(19)日本国特許庁(JP)　(12)特　許　公　報(B2)　(11)特許番号

特許第5292348号
(P5292348)

(45)発行日　平成25年9月18日(2013.9.18)　(24)登録日　平成25年6月14日(2013.6.14)

(51)Int.Cl.		F I		
H01J 37/244	***(2006.01)***	H01J	37/244	
H01J 37/317	***(2006.01)***	H01J	37/317	D
H01J 37/28	***(2006.01)***	H01J	37/28	B

請求項の数 6　(全 17 頁)

(21)出願番号　特願2010-72604(P2010-72604)
(22)出願日　平成22年3月26日(2010.3.26)
(65)公開番号　特開2011-204570(P2011-204570A)
(43)公開日　平成23年10月13日(2011.10.13)
審査請求日　平成23年9月15日(2011.9.15)

(73)特許権者　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　100091096
弁理士　平木　祐輔
(74)代理人　100105463
弁理士　関谷　三男
(74)代理人　100102576
弁理士　渡辺　敏章
(72)発明者　野間口　恒典
茨城県ひたちなか市大字市毛８８２番地
株式会社日立ハイテクノロジーズ　那珂事業所内

最終頁に続く

(54)【発明の名称】複合荷電粒子線装置

(57)【特許請求の範囲】
【請求項１】
イオンビームを照射するイオンビームカラムと、
電子ビームを照射する電子ビームカラムと、
前記イオンビームカラム及び電子ビームが取り付けられた試料室と、
試料に照射された前記電子ビームによって誘起された後方散乱電子が、前記試料室の内部に存在する構造物に衝突することによって放出された二次電子である三次電子を検出する三次電子検出器と、
前記検出された三次電子に基づいて画像を生成すると共に、前記集束イオンビームの走査信号と前記電子ビームの走査信号のタイミングを制御し、当該タイミングに基づいて前記イオンビームの照射と前記三次電子に基づく画像の表示装置における表示を実行する制御装置と、を備え、
前記制御装置は、前記イオンビームの走査信号と前記電子ビームの走査信号の同期を取り、前記イオンビームの走査領域と前記電子ビームの走査領域が同じ場合は、同一時刻の前記両ビームの走査位置を一致させることを特徴とする複合荷電粒子線装置。
【請求項２】
イオンビームを照射するイオンビームカラムと、
電子ビームを照射する電子ビームカラムと、
前記イオンビームカラム及び電子ビームが取り付けられた試料室と、
試料に照射された前記電子ビームによって誘起された後方散乱電子が、前記試料室の内

部に存在する構造物に衝突することによって放出された二次電子である三次電子を検出する三次電子検出器と、
前記検出された三次電子に基づいて画像を生成すると共に、前記集束イオンビームの走査信号と前記電子ビームの走査信号のタイミングを制御し、当該タイミングに基づいて前記イオンビームの照射と前記三次電子に基づく画像の表示装置における表示を実行する制御装置と、を備え、
前記制御装置は、前記イオンビームの走査信号と前記電子ビームの走査信号の同期を取り、前記イオンビームと前記電子ビームの走査領域が異なる場合は、いずれかのビームの走査動作を待機させ、走査領域が重なっている部分の走査時刻を一致させることを特徴とする複合荷電粒子線装置。

【請求項３】
請求項１において、
さらに、前記イオンビームを前記試料に照射し、前記試料からの二次電子又は二次イオンを検出するイオン像用検出器を備え、
前記制御装置は、前記イオン像用検出器によって検出された二次電子又は二次イオンに基づいて画像を取得し、当該二次電子又は二次イオンに基づく画像と、前記三次電子に基づく画像を同時に前記表示装置に表示することを特徴とする複合荷電粒子線装置。

【請求項４】
請求項２において、
さらに、前記イオンビームを前記試料に照射し、前記試料からの二次電子又は二次イオンを検出するイオン像用検出器を備え、
前記制御装置は、前記イオン像用検出器によって検出された二次電子又は二次イオンに基づいて画像を取得し、当該二次電子又は二次イオンに基づく画像と、前記三次電子に基づく画像を同時に前記表示装置に表示することを特徴とする複合荷電粒子線装置。

【請求項５】
請求項１において、
さらに、試料にガスを吹き付けるガス銃を有し、
前記制御装置は、前記イオンビームを用いて堆積膜を形成しているときに、前記検出された三次電子に基づいて画像を生成し、当該三次電子に基づく画像を表示装置に表示することを特徴とする複合荷電粒子線装置。

【請求項６】
請求項２において、
さらに、試料にガスを吹き付けるガス銃を有し、
前記制御装置は、前記イオンビームを用いて堆積膜を形成しているときに、前記検出された三次電子に基づいて画像を生成し、当該三次電子に基づく画像を表示装置に表示することを特徴とする複合荷電粒子線装置。

【発明の詳細な説明】
【技術分野】
【０００１】
本発明は、複合荷電粒子線装置に関し、例えば、イオンビームにより加工された試料を電子ビームにより観察するための技術に関する。

【背景技術】
【０００２】
近年、（走査）透過型電子顕微鏡（（S）TEM）用の薄膜試料作製には、集束イオンビーム（FIB）装置が用いられている。特に、半導体デバイスの不良解析用の薄膜試料作製においては、特定の断面でFIB加工を停止したい場合が殆どであり、走査電子顕微鏡（SEM）によりFIB加工した断面が観察できるFIB-SEM装置を用いることが一般的となっている。この際、試料の表面情報や凹凸情報を反映した二次電子を信号として画像観察することが一般的である。
【０００３】

しかしながら、特許文献１に記載されているように、イオンビーム照射中にはイオンビームによって試料から大量の二次電子が発生し、この二次電子が電子ビームによる二次電子に重畳する。そのため、イオンビーム照射中には極めて信号対雑音比（S/N比）の低いSEM像しか得られない。

【０００４】

イオンビーム照射中にSEM像を取得する方法としては、後方散乱電子を信号として画像観察する方法がある。後方散乱電子は、二次電子よりも高いエネルギーを持っており、イオンビーム照射では、エネルギーの高い電子は殆ど発生しない。そのため、電子ビーム照射による後方散乱電子を選択し、検出することによりイオンビームの照射によって発生した電子の影響を受けないSEM像を取得することができる。

【０００５】

また、FIB-SEM装置では、試料を透過してきた電子を信号として画像観察する方法がある。この透過電子による画像(STEM像)は、イオンビーム照射によって発生した電子の影響を受けない。ただし、STEM像の取得は、入射電子ビームの殆どが透過するような非常に薄い試料の場合に限られる。

【０００６】

さらに、FIB-SEM装置には、イオンビーム照射による試料の加工と電子ビーム照射による試料の観察を切り替えながら繰り返し行う機能がある。

【０００７】

また、近年、SEMでは、試料に照射された電子ビームによって誘起された後方散乱電子が、試料室内部に存在する構造物に衝突することによって、放出された二次電子（本明細書では三次電子（SE3）と呼ぶこととする）を選択的に検出する検出器が考えられている（例えば、特許文献２参照）。なお、三次電子（SE3）は、代表的な二次電子検出器であるEverhardt Thornley Detectorを用いた場合、殆ど検出されない。

【先行技術文献】

【特許文献】

【０００８】

【特許文献１】特開平９－１６１７１２号公報
【特許文献２】国際公開ＷＯ２００６／１２０００５号公報
【特許文献３】特開２００８－２８６６５２号公報
【特許文献４】特開２００８－０３４１７２号公報
【特許文献５】特開平７－２９６７５６号公報

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【０００９】

このような状況の下、本願発明者らは、FIB-SEM装置を用いた試料加工方法について鋭意検討した結果、次の知見を得るに至った。

【００１０】

近年、半導体産業を筆頭に、燃料電池や太陽電池といったエネルギー産業や、有機エレクトロルミネッセンス（Electro-Luminescence : EL）ディスプレイなどのように有機材料を用いた産業など、様々な産業において、構造物の微細化が進み、観察試料や分析試料の加工技術向上が望まれている。例えば、最先端デバイスではノードサイズが30 nm以下のデバイスが適用されつつあり、このようなデバイスの（S）TEM用薄膜試料作製では、ナノメートルオーダーの加工精度が要求される。そのような要求下において、FIB加工を実時間でSEM観察し、加工状況を常に精度よく監視することは、加工再現性および加工効率を飛躍的に向上させる技術として非常に重要である。

【００１１】

しかし、SEMにおいて最も一般的な信号である二次電子は、イオンビーム照射によっても放出される。そのため、FIB加工と同時にSEM観察を行うためには、電子ビームの電流量がイオンビームの電流量より例えば10倍以上大きく、且つ、早い走査時間でSEM像を取得

するという条件を満たす場合に限定される。電流量を増やすと、電子ビームのプローブ径が大きくなり、SEM像の分解能は低下する。そのため、FIB加工を高精度に監視することは困難となる。一方、電子ビームの電流量を増やすことなく、イオンビームの電流量を減らす方法も考えられるが、その場合、FIB加工の速度が低下し、加工効率が著しく低下する。

【００１２】

また、FIB-SEM装置では、試料の材料情報や組成情報を反映した後方散乱電子を画像信号とする観察方法がある。後方散乱電子は、イオンビーム照射によって放出されないため、後方散乱電子を選択的に取得することで、電子ビーム照射による信号とイオンビーム照射による信号とを区別して検出することができる。そのため、FIB加工とSEM観察を同時に行うことができる。

【００１３】

しかし、後方散乱電子検出器の検出効率は、二次電子検出器の検出効率よりも悪く、後方散乱電子検出器を用いて高分解能像を得るためには、長い走査時間が必要である。したがって、後方散乱電子を検出することで加工状況を監視できる条件は、極めて遅い加工速度の場合に限られる。そのため、後方散乱電子を検出する方法も加工効率を著しく低下させる。

【００１４】

また、試料内部を透過してきた電子を画像信号として検出する透過電子検出器（STEM検出器）を備えたSEMもある。STEM検出器は、主に結晶の回折コントラストを検出する明視野（Bright Field :BF）検出器、材料組成のコントラストを検出する暗視野（Dark Field ：DF）検出器、高角度散乱暗視野（High-Angle Annular Dark-Field : HAADF）検出器から構成され、STEM検出器を用いることで薄膜試料内部の結晶構造や組成情報を得ることができる。後方散乱電子同様、STEM信号もイオンビーム照射の影響を受けないため、FIB加工中にSTEM像を取得することができる。

【００１５】

しかし、STEM信号は、入射電子ビームの大半が透過するような非常に薄い試料の場合しか得ることができない。そのため、STEM信号を用いて加工状況を監視できる条件は、試料が非常に薄い場合に限られ、汎用性に欠ける。また、STEM信号は、試料内部の情報を含むため、STEM信号のみを用いて加工停止位置を精度よく特定することは困難である。

【００１６】

また、加工状況を監視する方法としては、上記以外にもイオンビーム照射と電子ビーム照射を切り替えながら、FIB加工とSEM観察を繰り返すというFIB-SEM装置特有の機能を用いる方法もある。

【００１７】

しかし、FIB加工とSEM観察の切り替えには時間を要するため、この場合も、加工効率が著しく低下する。

【００１８】

本発明はこのような状況を鑑みてなされたものであり、FIB加工における加工効率を低下させずにリアルタイムでSEM観察を可能にする技術を提供するものである。

【課題を解決するための手段】

【００１９】

上記課題を解決するために、本発明では、FIBカラムとSEMカラムを備える複合荷電粒子線装置に、電子ビームを試料に照射したときに発生する後方散乱電子が試料室の構造物に衝突することによって放出される二次電子（本明細書では、三次電子という）を検出するSE3検出器を設けている。そして、この三次電子を用いてSEM像を生成し、そのSEM像によって、イオンビームによる加工の状態を観察することが可能なようになっている。

【００２０】

なお、制御装置（統合コンピュータ）が、試料に対してイオンビームを照射している間に、三次電子に基づいて画像（SEM像）を生成して表示装置に表示するようにしても良い

。
【００２１】
また、制御装置は、三次電子に基づいて画像を生成すると共に、イオンビームの走査信号と電子ビームの走査信号のタイミングを制御し、当該タイミングに基づいてイオンビームの照射と三次電子に基づく画像の表示を制御しても良い。
【００２２】
さらに、試料にイオンビームを照射しながらガスを吹き付けて堆積膜を試料に形成するときにも、電子ビームを試料に照射し、三次電子によるSEM像を表示装置に表示するようにしても良い。
【００２３】
さらなる本発明の特徴は、以下本発明を実施するための最良の形態および添付図面によって明らかになるものである。
【発明の効果】
【００２４】
本発明によれば、FIB加工における加工効率を低下させずにリアルタイムでSEM観察が可能となる。
【図面の簡単な説明】
【００２５】
【図１】本発明の第１の実施形態による複合荷電粒子線装置の概略構成を示す図である。
【図２】図１に示した複合荷電粒子線装置の、クロスポイント付近の詳細を示す図である。
【図３】SE3検出器の先端の構成を模式的に示した図である。
【図４】三次元構築した画像データの一例を示す図である。
【図５】第１の実施形態における、集束イオンビームと電子ビームの走査方法を説明するためのフローチャートである。
【図６】第１の実施形態における、集束イオンビームと電子ビームの走査方法を模式的に示す図である。
【図７】SEM像を観察しながらＦＩＢ加工条件を変更する機能を説明するための図である。
【図８】本発明の第２の実施形態による、補正磁場発生部を備えた複合荷電粒子線装置の概略構成を示す図である。
【発明を実施するための形態】
【００２６】
以下、添付図面を参照して本発明の実施形態について説明する。ただし、本実施形態は本発明を実現するための一例に過ぎず、本発明の技術的範囲を限定するものではないことに注意すべきである。また、各図において共通の構成については同一の参照番号が付されている。
【００２７】
（１）第１の実施形態
＜複合荷電粒子線装置の構成＞
図１は、本発明の第１の実施形態による複合荷電粒子線装置の概略構成を示す図である。図１による複合荷電粒子線装置100は、FIB-SEM装置として示されている。
【００２８】
図１において、複合荷電粒子線装置100は、FIBカラム101aと、SEMカラム102aと、試料室103と、試料室103内に設けられた、三次電子検出器（ＳＥ３検出器ともいう。三次電子だけでなく二次電子や二次イオンの検出も可能な複合荷電粒子検出器を含む。）106、二次電子検出器110、透過電子検出器111、後方散乱電子検出器112及び低エネルギー損失後方散乱電子検出器113と、装置全体の動作を制御する統合コンピュータ120と、FIBカラム101aのイオンビームの走査を制御するためのイオンビームスキャン制御器121と、SEMカラム102aの電子ビームの走査を制御するための電子ビームスキャン制御器122と、検出した

後方散乱電子の情報を統合コンピュータ120に提供する後方散乱電子検出器用制御器123と、検出した二次電子の情報を統合コンピュータ120に提供する二次電子検出器用制御器124と、検出した三次電子の情報を統合コンピュータ120に提供する三次電子検出器用制御器125と、検出した透過電子の情報を統合コンピュータ120に提供する透過電子検出器用制御器126と、検出した低エネルギー損失後方散乱電子の情報を統合コンピュータ120に提供する低エネルギー損失後方散乱電子検出器用制御器127と、オペレータが照射条件や検出条件や各種指示等を入力する操作部（キーボード、マウスなど）128と、各検出電子に基づいて生成されたFIB画像及びSEM画像を表示するディスプレイ129と、を備えている。

【００２９】

FIBカラム101aは、イオンビームを発生するためのイオン源や、イオンビームを集束するためのレンズ、イオンビームを走査、シフトするための偏向系など、FIBに必要な構成要素を全て含んだ系である。同様に、SEMカラム102ａは、電子ビームを発生するための電子源や、電子ビームを集束するためのレンズ、電子ビームを走査、シフトするための偏向系など、SEMに必要な構成要素を全て含んだ系である。そして、FIBカラム101aとSEMカラム102aは、試料室103に搭載され、FIBカラム101aを通過したイオンビーム101bとSEMカラム102aを通過した電子ビーム102bは、クロスポイント104と呼ばれる試料105の一点で交差する。また、イオンビーム101bは、一般にガリウムイオンが使用されるが、加工する目的においてイオン種は問わない。また、イオンビームは、集束イオンビームに限られず、ブロードなイオンビームでもよい。

【００３０】

SE3検出器106（第１の検出器）は、試料105に照射された電子ビームによって誘起された後方散乱電子が試料室103内部の構造物に衝突することによって放出された二次電子である三次電子（SE3ともいう）を検出する。

【００３１】

低エネルギー損失後方散乱電子検出器113は、入射電子とほぼ同等のエネルギー（低エネルギー損失）の後方散乱電子を検出する。

【００３２】

尚、本実施形態では、FIBカラム101aを垂直配置し、SEMカラム102aを傾斜配置しているが、これに限られず、FIBカラム101aを傾斜配置し、SEMカラム102aを垂直配置してもよい。また、FIBカラム101aとSEMカラム102aの双方を傾斜配置してもよい。また、Ｇａ集束イオンビームカラム、Ａｒ集束イオンビームカラム、及び電子ビームカラムを備えた、トリプルカラム構成としてもよい。

【００３３】

また、図１に示すように、試料室103には、上述したように、第１の検出器であるSE3検出器106以外に、第２乃至第５の検出器として二次電子検出器（0～50eVの低エネルギーの電子を検出）110、STEM検出器111、後方散乱電子検出器（50eV以上の高エネルギーの電子を検出）112、低エネルギー損失後方散乱電子検出器113などの検出器を搭載しているが、Ｘ線検出器や二次イオン検出器を搭載してもよい。

【００３４】

さらに、試料室103には、上述した構成以外にも、試料ステージ、ガスデポジションユニット、マイクロサンプリングユニットなどが搭載されている。試料105を搬送するための試料ステージは、試料105を載置することが可能であり、平面移動や回転移動が可能である。また、イオンビームの加工や観察に必要な箇所をイオンビーム照射位置に移動させたり、電子ビームによる観察位置に移動させたりもできる。

【００３５】

尚、試料105としては、半導体試料の他、鉄鋼、軽金属、及びポリマー系高分子等も想定される。また、保護膜作製やマーキングに使用されるガスデポジションユニットは、荷電粒子ビームの照射により堆積膜を形成するデポガスを貯蔵し、必要に応じてノズル先端から供給することができる。FIBによる試料の加工や切断との併用により、試料の特定箇所をピックアップするマイクロサンプリングユニットは、プローブ駆動部（図示せず）に

よって試料室103内を移動できるプローブを含む。このプローブは、試料に形成された微小な試料片を摘出したり、試料表面に接触させて試料へ電位を供給したりすることに利用される。

【００３６】

さらに、FIBカラム101aとSEMカラム102aは、上述したようにそれぞれ独立した制御回路を備え、各々のビームの走査範囲や走査時間を独立して制御することができる。また、検出器ごとに制御回路を備え、各検出器からの検出信号を演算処理し、画像化する回路または演算処理部を備える。そして、取得した各画像を表示するディスプレイを１つまたは複数備える。また、試料ステージ、デポジションユニット、及びマイクロサンプリングユニットといった各駆動機構も制御回路を各々に持つ。そして、それらの制御回路は互いに通信可能であり、１つまたは複数のコンピュータによって統合的にコントロールされる。

【００３７】

図２は、図１に示したクロスポイント104付近を拡大した様子を示す模式図である。ここでは、SE3は、試料105に照射された電子ビーム102bによって誘起された後方散乱電子201が、試料室内部に存在するFIBカラム101aやSEMカラム102aなどの構造物に衝突することによって、放出された二次電子202であることが示されている。尚、SE3検出器106には、SE3だけでなく二次電子や二次イオンの検出も可能な複合荷電粒子検出器を用い、選択的に検出するようにしてもよい。

【００３８】

図３は、SE3と二次電子の検出が可能な検出器の一例として、SE3検出器106の先端付近の様子を示す模式図である。図３に示すように、SE3検出器106は、その先端に、SE３の検出効率を操作（制御）するためのSE3収集グリッド（電極で構成される）307と、試料105から放出された二次電子の検出効率を操作（制御）するためのフロントグリッド（電極で構成される）308を持ち、２つのグリッドに異なる電圧を印加することができるようになっている。そして、SE3収集グリッド307に印加する電圧によりSE3の検出効率を調節することができ、フロントグリッド308に印加する電圧により二次電子の検出効率を調節することができる。これにより、SE3を選択的に検出可能となるSE検出器106を実現することができる。

【００３９】

＜SE3検出器の技術的効果＞

以上のような構成を有し、イオンビームと電子ビームの両方を照射できる複合荷電粒子線装置100に、SE3検出器106を搭載する効果は、以下のとおりである。

【００４０】

SE3は、イオンビーム照射によって発生しないという特徴に加え、後方散乱電子の検出効率より遥かに高いという特徴を持つ。そのため、イオンビームの電流量と電子ビームの電流量を独立に設定することができる。すなわち、FIB-SEM装置の検出器として一般的な二次電子検出器では困難であった通常のFIB加工条件と通常のSEM観察条件の同時実行が、SE3検出器を搭載することで可能となる。

【００４１】

また、大電流イオンビームを用いた加工中にSEM観察を行うことや低電流電子ビームを用いてFIB加工を高分解能観察することも可能となる。これにより、高精度なFIB加工を再現性よく、且つ、効率よく実施することができる。また、FIBカラムの対物レンズ表面やSEMカラムの対物レンズ表面といった試料室内部の構造物に二次電子の放出しやすい金や白金などの物質を塗布すると、より多くのSE3が放出され、よりS/N比の高い像を取得することができる。

【００４２】

また、FIB-SEM装置では、試料断面または表面をFIBで切削してはSEMで観察するという操作を繰り返す（FIBの加工とSEMの観察を切り替えながら繰り返す）ことで試料の奥行き方向の構造情報を取得することができる。このFIB加工とSEM観察を繰り返すというFIB-SEM装置特有の機能（以後、Mill ＆ Monitor機能と呼ぶ。）を用いて取得した画像は、SEM

観察を行った断面と断面(または表面と表面)の間隔あるいは任意の間隔を設定して三次元的に画像構築される。この機能を用いる場合においても、SE3検出器を用いてFIB加工しながら高分解能SEM観察を行う利点は大きい。何故なら、FIB加工しながら高分解能SEM観察を行えば、FIB加工とSEM観察の切り替え時間を必要としないため、三次元構築に用いる画像データの収集時間を極端に短縮することができる。例えば、FIBの加工速度を2 nm/秒、SEM像のフレームレートを1秒、解像度を512×512 pixelという条件下で、FIB加工中の動画を撮影した場合、厚さ1 mmの試料の三次元構造情報を僅か10分で取得することができる。

【００４３】

なお、三次元構造情報をMill & Monitor機能を用いて取得しようとすると、10nmの加工ステップで画像を取得したとしても2時間程度の時間を要する。これは、FIBとSEMを切り替えるのに数十秒（例えば40秒）掛かるため、トータルで膨大な時間が掛かってしまうからである。

【００４４】

また、三次元構築されたデータは、図４に示すようにデータ上で水平面方向に断面をスライスすることが可能である。したがって、三次元構築した構造と同じサンプルであれば、得られたSEM像と比較することにより加工位置を正確に特定することが可能であり、加工停止位置の特定にも利用することができる。例えば、得られた三次元構造情報から取得した加工停止位置の断面像とFIB加工中に取得したSEM像との比較により、加工停止位置を自動で検知し、自動的にFIB加工を終了させることも可能である。尚、加工停止位置を自動検知し、自動的にFIB加工を終了させる機能については、加工停止位置の断面構造が既知であれば実施可能である。

【００４５】

また、SE3検出器を用いれば、イオンビームの照射により堆積膜を形成している間のSEM観察も可能となる。これにより、堆積膜形成位置や堆積させる量を精度よく監視することができる。なお、堆積膜形成については、図１には図示していないが、試料室103内に、試料105にガスを吹き付けるガス銃を配置する。そして、試料105に照射された電子ビームによって誘起された後方散乱電子が、試料室105内部に存在する構造物に衝突することによって、放出された二次電子（SE３）をSE3検出器106によって検出し、この検出電子に基づいて画像を生成する。これにより、イオンビームを用いて堆積膜を形成している最中に、電子ビームを用いて観察を行うことができる。

【００４６】

また、FIB加工中の観察が可能な他の検出信号を同時に検出することで、より多様な情報を取得することができる。例えば、エネルギーの高い電子ビームでSEM観察を行う場合、電子が試料内部まで入り込んでしまうため、SE3のみの信号では加工断面位置の特定精度が劣化する。しかし、試料表面の材料情報や組成情報を反映した低エネルギー損失後方散乱電子とSE3とを同時に検出することで、エネルギーの高い電子ビームを用いた場合においても精度よく加工断面位置を特定することが可能となる。

【００４７】

その他、STEM信号とSE3を同時に取得した場合、STEM信号により試料内部の構造情報や試料の厚み情報を形成し、SE３により加工断面の構造情報を形成し、両者に基づいて生成された画像を観察しながら加工停止位置を特定することが可能となる。これにより加工再現性および、加工精度を向上させることができる。

【００４８】

また、各検出器で取得した画像は、1つまたは複数のディスプレイに同時に表示することが可能である。

【００４９】

さらに、SE3検出器106は、FIB加工断面に対して垂直な方向に設置することが望ましい。通常、加工断面はSEM観察可能なように電子ビーム照射方向を向いている。したがって、電子ビームの入射軸とイオンビームの入射軸を含む平面に対して垂直な平面にSE3検出

器106を設置することが望ましい。何故なら、SE3収集グリッド307やフロントグリッド308に印加された電圧は、イオンビームに対して引力または斥力として働く場合が考えられる。そのような場合、SE3検出器106の設置平面内の加工精度は著しく劣化するが、SE3検出器106の設置平面に対して垂直な方向の加工精度は殆ど影響を受けない。したがって、最も加工精度が要求される加工断面に対して垂直にSE3検出器106を設置することが望ましいのである。

【００５０】

＜FIB加工とSEM観察の同時処理＞

次に、集束イオンビームの走査信号と電子ビームの走査信号の同期をとりながら、FIB加工とSEM観察を同時に行う処理について説明する。

【００５１】

本処理を実施する場合、走査イオン顕微鏡像を取得するために第２の検出器として図１に示した二次電子検出器110を搭載する必要がある。尚、二次電子検出器110の代わりに二次イオン検出器を搭載してもよい。

【００５２】

本処理において、まず、集束イオンビームの照射位置と電子ビームの照射位置を一致させ同じ速度で走査する。どちらかの走査範囲が狭い場合には、走査範囲が狭い方のビームを試料の一部または試料外で待機させ、走査範囲が重なっている領域のみ同時に走査する。例えば、イオンビームの走査範囲が電子ビームの走査範囲よりも狭い場合には、電子ビームの走査は通常と同じように行い、イオンビームを電子ビームの走査位置と一致させるように走査する。

【００５３】

図５は、FIB加工とSEM観察の同時処理を説明するためのフローチャートである。また、図６は、FIB加工とSEM観察の同時処理の様子の一例を示す概念図である。

【００５４】

まず、図５において、統合コンピュータ120は、例えば操作部128から入力されたSEM及びFIBのスキャン範囲を比較する（ステップS101）。SEMのスキャン範囲がFIBのスキャン範囲以上であれば、処理はステップS102に移行し、未満であれば処理はステップS105に移行する。そして、さらに、統合コンピュータ120は、SEMのスキャン範囲とFIBのスキャン範囲が同一か否か判断する（ステップS102）。SEMのスキャン範囲がFIBスキャン範囲より大きければ、処理はステップS103に移行し、同じであれば処理はステップS104に移行する。

【００５５】

ステップS103では、統合コンピュータ120は、イオンビームスキャン制御器121及び電子ビームスキャン制御器122を介して、FIBスキャン動作を待機させ、SEMスキャン動作を開始するようにイオンビーム及び電子ビームの走査を制御する。そして、統合コンピュータ120は、スキャン終了コマンドを受信した場合には処理を終了させ、受信していなければ処理をステップS107に移行させる（ステップS106）。ステップS107では、統合コンピュータ120は、SEMのスキャン位置がFIBのスキャン範囲に属するようになったか判断する。属さない場合にはSEMスキャン動作を継続し、処理は再度ステップS106に移行する。

【００５６】

一方、属するようになった場合には、統合コンピュータ120は、FIBスキャンを開始させる（ステップ108）。そして、統合コンピュータ120は、スキャン終了コマンドを受信した場合には処理を終了させ、受信していなければ処理をステップS110に移行させる（ステップS109）。ステップS110では、統合コンピュータ120は、SEMのスキャン位置がFIBのスキャン範囲から外れたか否か判断する。外れたと判断した場合、統合コンピュータ120は、FIBキャン動作を停止し、処理をステップS106に移行させる。一方、まだ属する場合、統合コンピュータ120は、FIBとSEMのスキャン動作を継続すべく、処理をステップS109に移行させる。

【００５７】

ステップS102においてSEMスキャン範囲とFIBスキャン範囲が同一である場合には、統合コンピュータ120は、FIBスキャン動作とSEMスキャン動作を開始する（ステップS104)。そして、統合コンピュータ120は、スキャン終了コマンドを受信した場合には処理を終了させ、受信していなければ両スキャン動作を継続させる（ステップS112）。

【００５８】

ステップS101においてSEMスキャン範囲がFIBスキャン範囲未満であったと判断された場合、統合コンピュータ120は、FIBスキャン動作を開始し、SEMスキャン動作を待機させるように制御する（ステップS105）。そして、統合コンピュータ120は、スキャン終了コマンドを受信した場合には処理を終了させ、受信していなければ処理をステップS114に移行させる（ステップS113）。ステップS114では、統合コンピュータ120は、FIBのスキャン位置がSEMのスキャン範囲に属するか否か判断し、属していないと判断した場合には、FIBのスキャンのみを継続し、属していると判断した場合には、処理をステップS115に移行させ、SEMスキャン動作を開始するように制御する。

【００５９】

次に、統合コンピュータ120は、スキャン終了コマンドを受信した場合には処理を終了させ、受信していなければ処理をステップS117に移行させる（ステップS116）。ステップS117では、統合コンピュータ120は、FIBのスキャン位置がSEMのスキャン範囲から外れたか否か判断する。外れたと判断した場合、統合コンピュータ120は、SEMキャン動作を停止し、処理をステップS113に移行させる。一方、まだ属する場合、統合コンピュータ120は、FIBとSEMのスキャン動作を継続すべく、処理をステップS116に移行させる。

【００６０】

なお、ここでは、一方のビームが待機状態にあるフェーズをPhase A、両ビームが同じ場所を同時にスキャンしているフェーズをPhase Bと定義する。Phase Aには、ステップS106、S107、S113、及びS114が含まれ、Phase Bには、S109、S110、S112、S116、及びS117が含まれる。

【００６１】

続いて、図５のフローチャートによる動作を、図６を用いてより分かりやすく説明する。図６（ａ）に示すように、まず電子ビーム402bのみ試料405上を走査する。このとき、イオンビームは、試料外の場所で待機させ試料には照射しない。この状態が、図５におけるPhase Aの状態である。そして、電子ビーム402bの走査位置がイオンビームの走査範囲406と重なる領域に到達したら、図６（ｂ）に示すように、イオンビーム401bを試料405に照射し、電子ビームと同じ速度で走査する。この状態が、図５におけるPhase Bの状態である。そして、電子ビーム402bの走査位置が、イオンビームの走査範囲406を超える位置に到達したら、図６（ｃ）に示すように、イオンビームを試料外の場所で待機させ、電子ビーム402bのみ走査する。この状態が、図５におけるPhase Aに戻った状態である。そして再び、電子ビーム402bがイオンビームの走査領域406と重なる領域に到達したら、図6(d)に示すように、イオンビーム401bを試料405に照射し、電子ビームと同じ速度で走査する。この状態が、図５におけるPhase Bに再度移行した状態である。図６（ｂ）（ｃ）（ｄ）のプロセスを何度か繰り返し、両ビームがイオンビームの走査範囲406の終点に到達したら、図６（ｅ）に示すように、イオンビームを試料外の場所で待機させ、電子ビーム402bのみを走査する。この状態が、再び図５におけるPhase Aの状態である。このように、図６（ａ）乃至（ｅ）に示したプロセスを繰り返しながら、SEM像および走査イオン顕微鏡像を同時に取得する。

【００６２】

さらに、得られた２種類の画像は、FIB-SEM装置に備えられたディスプレイ129に同時に表示することができる。このとき、得られた走査イオン顕微鏡画像（FIB像）の一辺または両辺を任意の大きさに拡大若しくは縮小して、走査電子顕微鏡像（SEM像）と同時に表示するようにしても良い。

【００６３】

以上のような処理を実施することで得られる効果は次の通りである。まず、イオンビー

ムの走査範囲が電子ビームの走査範囲よりも狭い場合には、SEM像を用いて加工領域の位置を観察し、イオンビーム走査領域の画像を用いて加工断面の位置を監視することができる。これにより、加工位置のずれを即座に検知し、加工位置を自動または手動で補正することができる。そのため、加工精度を向上することができる。

【００６４】

また、イオンビームの走査範囲が電子ビームの走査範囲よりも広い場合には、イオンビーム走査領域の画像を用いて加工断面全体の状況を確認しながら、SEM像を用いて局所領域の断面構造を詳細に観察することができる。これにより、加工停止位置を高精度に特定することができる。半導体デバイスのように加工進行方向に周期的な構造を持つ場合など、周期構造をもつ領域の高分解能像を観察しつつ、かつ加工領域は広く保つことで、観察視野が広く、良質な(S)TEM薄膜試料を作製することができるようになる。

【００６５】

また、イオンビームの走査速度が電子ビームの走査速度よりも速い場合には、１枚のSEM像中で、加工断面の位置が、電子ビームを照射した時刻の差に相当する加工量分だけずれてしまう。しかし、統合コンピュータ120からの制御により、電子ビームとイオンビームの走査速度を同じにすることで、そのずれを解消することができる。これにより、加工停止位置の特定精度を向上させることができる。また、FIB加工中のSEM像を取得し、試料の三次元構造データを構築する場合においても、三次元構造の構築精度を向上させることができる。

【００６６】

さらに、オペレータの指示に従って、電子ビームの走査時刻をイオンビームの走査時刻より僅かに遅くする（同時に（同期をとりながら）走査するが、同じ位置を走査する時刻がずれている）ことで、切削加工直後のSEM像を取得することができる。特に、酸化反応が急速に進む物質など、表面が不安定な材料を観察する場合に効果的である。但し、この場合、二次電子検出器を用いて得られた像は電子ビーム照射位置の構造情報とイオンビーム照射位置の構造情報が混合した像となってしまう。

【００６７】

尚、電子ビーム照射によって得られる構造情報とイオンビーム照射によって得られる構造情報は異なる場合があることから、加工を目的とするイオンビームに限らず、観察を目的とするイオンビームを用いた場合においてもイオンビームの走査と電子ビームの走査の同期をとる利点は大きい。

【００６８】

また、本実施形態では、SEM像の取得にSE3検出器106を用いているが、後方散乱電子検出器112や低エネルギー損失後方散乱電子検出器113など、イオンビーム照射の影響を受けることなくSEM像を取得することが可能な検出器であれば、検出器の種類を問わない。

【００６９】

＜イオンビームによる加工領域及び加工条件の変更＞

次に、イオンビーム（FIB）加工を続けながら、イオンビームの加工領域および加工条件（イオンビーム照射条件）を変更する動作について説明する。図７は、当該動作の概要を示す図である。

【００７０】

図７（ａ）（ｃ）（ｅ）は、本実施例を実施しているときのディスプレイ表示画面を示している。また、図７（ｂ）（ｄ）（ｆ）はそれぞれ図７（ａ）（ｃ）（ｅ）に示す画面のときの試料形状を示している。

【００７１】

図７（ｂ）に示した状態から加工を開始するとする。また、SEM像表示画面506aに点線で示した形状が加工すべき形状を示している。まず、試料505をSEMで観察し、得られたSEM像をSEM像表示画面506aに表示する。次に、SEM像表示画面506aを見ながら、イオンビームの走査範囲509bを設定する。そして、SEM像表示画面上にイオンビームの走査範囲を示す表示507aを表示する。

【００７２】
次に、コントロールボタン508を用いて、イオンビームの走査範囲509bを図７（ｂ）に示す矢印Ｘ１の方向に移動させる。このとき、SEM像表示画面506aのSEM像は随時更新される。また、イオンビームの走査範囲を示す表示507aもイオンビームの走査範囲509bの移動に合わせて移動させる。その後、イオンビーム501bは、図７（ｄ）に示すイオンビームの走査範囲509dに到達する。そのとき、SEM像表示画面には、図７（ｃ）に示すようなSEM像が表示される。また、試料形状は、図７（ｄ）に示すような形状となる。以上の要領で引き続き、イオンビームによる加工を続ける。すなわち、コントロールボタン508を用いて、イオンビームの走査範囲509dを図７（ｄ）に示す矢印Ｘ２の方向に移動させる。SEM像表示画面506c上のイオンビームの走査範囲を示す表示507cもイオンビームの走査範囲509dの移動に合わせて図７（ｃ）に示す矢印Ｘ２の方向に移動させる。その結果、図７（ｆ）に示すように、所望の形状を作製することができる。
【００７３】
本機能を実施することで得られる効果は次の通りである。一般的に、イオンビーム加工では、加工条件を選択した後、加工時間を設定し、加工終了後に加工された形状を確認する。そのため、微細加工を行う場合には、加工条件を事前に見積もっておく必要がある。しかし、本機能を用いる場合には、SEMを用いて加工中の試料形状を観察しているため、加工形状を随時フィードバックし加工領域および加工条件を設定することができる。そのため、事前に加工条件を見積もる必要がない。
【００７４】
また、試料のある部分だけ切り出したい場合には、SEM像を観察しながら切り出したい形状に沿ってイオンビームの走査領域を動かせばよいため、容易に加工を実施することができる。
また、様々な物質から形成される試料を任意の形に加工したい場合、物質によって加工速度が異なるため、一般的に加工条件の設定が複雑になる。しかし、本機能を用いれば、加工状況を観察しながら加工領域を変更するため、そのような煩雑な設定を事前に行う必要がない。
また、試料ドリフトなど不測の事態にも即座に対応し、加工を続けることができる。
【００７５】
尚、本実施形態では、イオンビームの走査範囲を移動させるために、ディスプレイ129に表示されたコントロールボタン（ＧＵＩ）508を用いたが、イオンビームの走査範囲を移動させる目的において、専用のコントロールパネル（操作パネル）やマウスを用いても構わない。また、本実施形態では、イオンビームの走査範囲をコントロールボタン508で動かし、その動きに合わせて、SEM像中の表示を動かしたが、SEM像中の表示をマウス等で動かした場合には、その移動に合わせてイオンビームの走査範囲を移動させる。さらに、イオンビームの走査範囲を平行移動させたが、回転移動させるようにしても良い。その場合、コントロールボタン508は回転移動可能な形状にする必要がある。
【００７６】
（２）第２の実施形態
第２の実施形態による複合荷電粒子線装置の構成は、ほぼ第１の実施形態の装置構成と同じであるが、FIBカラム内部の構成が第１の実施形態と異なっている。
【００７７】
つまり、図８に示すように、FIBカラム601aは、静電型コンデンサーレンズ608及び静電型対物レンズ610の間に、FIBでは通常設けない補正磁場発生部609を備えた構成となっている。FIBカラム601aのその他の装置要素は、第１の実施形態の場合と同じである。
【００７８】
補正磁場発生部609はイオンビームの歪を補正するものである。この補正磁場発生部609を設けることによる技術的効果は次のとおりである。
【００７９】
特許文献４に記載されているように、イオンビームの光軸上に磁場が存在する場合、質

量の異なるイオンは異なる軌道を取る。そのため、試料上605でイオンビームが一点に集束されないという問題が生じる。一般に用いられるガリウムイオンビームは二種の同位体を含んでおり、SE3検出器106を搭載したFIB-SEM装置であっても試料105側に磁場を漏らすタイプの対物レンズを用いたSEMの場合には、FIB加工とSEM観察を同時に行うことができない。

【００８０】

しかし、補正磁場発生部609を設けることで、イオンビーム601bの光軸上に磁場が存在する場合においても、イオンビームが試料上で同位体分離を生じることなく、クロスポイント604に照射されるようになる。このため、試料105側に磁場を漏らすタイプの対物レンズを用いたSEMにおいても、FIB加工中にSEM観察を行うことができるようになる。

【００８１】

セミインレンズ型、或いはシュノーケル型と称される、試料側に磁場を漏らすタイプのレンズは、試料側に磁場を漏らさないアウトレンズ型の対物レンズよりもビームプローブ径が小さく、より高分解能観察が可能である。よって、FIB加工中にセミインレンズ型の対物レンズを用いて高分解能SEM観察を行うことにより加工精度を向上させることが可能である。また、取得した複数枚のSEM像を用いて三次元構築を行う場合においても、より分解能の高い三次元構築が可能である。

【００８２】

尚、本実施形態では、静電型コンデンサーレンズ608と静電型対物レンズ610の間に補正磁場発生部609を配置したが、FIBカラム601a内のどこに配置しても同様の効果を得ることができる。また、イオンビームの照射電流量は少なくなるが、特許文献５に記載されているように、不要な同位体成分を取り除き、所望のイオンのみを取得する機構（例えば、複数の同位体を含むイオンビームから、試料105の加工に不必要な同位体を取り除き、単一質量のイオンからなるイオンビームを生成するフィルタ）を設けることでも、イオンビーム照射中にセミインレンズモードでSEM観察を行うことが可能となる。

【産業上の利用可能性】

【００８３】

FIB-SEM装置におけるFIB加工を、実時間でSEM観察し、加工状況を常に精度よく監視することが可能な装置を提供できる。最先端デバイスや機能材料の、高品位、且つ高精度な薄膜試料作製が可能となり、加工再現性、加工効率が飛躍的に向上するとともに、（S）TEMにおける解析精度も飛躍的に向上する。

【００８４】

また、Heイオン顕微鏡などのように観察を目的としてイオンビームを照射するカラムと電子ビームを照射するカラムとを備えた複合荷電粒子線装置においても、走査イオン顕微鏡像と電子顕微鏡像の同時取得を可能にする。

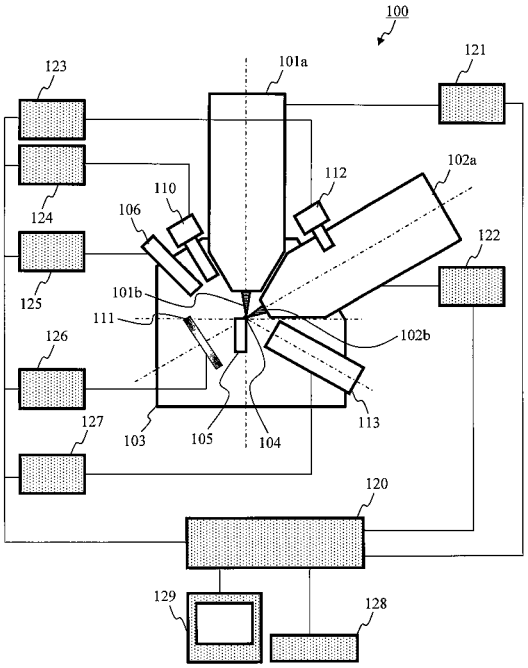
【符号の説明】

【００８５】

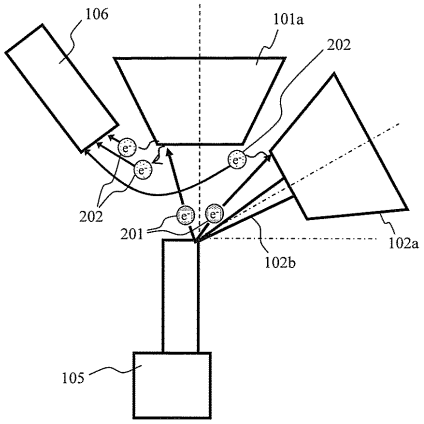
101a，601a：イオンビームカラム
101b，401b，501b，601b：イオンビーム
102a，602a：電子ビームカラム
102b，402b，602b：電子ビーム
103：試料室
104，604：クロスポイント
105，405，505，605：試料
106：三次電子検出器（三次電子だけでなく二次電子や二次イオンの検出も可能な複合荷電粒子検出器を含む）
110：二次電子検出器
111：透過電子検出器
112：後方散乱電子検出器
113：低エネルギー損失後方散乱電子検出器

120：統合コンピュータ
121：イオンビームスキャン制御器
122：電子ビームスキャン制御器
123：後方散乱電子検出器用制御器
124：二次電子検出器用制御器
125：三次電子検出器用制御器
126：透過電子検出器用制御器
127：低エネルギー損失後方散乱電子検出器用制御器
128：コントローラ（キーボード、マウスなど）
129：ディスプレイ
201：後方散乱電子
202：試料室内部に存在する構造物に衝突することによって放出された二次電子
307 ： SE3収集グリッド
308 ： フロントグリッド
406：イオンビームの走査範囲
506a，506c，506e：SEM像表示画面
507a，507c：イオンビームの走査範囲を示す表示
508：イオンビームの走査範囲を動かすコントロールボタン
509b，509d：イオンビームの走査範囲
606：イオン源
607：加速電極
608：静電型コンデンサーレンズ
609：補正磁場発生部
610：静電型対物レンズ

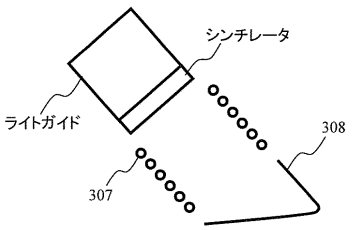
【図１】



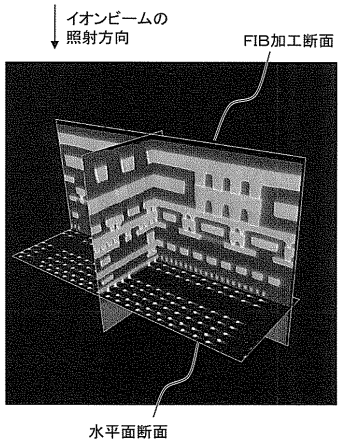
【図２】



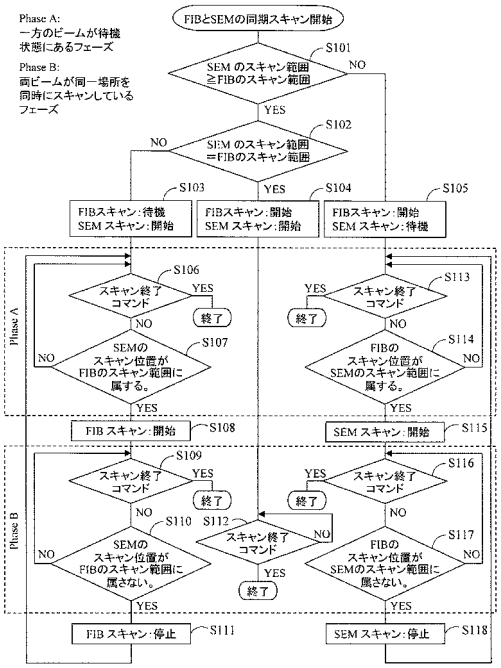
【図３】



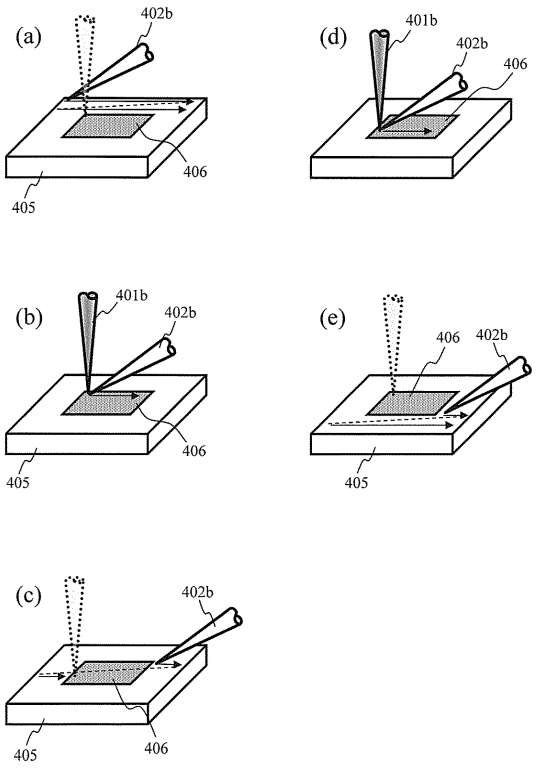
【図４】


イオンビームの
照射方向
FIB加工断面
水平面断面

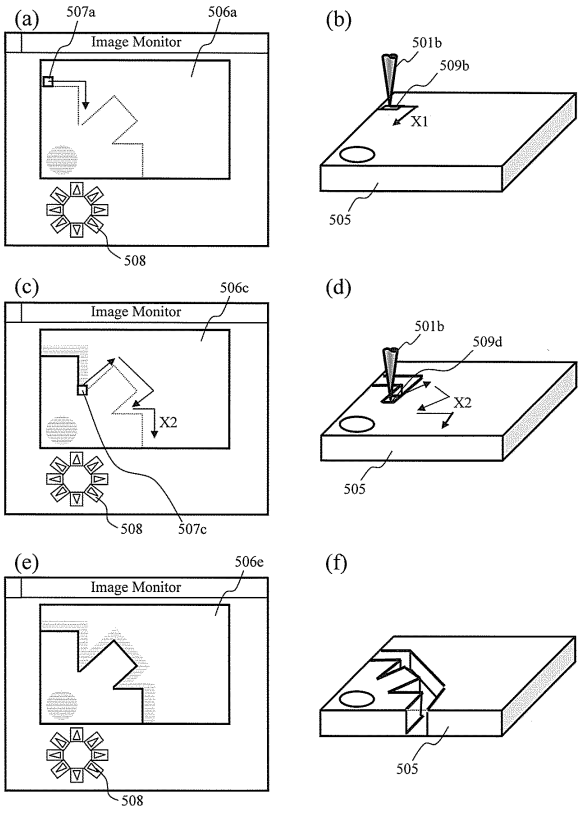
【図５】


Phase A:
一方のビームが待機
状態にあるフェーズ
Phase B:
両ビームが同一場所を
同時にスキャンしている
フェーズ
FIBとSEMの同期スキャン開始
S101
SEM のスキャン範囲
≧FIBのスキャン範囲
NO
YES
S102
SEM のスキャン範囲
＝FIBのスキャン範囲
NO
YES
S103
FIBスキャン：待機
SEM スキャン：開始
S104
FIBスキャン：開始
SEM スキャン：開始
S105
FIBスキャン：開始
SEM スキャン：待機
Phase A
S106
スキャン終了
コマンド
YES
終了
NO
S107
SEMの
スキャン位置が
FIBのスキャン範囲に
属する。
NO
YES
S113
スキャン終了
コマンド
YES
終了
NO
S114
FIBの
スキャン位置が
SEMのスキャン範囲に
属する。
NO
YES
FIB スキャン：開始
S108
SEM スキャン：開始
S115
Phase B
S109
スキャン終了
コマンド
YES
終了
NO
S110
SEMの
スキャン位置が
FIBのスキャン範囲に
属さない。
NO
YES
S112
スキャン終了
コマンド
NO
YES
終了
S116
スキャン終了
コマンド
YES
終了
NO
S117
FIBの
スキャン位置が
SEMのスキャン範囲に
属さない。
NO
YES
FIB スキャン：停止
S111
SEM スキャン：停止
S118

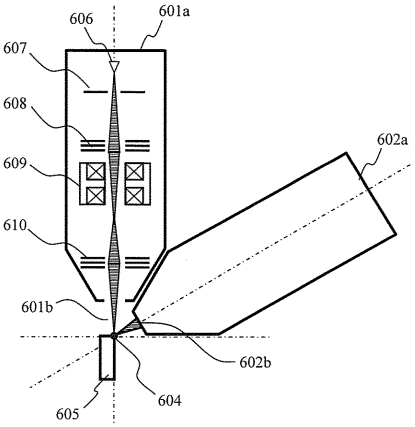
【図６】


(a)
402b
406
405
(b)
401b
402b
406
405
(c)
402b
405
406
(d)
401b
402b
406
(e)
406
402b
405

【図７】


(a)
507a
506a
Image Monitor
508
(b)
501b
509b
X1
505
(c)
506c
Image Monitor
X2
508
507c
(d)
501b
509d
X2
505
(e)
506e
Image Monitor
508
(f)
505

【図８】



フロントページの続き

(72)発明者　揚村　寿英
茨城県ひたちなか市大字市毛８８２番地　株式会社日立ハイテクノロジーズ　那珂事業所内

審査官　遠藤　直恵

(56)参考文献　特開平０９－１６１７１２（ＪＰ，Ａ）
特表２００９－５３６７７６（ＪＰ，Ａ）
特開２００８－０３４１７２（ＪＰ，Ａ）
特開平０７－２９６７５６（ＪＰ，Ａ）
特開２００８－２８６６５２（ＪＰ，Ａ）
特開平０５－１０９３７９（ＪＰ，Ａ）
特開２００９－０２６６２１（ＪＰ，Ａ）

(58)調査した分野(Int.Cl.，ＤＢ名)
Ｈ０１Ｊ　３７／２４４
Ｈ０１Ｊ　３７／２８
Ｈ０１Ｊ　３７／３１７