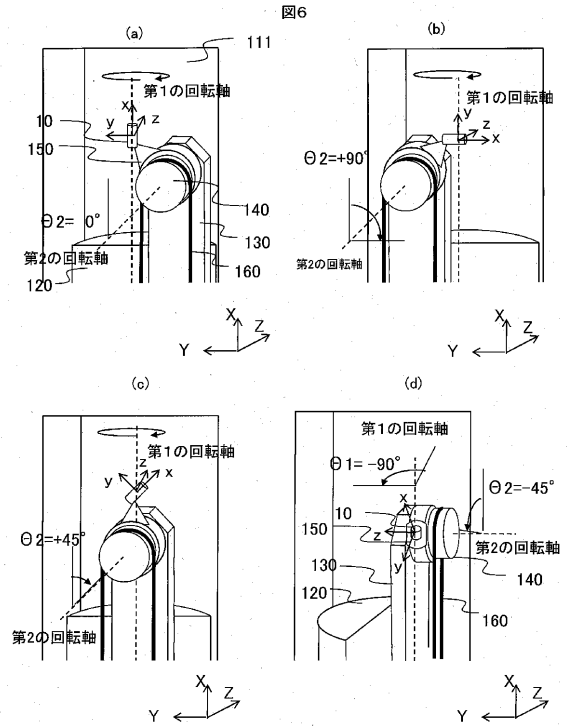
【 図 4 】



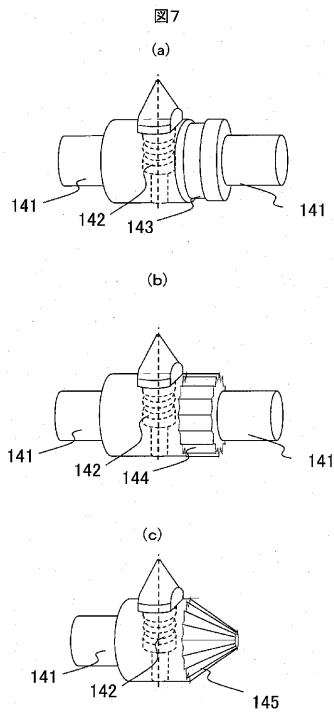
【 図 5 】



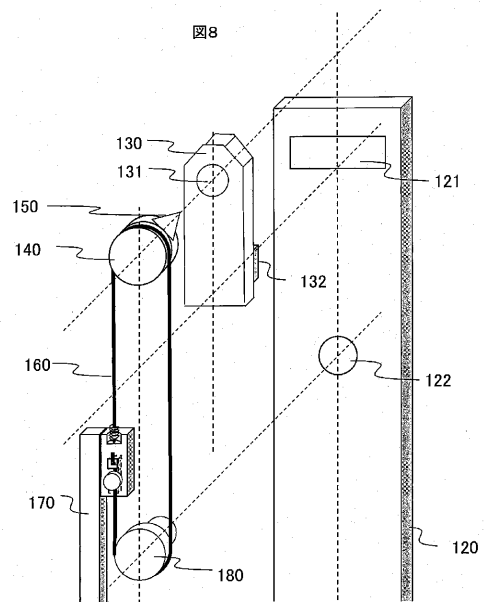
【 図 6 】



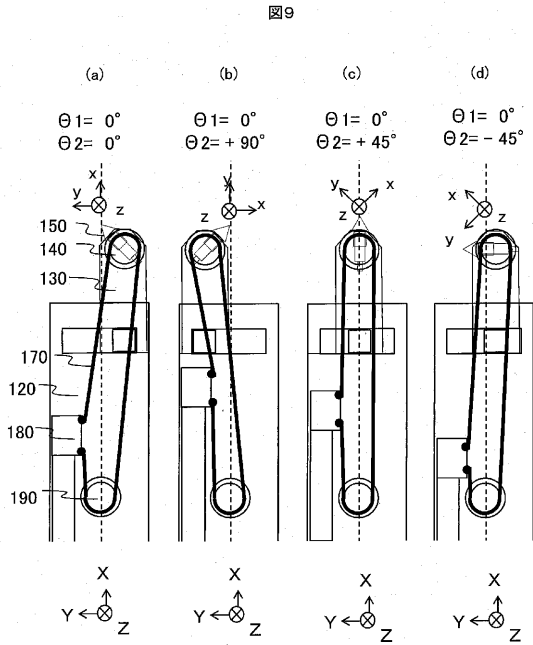
【 図 7 】



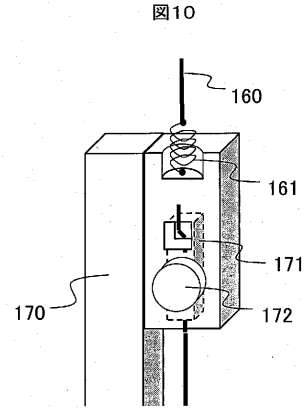
【 図 8 】



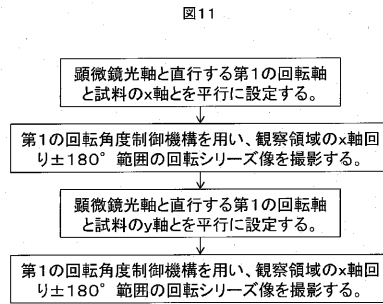
【 図 9 】



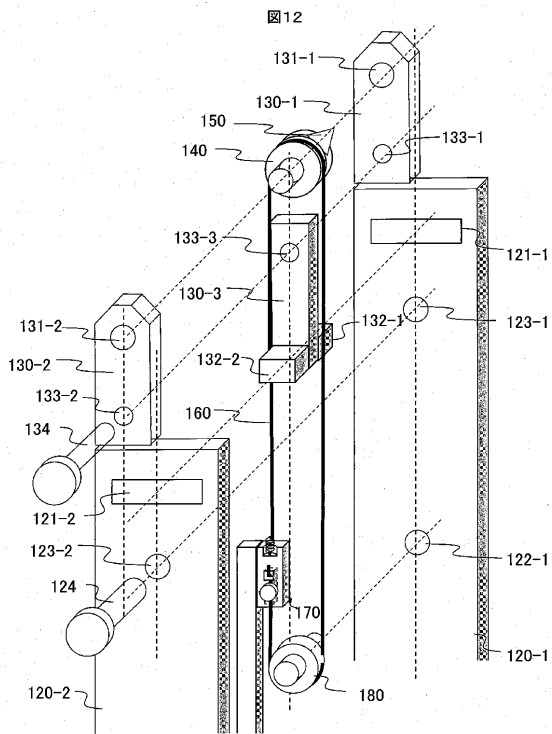
【 図 1 0 】



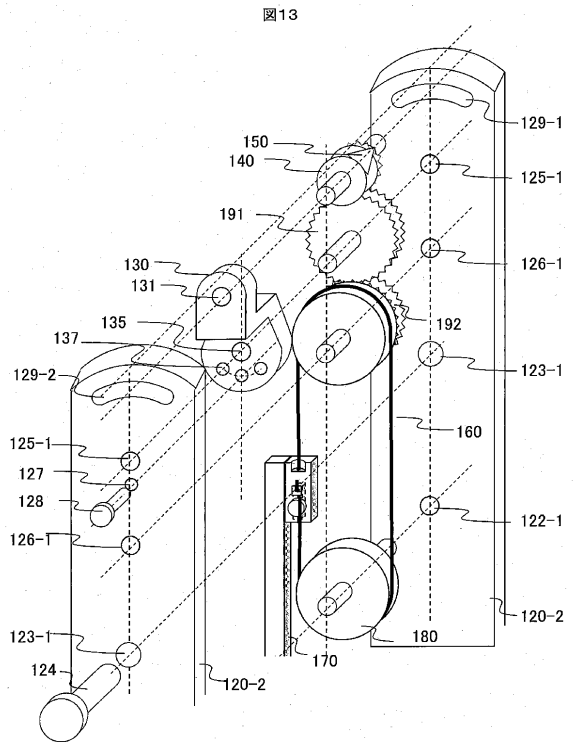
【 図 1 1 】



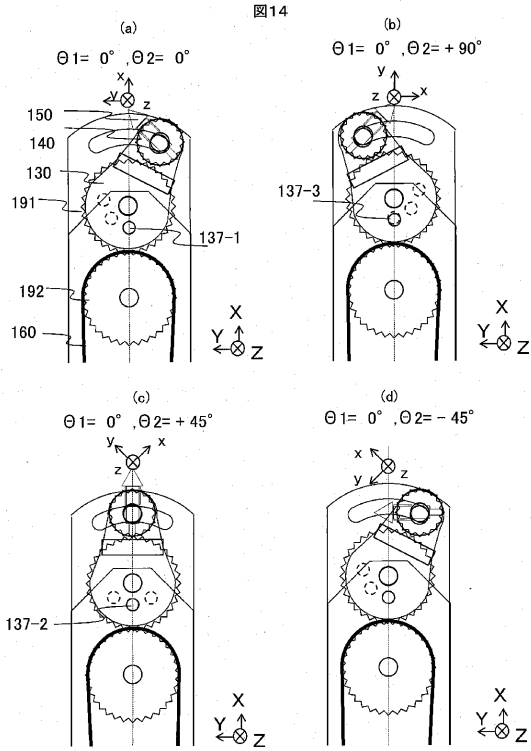
【 図 1 2 】



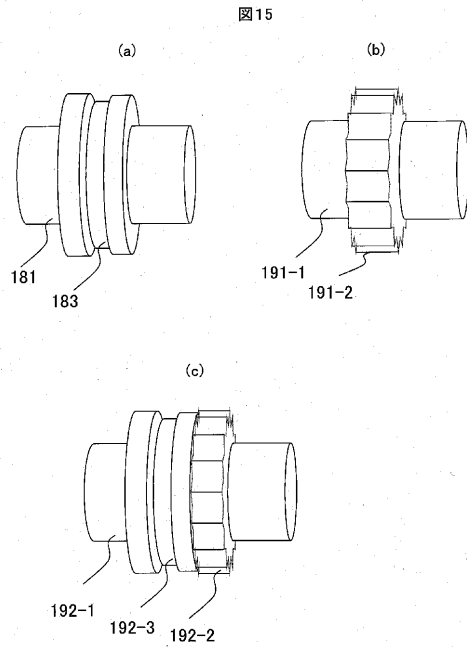
【 図 1 3 】



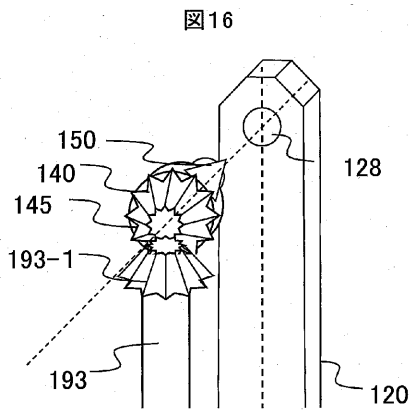
【 図 1 4 】



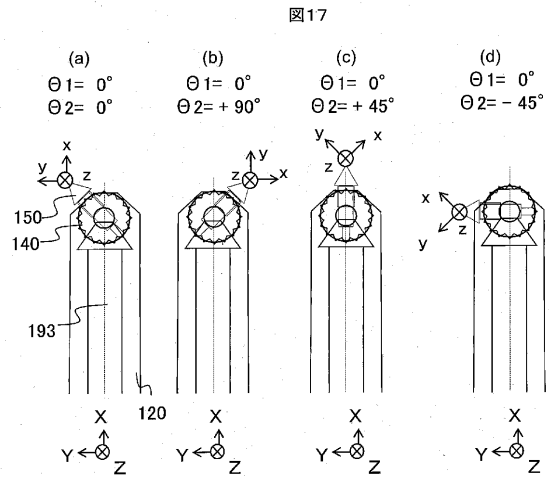
【 図 1 5 】



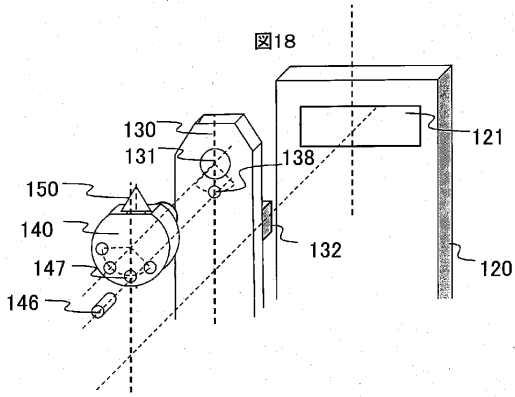
【 図 1 6 】



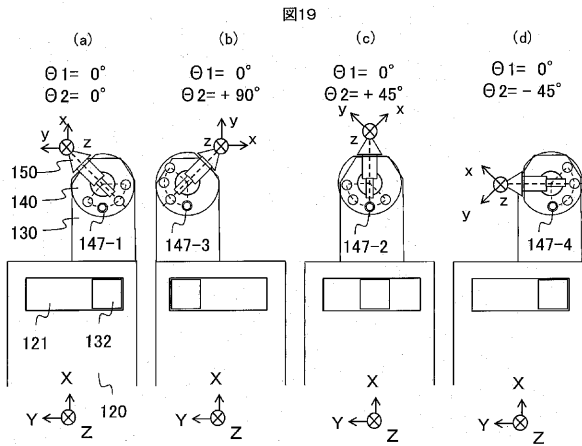
【 図 1 7 】



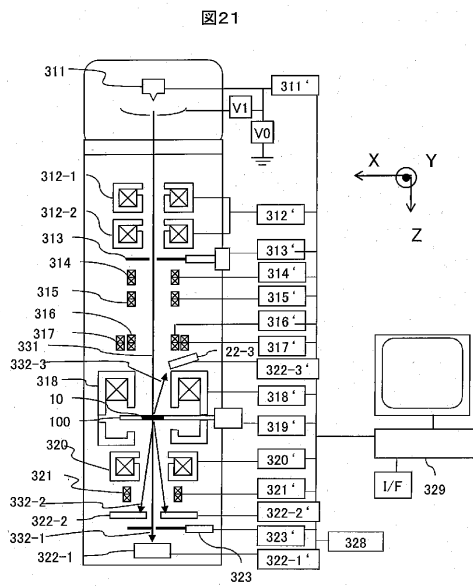
【 図 1 8 】



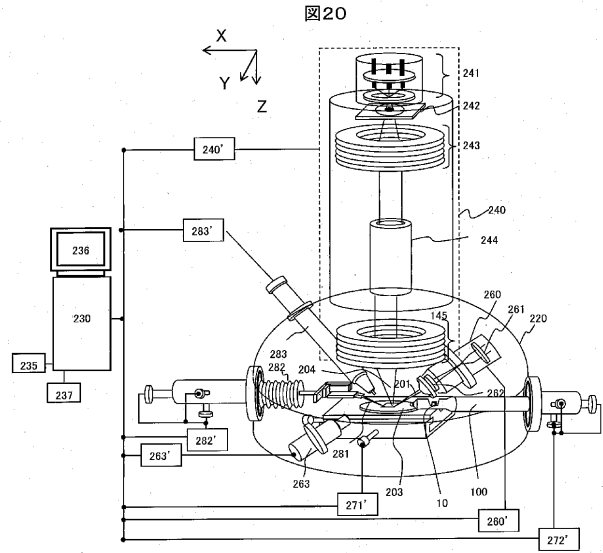
【 図 1 9 】



【 図 2 1 】



【 図 2 0 】



フロントページの続き

(72)発明者 菊池 秀樹

茨城県ひたちなか市大字市毛 8 8 2 番地 株式会社日立ハイテクノロジーズ那珂事業所内

(72)発明者 鹿島 秀夫

東京都国分寺市東恋ヶ窪一丁目 2 8 0 番地 株式会社日立製作所中央研究所内

Fターム(参考) 5C001 AA01 AA03 AA04 AA05 AA06 CC03

5C033 SS02