

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特 許 公 報(B2)

(11) 特許番号

特許第6462729号
(P6462729)

(45) 発行日 平成31年1月30日(2019.1.30)

(24) 登録日 平成31年1月11日(2019.1.11)

(51) Int.Cl.	F I
HO 1 J 37/28 (2006.01)	HO 1 J 37/28 B
HO 1 J 37/244 (2006.01)	HO 1 J 37/28 Z
HO 1 J 37/141 (2006.01)	HO 1 J 37/244
	HO 1 J 37/141 Z

請求項の数 24 (全 29 頁)

(21) 出願番号 特願2016-571793 (P2016-571793)	(73) 特許権者 399105623 松定プレジジョン株式会社 滋賀県草津市青地町745番地
(86) (22) 出願日 平成27年12月3日(2015.12.3)	(74) 代理人 110000338 特許業務法人HARAKENZO WORLD PATENT & TRADEMARK
(86) 国際出願番号 PCT/JP2015/084072	(72) 発明者 熊本 和哉 滋賀県草津市青地町745番地 松定プレジジョン株式会社内
(87) 国際公開番号 W02016/121224	(72) 発明者 松田 定好 滋賀県草津市青地町745番地 松定プレジジョン株式会社内
(87) 国際公開日 平成28年8月4日(2016.8.4)	審査官 鳥居 祐樹
審査請求日 平成30年8月9日(2018.8.9)	最終頁に続く
(31) 優先権主張番号 特願2015-17317 (P2015-17317)	
(32) 優先日 平成27年1月30日(2015.1.30)	
(33) 優先権主張国 日本国(JP)	
早期審査対象出願	

(54) 【発明の名称】 荷電粒子線装置及び走査電子顕微鏡

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

荷電粒子源と、
前記荷電粒子源から放出する荷電粒子線を加速するために設けられる、前記荷電粒子源に接続された加速電源と、
試料に対して前記荷電粒子線が入射する側の反対側に設置され、前記荷電粒子線を前記試料に集束させる対物レンズと、
前記荷電粒子線を前記試料に向けて射出する上部装置と、
前記試料が保持される下部装置と、
前記荷電粒子線によって前記試料から放出する信号電子を検出する検出器と
を備え、
前記上部装置は、孔部を有し、前記孔部から前記上部装置の内部を通った前記荷電粒子線を最終的に放出し、
前記検出器は、前記上部装置と前記下部装置との間に、且つ、前記孔部よりも下の、前記対物レンズの光軸から3cm以内の位置に設けられている、荷電粒子線装置。

【請求項2】

前記信号電子は、前記試料から放出する二次電子を含む、請求項1に記載の荷電粒子線装置。

【請求項3】

荷電粒子源と、

前記荷電粒子源から放出する荷電粒子線を加速するために設けられる、前記荷電粒子源に接続された加速電源と、

試料に対して前記荷電粒子線が入射する側の反対側に設置され、前記荷電粒子線を前記試料に集束させる対物レンズと、

前記荷電粒子線を前記試料に向けて射出する上部装置と、

前記試料が保持される下部装置と、

前記荷電粒子線によって前記試料から放出する信号電子を検出する検出器と、

前記試料に負電位を与える、前記荷電粒子線を減速するためのリターディング電源とを備え、

前記上部装置は、孔部を有し、前記孔部から前記上部装置の内部を通った前記荷電粒子線を最終的に放出し、

前記検出器は、前記上部装置と前記下部装置との間に、且つ、前記対物レンズの光軸から3cm以内の位置に設けられている、荷電粒子線装置。

【請求項4】

前記試料に負電位を与える、前記荷電粒子線を減速するためのリターディング電源を備えた、請求項1または2に記載の荷電粒子線装置。

【請求項5】

前記試料に負電位を与える、前記荷電粒子線を減速するためのリターディング電源を備え、

前記信号電子は、前記試料から放出する反射電子を含む、請求項2に記載の荷電粒子線装置。

【請求項6】

電子を引きつける電界を有する二次電子検出器を備え、

前記信号電子は、前記試料から放出する二次電子を含み、

前記二次電子検出器から発生する電界が、前記荷電粒子線によって前記試料から放出される二次電子を引き付けるように、前記二次電子検出器は配置される、請求項3に記載の荷電粒子線装置。

【請求項7】

前記検出器は、前記荷電粒子線が通過する軌道をふさがないように配置され、前記上部装置の最下部に取り付けられる、請求項1から6のいずれかに記載の荷電粒子線装置。

【請求項8】

前記試料に対して前記荷電粒子線が入射する側に設置される、前記対物レンズとは異なる他の対物レンズを備えた、請求項1から7のいずれかに記載の荷電粒子線装置。

【請求項9】

前記検出器と前記対物レンズとの距離は、10mmから200mmとされる、請求項1から8のいずれかに記載の荷電粒子線装置。

【請求項10】

前記検出器は、半導体検出器、蛍光体の発光方式の検出器、またはマイクロチャンネルプレート検出器であり、前記荷電粒子線の軌道から3cm以内に配置される、請求項1から9のいずれかに記載の荷電粒子線装置。

【請求項11】

前記荷電粒子源として、熱電子源型のものが用いられる、請求項1から10のいずれかに記載の荷電粒子線装置。

【請求項12】

前記対物レンズは、前記加速電源を-30kVから-10kVのいずれかにして加速された前記荷電粒子線を、前記対物レンズの磁極の前記試料に最も近いところから見て、0mmから4.5mmのいずれかの高さの位置に集束可能である、請求項1から11のいずれかに記載の荷電粒子線装置。

【請求項13】

前記対物レンズの強度と前記他の対物レンズの強度とを独立に制御する機能と、

10

20

30

40

50

前記荷電粒子線を前記対物レンズのみで試料に集束する機能と、
 前記荷電粒子線を前記他の対物レンズのみで前記試料に集束する機能とを有する、請求項 8 に記載の荷電粒子線装置。

【請求項 14】

荷電粒子源と、
 前記荷電粒子源から放出する荷電粒子線を加速するために設けられる、前記荷電粒子源に接続された加速電源と、

試料に対して前記荷電粒子線が入射する側の反対側に設置され、前記荷電粒子線を前記試料に集束させる対物レンズと、

前記荷電粒子線を前記試料に向けて射出する上部装置と、

前記試料が保持される下部装置と、

前記荷電粒子線によって前記試料から放出する信号電子を検出する検出器と、

前記試料に対して前記荷電粒子線が入射する側に設置される、前記対物レンズとは異なる他の対物レンズと
 を備え、

前記上部装置は、孔部を有し、前記孔部から前記上部装置の内部を通った前記荷電粒子線を最終的に放出し、

前記検出器は、前記上部装置と前記下部装置との間に、且つ、前記孔部よりも下の位置に設けられ、

前記荷電粒子線を前記対物レンズのみで試料に集束する機能と、

前記荷電粒子線を前記他の対物レンズのみで前記試料に集束する機能とを有し、

前記荷電粒子線を前記対物レンズのみで試料に集束するとき、前記対物レンズと測定試料面との距離が前記他の対物レンズと測定試料面との距離よりも近くされ、

前記荷電粒子線を前記他の対物レンズのみで前記試料に集束するとき、前記他の対物レンズと測定試料面との距離が前記対物レンズと測定試料面との距離よりも近くされる、荷電粒子線装置。

【請求項 15】

前記上部装置と前記下部装置との間に配置され、前記荷電粒子線が通過する開口部のある電位板を備え、

前記電位板には、接地電位、正の電位、または負の電位が与えられる、請求項 1 から 14 のいずれかに記載の荷電粒子線装置。

【請求項 16】

荷電粒子源と、

前記荷電粒子源から放出する荷電粒子線を加速するために設けられる、前記荷電粒子源に接続された加速電源と、

試料に対して前記荷電粒子線が入射する側の反対側に設置され、前記荷電粒子線を前記試料に集束させる対物レンズと、

前記荷電粒子線を前記試料に向けて射出する上部装置と、

前記試料が保持される下部装置と、

前記荷電粒子線によって前記試料から放出する信号電子を検出する検出器と、

前記上部装置と前記下部装置との間に配置され、前記荷電粒子線が通過する開口部のある電位板と
 を備え、

前記上部装置は、孔部を有し、前記孔部から前記上部装置の内部を通った前記荷電粒子線を最終的に放出し、

前記検出器は、前記上部装置と前記下部装置との間に、且つ、前記孔部よりも下の位置に設けられ、

前記電位板には、接地電位、正の電位、または負の電位が与えられ、

前記検出器は、前記電位板の下側に配置されている、荷電粒子線装置。

【請求項 17】

10

20

30

40

50

前記電位板の開口部は直径2 mmから20 mmの円形、またはメッシュ形状である、請求項15または16に記載の荷電粒子線装置。

【請求項18】

荷電粒子源と、

前記荷電粒子源から放出する荷電粒子線を加速するために設けられる、前記荷電粒子源に接続された加速電源と、

試料に対して前記荷電粒子線が入射する側の反対側に設置され、前記荷電粒子線を前記試料に集束させる対物レンズと、

前記荷電粒子線を前記試料に向けて射出する上部装置と、

前記試料が保持される下部装置と、

前記荷電粒子線によって前記試料から放出する信号電子を検出する検出器と、

前記上部装置と前記下部装置との間に配置され、前記荷電粒子線が通過する開口部のある電位板と

を備え、

前記上部装置は、孔部を有し、前記孔部から前記上部装置の内部を通った前記荷電粒子線を最終的に放出し、

前記検出器は、前記上部装置と前記下部装置との間に、且つ、前記孔部よりも下の位置に設けられ、

前記電位板には、接地電位、正の電位、または負の電位が与えられ、

前記電位板は、試料の近く以外の場所では前記試料が載置される導電性試料台から離れる形状を有する、荷電粒子線装置。

【請求項19】

荷電粒子源と、

前記荷電粒子源から放出する荷電粒子線を加速するために設けられる、前記荷電粒子源に接続された加速電源と、

試料に対して前記荷電粒子線が入射する側の反対側に設置され、前記荷電粒子線を前記試料に集束させる対物レンズと、

前記荷電粒子線を前記試料に向けて射出する上部装置と、

前記試料が保持される下部装置と、

前記荷電粒子線によって前記試料から放出する信号電子を検出する検出器と、

前記上部装置と前記下部装置との間に配置され、前記荷電粒子線が通過する開口部のある電位板と、

前記電位板を移動させる移動手段と

を備え、

前記上部装置は、孔部を有し、前記孔部から前記上部装置の内部を通った前記荷電粒子線を最終的に放出し、

前記検出器は、前記上部装置と前記下部装置との間に、且つ、前記孔部よりも下の位置に設けられ、

前記電位板には、接地電位、正の電位、または負の電位が与えられる、荷電粒子線装置

。

【請求項20】

前記移動手段は、前記電位板に接続されたステージであり、

前記ステージは、前記試料を載置可能である、請求項19に記載の荷電粒子線装置。

【請求項21】

前記荷電粒子線は、正のイオンであり、

前記試料には、接地電位以上の正の電位が与えられており、

前記電位板には、前記試料の電位と比べて同電位または高い電位が与えられている、請求項15から20のいずれかに記載の荷電粒子線装置。

【請求項22】

荷電粒子源と、

10

20

30

40

50

前記荷電粒子源から放出する荷電粒子線を加速するために設けられる、前記荷電粒子源に接続された加速電源と、

試料に対して前記荷電粒子線が入射する側の反対側に設置され、前記荷電粒子線を前記試料に集束させる対物レンズと、

前記荷電粒子線を前記試料に向けて射出する上部装置と、

前記試料が保持される下部装置と、

前記荷電粒子線によって前記試料から放出する信号電子を検出する検出器と、

前記試料に対して前記荷電粒子線が入射する側に設置される、前記対物レンズとは異なる他の対物レンズと

を備え、

10

前記上部装置は、孔部を有し、前記孔部から前記上部装置の内部を通った前記荷電粒子線を最終的に放出し、

前記検出器は、前記上部装置と前記下部装置との間に、且つ、前記孔部よりも下の位置に設けられ、

前記対物レンズと前記他の対物レンズを同時に使い、前記荷電粒子線の前記試料に入射する開き角を前記他の対物レンズで可変して前記試料に集束する機能を有する、荷電粒子線装置。

【請求項 2 3】

前記荷電粒子源から放出される電子が前記対物レンズの主面と光軸との交点近くを通過する軌道になるように調整される、請求項 2 2 に記載の荷電粒子線装置。

20

【請求項 2 4】

請求項 1 から 2 0、2 2、2 3 のいずれかに記載の荷電粒子線装置を備える、走査電子顕微鏡。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0 0 0 1】

本発明は、荷電粒子線装置及び走査電子顕微鏡に関する。より特定的には、本発明は、試料から放出する信号電子を検出する検出部を簡単な構成とすることができる荷電粒子線装置及び走査電子顕微鏡に関する。

【背景技術】

30

【0 0 0 2】

荷電粒子線装置としては、走査電子顕微鏡 (Scanning Electron Microscope : 以下、「SEM」と略す。)、EPMA (Electron Probe Micro Analyser)、電子ビーム溶接機、電子線描画装置、およびイオンビーム顕微鏡などが存在する。

【0 0 0 3】

従来のSEMでは、高分解能化の観点からレンズの短焦点化に工夫が成されている。高分解能化のためには、レンズの光軸上磁束密度分布 $B(z)$ において B を強くすることが必要である。また、高分解能化のためには、レンズの厚み、すなわち B 分布の z 幅を薄くすることが必要である。

40

【0 0 0 4】

下記特許文献 1 には、2つの対物レンズ (第 1 の対物レンズと第 2 の対物レンズ) を備えたSEMが記載されている (以後、試料に対して電子銃側のレンズを第 1 の対物レンズと呼ぶ。試料から見て電子銃の反対側にある対物レンズを第 2 の対物レンズと呼ぶ)。第 2 の対物レンズは、特に、加速電圧 V_{acc} が $0.5 \sim 5 \text{ kV}$ の低加速時における高分解能観察モードで用いられる。第 1 の対物レンズは、加速電圧 V_{acc} が $0.5 \sim 30 \text{ kV}$ における通常の観察モードで用いられる。

【0 0 0 5】

下記特許文献 1 において、第 1 の対物レンズと第 2 の対物レンズとは同時に動作させることはない。第 1 の対物レンズと第 2 の対物レンズとは、モード毎にモード切り替え手段

50

によって切り替えられる。また、下記特許文献 1 の第 2 の実施例（[0 0 1 7] 段落）では、第 2 の対物レンズの磁極の一部を電氣的絶縁部を介して電流電位的に分離することが記載されている。そして、磁極の一部と試料には、電圧 V_{decel} が印加される。

【 0 0 0 6 】

下記特許文献 1 の第 1 の実施例（[0 0 1 0] ~ [0 0 1 6] 段落）では、二次電子（または反射電子）検出器は、第 1 の対物レンズよりもさらに電子銃側に置かれている。試料部で発生した二次電子（又は反射電子）は、第 1 の対物レンズの中を通過して検出器に入る。

【 0 0 0 7 】

下記特許文献 2 も、SEM の構成を開示している。特許文献 2 の SEM において対物レンズは、試料に対して電子銃とは反対側に配置される。二次電子は二次電子検出器からの引込み電界により偏向されて、二次電子検出器に捕獲される。

10

【先行技術文献】

【特許文献】

【 0 0 0 8 】

【特許文献 1】特開 2 0 0 7 - 2 5 0 2 2 3 号公報

【特許文献 2】特開平 6 - 1 8 1 0 4 1 号公報

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【 0 0 0 9 】

20

特許文献 1 において、検出器は、第 1 の対物レンズよりも電子銃側に設けられている。そのため、信号電子（二次電子および反射電子）は、第 1 の対物レンズ内を通過して検出器に入射する必要がある。信号電子を第 1 の対物レンズ中で吸収されないように通過させるためには困難が伴う。このため特許文献 1 の SEM は、高価な装置となっている。

【 0 0 1 0 】

特許文献 2 では、第 2 の対物レンズを用いて二次電子の高感度検出を実現することが述べられている。なお特許文献 2 では、試料に電圧（以下、試料に与える電圧をリターディング電圧 V_{decel} と呼ぶ。）を印加することなどについて記載がなされていない。

【 0 0 1 1 】

本発明は、試料から放出する信号電子を検出する検出部を簡単な構成とすることができ

30

る荷電粒子線装置及び走査電子顕微鏡を提供することを目的としている。

【課題を解決するための手段】

【 0 0 1 2 】

上記目的を達成するためこの発明のある局面に従うと、荷電粒子源と、荷電粒子源から放出する荷電粒子線を加速するために設けられる、荷電粒子源に接続された加速電源と、荷電粒子線を試料に集束させる対物レンズとを有する荷電粒子線装置は、対物レンズは、試料に対して荷電粒子線が入射する側の反対側に設置され、荷電粒子線装置は、荷電粒子線を試料に向けて射出する上部装置と、試料が保持される下部装置と、荷電粒子線によって試料から放出する信号電子を検出する検出器とにより構成され、上部装置は、孔部を有し、孔部から上部装置の内部を通った荷電粒子線を最終的に放出し、検出器は、上部装置と下部装置とを除いた空間に設けられている。

40

【 0 0 1 3 】

好ましくは、検出器は、孔部よりも下の位置に設けられている。

【 0 0 1 4 】

好ましくは、荷電粒子線装置は、試料に負電位を与える、荷電粒子線を減速するためのリターディング電源をさらに備える。

【 0 0 1 5 】

好ましくは、検出器は、荷電粒子線が通過する軌道をふさがないように配置され、上部装置の最下部に取り付けられる。

【 0 0 1 6 】

50

好ましくは、荷電粒子線装置は、試料に対して荷電粒子線が入射する側に設置される、対物レンズとは異なる他の対物レンズをさらに備える。

【0017】

好ましくは、検出器と対物レンズとの距離は、10mmから200mmとされる。

【0018】

好ましくは、検出器は、半導体検出器、蛍光体の発光方式の検出器、またはマイクロチャンネルプレート検出器であり、荷電粒子線の軌道から3cm以内に配置される。

【0019】

好ましくは、荷電粒子線装置は、電子を引きつける電界を有する二次電子検出器をさらに備え、二次電子検出器から発生する電界が、荷電粒子によって試料から放出される二次電子を引き付けるように、二次電子検出器は配置される。

10

【0020】

好ましくは、検出器は、電子を引きつける電界を有する二次電子検出器であり、二次電子検出器は、二次電子検出器から発生する電界が荷電粒子によって試料から放出される二次電子を引き付けるように配置される。

【0021】

好ましくは、荷電粒子源として、熱電子源型のものが用いられる。

【0022】

好ましくは、対物レンズは、加速電源を-30kVから-10kVのいずれかにして加速された荷電粒子線を、対物レンズの磁極の試料に最も近いところから見て、0mmから4.5mmのいずれかの高さの位置に集束可能である。

20

【0023】

好ましくは、対物レンズ上に配置される絶縁板と、絶縁板の上に配置される導電性試料台とを備え、対物レンズと導電性試料台とは絶縁される。

【0024】

好ましくは、導電性試料台は、周縁部に近づくほど絶縁板から離れる形状をしている。

【0025】

好ましくは、絶縁板と導電性試料台との間が、絶縁材で充填される。

【0026】

好ましくは、荷電粒子線装置は、試料に対して荷電粒子線が入射する側に設置された、対物レンズとは異なる第2の対物レンズをさらに備え、対物レンズの強度と第2の対物レンズの強度とを独立に制御する機能と、荷電粒子線を対物レンズのみで試料に集束する機能と、荷電粒子線を第2の対物レンズのみで試料に集束する機能とを有する。

30

【0027】

好ましくは、荷電粒子線装置は、上部装置と下部装置との間に配置され、荷電粒子線が通過する開口部のある電位板をさらに備え、電位板には、接地電位、正の電位、または負の電位が与えられる。

【0028】

好ましくは、検出器は、電位板の下側に配置されている。

【0029】

好ましくは、電位板の開口部は直径2mmから20mmの円形、またはメッシュ形状である。

40

【0030】

好ましくは、電位板は、試料の近く以外の場所では導電性試料台から離れる形状を有する。

【0031】

好ましくは、荷電粒子線装置は、電位板を移動させる移動手段をさらに備える。

【0032】

好ましくは、荷電粒子線は、正のイオンであり、試料には、接地電位以上の正の電位が与えられており、電位板には、試料の電位と比べて同電位または高い電位が与えられてい

50

る。

【0033】

この発明の他の局面に従うと、走査電子顕微鏡は、上述のいずれかに記載の荷電粒子線装置を備える。

【発明の効果】

【0034】

本発明によれば、試料から放出する信号電子を検出する検出部を簡単な構成とすることができる荷電粒子線装置及び走査電子顕微鏡を提供することができる。

【図面の簡単な説明】

【0035】

【図1】本発明の第1の実施の形態におけるSEMの構成を説明する概略断面図である。

【図2】本発明の第1の実施の形態で、第1の対物レンズを使い、反射電子および二次電子を検出する場合を示す概略断面図である。

【図3】本発明の第1の実施の形態で、主な集束に第2の対物レンズを使い、二次電子を検出する場合を示す概略断面図である。

【図4】本発明の第1の実施の形態でのリターディング時のレンズ部を説明するための図であり、(a)リターディング時の等電位線、(b)第2の対物レンズの光軸上磁束密度分布 $B(z)$ 、および(c)リターディング時の荷電粒子の速度を説明する図である。

【図5】本発明の第1の実施の形態での絶縁部と試料台の他の構成を説明する概略断面図である。

【図6】本発明の第1の実施の形態における、第1の対物レンズによる開き角の調整を説明する図であり、(a)シミュレーションデータ3($V_{acc} = -1kV$)、(b)シミュレーションデータ4($V_{acc} = -10kV$ 、 $V_{decel} = -9kV$)、および(c)シミュレーションデータ5($V_{acc} = -10kV$ 、 $V_{decel} = -9kV$ 、第1の対物レンズを使用)に対応する図である。

【図7】本発明の第1の実施の形態において、偏向コイルの上下偏向コイルの強度比調整で偏向の交点を調整することを説明するための図である。

【図8】本発明の第2の実施の形態において、第1の対物レンズがない簡易的な場合を説明する概略断面図である。

【図9】本発明の第4の実施の形態に係るSEMの装置構成の一例を示す断面図である。

【発明を実施するための形態】

【0036】

次に、図面を参照して本発明の実施形態を説明する。以下の図面は模式的なものであり、寸法や縦横の比率は現実のものとは異なることに留意すべきである。

【0037】

また、以下に示す本発明の実施の形態は、本発明の技術的思想を具現化するための装置や方法を例示するものである。本発明の技術的思想は、構成部品の材質、形状、構造、配置などを下記のものに特定するものでない。本発明の技術的思想は、特許請求の範囲に記載された技術的範囲内において、種々の変更を加えることができる。

【0038】

[第1の実施の形態]

【0039】

図1を参照して、本発明の第1の実施の形態であるSEMの概略構成を説明する。

【0040】

このSEMは、電子源(荷電粒子源)11と、加速電源14と、コンデンサレンズ15と、対物レンズ絞り16と、二段偏向コイル17と、対物レンズ18, 26と、検出器20とを備えた電子線装置である。加速電源14は、電子源11から放出される一次電子線(荷電粒子線)12を加速する。コンデンサレンズ15は、加速された一次電子線12を集束する。対物レンズ絞り16は、一次電子線12の不要な部分を除く。二段偏向コイル17は、一次電子線12を試料23上で二次元的に走査する。対物レンズ18, 26は、

10

20

30

40

50

一次電子線 1 2 を試料 2 3 上に集束させる。検出器 2 0 は、試料 2 3 から放出された信号電子 2 1 (二次電子 2 1 a、反射電子 2 1 b) を検出する。

【 0 0 4 1 】

S E M は、電磁レンズの制御部として、第 1 の対物レンズ電源 4 1 と、第 2 の対物レンズ電源 4 2 と、制御装置 4 5 とを備える。第 1 の対物レンズ電源 4 1 は、第 1 の対物レンズ 1 8 の強度を可変する。第 2 の対物レンズ電源 4 2 は、第 2 の対物レンズ 2 6 の強度を可変する。制御装置 4 5 は、第 1 の対物レンズ電源 4 1 と第 2 の対物レンズ電源 4 2 とを制御する。

【 0 0 4 2 】

制御装置 4 5 は、第 1 の対物レンズ 1 8 の強度と第 2 の対物レンズ 2 6 の強度とを、独立に制御できる。制御装置 4 5 は、両レンズを同時に制御できる。また、図には示していないが、各電源は制御装置 4 5 に接続されることで調整できるようになっている。

10

【 0 0 4 3 】

電子源 1 1 としては、熱電子放出型 (熱電子源型)、電界放出型 (ショットキー型、または冷陰極型) を用いることができる。第 1 の実施の形態では、電子源 1 1 に、熱電子放出型の L a B 6 などの結晶電子源、またはタングステンフィラメントが用いられている。電子源 1 1 とアノード板 (接地電位) との間には、例えば加速電圧 - 0 . 5 k V から - 3 0 k V が印加される。ウェーネルト電極 1 3 には、電子源 1 1 の電位よりも負の電位が与えられる。これにより、電子源 1 1 から発生した一次電子線 1 2 の量がコントロールされる。そして、電子源 1 1 のすぐ前方に、一次電子線 1 2 の一度目の最小径であるクロスオーバー径が作られる。この最小径が、電子源の大きさ S_0 と呼ばれる。

20

【 0 0 4 4 】

加速された一次電子線 1 2 は、コンデンサレンズ 1 5 により集束される。これにより、電子源の大きさ S_0 が縮小する。コンデンサレンズ 1 5 により、縮小率および試料 2 3 に照射される電流 (以下、プローブ電流と呼ぶ。) が調整される。そして、対物レンズ絞り 1 6 により、不用な軌道の電子が取り除かれる。対物レンズ絞り 1 6 の穴径に応じて、試料 2 3 に入射するビームの開き角 とプローブ電流とが調整される。

【 0 0 4 5 】

対物レンズ絞り 1 6 を通過した一次電子線 1 2 は、走査用の二段偏向コイル 1 7 を通過した後、第 1 の対物レンズ 1 8 を通過する。汎用 S E M は、第 1 の対物レンズ 1 8 を使って、一次電子線 1 2 の焦点を試料 2 3 上に合わせる。図 1 の S E M はこのような使い方もできる。

30

【 0 0 4 6 】

図 1 において、電子源 1 1 から第 1 の対物レンズ 1 8 までの構成により、一次電子線 1 2 を試料 2 3 に向けて射出する上部装置が構成される。また、電位板 2 2 と、それよりも下に配置される部材とにより下部装置が構成される。下部装置に試料 2 3 は保持される。上部装置は、その内部を通った荷電粒子線が最終的に放出される孔部 1 8 c を有している。第 1 の実施の形態ではその孔部 1 8 c は、第 1 の対物レンズ 1 8 に存在する。検出器 2 0 は、その孔部 1 8 c の下に取り付けられている。検出器 2 0 も、一次電子線 1 2 が通過する開口部を有している。検出器 2 0 は、孔部 1 8 c と開口部とが重なるように、第 1 の対物レンズ 1 8 の下部に取り付けられる。第 1 の対物レンズ 1 8 の下部に複数の検出器 2 0 が取り付けられてもよい。複数の検出器 2 0 は、一次電子線 1 2 の軌道をふさがないようにしつつ、検出器 2 0 の検出部を上部装置の孔部 1 8 c 以外にはできるだけ隙間がないようにして、取り付けられる。

40

【 0 0 4 7 】

図 2 に、第 1 の対物レンズ 1 8 を使って、一次電子線 1 2 の焦点を試料 2 3 上に合わせる場合の例を示す。特に、厚みのある試料 2 3 はこの方法で観察される。

【 0 0 4 8 】

一方で、第 2 の対物レンズ 2 6 を主に使うときは、第 1 の対物レンズ 1 8 を通過した一次電子線 1 2 は、第 2 の対物レンズ 2 6 で縮小集束される。この第 2 の対物レンズ 2 6 は

50

、試料 2 3 に近づくほど強い磁場分布をしているため（図 4（b）参照）、低収差レンズを実現している。また、第 1 の対物レンズ 1 8 は、見やすい画像になるように、開き角をコントロールすること、ならびに縮小率やレンズの形状、および焦点深度を調整することに用いられる。すなわち、第 1 の対物レンズ 1 8 は、これらの各制御値を最適化するのに用いられる。また、第 2 の対物レンズ 2 6 のみで一次電子線 1 2 を集束しきれない場合には、第 1 の対物レンズ 1 8 で一次電子線 1 2 を集束させるための補助を行うこともできる。

【 0 0 4 9 】

図 3 を参照して、リターディングをしない場合についての動作を説明する。

【 0 0 5 0 】

リターディングをしない場合には、図 1 の電位板 2 2 は取り外してもよい。試料 2 3 はできるだけ第 2 の対物レンズ 2 6 に近づくように設置するのが良い。より詳しくは、試料 2 3 は、第 2 の対物レンズ 2 6 の上部（上面）からの距離が 5 mm 以下になるように、第 2 の対物レンズ 2 6 の上部に近づけて設置するのが好ましい。

【 0 0 5 1 】

一次電子線 1 2 は、加速電源 1 4 で加速されたエネルギーで試料 2 3 上を走査する。そのとき二次電子 2 1 a は、第 2 の対物レンズ 2 6 の磁場により磁束に巻きついて螺旋運動をしながら上昇する。二次電子 2 1 a は、試料 2 3 表面から離れると、急速に磁束密度が低下することにより旋回から振りほどかれて発散し、二次電子検出器 1 9 からの引込み電界により偏向されて二次電子検出器 1 9 に捕獲される。すなわち、二次電子検出器 1 9 は、二次電子検出器 1 9 から発生する電界が、荷電粒子線によって試料から放出される二次電子を引き付けるように、配置される。このようにして、二次電子検出器 1 9 に入る二次電子 2 1 a を多くすることができる。

【 0 0 5 2 】

次に、図 4 を用いてリターディングをする場合について概略を説明する。図 4 において、（a）はリターディング時の等電位線を示し、（b）は第 2 の対物レンズの光軸上磁束密度分布 $B(z)$ を示し、（c）はリターディング時の荷電粒子の速度を示している。

【 0 0 5 3 】

図 4 の（b）に示されるように、第 2 の対物レンズ 2 6 の光軸上磁束密度は試料に近いほど強い分布をしているので、対物レンズは低収差レンズになる。そして、試料 2 3 に負の電位を与えると、一次電子線 1 2 は試料 2 3 に近づくほど減速する（図 4（c）参照）。一次電子線 1 2 は速度が遅いほど磁場の影響を受けやすくなるため、試料 2 3 に近いほど第 2 の対物レンズ 2 6 が強いレンズになるといえる。そのため、試料 2 3 に負の電位を与えると、第 2 の対物レンズ 2 6 はさらに低収差のレンズとなる。

【 0 0 5 4 】

また、信号電子 2 1 は、試料 2 3 のリターディング電圧による電界で加速され、エネルギー増幅して検出器 2 0 に入る。そのため、検出器 2 0 は高感度となる。このような構成にすることで、高分解能な電子線装置を実現できる。

【 0 0 5 5 】

また、第 1 の対物レンズ 1 8 と第 2 の対物レンズ 2 6 との距離は、10 mm から 200 mm とされる。より好ましくは 30 mm から 50 mm とすることが望ましい。第 1 の対物レンズ 1 8 と第 2 の対物レンズ 2 6 との距離が 10 mm より近いと、第 1 の対物レンズ 1 8 の直下に置いた検出器 2 0 で反射電子 2 1 b が検出できる。しかし、リターディング時に二次電子 2 1 a が第 1 の対物レンズ 1 8 の中に引きこまれやすくなる。第 1 の対物レンズ 1 8 と第 2 の対物レンズ 2 6 との距離を 10 mm 以上離すことで、二次電子 2 1 a は検出器 2 0 で検出されやすくなる。また、第 1 の対物レンズ 1 8 と第 2 の対物レンズ 2 6 との隙間が 30 mm 程度ある場合には、試料 2 3 の出し入れがとても行いやすくなる。

【 0 0 5 6 】

次に、各部品の構成について詳細に説明する。まず第 2 の対物レンズ 2 6 の形状について、図 1 を参照して説明する。

10

20

30

40

50

【 0 0 5 7 】

第2の対物レンズ26を形成する磁極は、一次電子線12の理想光軸と中心軸が一致した中心磁極26aと、上部磁極26bと、筒形の側面磁極26cと、下部磁極26dとからなる。中心磁極26aは、上部ほど径が小さくなる形状である。中心磁極26aの上部は、例えば1段または2段の円錐台形状である。中心磁極26aの下部は、円柱形状である。中心磁極26aの下部の中心軸には、貫通孔がない。上部磁極26bは、中心に向かってテーパ状に中心磁極26aの重心に近い側が薄くなる、円盤形状である。上部磁極26bの中心には、開口径dの開口が空いている。中心磁極26aの先端径Dは、6mmより大きく14mmより小さい。開口径dと先端径Dとの関係は、 $d - D = 4 \text{ mm}$ とされる。

10

【 0 0 5 8 】

次に、磁極の具体的な例を示す。中心磁極26aと上部磁極26bとの両者の試料側の上面は、同じ高さとしてされる。中心磁極26aの下部外径は60mmである。この外径が細いと、透磁率の低下を招くので好ましくない。

【 0 0 5 9 】

中心磁極26aが $D = 8 \text{ mm}$ の場合、上部磁極26bの開口径dは、12mmから32mmとすることが好ましい。より好ましくは、開口径dは、14mmから24mmである。開口径dが大きいほど、光軸上磁束密度分布は山がなだらかになって幅が広がり、一次電子線12の集束に必要なAT（アンペアターン：コイル巻数 $N [T]$ と電流 $I [A]$ との積）を小さくすることができるというメリットがある。しかし、開口径dと先端径Dとの関係が $d > 4 D$ となると、収差係数が大きくなる。ここでは上部磁極26bの開口径dは20mm、側面磁極26cの外径は150mmである。また、中心磁極26aの軸中心に貫通穴があってもよい。

20

【 0 0 6 0 】

ここで、例えば厚みが5mmの試料23に対し、30kVの高加速電圧でも一次電子線12を集束させる場合には、先端径Dは6mmより大きく14mmより小さくするのがよい。Dを小さくしすぎると、磁極が飽和し、一次電子線12が集束しない。一方で、Dを大きくすると性能が悪くなる。また、dとDとの大きさの差が4mmより小さいと、磁極が近すぎて飽和しやすくなり、一次電子線12が集束しない。また、第1の対物レンズ18と第2の対物レンズ26との距離が10mm以下になると、作業性が悪くなる。この距離が200mmより長すぎると、開き角が大きくなりすぎる。この場合、収差を最適にするために、第1の対物レンズ18を使ってを小さくする調整が必要になり、操作性が悪くなる。

30

【 0 0 6 1 】

また例えば、5kV以下の加速電圧のみで使用し、試料23の厚みが薄い場合は、先端径Dは6mm以下にしてもよい。ただし、例えば加速電圧が5kVである場合において、Dを2mm、dを5mmにし、試料23の厚みを5mmにし、第2の対物レンズ26のみを用いると、磁極が飽和してしまい、一次電子線12が集束しない。しかし、試料23を薄いものに制限すれば、レンズはさらに高性能化できる。

【 0 0 6 2 】

試料23に電位を与える方法として、第2の対物レンズ26の磁極の一部に電氣的絶縁部を挟んで一部の磁極を接地電位から浮かし、試料23と磁極の一部にリターディング電圧を与えることもできる。ただし、この場合、磁気回路中に磁性体でないものを挟むと、磁気レンズが弱いものになる。また、リターディング電圧を高くすると放電が発生する。電氣的絶縁部を厚くすると、さらに磁気レンズが弱いものになるという問題がある。

40

【 0 0 6 3 】

図1に示されるように、上部磁極26bと中心磁極26aとの間に、非磁性体で成るシール部26f（例えば銅やアルミニウムまたはモネル）を置くことが望ましい。シール部26fは、上部磁極26bと中心磁極26aとの間を、リングまたは口付けで真空気密にする。第2の対物レンズ26では、上部磁極26bと、シール部26fおよび中心磁

50

極 2 6 a とにより、真空側と大気側とが気密分離される。上部磁極 2 6 b と真空容器とは、図には示していないが、Oリングで気密になるように結合されている。このようにすることで、第 2 の対物レンズ 2 6 は、真空側の面を除いて、大気にさらすことができるようになる。そのため、第 2 の対物レンズ 2 6 を冷却しやすくなる。

【 0 0 6 4 】

真空容器の中に第 2 の対物レンズ 2 6 を入れることもできるが、真空度が悪くなる。コイル部 2 6 e が真空側にあると、ガス放出源になるからである。また、このように真空側と大気側とを気密分離しないと、真空引きをしたときにガスが第 2 の対物レンズ 2 6 と絶縁板 2 5 とが接しているところを通り、試料が動いてしまうという問題がある。

【 0 0 6 5 】

コイル部 2 6 e は、たとえば 6 0 0 0 A T のコイル電流にすることができる。コイルが発熱して高温になると、それを原因として、巻線の被膜が融けてショートが発生することがある。第 2 の対物レンズ 2 6 が大気にさらすことができるようになることにより、冷却効率が上がる。例えば第 2 の対物レンズ 2 6 の下面の台をアルミニウム製にすることで、その台をヒートシンクとして利用することができる。そして、空冷ファンや水冷などで第 2 の対物レンズ 2 6 を冷却できるようになる。このように気密分離することで、強励磁の第 2 の対物レンズ 2 6 とすることが可能になる。

【 0 0 6 6 】

図 1 を参照して、リターディング部を説明する。

【 0 0 6 7 】

第 2 の対物レンズ 2 6 の上に、絶縁板 2 5 を置く。絶縁板 2 5 は、例えば 0 . 1 mm から 0 . 5 mm 程度の厚みのポリイミドフィルムやポリエステルフィルム等である。そして、その上に、磁性のない導電性のある試料台 2 4 を置く。試料台 2 4 は、例えば底面が 2 5 0 μ m 厚のアルミニウム板で、周縁が周縁端に近づくほど絶縁板 2 5 から離れる曲面形状に加工されたものである。試料台 2 4 は、さらに曲面部と絶縁板 2 5 との間の隙間に絶縁材 3 1 が充填されたものであってもよい。このようにすると、第 2 の対物レンズ 2 6 と試料台 2 4 との間の耐電圧が上がり、安定して使うことができる。試料台 2 4 の平面形状は円形であるが、楕円、矩形など、どのような平面形状であってもよい。

【 0 0 6 8 】

試料台 2 4 の上に試料 2 3 が載置される。試料台 2 4 は、リターディング電圧を与えるために、リターディング電源 2 7 に接続される。電源 2 7 は、例えば 0 V から - 3 0 k V まで印加できる出力が可変の電源とする。試料台 2 4 は、真空外部から位置移動ができるように絶縁物でできた試料台ステージ板 2 9 に接続されている。これにより、試料 2 3 の位置は変更可能である。試料台ステージ板 2 9 は、X Y ステージ (図示せず) に接続されており、真空外部から動かすことができる。

【 0 0 6 9 】

試料 2 3 の上には円形の開口部のある導電性板 (以下、電位板 2 2 と呼ぶ) が配置される。電位板 2 2 は、第 2 の対物レンズ 2 6 の光軸に対し垂直に設置される。この電位板 2 2 は、試料 2 3 に対して絶縁して配置される。電位板 2 2 は、電位板電源 2 8 に接続される。電位板電源 2 8 は、例えば 0 V および - 1 0 k V から + 1 0 k V の出力が可変の電源である。電位板 2 2 の円形の開口部の直径は、2 mm から 2 0 mm 程度までであればよい。より好ましくは、開口部の直径は、4 mm から 1 2 mm までであればよい。あるいは、一次電子線 1 2 または信号電子 2 1 が通過する電位板 2 2 の部分を導電性のメッシュ状にしてもよい。メッシュの網部が電子が通過しやすいように細くされ、開口率が大きくなるようにするとよい。この電位板 2 2 は、中心軸調整のために真空外部から位置を移動できるように、X Y Z ステージ (図示せず) に接続される。

【 0 0 7 0 】

試料台 2 4 の周縁は電位板 2 2 側に厚みがある。例えば電位板 2 2 が平らであると、電位板 2 2 は試料台 2 4 周縁で試料台 2 4 に近くなる。そうなると放電しやすくなる。電位板 2 2 が、試料 2 3 の近く以外の場所では導電性試料台 2 4 から離れる形状を有している

10

20

30

40

50

ことで、試料台 2 4 との耐電圧を上げることができる。

【 0 0 7 1 】

電位板 2 2 は、試料 2 3 から 1 mm から 1.5 mm 程度の距離を離すことで、放電しないように配置されている。しかし、離しすぎないように配置されるのがよい。その目的は、第 2 の対物レンズ 2 6 の作る磁場が強い位置に減速電界を重ねるためである。もし、この電位板 2 2 が試料 2 3 から遠くに置かれた場合、あるいは電位板 2 2 が無い場合、一次電子線 1 2 が第 2 の対物レンズ 2 6 で集束される前に減速してしまい、収差を小さくする効果が減少する。

【 0 0 7 2 】

それについて図 4 を参照して説明する（図 4 は、後で述べるシミュレーションデータ 4 のときに対応した説明図である）。図 4 の（ a ）は、リターディング時の等電位線を説明する図である。

10

【 0 0 7 3 】

仮に電位板 2 2 の開口部が大きすぎ、試料 2 3 と電位板 2 2 との距離が近すぎる場合、等電位線が電位板 2 2 の開口部より電子銃側に大きくはみ出して分布する。この場合、一次電子が、電位板 2 2 に到着するまでに減速してしまうことがある。電位板 2 2 の開口径が小さいほど、電界のもれを減少させる効果がある。ただし、信号電子 2 1 が電位板 2 2 に吸収されないようにする必要がある。そのため、放電を起こさない範囲で試料 2 3 と電位板 2 2 との電位差を調整するとともに、試料 2 3 と電位板 2 2 との距離を調整すること、電位板 2 2 の開口径を適切に選ぶことが大切となる。

20

【 0 0 7 4 】

図 4 の（ b ）は、第 2 の対物レンズ 2 6 の光軸上磁束密度分布 $B(z)$ を説明する図である。縦軸は $B(z)$ 、横軸は座標であり、第 2 の対物レンズ 2 6 の表面が原点（ - 0 ）である。第 2 の対物レンズ 2 6 に近いほど急激に $B(z)$ が大きくなっている様子が示されている。

【 0 0 7 5 】

図 4 の（ c ）は、リターディング時の荷電粒子の速度を説明する図である。荷電粒子線の速度は、試料直前で減速していることが示されている。

【 0 0 7 6 】

電位板 2 2 を試料 2 3 の近くに置くことにより、一次電子の速度は、電位板 2 2 近くまではあまり変わらない。そして、一次電子は、電位板 2 2 あたりから試料 2 3 に近づくほど速度が遅くなり、磁場の影響を受けやすくなる。第 2 の対物レンズ 2 6 の作る磁場も試料 2 3 に近いほど強くなっているため、両方の効果が合わさって、試料 2 3 に近いほどさらに強いレンズになり、収差の小さいレンズになる。

30

【 0 0 7 7 】

加速電圧をできるだけ大きくしながら、リターディング電圧を加速電圧に近づけることができれば、照射電子エネルギーを小さくして、電子が試料 2 3 の中に入り込む深さを浅くすることができる。これによって、試料の表面形状の高分解能観察が可能になる。さらに収差も小さくできることで、高分解能でかつ低加速の SEM が実現できる。

【 0 0 7 8 】

第 1 の実施の形態では、試料 2 3 と電位板 2 2 との耐圧を簡単に高くすることができる。第 1 の対物レンズ 1 8 と第 2 の対物レンズ 2 6 との間は 10 mm から 200 mm の距離とすることができる。そのため、例えば平坦な試料 2 3 であれば、試料 2 3 と電位板 2 2 との間隔を 5 mm 程度あければ、試料 2 3 と電位板 2 2 とに比較的簡単に 10 kV 程度の電位差を印加することができる。尖った部分がある試料 2 3 の場合は放電しないように、距離や開口径を適切に選ぶ必要がある。

40

【 0 0 7 9 】

図 5 に、試料の異なる配置例を示す。図 5 に示されるように、さらに、円筒形で上面が R 加工された円筒放電防止電極 3 0 を、試料台 2 4 の上の試料 2 3 の周囲に設置して、放電しにくくするとよい。円筒放電防止電極 3 0 は、試料上の等電位線を滑らかにして、試

50

料 2 3 のがたつきによる集束点のずれを緩和するのにも役立つ。

【 0 0 8 0 】

第 1 の実施の形態における検出器 2 0 として、半導体検出器 2 0、マイクロチャンネルプレート検出器 2 0 (MCP)、または蛍光体発光方式のロビンソン検出器 2 0 が用いられる。これらの少なくともいずれかが第 1 の対物レンズ 1 8 の直下に配置される。二次電子検出器 1 9 は、二次電子 2 1 a を集めるように、電界が試料 2 3 の上方にかかるように配置される。

【 0 0 8 1 】

半導体検出器 2 0、MCP 検出器 2 0 またはロビンソン検出器 2 0 は、第 1 の対物レンズ 1 8 の試料側に接し、光軸から 3 c m 以内に配置される。より好ましくは、検出部の中心が光軸におかれ、その中心に一次電子が通過する開口部が設けられている検出器 2 0 が使用される。光軸から 3 c m 以内に設置するのは、リターディングをした場合、信号電子は光軸近くに進むからである。

【 0 0 8 2 】

一次電子線 1 2 は、加速電源 1 4 (V a c c) で加速に用いられた加速電圧からリターディング電圧 V d e c e l を引いた値、すなわち $(V a c c - V d e c e l)$ [V] に電子電荷をかけたエネルギーで、試料 2 3 上を走査する。そのとき、試料 2 3 から信号電子 2 1 が放出される。加速電圧とリターディング電圧との値によって、電子の影響の受け方は異なる。反射電子 2 1 b は、第 2 の対物レンズ 2 6 の磁場によって、回転する力を受けると同時に、試料 2 3 と電位板 2 2 との間の電界のために加速する。そのため、反射電子 2 1 b の放射角の広がり狭まり、検出器 2 0 に入射しやすくなる。また、二次電子 2 1 a も第 2 の対物レンズ 2 6 の磁場によって、回転する力を受けると同時に、試料 2 3 と電位板 2 2 との間の電界のために加速して、第 1 の対物レンズ 1 8 の下にある検出器 2 0 に入射する。二次電子 2 1 a も反射電子 2 1 b も加速し、エネルギーが増幅されて検出器 2 0 に入射するため、信号が大きくなる。

【 0 0 8 3 】

汎用 SEM では、第 1 の対物レンズ 1 8 のようなレンズで電子を集束するのが通常である。この第 1 の対物レンズ 1 8 は、通常、試料 2 3 を第 1 の対物レンズ 1 8 に近づけるほど高分解能になるように設計されている。しかし、半導体検出器 2 0 などには厚みがあり、その厚み分は第 1 の対物レンズ 1 8 から試料 2 3 を離す必要がある。また、試料 2 3 を第 1 の対物レンズ 1 8 に近づけすぎると、二次電子 2 1 a が、第 1 の対物レンズ 1 8 の外にある二次電子検出器 1 9 に入りにくくなる。そのため汎用 SEM では、第 1 の対物レンズ 1 8 直下の位置に配置され、一次電子が通過する開口部がある厚みの薄い半導体検出器 2 0 が用いられる。試料 2 3 は、検出器 2 0 にぶつからないように少し隙間をあけて置かれる。したがって、試料 2 3 と第 1 の対物レンズ 1 8 とは少し離れてしまい、高性能化が難しくなる。

【 0 0 8 4 】

第 1 の実施の形態では、第 2 の対物レンズ 2 6 を主レンズとして使う場合、試料 2 3 を第 2 の対物レンズ 2 6 に近づけて設置することができる。そして、第 1 の対物レンズ 1 8 と第 2 の対物レンズ 2 6 との間の距離を離すことができる。例えば 3 0 m m 離せば、1 0 m m 程度の厚みのある MCP 検出器 2 0 を第 1 の対物レンズ 1 8 の直下に置くことが可能になる。また、ロビンソン型の検出器 2 0 や半導体検出器 2 0 を置くことも当然にできる。反射板を置いて、信号電子 2 1 を反射板にあてて、そこから発生または反射した電子を第 2 の二次電子検出器で検出する方法もある。同等の作用を持つ様々な信号電子の検出器 2 0 を設置することができる。

【 0 0 8 5 】

次に、レンズ光学系の性能に関連する開き角 について説明する。

【 0 0 8 6 】

一次電子線 1 2 が試料 2 3 に当たるときのビーム径を、プローブ径と呼ぶ。プローブ径を評価する式として次の式を使う。なお、以下の数式において、「 \wedge 」に続く数字は冪指

10

20

30

40

50

数である。

【0087】

[数1] プローブ径 $D_{probe} = \sqrt{D_g^2 + D_s^2 + D_c^2 + D_d^2}$ [nm]

【0088】

[数2] 光源の縮小直径 $D_g = M_1 \cdot M_2 \cdot M_3 \cdot S_o = M \cdot S_o$ [nm]

【0089】

[数3] 球面収差 $D_s = 0.5 C_s \cdot \theta^3$ [nm]

【0090】

[数4] 色収差 $D_c = 0.5 C_c \cdot \theta \cdot V / V_i$ [nm]

10

【0091】

[数5] 回折収差: $D_d = 0.75 \times 1.22 \times \lambda / \theta$ [nm]

【0092】

ここで、電子源の大きさが S_o 、一段目コンデンサレンズ15aの縮小率が M_1 、二段目コンデンサレンズ15bの縮小率が M_2 、第1の対物レンズ18と第2の対物レンズ26とが作るレンズの縮小率が M_3 、全縮小率 $M = M_1 \times M_2 \times M_3$ 、球面収差係数が C_s 、色収差係数が C_c 、試料面での一次電子線12の開き角が θ 、照射電圧(一次電子が試料23に衝突するときのエネルギーに対応する電圧)が V_i 、一次電子線12のエネルギー広がりに対応する電圧が V 、電子の波長が λ である。

【0093】

20

熱電子放出型電子源を用いたSEMの性能の一例について、シミュレーションデータを使って説明する。図1の第1の対物レンズ18はアウトレンズ型とする。

【0094】

第1の対物レンズ18で一次電子線12を集束する場合を示す。これは、汎用SEMに対応する。

【0095】

一次電子線12の V を1V、電子源の大きさ S_o を $10 \mu\text{m}$ とする。 $M_1 \times M_2 = 0.00282$ とする。穴径30ミクロンである対物レンズ絞り16を置いて、不用な軌道電子を取り除く。この対物レンズ絞り16の穴径によって、試料23に入射するビームの開き角 θ とプローブ電流が調整できる。WDを6mm、加速電圧 $V_{acc} = -30 \text{ kV}$ ($V_i = 30 \text{ kV}$) とする。シミュレーション計算すると、

30

【0096】

(シミュレーションデータ1)

【0097】

$D_{probe} = 4.4 \text{ nm}$ 、 $D_g = 1.59$ 、 $D_s = 3.81$ 、 $D_c = 0.916$ 、 $D_d = 1.25$ 、

【0098】

$C_s = 54.5 \text{ mm}$ 、 $C_c = 10.6 \text{ mm}$ 、 $\theta = 5.19 \text{ mrad}$ 、 $M_3 = 0.0575$ となる。

【0099】

40

次に、第2の対物レンズ26で一次電子線12を集束する場合を示す。

【0100】

図1の構成で、第2の対物レンズ26と第1の対物レンズ18との距離を40mmとする。第2の対物レンズ26は、 $D = 8 \text{ mm}$ 、 $d = 20 \text{ mm}$ とし、 θ を調整するため対物レンズ絞り16の穴径を21.8ミクロンとする。このとき、汎用SEMのときと比べてプローブ電流量が変化しないように、コンデンサレンズ15を弱めて調整する。その他の条件は同じとする。 $Z = -4 \text{ mm}$ の位置での性能をシミュレーションすると、

【0101】

(シミュレーションデータ2)

【0102】

50

$D_{probe} = 1.44 \text{ nm}$ 、 $D_g = 0.928$ 、 $D_s = 0.657$ 、 $D_c = 0.503$ 、 $D_d = 0.729$ 、

【0103】

$C_s = 1.87 \text{ mm}$ 、 $C_c = 3.391 \text{ mm}$ 、 $\theta = 8.89 \text{ mrad}$ 、 $M_3 = 0.0249$ となる。

【0104】

以上のように、第2の対物レンズ26を用いることで、SEMの性能が大幅によくなっていることがわかる。

【0105】

また、第1の対物レンズ18で集束するときと比べて、第2の対物レンズ26で集束するときは、 D_g が小さくなっている。このことはプローブ径を同等にする場合、第1の対物レンズ18で集束するときと比べて、コンデンサレンズ15を弱めることができることを示している。したがって、第2の対物レンズ26を使うことで、汎用SEMと比べてプローブ電流を大電流化できることがわかる。

10

【0106】

次に第1の対物レンズ18は使わずに、第2の対物レンズ26を使い、加速電圧 V_{acc} を -1 kV ($V_i = 1 \text{ kV}$)とする場合を説明する(リターディング電圧は 0 V とする)。プローブ電流が変化しないように、コンデンサレンズ15を調整する(ただし、電子銃からの軌道とビーム量は -30 kV のときと同じとする)。その他の条件は同じとする。以下がシミュレーションデータである。

20

【0107】

(シミュレーションデータ3)

【0108】

結果を図6(a)に示す。

【0109】

$D_{probe} = 15.6 \text{ nm}$ 、 $D_g = 0.928$ 、 $D_s = 0.657$ 、 $D_c = 15.1$ 、 $D_d = 3.99$ 、

【0110】

$C_s = 1.87 \text{ mm}$ 、 $C_c = 3.39 \text{ mm}$ 、 $\theta = 8.89 \text{ mrad}$ 、 $M_3 = 0.0249$ である。

30

【0111】

この場合、 C_s 、 C_c 、 θ 、 M_3 、 D_s はシミュレーションデータ2と変わらない。 V/V_i が大きくなるため、プローブ径がとて大きくなる。

【0112】

次に、電位板22を試料23の上部に配置する例を説明する。電位板22の開口径は 5 mm 、試料23は 6 mm とする。試料測定面を $Z = -4 \text{ mm}$ (第2の対物レンズ26からの距離)とする。試料台24と電位板22との距離を 8 mm 、試料測定面と電位板22との間隔を 5 mm とする。

【0113】

加速電圧 V_{acc} は -10 kV 、電位板22を 0 V 電位とし、試料23を $V_{decel} = -9 \text{ kV}$ でリターディングし、 $V_i = 1 \text{ kV}$ とした場合の数値をシミュレーションする。ここでは第1の対物レンズ18は使わず、第2の対物レンズ26のみで集束させる。

40

【0114】

(シミュレーションデータ4)

【0115】

結果を図6(b)に示す。

【0116】

$D_{probe} = 5.72 \text{ nm}$ 、 $D_g = 0.924$ 、 $D_s = 2.93$ 、 $D_c = 4.66$ 、 $D_d = 1.26$ 、

【0117】

50

$C_s = 0.260$ mm、 $C_c = 0.330$ mm、 $\theta = 28.2$ mrad、 $M_3 = 0.0247$ である。

【0118】

リターディング電圧 V_{decel} を -9 kV にすると、照射電子のエネルギーは 1 keV となる。加速電圧が -1 kV のときと比べて、プローブ径が大幅に改善している。

【0119】

次にこの条件に第1の対物レンズ18を追加して使用し、強度を適切に調整する(シミュレーションデータ1に必要なAT(アンペアターン)の約0.37倍としてみる)例を示す。

【0120】

(シミュレーションデータ5)

【0121】

結果を図6(c)に示す。

【0122】

$D_{probe} = 4.03$ nm、 $D_g = 1.60$ 、 $D_s = 0.682$ 、 $D_c = 2.92$ 、 $D_d = 2.17$ 、

【0123】

$C_s = 0.312$ mm、 $C_c = 0.357$ mm、 $\theta = 16.3$ mrad、 $M_3 = 0.0430$ である。

【0124】

ここで D_{probe} が減少していることがわかる。シミュレーションデータ4では D_c ($= 4.66$) が飛びぬけて大きくなっていた。そこで、第1の対物レンズ18を少し加えることで、 θ を小さくすることができる。 D_c は上記[数4]から C_c と θ に依存する。 C_c は少し大きくなっているが、 θ は相当小さくなっている。そのため D_c は小さくなっている。[数1]から、 D_{probe} は第1の対物レンズ18を使うことで小さくできることがわかる。

【0125】

図6(a)の $\theta = 8.89$ mrad に対して、図6(b)では $\theta = 28.2$ mrad であり、リターディングによって大きな値になっている。すなわち、強いレンズになっていることがわかる。また、そのために D_d も小さくなっていることがわかる。図6(c)では第1の対物レンズ18で θ を調整して D_c が小さくなっていることがわかる。

【0126】

ここで大切なことは、対物レンズ絞り16の穴径を小さくして θ を調整することも可能であるが、その場合はプローブ電流が減少してしまうということである。しかし、第1の対物レンズ18を使用して θ を調整してもプローブ電流は減少しない。そのため、試料23から発生する二次電子21aと反射電子21bは減少しない。

【0127】

また、リターディング電圧の印加によって検出器20の感度がよくなると、プローブ電流を減らすことができる。さらに対物レンズ絞り16の穴径を小さくして θ を小さくすることもできる。また、コンデンサレンズ15による縮小率 $M_1 \times M_2$ を小さくすることも可能になる。そのため、 D_g 、 D_s 、 D_c 、および D_d との兼ね合いがあるので調整が必要だが、プローブ径をさらに小さくできる場合がある。対物レンズ絞り16と第1の対物レンズ18とでプローブ径を最適化できる。

【0128】

また、試料23によっては焦点深度が浅いレンズだと、凸凹の上の面と底の面どちらかにしかピントが合わないことがある。このような場合、プローブ径が同じでも θ が小さいほど焦点深度が深くなり、きれいに見えることもある。第1の対物レンズ18を使って、像を見やすいように最適化することもできる。

【0129】

次に、第1の実施の形態における装置の様々な使い方の具体例を示す。

10

20

30

40

50

【 0 1 3 0 】

図6 (b)では、加速電圧 V_{acc} を -10 kV とし、試料23を -9 kV でリターディングするシミュレーションを示したが、例えば、加速電圧 V_{acc} を -4 kV 、試料23を -3.9 kV にして、 $V_i = 100\text{ V}$ とすることもできる。加速電圧とリターディング電圧の比が1に近いほど、収差係数を小さくすることができる。また、上記では第2の対物レンズ26の磁極について、 $D = 8\text{ mm}$ 、 $d = 20\text{ mm}$ とした場合を示したが、 $D = 2$ 、 $d = 6$ 等にすれば、試料高さや加速電圧の制限はあるが、より性能をよくすることができる。

【 0 1 3 1 】

また、加速電圧を -10 kV としてリターディング無しの場合、二次電子検出器19で二次電子21aを検出できるが、半導体検出器20では検出できない。しかし、加速電圧を -20 kV とし、リターディング電圧を -10 kV とすれば約 10 keV のエネルギーで二次電子21aが半導体検出器20に入り、検出可能である。

10

【 0 1 3 2 】

また、加速電圧を -10.5 kV とし、リターディング電圧を -0.5 kV としたとき、二次電子21aは半導体検出器20では感度よく検出できない。しかしこのとき、二次電子検出器19で二次電子21aを検出することができる。すなわち、二次電子21aはリターディング電圧が低いときは二次電子検出器19で捕らえることができ、リターディング電圧を徐々に上げていくと半導体検出器20側で検出できる量が増えていく。このように、二次電子検出器19は、焦点を合わせながらリターディング電圧を上げていく調整時にも役立つ。

20

【 0 1 3 3 】

第1の実施の形態の第2の対物レンズ26は、 $Z = -4.5\text{ mm}$ で 30 keV の一次電子を集束できるように設計してある。試料位置が第2の対物レンズ26に近づけば、例えば $Z = -0.5\text{ mm}$ の位置では、 100 keV の一次電子も集束させることができる。リターディングをしない場合は、絶縁板25(絶縁フィルム)を第2の対物レンズ26の上に置かなくてもよい。そのため、この場合には、第2の対物レンズ26は、加速電圧が -100 kV の一次電子線12を十分に集束できる。好ましくは第2の対物レンズ26は、加速電源を -30 kV から -10 kV のいずれかにして加速された荷電粒子線を、対物レンズの磁極の試料に最も近いところから見て、 0 mm から 4.5 mm のいずれかの高さの位置に集束可能であるように設計される。

30

【 0 1 3 4 】

加速電圧は -15 kV とし、試料23は -5 kV とし、電位板22に -6 kV をかけた場合について説明する。一次電子は、試料23に当たるときには、 10 keV になる。試料23から放出される二次電子21aのエネルギーは、 100 eV 以下である。電位板22の電位は試料23の電位よりも 1 kV 低いため、二次電子21aは電位板22を超えることができない。そのため、二次電子21aは検出できない。試料23から放出された 1 keV 以上のエネルギーを持っている反射電子21bは、電位板22を通過することができる。さらに電位板22と第1の対物レンズ18下の検出器20との間に 6 kV の電位差があり、反射電子21bは加速され検出器20に入る。このように電位板22の電圧を調整できるようにすることによって、電位板22をエネルギーフィルタとして使うこともでき、さらに信号電子21を加速させることで感度を上げることも可能になる。

40

【 0 1 3 5 】

次に、試料の高さが例えば 7 mm ある場合について説明する。

【 0 1 3 6 】

このとき、リターディングをする場合でも、上部磁極26bから絶縁板25と試料台24の厚みを含めて、例えば $Z = -7.75\text{ mm}$ 程度の位置において測定が行われる。この場合、第2の対物レンズ26のみでは 30 keV の一次電子線12を集束させることはできない。しかし、加速電圧を下げなくても第1の対物レンズ18の助けを借りれば、一次電子線12を集束可能である。

50

【 0 1 3 7 】

また、試料 2 3 の高さによっては、第 1 の対物レンズ 1 8 のみで集束させた方が性能良く観察できる場合もある（図 2 参照）。このように、試料 2 3 によって最適な使い方を選ぶことができる。

【 0 1 3 8 】

上記では、第 1 の対物レンズ 1 8 と第 2 の対物レンズ 2 6 との間隔を 4 0 m m とする場合について述べたが、この距離は固定式でも可動式にしてもよい。第 1 の対物レンズ 1 8 と第 2 の対物レンズ 2 6 との距離を離すほど、縮小率 M 3 は小さい値になる。そして開き角 は大きくできる。この方法で を調整することができる。

【 0 1 3 9 】

また、リターディング電圧が高いと信号電子 2 1 は光軸の近くを通過して、検出器 2 0 の一次電子が通るための開口部に入りやすくなる。そのため検出器 2 0 の開口部は小さい程よい。検出器 2 0 の開口部は 1 から 2 m m 程度にしておくと、感度がよい。電位板 2 2 の開口径や高さを調整し、電位板 2 2 の位置を光軸から少しずらすことで、信号電子 2 1 が検出器 2 0 に当たるように信号電子 2 1 の軌道を調整して感度をよくする方法がある。また、第 1 の対物レンズ 1 8 と第 2 の対物レンズ 2 6 との間に電場と磁場を直行させて印加するイークロスビー（E x B）を入れ、信号電子 2 1 を少し曲げるのもよい。一次電子の進行方向と信号電子 2 1 の進行方向とは逆なので、少し信号電子 2 1 を曲げるのに、弱い電場と磁場とを設けてもよい。少し曲がれば検出器 2 0 中心の開口部に入らず、検出できるようになる。また、単に第 1 の対物レンズ 1 8 と第 2 の対物レンズ 2 6 との間に電界を光軸に対して横からかけてもよい。このようにしても、一次電子は影響を受けにくいし、横ずれだけであれば画像への影響は少ない。例えば二次電子検出器 1 9 のコレクタ電極などによる電界を使って、信号電子 2 1 の軌道をコントロールすることも可能である。

【 0 1 4 0 】

図 3 では、第 2 の対物レンズ 2 6 を主レンズとして使っている。試料台 2 4 が接地電位の場合、二次電子 2 1 a は二次電子検出器 1 9 で検出される。反射電子 2 1 b は半導体検出器 2 0 またはロビンソン検出器 2 0 などで検出される。試料 2 3 と検出器 2 0 とが 1 0 m m から 2 0 m m 程度離れているときは、感度よく検出できる。しかし、4 0 m m 程度離れると、検出器 2 0 に入らない反射電子 2 1 b が増え、反射電子 2 1 b の検出量が少なくなる。このときに試料 2 3 にリターディング電圧を与えると、二次電子 2 1 a は半導体検出器 2 0 またはロビンソン検出器 2 0 などで検出されるようになる。また、リターディング電圧を与えることで、反射電子 2 1 b の広がりも抑えられ、半導体検出器 2 0 またはロビンソン検出器 2 0 などにおいて高感度で検出できるようになる。このように電位板 2 2 がない場合もリターディングは使用可能である。

【 0 1 4 1 】

図 2 では、試料 2 3 が分厚い場合で、対物レンズとして第 1 の対物レンズ 1 8 を使った場合を示した。図 2 では、電位板 2 2 を動かすステージを活用して、試料ステージとして使用することができる。この X Y 移動ステージは、第 1 の対物レンズ 1 8 に近づける方向にも移動できる。これにより、汎用 S E M のように装置が使用される。反射電子 2 1 b は半導体検出器 2 0 またはロビンソン検出器 2 0 などで検出され、二次電子 2 1 a は二次電子検出器 1 9 で検出される。通常、試料 2 3 は接地電位であるが、簡易的にリターディングもできる（電位板 2 2 なしでリターディングを行うことができる）。

【 0 1 4 2 】

第 2 の対物レンズ電源 4 2 のみを使うときには、第 1 の対物レンズ 1 8 と試料測定面との距離よりも、第 2 の対物レンズ 2 6 と試料測定面との距離の方が近くなるように装置が構成され、第 1 の対物レンズ電源 4 1 のみを使うときには、第 2 の対物レンズ 2 6 と試料測定面との距離よりも、第 1 の対物レンズ 1 8 と試料測定面との距離の方が近くなるように装置が構成される。

【 0 1 4 3 】

図 1 でリターディングをした場合、試料 2 3 の電位が負になる。試料 2 3 を G N D レベ

10

20

30

40

50

ルにしたまま電位板 22 に正の電圧を印加することも可能である（この手法を、ブースティング法と呼ぶ）。試料 23 に負の電圧を印加して、電位板 22 に正の電位をかけて、低加速 SEM としてさらに性能をよくすることも可能である。例として、第 1 の対物レンズ 18 は接地電位とし、電位板 22 に +10 kV を印加し、試料 23 は接地電位にする場合を説明する。加速電圧は -30 kV とする。一次電子は第 1 の対物レンズ 18 を通過するときは 30 keV であり、第 1 の対物レンズ 18 から電位板 22 にむけて加速され、電位板 22 あたりから試料 23 にむけて減速する。以下にこの場合のシミュレーションデータを示す。試料 23 と電位板 22 の形は、シミュレーションデータ 4 の場合と同じ条件とする。

【0144】

（シミュレーションデータ 6）

【0145】

$D_{probe} = 1.31 \text{ nm}$ 、 $D_g = 0.904$ 、 $D_s = 0.493$ 、 $D_c = 0.389$ 、 $D_d = 0.710$ 、

【0146】

$C_s = 1.29 \text{ mm}$ 、 $C_c = 2.56 \text{ mm}$ 、 $\theta = 9.13 \text{ mrad}$ 、 $M_3 = 0.0244$ である。

【0147】

以上の結果によると、ブースティングなしの場合（シミュレーションデータ 2）と比べて、プローブ径が改善している。

【0148】

信号電子 21 は、試料 23 と電位板 22 との間では加速されるが、電位板 22 と検出器 20 との間では減速される。検出器 20 が半導体検出器 20 である場合に反射電子 21b を検出できるが、半導体検出器 20 は接地電位であるため、二次電子 21a は減速し、検出できない。二次電子 21a は二次電子検出器 19 で検出できる。リターディング電圧を試料 23 に印加すれば、半導体検出器 20 で二次電子 21a も検出可能になる。

【0149】

次に図 7 を参照して、二段偏向コイル 17 の調整によって偏向軌道の交点を移動させることについて説明する。二段偏向コイル 17 で試料 23 上を二次元的に走査する。二段偏向コイル 17 の電子源側を上段偏向コイル 17a、試料側を下段偏向コイル 17b と呼ぶ。

【0150】

図 1 に示されるように、この二段偏向コイル 17 は、上段偏向コイル 17a の強度を可変する上段偏向電源 43 と、下段偏向コイル 17b の強度を可変する下段偏向電源 44 と、上段偏向電源 43 と下段偏向電源 44 とを制御する制御装置 45 とにより制御される。

【0151】

上段偏向コイル 17a と下段偏向コイル 17b は、第 1 の対物レンズ 18 の内部から見て一次電子線 12 が飛来してくる側に設置される（第 1 の対物レンズ 18 のレンズ主面より上流に設置、またはレンズ主面の位置に下段の偏向部材を置く場合には外側磁極 18b（図 7 参照。なお、図 7 の符号 18a は内側磁極を示す。）より上流に設置される）。上段偏向電源 43 と下段偏向電源 44 との使用電流比は、制御装置 45 によって可変となっている。

【0152】

図 7 (a) では、二段の偏向コイル 17 によって、電子は光軸と第 1 の対物レンズ 18 の主面の交点近くを通過する軌道になっている。第 1 の対物レンズ 18 を主レンズとして使う場合（図 2）には、このように設定される。第 2 の対物レンズ 26 を主レンズとして使うときに、図 7 (a) のようにすると偏向収差が大きくなり、低倍率の画像ほど歪んでしまう。第 2 の対物レンズ 26 を主レンズとして使うときは、図 7 (b) のように、上段偏向コイル 17a と下段偏向コイル 17b の強度比が、電子が第 2 の対物レンズ 26 の主面と光軸との交点近くを通過する軌道になるように調整される。調整は、上段偏向電源 4

10

20

30

40

50

3と下段偏向電源44の使用電流比を調整する制御装置45によって行われる。このようにすることで、画像の歪は減少する。なお、使用電流比を調整することで偏向軌道の交点(クロス点)をずらすのではなく、巻き数の異なるコイルをリレーなどで切り替える方式(巻数の異なるコイルを複数設け、用いるコイルを制御装置で選ぶ方式)や、静電レンズの場合は電圧を切り替える方式(使用電圧比を可変する方式)を採用してもよい。

【0153】

図7に示されるように、偏向コイル17は第1の対物レンズ18内の隙間に配置してもよい。偏向コイル17は、第1の対物レンズ18内にあってもよいし、図1のようにそれよりもさらに荷電粒子線の上流側に位置してもよい。静電偏向を採用する場合には、偏向コイルに代えて偏向電極が採用される。

10

【0154】

[第2の実施の形態]

【0155】

図8を参照して、第1の対物レンズ18のない簡易的な装置構成を説明する。

【0156】

ここでは半導体検出器20を下段偏向コイル17bの下に置いている。第1の対物レンズ18がない場合、その分下段偏向コイル17bと第2の対物レンズ26との距離を短くすることができる。このような装置構成は、小型化に適している。第1の実施の形態と比較して、第2の実施の形態でも第1の対物レンズ18を使用することを除いて、同様に装置を使用することができる。検出器20と第2の対物レンズ26との距離は、10mmから200mm離して設置されている。

20

【0157】

図8の装置においては、電子源11から下段偏向コイル17bまでの構成により、一次電子線12を試料23に向けて射出する上部装置が構成される。また、電位板22と、それよりも下に配置される部材とにより下部装置が構成される。下部装置に試料23は保持される。上部装置は、その内部を通った荷電粒子線が最終的に放出される孔部を有している。その孔部は、下段偏向コイル17bに存在する。検出器20は、その孔部の下に取り付けられている。検出器20も一次電子線12が通過する開口部を有しており、孔部と開口部とが重なるように、検出器20は下段偏向コイル17bよりも下部に取り付けられる。

30

【0158】

[第3の実施の形態]

【0159】

第3の実施の形態では、電子源11に電界放出型のものを用いる。電界放出型は、熱電子放出型と比べて輝度が高く、光源の大きさは小さく、一次電子線12のVも小さく、色収差の面でも有利である。第3の実施の形態では第1の実施の形態との比較のために、第1の実施の形態の二段目コンデンサレンズ15bから下を第1の実施の形態と同じものとし、電子源部を電界放出型にし、一段目コンデンサレンズ15aをなくしている。一次電子線12のVを0.5eVとし、電子源の大きさ $S_o = 0.1\mu\text{m}$ とする。Z = -4mmとし、加速電圧Vaccを-30kV、第1の対物レンズ18はOFFとした性能を計算すると、以下のようになる。

40

【0160】

(シミュレーションデータ7)

【0161】

$D_{probe} = 0.974\text{nm}$ 、 $D_g = 0.071$ 、 $D_s = 0.591$ 、 $D_c = 0.248$ 、 $D_d = 0.730$ 、

【0162】

$C_s = 1.69\text{mm}$ 、 $C_c = 3.36\text{mm}$ 、 $\theta = 8.88\text{mrad}$ 、 $M_3 = 0.0249$

【0163】

50

電界放出型電子源は熱電子放出型と比べて輝度が高い。さらにコンデンサレンズ15が一段になっているので、プローブ電流は熱電子放出型のと比べて多くなっている。それにもかかわらず、プローブ径が小さくなっていることがわかる。 D_d が一番大きな値を示している。

【0164】

次の例では、加速電圧 V_{acc} を -1 kV ($V_i = 1\text{ kV}$) とする。第1の対物レンズ18は使わずに、第2の対物レンズ26を使い、電子を集束する。プローブ電流は変化しないようにコンデンサレンズ15を調整する。その場合は、以下ようになる。

【0165】

(シミュレーションデータ8)

10

【0166】

$D_{probe} = 8.48\text{ nm}$ 、 $D_g = 0.071$ 、 $D_s = 0.591$ 、 $D_c = 7.45$ 、 $D_d = 4.00$ 、

【0167】

$C_s = 1.68\text{ mm}$ 、 $C_c = 3.36\text{ mm}$ 、 $\theta = 8.88\text{ mrad}$ 、 $M_3 = 0.0249$

【0168】

以上のように、熱電子放出型(シミュレーションデータ3)では、 $D_{probe} = 15.6\text{ nm}$ なので、電界放出型電子源の方がよいことがわかる。

【0169】

20

次に、電位板22と試料23を図1のように配置する例について説明する。試料測定面を $Z = -4\text{ mm}$ とする。

【0170】

加速電圧 V_{acc} は -10 kV とし、電位板22を 0 V 電位にし、試料23を -9 kV にした場合($V_i = 1\text{ kV}$)について計算結果を以下に示す。ここでは第1の対物レンズ18は使わず、第2の対物レンズ26のみで集束させている。

【0171】

(シミュレーションデータ9)

【0172】

$D_{probe} = 3.92\text{ nm}$ 、 $D_g = 0.071$ 、 $D_s = 2.90$ 、 $D_c = 2.32$ 、 $D_d = 1.26$ 、

30

【0173】

$C_s = 0.260\text{ mm}$ 、 $C_c = 0.330\text{ mm}$ 、 $\theta = 28.1\text{ mrad}$ 、 $M_3 = 0.0248$

【0174】

収差の中で D_s が一番大きな値になっている。これは、試料23に近くほど電子の速さが遅くなり磁場の影響を受けやすくなることと、磁束密度が試料23に近いほど大きな値であることから試料23に近いほど強いレンズになっているため、 θ が大きくなりすぎたことによる。 D_s は、 θ の3乗に比例することから、大きくなっている。第1の対物レンズ18を使うことで改善するのがよい。

40

【0175】

次に、第1の対物レンズ18を使用し、強度を最適調整した場合(シミュレーションデータ1のAT(アンペアターン)の約0.31倍にした場合)のデータを示す。

【0176】

(シミュレーションデータ10)

【0177】

$D_{probe} = 2.68\text{ nm}$ 、 $D_g = 0.103$ 、 $D_s = 1.03$ 、 $D_c = 1.68$ 、 $D_d = 1.82$ 、

【0178】

$C_s = 0.279\text{ mm}$ 、 $C_c = 0.344\text{ mm}$ 、 $\theta = 19.5\text{ mrad}$ 、 $M_3 = 0.0$

50

358

【0179】

収差係数だけを見ると悪化しているが、プローブ径は を調節したことにより、さらに改善している。

【0180】

ここでは第1の実施の形態と比較するため、対物レンズ絞り16の穴径を21.8ミクロンと同じにした。電界放出型の場合は、輝度が明るいため、そしてコンデンサレンズ15が一段になっているため、さらに穴径を小さくできる。そのため、回折収差が主な収差になる。

【0181】

以上のように本実施の形態によると、第2の対物レンズ26を使い、リターディングすることで、 が大きくなるレンズ系になり、回折収差を減らせるレンズ系となっている。すなわち、荷電粒子線装置において低収差の第2の対物レンズを実現することができる。信号電子を高感度で検出し、安価に高分解能化を実現することができる。

10

【0182】

本実施の形態によれば、信号電子が第1の対物レンズの中を通過しないため、検出部を簡単な構造にすることができる。第2の対物レンズの光軸上磁束密度は、試料に近いほど強い分布をしているので、対物レンズは低収差レンズになる。試料に負の電位を与えると、試料に近いほど強いレンズになり、対物レンズはさらに低収差レンズになる。試料のリターディング電圧による電界で、信号電子は加速され、エネルギー増幅して検出器に入るため、検出器は高感度となる。以上の構成によって、高分解能な荷電粒子線装置を実現することができる。

20

【0183】

[第4の実施の形態]

【0184】

次に、第4の実施の形態におけるSEM(荷電粒子装置の一例)の装置構成について説明する。以下の説明において、上述の実施の形態と同様の構成(各構成の変形例も含む)については、上述と同じ符号を付し、それらの構成についての詳細な説明については省略する。

【0185】

上記の第1の実施の形態の大まかな構成は、次のように、第4の実施の形態においても同様である。上部装置には、電子源11から第1の対物レンズ18までの構成が配置されている。上部装置から試料23に向けて一次電子線12が射出される。下部装置には、第2の対物レンズ26が配置されている。下部装置に試料23が保持される。二次電子検出器19及び検出器20も、同様に設けられる。二次電子検出器19は、二次電子21aの信号電子21を検出するために設けられる。

30

【0186】

図9は、本発明の第4の実施の形態に係るSEMの装置構成の一例を示す断面図である。

【0187】

図9に示されるSEMでは、図1に示されるものと同様に、上部装置や、第2の対物レンズ26や、二次電子検出器19や、電位板22等が設けられている。このSEMでは、リターディングが行われる。このように、第4の実施の形態において、SEMは、基本的には図1に示されるものと同様の構成を有している。第4の実施の形態において、SEMは、電位板22の下面(試料23側の面)に、反射電子21bを検出する検出器720が配置されている点で図1に示されるものとは異なっている。

40

【0188】

検出器720には、一次電子線12や二次電子21aが通過する孔部が設けられている。検出器720としては、例えば、マイクロチャンネルプレートや、ロビンソン検出器や、半導体検出器等が用いられる。

50

【 0 1 8 9 】

このように、図 9 に示される装置では、比較的試料 2 3 に近い位置に、検出器 7 2 0 が配置される。入射する反射電子 2 1 b の立体角が大きく、反射電子 2 1 b の検出感度が向上するので、より高い感度で試料 2 3 の観察を行うことができる。

【 0 1 9 0 】

第 4 の実施の形態において、電位板 2 2 の上方に、検出器 2 0 が配置されていてもよい。検出器 7 2 0 の孔部 7 2 0 a の寸法は、一次電子線 1 2 が通過する程度に小さくてもよい。例えば、孔部 7 2 0 a は、円形の貫通孔であって、その直径がたとえば 1 ミリメートルから 2 ミリメートル程度が好ましい。このように孔部 7 2 0 a を小さくすることにより、反射電子 2 1 b のほとんどは電位板 2 2 より上方に通過することができなくなる。したがって、二次電子検出器 1 9 または検出器 2 0 に入射する信号電子 2 1 のほとんどが二次電子 2 1 a となるため、反射電子像との混合でない、鮮明な二次電子像を得ることができる。

10

【 0 1 9 1 】

[その他]

【 0 1 9 2 】

本発明は上記実施形態によって記載したが、この開示の記述および図面はこの発明を限定するものであると理解すべきではない。例えば荷電粒子源から試料 2 3 までの荷電粒子線の軌道を図では直線に描いてある。しかし、エネルギーフィルタなどを入れると軌道が曲げられる。荷電粒子線の軌道が曲がっている場合もある。このような場合も特許請求の範囲に記載された技術的範囲内に含まれる。また、イオンビーム顕微鏡では負イオンの荷電粒子の場合、電子と同様の考え方ができ第 1 の実施の形態と同様に適用できることがわかる。イオンの場合、電子と比べて質量が重いので、コンデンサレンズ 1 5 を静電レンズに、偏向コイル 1 7 を静電偏向に、第 1 の対物レンズ 1 8 を静電レンズにしてもよい。また、対物レンズ 2 6 は磁気レンズを用いる。

20

【 0 1 9 3 】

上記説明によって本発明は、荷電粒子線装置である E P M A、電子線描画装置などの電子ビーム装置、またはイオンビーム顕微鏡などのイオンビーム装置に容易に適用できることが理解できる。He + イオン源のようにプラスイオンの荷電粒子を用いる場合には、イオン源の加速電源として正の加速電源 1 4 を用いる。リターディングを行わない場合は、第 1 の実施の形態と同様に装置を構成することができる。リターディングを行う場合は、リターディング電源 2 7 をプラス電源に切り替えるほか、上述の実施の形態と同様に装置を構成することができる。このとき、電位板 2 2 が接地電位であれば、試料 2 3 から放出した信号電子 2 1 は、負電荷であるため、試料 2 3 に引き戻されてしまう。この場合、電位板 2 2 の電位が試料 2 3 の電位よりも高くなるように電位板電源 2 8 を調整すればよい。たとえば、荷電粒子線の加速電源 1 4 を + 7 k V とし、上部装置を接地電位とし、電位板 2 2 を + 6 k V とし、試料 2 3 を + 5 k V とすればよい。そうすると、電位板 2 2 の位置に置いた検出器 7 2 0 で信号電子 2 1 を検出することができる。

30

【 0 1 9 4 】

上述の実施の形態および変形例は、すべての点で例示であって制限的なものではないと考えられるべきである。本発明の範囲は上記した説明ではなくて特許請求の範囲によって示され、特許請求の範囲と均等の意味および範囲内でのすべての変更が含まれることが意図される。

40

【 符号の説明 】

【 0 1 9 5 】

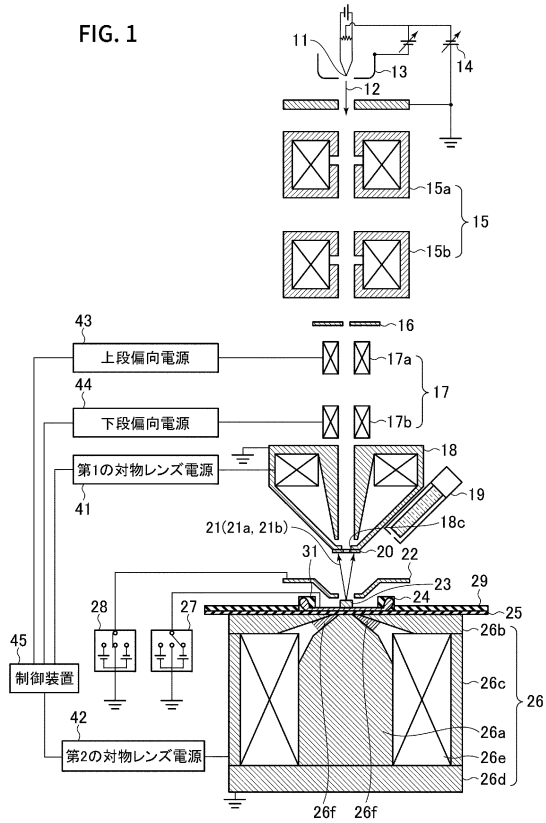
- 1 1 ... 荷電粒子源 (電子源)
- 1 2 ... 荷電粒子線 (一次電子線)
- 1 3 ... ウェーネルト電極
- 1 4 ... 加速電源
- 1 5 ... コンデンサレンズ

50

1 5 a ...一段目コンデンサレンズ	
1 5 b ...二段目コンデンサレンズ	
1 6 ...対物レンズ絞り	
1 7 ...二段偏向コイル	
1 7 a ...上段偏向コイル	
1 7 b ...下段偏向コイル	
1 8 ...第1の対物レンズ	
1 8 a ...内側磁極	
1 8 b ...外側磁極	
1 8 c ...孔部	10
1 9 ...二次電子検出器	
2 0 ...検出器(半導体検出器、ロビンソン検出器またはM C P検出器)	
2 1 ...信号電子(2 1 a ...二次電子、2 1 b ...反射電子)	
2 2 ...電位板	
2 3 ...試料	
2 4 ...試料台	
2 5 ...絶縁板	
2 6 ...第2の対物レンズ	
2 6 a ...中心磁極	
2 6 b ...上部磁極	20
2 6 c ...側面磁極	
2 6 d ...下部磁極	
2 6 e ...コイル	
2 6 f ...シール部	
2 7 ...リターディング電源	
2 8 ...電位板電源	
2 9 ...試料台ステージ板	
3 0 ...円筒放電防止電極	
3 1 ...絶縁材	
4 1 ...第1の対物レンズ電源	30
4 2 ...第2の対物レンズ電源	
4 3 ...上段偏向電源	
4 4 ...下段偏向電源	
4 5 ...制御装置	
7 2 0 ...検出器(半導体検出器、ロビンソン検出器またはM C P検出器)	

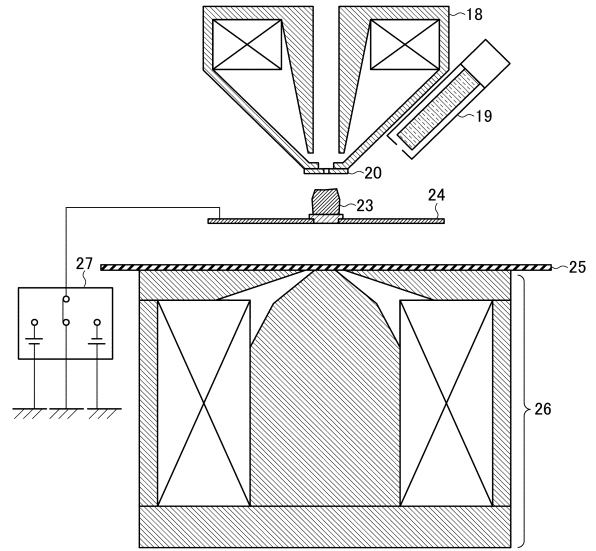
【 図 1 】

FIG. 1



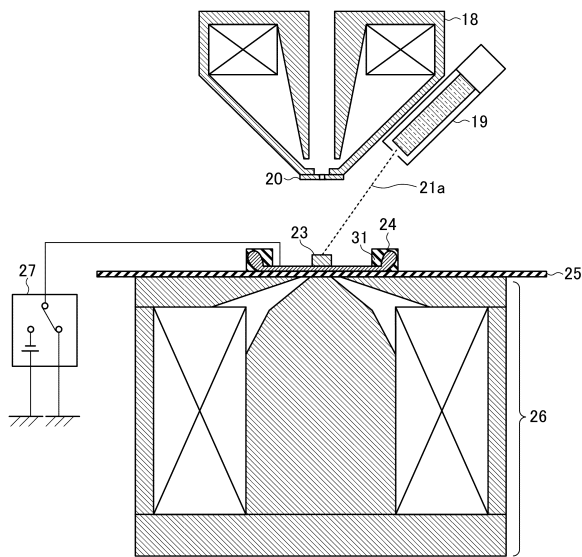
【 図 2 】

FIG. 2



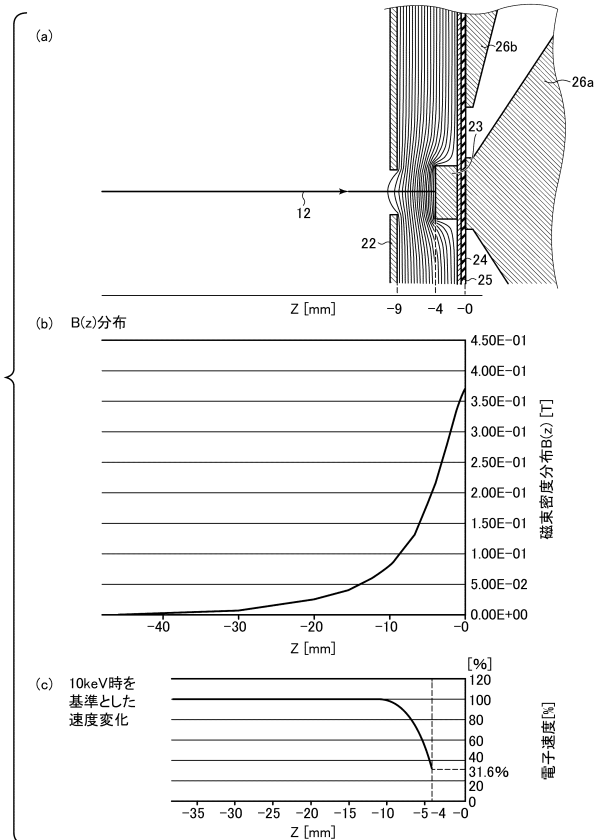
【 図 3 】

FIG. 3



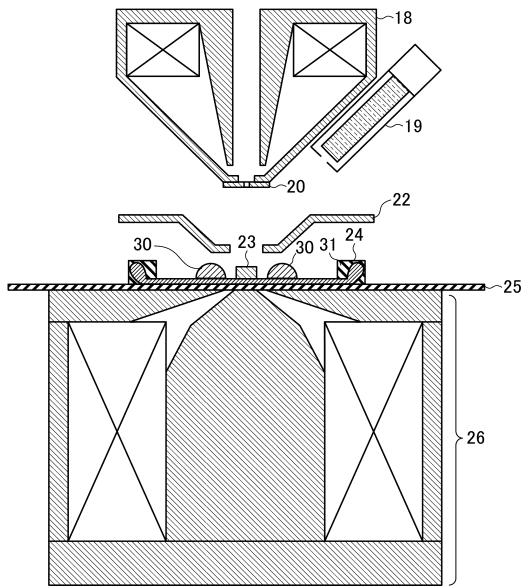
【 図 4 】

FIG. 4



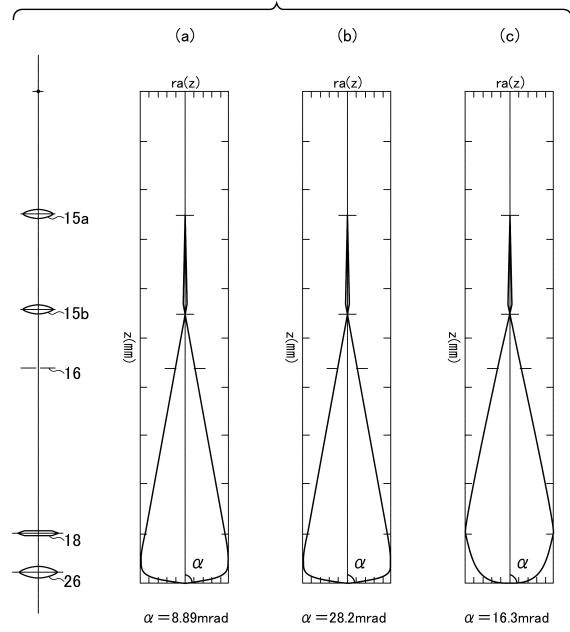
【 図 5 】

FIG. 5



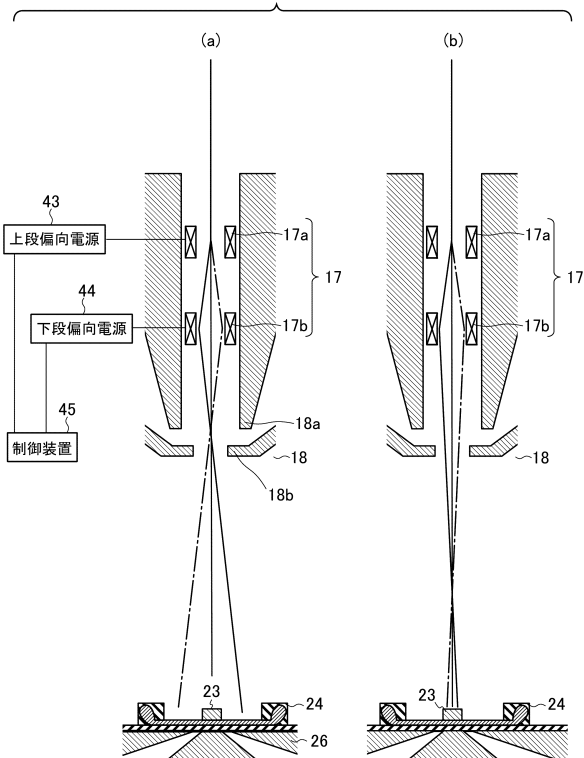
【 図 6 】

FIG. 6



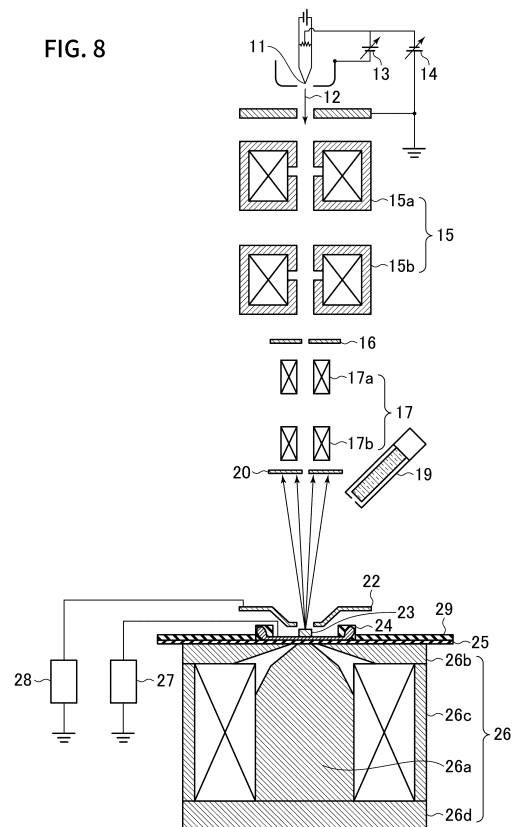
【 図 7 】

FIG. 7



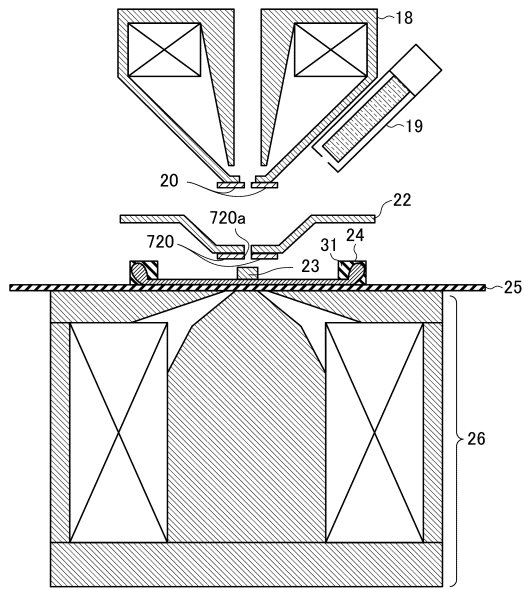
【 図 8 】

FIG. 8



【 図 9 】

FIG. 9



フロントページの続き

- (56)参考文献 特開2000-348658(JP,A)
特開平06-181041(JP,A)
特開2008-004329(JP,A)
米国特許第03870891(US,A)
特開2016-143513(JP,A)
特開2016-143514(JP,A)

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

H01J 37/28
H01J 37/06
H01J 37/244
H01J 37/141