

(19) 日本国特許庁 (JP)

(12) 特 許 公 報 (B2)

(11) 特許番号

特許第6294280号
(P6294280)

(45) 発行日 平成30年3月14日 (2018. 3. 14)

(24) 登録日 平成30年2月23日 (2018. 2. 23)

(51) Int. Cl.

F I

HO 1 J 37/09 (2006. 01)

HO 1 J 37/09 A

HO 1 J 37/26 (2006. 01)

HO 1 J 37/26

HO 1 J 37/28 (2006. 01)

HO 1 J 37/28 C

HO 1 J 37/21 (2006. 01)

HO 1 J 37/21 A

HO 1 J 37/21 B

請求項の数 10 (全 20 頁) 最終頁に続く

(21) 出願番号 特願2015-203388 (P2015-203388)

(22) 出願日 平成27年10月15日 (2015. 10. 15)

(65) 公開番号 特開2016-81929 (P2016-81929A)

(43) 公開日 平成28年5月16日 (2016. 5. 16)

審査請求日 平成29年1月12日 (2017. 1. 12)

(31) 優先権主張番号 14189135.8

(32) 優先日 平成26年10月16日 (2014. 10. 16)

(33) 優先権主張国 欧州特許庁 (EP)

早期審査対象出願

(73) 特許権者 501233536

エフ イー アイ カンパニ

F E I C O M P A N Y

アメリカ合衆国 オレゴン 97124-

5793 ヒルズボロ ドーソン・クリ-

ク・ドライブ 5350 エヌイー

(74) 代理人 100107766

弁理士 伊東 忠重

(74) 代理人 100070150

弁理士 伊東 忠彦

(74) 代理人 100091214

弁理士 大貫 進介

(72) 発明者 パベル ポトツェク

オランダ国, 5654 ペーイクス エイ

ントホーフェン, ファウレストラート 1

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 特殊な絞り板を備える荷電粒子顕微鏡

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項 1】

試料を保持する試料ホルダ、

荷電粒子ビームを生成するビーム源、

前記試料へ照射するように前記ビームを案内する照射体、

前記照射に応じて前記試料から放出される放射線束を検出する検出器、

を有する荷電粒子顕微鏡であって、

前記照射体は、前記ビームが前記試料に衝突する前に前記ビームの幾何学形状を画定し、
前記ビームを複数の分割ビームへ変換するための開口領域を前記ビーム路中に有し、前
記試料上で前記ビームのオートフォーカス操作を実行するのに用いられる絞り板を有し、

前記開口領域が複数の孔の分布を有し、前記複数の孔の各々は、前記絞り板へ入射する
前記ビームの直径よりも小さく、

前記ビーム路中に様々な異なる絞り板を配置するように選択的に起動される交換機構に
より、絞り板が保持されることを特徴とする荷電粒子顕微鏡。

【請求項 2】

前記複数の孔の中には、孔のサイズ、孔の形状、孔の方位、及びこれらの組み合わせを
含む群から選ばれた特性に関して相互に異なる少なくとも2つの孔が存在する、請求項1
に記載の顕微鏡。

【請求項 3】

前記分布が、該分布の重心に対して非等方性を示す、請求項1又は2に記載の顕微鏡。

【請求項 4】

前記交換機構が、

前記ビーム路内での様々なホルダ位置の位置設定を行うように動かされ得て、各々には絞り板が供され得る多数のホルダ位置を有するトレイト、

絞り板のライブラリと協働して、前記ライブラリから所与の絞り板を取り出し、かつ、前記所与の絞り板を前記ビーム路内に設置するグリッパとを有する群から選ばれる、請求項 3 に記載の顕微鏡。

【請求項 5】

前記交換機構には複数の絞り板の一団が供され、

前記一団のうちの各絞り板は、前記分布の異なる実施例を有する、

請求項 1 又は 4 に記載の顕微鏡。

10

【請求項 6】

試料ホルダ上に試料を供する段階、

ビーム源から照射体を介して前記試料へ照射するように荷電粒子ビームを案内する段階

、
検出器を用いることによって前記照射に応じて前記試料から放出される放射線束を検出する段階を有する荷電粒子顕微鏡の使用方法であって、さらに、

前記試料に衝突する前に前記ビームの形状を画定し、前記ビームを複数の分割ビームへ変換するために開口領域を前記ビーム路中に有する絞り板を設ける段階であって、前記開口領域が複数の孔の分布を有し、前記複数の孔の各々は、前記絞り板へ入射する前記ビームの直径よりも小さい段階を有し、

20

前記ビーム路中に様々な異なる絞り板を配置するように選択的に起動される交換機構により、絞り板が保持され、前記絞り板が、前記試料上で前記ビームのオートフォーカス操作を実行するのに用いられる、ことを特徴とする、方法。

【請求項 7】

試料ホルダ上に試料を供する段階、

ビーム源から照射体を介して前記試料へ照射するように荷電粒子ビームを案内する段階

、
検出器を用いることによって前記照射に応じて前記試料から放出される放射線束を検出する段階を有する荷電粒子顕微鏡の使用方法であって、さらに、

30

前記試料に衝突する前に前記ビームの形状を画定し、前記ビームを複数の分割ビームへ変換するために開口領域を前記ビーム路中に有する絞り板を設ける段階であって、前記開口領域が複数の孔の分布を有し、前記複数の孔の各々は、前記絞り板へ入射する前記ビームの直径よりも小さい段階を有し、

前記ビーム路中に様々な異なる絞り板を配置するように選択的に起動される交換機構により、絞り板が保持され、

前記顕微鏡が、前記試料を透過して検出器へ向かうよう荷電粒子束を案内する結像系を有する透過型顕微鏡で、

前記絞り板は画像の焦点を測定するのに用いられる、ことを特徴とする、方法。

【請求項 8】

前記絞り板が前記試料の少なくとも一部にわたって前記ビームを走査する間に用いられる方法であって、

40

前記絞り板は、

前記ビームが衝突する前記一部の表面の幾何形状プロファイルを推定する段階と、

すべての地点について基本的に均一な焦点状態を有する前記一部の画像を生成する段階を有する群から選ばれる操作を実行するために用いられる、請求項 6 又は 7 に記載の方法

。

【請求項 9】

前記絞り板が、前記試料の画像の分解能を改善するのに用いられる、請求項 6 又は 7 に記載の方法。

50

【請求項 10】

前記ビームの走査運動は、前記試料の疎な走査を実行するのに用いられ、
前記画像は、前記疎な走査中に収集される検出器データから構築される、
請求項 9 に記載の方法。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は荷電粒子顕微鏡に関する。当該荷電粒子顕微鏡は、
試料を保持する試料ホルダ、
荷電粒子ビームを生成するビーム源、
前記試料へ照射するように前記ビームを案内する照射体、
前記照射に応じて前記試料から放出される放射線束を検出する検出器、
当該照射体は、前記ビームが前記試料に衝突する前に前記ビームの幾何学形状を画定する
ための前記ビーム路中に開口領域を有する絞り板を有する。

10

【0002】

本発明はまた当該顕微鏡の様々な画期的な使用方法にも関する。

【背景技術】

【0003】

荷電粒子顕微鏡 - 具体的には電子顕微鏡 - は、微小な対象物を撮像する周知で重要性を増している方法である。歴史的には、電子顕微鏡の基本的性質は、多数の周知の装置 - た
例えば透過電子顕微鏡 (TEM)、走査電子顕微鏡 (SEM)、及び走査透過電子顕微鏡 (STEM) - 及び様々な派生型装置 - た例えば支援活動 (た例えばイオンビームミリング又はイオンビーム誘起堆積 (IBID)) を可能にするように「加工用」集束イオンビーム (FIB) をさらに用いることのできる所謂「デュアルビーム」装置 (た例えば FIB - SEM) - へ発展してきた。
より詳細には以下の通りである。

20

- SEMでは、試料への走査電子ビームの照射が、2次電子、後方散乱電子、X線、及びフォトルミネッセンス (赤外、可視、及び/又は紫外の光子) として、試料からの「補助」放射線の放出を引き起こす。続いてこの放出放射線束の1つ以上の成分が、画像蓄積目的及び/又は (た例えば EDX (エネルギー分散 X 線分光) の場合には) 分光解析で検
出及び利用される。

30

- TEMでは、試料への照射に用いられる電子ビームは、試料 (この目的のため、一般的には SEM 用試料の場合よりも薄くなる) へ侵入するのに十分高いエネルギーとなるように選ばれる。よって試料から放出される透過電子束は、画像の生成に用いられて良い。係る TEM が走査モード (よって STEM となる) で動作する場合、問題となる画像は、照射電子ビームの走査運動中に蓄積される。

【0004】

ここで述べた話題の一部に関するさらなる情報はたとえば、以下の Wikipedia のリンクから収集することができる。

http://en.wikipedia.org/wiki/Electron_microscope

40

http://en.wikipedia.org/wiki/Scanning_electron_microscope

http://en.wikipedia.org/wiki/Transmission_electron_microscopy

http://en.wikipedia.org/wiki/Scanning_transmission_electron_microscopy

照射ビームとして電子ビームを用いる代わりとして、荷電粒子顕微鏡観察もまた、他の種類の荷電粒子を用いて実行されて良い。この点では、「荷電粒子」という語句は、たとえば電子、正イオン (たとえば Ga イオン又は He イオン)、負イオン、陽子、及び陽電子を含むものとして広義に解釈されなければならない。

イオン系顕微鏡に関しては、さらなる情報は、たとえば以下のリンクと非特許文献1から収集することができる。

http://en.wikipedia.org/wiki/Scanning_Helium_Ion_Microscope

50

撮像に加えて、荷電粒子顕微鏡はまた、他の機能 - たとえば分光の実行、ディフラクトグラムの検査、(局在化した)表面改質(たとえばミリング、エッチング、堆積)等の実行 - をも有して良いことに留意して欲しい。

すべての場合において、荷電粒子顕微鏡(CPM)は少なくとも以下の構成要素を有する。

- 放射線源(たとえばショットキー電子源若しくはイオン銃)
- 照射体。線源からの「生の」放射線ビームを操作し、かつ、その放射線に対してある作用 - 集束、収差の緩和、(アパーチャによる)トリミング、フィルタリング等 - を実行するように機能する。照射体は一般的に、1つ以上の(荷電粒子)レンズを有し、かつ、他の種類の(粒子)光学部品をも有して良い。望ましい場合には、照射体には、調査中の試料にわたる走査運動を出力ビームに実行させることのできる偏向器システムが供されて良い。
- 上に調査中の試料が保持及び位置設定(たとえば傾斜、回転)され得る試料ホルダ。望ましい場合には、このホルダは、試料に対するビームの所望の走査運動を実現するように動かされて良い。一般的には、係る試料ホルダは、たとえば機械ステージのような位置設定システムに接続される。
- (被照射試料から放出される放射線を検出する)検出器。前記検出器は、単体であって良いし又は事実上複合体/分配されても良く、かつ、検出される放射線に依存して多くの異なる形態をとって良い。例には、光電子増倍管(固体光電子増倍管SSPMを含む)、フォトダイオード、CMOS検出器、CCD検出器、光電池等が含まれる。これらはたとえば、シンチレータ膜と併用されて良い。

【0005】

特に当該装置は一般的に以下を有する。

【0006】

照射体内に設けられていて調査中の試料に荷電粒子ビームが衝突する前にその荷電粒子ビームを遮断するように位置設定可能な絞り板。この板は一般的に、前記ビームを透過しない材料(たとえば金属)のシートを含むが、前記ビーム(の少なくとも一部)を透過させることが可能な開口領域をも含む。この板は、前記試料に前記ビームが衝突する前に前記ビームの幾何学形状(たとえば周辺形状、サイズ)を画定/制御するのに用いられる。開口領域は、入射荷電粒子ビームが前記開口領域の中心に位置するときに、たとえば前記ビームの直径(外部断面寸法)が少なくとも前記開口領域の直径程度となることによって、そのビームが完全に「満たした」(及んだ)跡/断面を有するように調節される。

【0007】

以降では、本発明は、例として、電子顕微鏡の具体的に文脈において説明され得る。しかし係る単純化は単に簡明を期す/例示のためであり、限定と解されてはならない。

【0008】

上の「技術分野」で述べた顕微鏡の例はたとえばSEMである。この場合では、上述の絞り板は通常、たとえば「コンデンサ絞り」又は「収差制御絞り」と呼ばれ、かつ、通常はビーム断面積の程度/直径/サイズを制限する機能を有する。これは一般的に像の分解能にとって有利である。その理由は軸を外れる荷電粒子は、照射体(の(複数の)プローブ生成レンズ)中のレンズ収差(たとえば球面収差及び色収差)のため、十分に集束されない傾向にあるからである。係る目的のため、開口領域は基本的に、(粒子)光軸で中心をとる相対的に大きな環状の孔で構成される。一般的には係る板は、照射体の最終プローブ生成レンズ(対物レンズ)に隣接するように位置設定される。従来開口領域の面内位置(直交座標XY)は、プローブ生成レンズとの厳密な位置合わせを行うために微調整されて良い。通常顕微鏡利用者は、各異なる分解能とプローブ電流間での切り換えを行うため、各異なるサイズの絞りからなる組の間で機械的に切り換えを行って良い。

【0009】

前段落で述べたような装置がこれまでのところ許容可能な結果を出してきたが、本願発

10

20

30

40

50

明者等は、この従来型の設計を実質的に改良するために意欲的に取り組んできた。この努力の結果が本願の主題である。

【先行技術文献】

【特許文献】

【0010】

【特許文献1】欧州特許出願第14172871.7号明細書

【非特許文献】

【0011】

【非特許文献1】W.H. Escovitz, T.R. Fox and R. Levi-Setti, Scanning Transmission Ion Microscope with a Field Ion Source, Proc. Nat. Acad. Sci. USA 72(5), pp 1826-1828 (1975)

10

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0012】

本発明の目的は、上述の荷電粒子顕微鏡を改良することである。具体的に本発明の目的は、係る顕微鏡が、従来の顕微鏡に現在のところ欠けている機能を享受することである。しかも本発明の目的は、改良された顕微鏡の設計が、従来技術に係る装置によりも多目的で、かつ、より正確な結果を得ることを可能にすることである。

【課題を解決するための手段】

【0013】

20

上記及び他の目的は、「技術分野」で述べた荷電粒子顕微鏡であって、前記開口領域が複数の孔の分布を有し、前記複数の孔の各々は、前記絞り板へ入射する前記ビームの直径よりも小さいことを特徴とする荷電粒子顕微鏡によって実現される。よって前記開口領域は、単一の入射ビームを複数の放出分割ビームへ変換するように機能する。所与の分割ビームの断面形状は、前記ビームが放出される（前記分布内の）前記孔の形状に依存する。

【0014】

本発明の要点は、数学的見地及び物理的見地の両方から説明され得る。一般的な数学的解析に関しては、以降のことに留意して欲しい。

- 荷電粒子顕微鏡における像生成処理は、試料に関連する情報と（粒子）光学系に関する情報のコンボリューションを含む。後者はたとえば、所謂点拡がり関数（PSF）を用いることによって数学的に記述することができる。PSFは、点状物体が介在光学系によって非点状画像へ変換される（関数上での）方法を表す。

30

- このコンボリューションから試料に関連する情報又は光学系に関する情報のみを抽出するため、ある形式のデコンボリューションが実行されなければならない。係るデコンボリューションを実行する簡便な方法はフーリエドメイン内に存在する。フーリエドメイン内では、商 $Q = S / O$ で処理が行われる。ここで、 S は試料に関する周波数スペクトルで、かつ、 O は光学系に関する周波数スペクトルである。

- 本願発明者等は、従来型の絞り板 - 典型的には（大きな単一の）環状孔を備える - が用いられるとき、スペクトル O が、自然に複数のゼロを有する擬ガウシアンになろうとすることを発見した。前記ゼロが商 Q の分母内で生じるので、前記ゼロは不連続性を引き起こし、かつ、画像全体にわたる「アーティファクト」としてはっきり現れる。アーティファクトは本質的に画像ノイズとみなされ得る。

40

- 他方、本発明による複数の孔を備える絞り板が用いられるとき、スペクトル O は、ゼロが少なく（本質的にはなくなる）なり、はるかに滑らかに見える。それにより、上述した不連続性が緩和されて、最終的には、信号対雑音比が改善されたはるかに「清浄な」像が生成される。

【0015】

この一般的な効果に立脚して、さらにより具体的な精緻化もなされ得る。特に、単一の（相対的に大きな）孔を複数の（顕著に小さな）孔の分布に置き換えることで、具体的な効果を生じさせるために「調節」され得るパラメータ / 新たな自由度が生成される。より具

50

体的には、前記置き換えは、分布形状、分布密度、分布同等性／対称性、孔の形状、孔のサイズ、孔の方位等を新たなパラメータを生成する。前記新たなパラメータは、前記スペクトルOの具体的操作を生成するように選ばれて良い。以降でより詳細に説明するように、前記操作は、以下に示すような顕著な機能の改善に役立ち得る。

- より迅速／正確な焦点測定／制御
- 試料高さのマッピング
- 分解能の向上

上述の数学的な解明に加えて、本発明（のある態様）は物理的にも理解され得る。この文脈では、以下の補助的用語を導入する。

- 前記試料面での絞り板の孔の完全に焦点合わせされた像は、本影（u m b r a）を有するものと呼ばれる。
- 前記像が焦点合わせされていない場合、前記像の周辺は曖昧になり、前記陰を取り囲む半影（p e n u m b r a）が生成される。
- （近似的には）前記本影はゼロ次結像情報を含み、かつ、前記半影は1次結像情報を含むものとみなされて良い。

【0016】

従来の単一孔の（環状）絞り板を備える従来の顕微鏡では、単一の（円盤形状の）本影と単一の（環状の）半影が存在する。前記絞り板を本発明の多数孔の絞り板に置き換えることで、多数の本影と半影が生成される。このとき隣接する半影の重なり領域に係る高次現象が付随して起こる。この高次情報は従来の状況には存在しない。前記高次情報は、画像処理に関する新たな／さらなる情報を与えるだけではなく、特定の要件に（より緊密に）適合するようにも操作され得る。なぜなら本発明の絞り板内の孔の相対位置、サイズ、及び／又は形状を変更することで、それに対応して前記重なり領域のサイズ／性質が変更されるからである。それに加えて、集団をなす、重なっていない半影の形態及びサイズも同様に操作されえる。その結果前記1次情報もまた豊富になる可能性がある。前記の高次重なり効果からの情報の抽出はたとえば、干渉縞又は波のうなりからの情報の抽出にある程度関連しているとも考えられる。

【0017】

本発明の特別な実施例では、本発明の絞り板は、前記試料上での前記ビームの自動焦点合わせ操作を実行するのに用いられる。従来自動焦点合わせは、所謂「フォーカスシリーズ（f o c u s s e r i e s）」を実行することによって機能している。フォーカスシリーズでは、試験用物体（たとえば試料の特別な特徴部）の像の一連の試験結果（列）が最善の焦点で - たとえばわずかな過焦点から最善の焦点を介してわずかな過小焦点までで - 行われる。このシリーズの解析は、使用された試験用物体の最小画像直径の焦点位置として最善の焦点の軸方向位置を明らかにする。しかしそのような動的方法は時間のかかるものであるので、意図しないスループットの損失を引き起こす。しかも係る方法は多数の露光列を必要とするので、放射線感受性を有する試験用物体にとって有害となり得る。本発明は、以下に示す2つの相補的な方法によってこの問題を解決する。

（i）本発明による多数孔を瞬間的に用いることによって、本願発明者等は、焦点外し画像には、焦点外しの大きさを独自に示す特定の物理的「縞情報」／数学的「スペクトル情報」が与えられ得ることを発見した。係るシナリオでは、単一の画像の（数学的）解析は、その画像に係るデフォーカスの大きさを明らかにすることができる。デフォーカスの方向（符号）を決定するため、デフォーカスが増大しているのか減少しているのかを判断するように、わずかに異なる焦点設定で第2画像が生成される。よってこのシナリオでは、フォーカスシリーズ及び／又は従来技術は、わずかに異なる焦点値で一对の連続する画像に置き換えられることによって、スループットが改善され、かつ、試験用物体の合計放射線曝露が減少し得る。

（ii）本発明の多数の孔の絞り板内の孔の分布が、（たとえば、絞り板の面内での極座標系の（ある）異なる軌道角方向について様々な特性（たとえば形状、密度、半径の大きさ、孔のサイズ等）を有することによって）該分布の重心に対して非等方性（非対称性

10

20

30

40

50

）を示す場合、（i）の方法はさらに精緻化／改良され得る。本願発明者等は、係る非対称な分布の場合、上述の物理的「縞情報」／数学的「スペクトル情報」は、デフォーカスの大きさを独自に示すだけでなく、デフォーカスの方向を示すとみなされ得ることも発見した。その場合、単一画像は、最善の焦点の位置を決定するのに十分な情報を与えるので、従来技術の動的フォーカスシリーズは、はるかに迅速な静的方法にとって代わられる。

【0018】

当業者は、方法（i）及び／又は（ii）が、関連する（オンオフ又は周期的）事前校正手順と併用され得ることを理解する。前記事前校正手順は、観測された画像のデフォーカスの大きさを、軸方向での焦点位置における対応する補正へ効率的に変換することを可能にする。

10

【0019】

前の実施例で説明したオートフォーカスは、本来持っている能力の点で実質的に有利だが、これまで非現実的だった新たな機能を可能にする。たとえば本発明の特別な実施例では、本発明の絞り板は、以下の段階を有する群から選ばれる操作を実行するため、前記試料の少なくとも一部にわたって前記ビームを走査する間に用いられる。

- 前記ビームが衝突する前記部分の表面の幾何学形状プロファイルを推定する段階
- すべての地点について基本的に均一な焦点状態を有する前記部分の画像を生成する段階

前段落で説明したオートフォーカスの実施例の顕著な利点は、（時間を要するフォーカスシリーズが緩和されるため）基本的にビーム走査中にその場での地点毎の焦点合わせを可能にすることである。その結果、走査経路の地点（画素／孤）あたりの焦点情報が（実質的に）リアルタイムで取得可能となり、かつ、これは以下のことを可能にする。

20

【0020】

前段落で説明したオートフォーカスの実施例の顕著な利点は、（時間を要するフォーカスシリーズが緩和されるため）基本的にビーム走査中にその場での地点毎の焦点合わせを可能にすることである。その結果、走査経路の地点（画素／孤）あたりの焦点情報が（実質的に）リアルタイムで取得可能となり、かつ、これは以下のことを可能にする。

（a） 走査経路上での地点ごとの最善の焦点の軸方向での位置の記録及び参考面に対するこれらの位置の参照が可能となる。このようにして、前記ビームが衝突する前記試料（の一部）の表面の高さマップを構築することが可能となる。

30

（b） 前記試料の全部（又は一部）について単一の大域焦点値を用いるのではなく、走査中に焦点を調節することができるので、局在化された焦点合わせを実現することが可能となる。その最終的な形態では、この方法は、被操作画像の点毎の焦点合わせを可能にする。これは、非平坦試料にとって有用なだけでなく、（熱効果、ヒステリシス、振動等による）焦点ドリフトの補償を可能にする点で有利である。

【0021】

本発明の他の実施例では、本発明の絞り板は、前記試料の画像の分解能を改善するのに用いられる。数学的には、本発明の絞り板を用いる効果は、当該絞り板内の孔に対応する位置での第1値（たとえば1）、及び、前記絞り板の阻止位置で第2値（たとえば0）を有する阻止関数（フィルタ関数）を前記照射体のビーム源関数に重ねることによって前記ビーム源関数を修正することであることが示され得る。透過型CPMの場合、前記ビーム源関数の修正はこのようにして、前記CPMにおける最終的な結像過程を表すコントラスト伝達関数（CTF）の操作となる。特に前記CTFは、高い空間周波数で改善されるように操作されて良い（さもなければ未修正のビーム源関数の場合には、ゼロになるとうとする）。前記改善によって空間分解能が向上する。たとえば以降の実施例3を参照のこと。非透過型CPM（たとえばSEM）の場合、同様の効果が、前記試料でのプローブプロファイル／挙動を表す数学的関数で起こる。前記関数は一般的に「結像関数」と呼ばれ得る。

40

【0022】

50

前段落で説明された実施例の特別版では、以下が適用される。

- 前記ビームの走査運動は、前記試料の疎な走査を実行するのに用いられる。
- 前記画像は、前記疎な走査中に収集される検出器データから構築される。

【0023】

疎な走査は、試料を充填する走査経路に沿ったすべての可能な画素位置にアクセスする代わりに、前記位置からなる相対的に疎な組のみにアクセスする方法である。前記走査方法は、必然的に全走査よりも（はるかに）速く、かつ、必要とされる前記試料の放射線曝露をはるかに小さくするので有利である。しかし前記走査方法は原則として、画像を構築するために生成するデータ組は（はるかに）少なくなり、これは一般的に画像の分解能を低下させる点で不利益となる。前段落で説明された機構は、到達可能な分解能を改善する手段を供する。前記手段は、所与のデータ組で良好な分解能を与えるか、又は、はるかに小さな（疎な）データ組を所与の分解能を実現するのに用いることを可能にするため、疎な走査の画像にとって特に重要である。CPM撮像における（様々な）疎な走査方法についてのさらなる情報はたとえば特許文献1から得られる。

10

【0024】

本発明のさらに他の実施例では、以下が適用される。

- 使用される顕微鏡は、前記試料を透過して検出器へ向かうように荷電粒子束を案内する結像系を有する透過型顕微鏡である。
- 本発明の絞り板は、画像の焦点（デフォーカス）を測定するのに用いられる。

【0025】

20

本発明のさらに他の実施例では、以下が適用される。

- 使用される顕微鏡は、前記試料を透過して検出器へ向かうように荷電粒子束を案内する結像系を有する透過型顕微鏡である。
- 本発明の絞り板は、画像の焦点（デフォーカス）を測定するのに用いられる。

【0026】

この実施例は、透過型顕微鏡内の照射ビームが厳密にコリメートされていない／平行ではなく、一般的には（相対的に狭い）照射角度の分布を含むことを利用している。本発明の絞り板 - この実施例では、たとえば有利となるようにビームのクロスオーバー内／付近に設けられる - を用いることによって、この連続的な照射角の分布は、複数の離散的な照射角範囲からなる集合に離散化される。複数の離散的な照射角範囲の各々は、相対的に小さな孔を通過する結果生成されるため、相対的に小さい。その結果、このようにして照射される試料は、各々が独自の（中央）ビーム傾斜を有する複数の離散的な分割ビームによって同時に照射される。焦点外しされた画像では、これらの分割ビームの各々は独自の横方向にシフトした部分画像を生成する。このときこれらの分割ビームの横方向シフトの大きさは、元のビーム傾斜の大きさと符号に依存する。他方焦点合わせされた画像では、すべての横方向シフトは本質的にゼロとなる。よって複数の前記分割ビームが前記試料へ同時に照射されることで、各独立して横方向にシフトした複数の部分画像が生成される。前記複数の部分画像は、コンボリューションされた最終画像を生成するように結合される。よってこの画像の数学的デコンボリューションは、そのデフォーカスの大きさ及び符号を与える。このようにして、焦点情報は、複数の結像処理を用いて決定されなければならないのではなく、（同時に複数の分割ビーム傾斜を用いた）単一の結像処理から得ることができる。よって時間の節約、スループットの改善、及び、前記試料への累積的照射の減少が実現される。

30

40

【0027】

既に述べたように、本発明は、本発明の開口領域へ与えられる形態に関して顕著な自在性／自由度を与える。前記分布の幾何学形状パラメータ - たとえば前記分布の節点が位置する「グリッド」の形態（たとえば六角形式、直交形式、極形式、不規則形式等）、前記グリッド内の「セル」のサイズ、前記セルの充填因子等 - に加えて、前記孔のパラメータ - たとえば孔のサイズ、孔の形状、孔の方位等 - もまた（自由に）選ばれて良い。係る多数の調節可能なパラメータを供することによって、本発明は、従来の絞りでは利用できず

50

、かつ、上述の P S F / フーリエスペクトル / C T F / 結像関数を微細に操作するように調節され得る多数の新たな自由度を供する。以下に、より具体的な例が与えられる。

【 0 0 2 8 】

既に述べたように、本発明は、本発明の開口領域へ与えられる形態に関して顕著な自在性 / 自由度を与える。前記分布の幾何学形状パラメータ - たとえば前記分布の節点が位置する「グリッド」の形態（たとえば六角形式、直交形式、極形式、不規則形式等）、前記グリッド内の「セル」のサイズ、前記セルの充填因子等 - に加えて、前記孔のパラメータ - たとえば孔のサイズ、孔の形状、孔の方位等 - もまた（自由に）選ばれて良い。係る多数の調節可能なパラメータを供することによって、本発明は、従来の絞りでは利用できず、かつ、上述の P S F / フーリエスペクトル / C T F / 結像関数を微細に操作するように調節され得る多数の新たな自由度を供する。以下に、より具体的な例が与えられる。

- 上述した前記グリッドのサイズ（ピッチ / 周期）の適切な調節は、前記画像中でのある（フーリエ）周波数を改善 / 抑制するのに用いられ得る。

- 相対的に微細なグリッドピッチの選択は、相対的に粗いグリッドピッチよりも、より厳密な深さ関連（焦点）情報を得ることが期待される。

- 円形又は擬円形のセル形状を選ぶことは、特別ではない試料の幾何学構造（たとえば不規則な生体細胞、鉱物のグレイン等）について良好な再構成結果を与えることが期待される。とはいえ直交グリッドは、たとえば本質的に直交する構造（たとえば半導体回路）を備える試料の場合に良好な結果を与えることができる。

- そうは言っても、規則的なグリッド / セルの形状には限定されず、不規則又は擬規則的な孔の分布も許容される。

- 孔の形状 / サイズに関して、前述 / 後述の説明は、これらのパラメータの調節が、衝突するビーム源の波に本発明の絞り板を重ねる阻止機能（フィルタ機能）の形態を調節することを明らかにする。

【 0 0 2 9 】

本発明の特別な実施例（「異種（heterogeneous）」実施例）では、前記分布は、孔のサイズ、孔の形状、及び孔の方位のうちの少なくとも1つに関して相互に異なる少なくとも2つの孔を有する。係る実施例は、所与の状況の必要性に対して本発明の絞り板（の阻止 / フィルタリング機能）を適合させるための最大の自在性を可能にする。

【 0 0 3 0 】

前述したように、前記開口領域内で前記孔の分布及び / 又は前記孔自体のパラメータを調節することによって、本発明の絞り板の多くの異なる可能な実施例が自由に生成される。このようにして、当該絞り板に係る P S F を変更し、付随するフーリエスペクトル内のある周波数を強調 / 抑制することが可能となる。本発明の C P M の使用の自在性 / 多様性の増大を可能にするため、希望 / 必要に応じて様々な当該絞り板を迅速 / 容易に配置することが有用である。この目的のため、本発明の特別な実施例では、所与の絞り板は、前記ビーム路中に様々な異なる当該絞り板を設けるように選択的に起動する交換機構によって保持される。前記様々な絞り板は、望ましい場合には、本発明の絞り板の様々な版に加えて、従来型の絞り板を含んでも良い。当該 C P M の真空環境内において様々な絞り板をその場で有することは有利である。なぜなら前記絞り板は、各使用前 / 後でエアロックを介して移動される必要がなくなるからである。しかも当該 C P M の利用者は、彼 / 彼女が変更を必要とするとき - たとえば彼 / 彼女が異なる型の試料を検査する場合又は異なる種類の解析（撮像、ディフラクトグラム取り込み、分光）を実行する場合又は校正手順を実行する場合等 - には各異なる絞り板間で容易に切り換えることができる。

【 0 0 3 1 】

前段落で説明した実施例の精緻型では、前記交換機構は、

- 前記ビーム路内での様々なホルダ位置の位置設定を行うように動かされ得て、各々には絞り板が供され得る多数のホルダ位置を有するトレイ

- 絞り板のライブラリと協働して、前記ライブラリから所与の絞り板を取り出し、かつ、前記所与の絞り板を前記ビーム路内に設置するグリッパ

を有する群から選ばれる。

【0032】

前記トレイに関しては、これはたとえば、モータ（たとえばステッパモータ）によって駆動／位置設定可能な回転可能なコンベヤ又はスライド可能なそりであって良い。前記グリッパに関しては、これはたとえば、様々な絞り板が格納されているスロット位置を有するラック／スタックと協働するSCARAロボット又は他の型の機械アーム／ハンド機構であって良い。望ましい場合には、前記機構は、たとえば電気ルックアップテーブル内に様々な種類の絞り板の格納位置を記録し、かつ、前記交換機構（回転式／スライド式駆動装置、ロボットアーム、ラック／スタックエレベータ等）のアクチュエータをコンピュータ制御装置へ接続することによって完全に自動化されて良い。前記コンピュータ制御装置は、前記ビーム路中に選ばれた絞り板を設置するように、ユーザーインターフェース上での入力（たとえば（タッチ）スクリーン上でのアイコンの選択）に応じて前記ルックアップテーブルを参照し、かつ、適切な制御命令を前記アクチュエータへ送ることができる。

10

【0033】

ここで本発明について、典型的実施例と添付の概略的図面に基づいてより詳細に説明する。

【0034】

図中、適切な場合には、対応部分は、対応する参照符号を用いて示される。

【図面の簡単な説明】

【0035】

20

【図1】本発明による走査型荷電粒子顕微鏡の実施例の断面図を表している。

【図2】2Aと2Bは、本発明による絞り板の実施例の上面図を表している。

【図3】本発明による透過型荷電粒子顕微鏡の実施例の断面図を表している。

【図4】（衝突ビームの）コヒーレンス角と分解能の損失との関係を表している。

【図5】5Aと5Bは、如何にして本発明が、結像関数のフーリエ変換を選択的に操作するのに用いられ得るのかを表している。

【発明を実施するための形態】

【0036】

図1は、本発明によるCPMの実施例の概略図である。より具体的には図1は走査型顕微鏡400の実施例 - この場合SEM - を示している（とはいえ本発明においては、走査型顕微鏡400はたとえばイオン系顕微鏡であっても有効となりえる）。顕微鏡400は粒子光学鏡筒402を有する。粒子光学鏡筒402は粒子光学軸404'に沿った荷電粒子ビーム404（この場合では電子ビーム）を生成する。粒子光学鏡筒402は、真空チャンバ406上に設けられる。真空チャンバ406は、試料410を保持する試料ホルダ/台408を含む。真空チャンバ406は、真空ポンプ（図示されていない）を用いることによって排気される。電源422の助けによって、試料ホルダ408又は少なくとも試料410は、望ましい場合には、接地電位に対してある電位にバイアス印加（浮遊）され得る。

30

【0037】

粒子光学鏡筒402は、電子源412（たとえばショットキー銃）、電子ビーム404を試料410へ集束させるレンズ414と416、及び、（ビーム404のビーム操作／走査を実行する）偏向ユニット418を有する。当該装置400はさらにコンピュータ処理装置（制御装置）424を有する。コンピュータ処理装置（制御装置）424は、とりわけ偏向ユニット418、レンズ414、416、及び検出器420、428を制御し、かつ、検出器420、428から収集される情報を表示装置426上に表示する。本発明においては、装置414、416、及び418は、上述の照射体を含むものとみなされて良い。

40

【0038】

検出器420、428は、入力ビーム404の照射に応じて試料410から放出される様々な種類の出力放射線を検査するのに用いられ得る様々な検出器の種類から選ばれる。

50

図示された装置では、以下の検出器が選択された。

- 検出器 4 2 0 は、試料 4 1 0 から放出される出力 B S 電子束（の少なくとも一部）を検出するのに用いられるホウ素がドーピングされた固体検出器である。
- 検出器 4 2 8 は、（ビーム 4 0 4 の通過を可能にする）中央開口 4 3 0 の周りに設けられる複数（たとえば 4 つ）の独立した検出部を含む区分化された検出器である。係る検出はたとえば、試料 4 1 0 から放出される出力（2 次又は後方散乱）電子束の角度依存性を調査するのに用いられて良い。

【 0 0 3 9 】

図示されているように、検出器 4 2 0 と 4 2 8 のいずれも電子を検査するのに用いられる。しかしこれは純粋に設計 / 実装上の選択であり、必要な場合には、電子に加えて又は電子の代わりに試料 4 1 0 から放出される他の種類の放射線（たとえば X 線、カソードルミネッセンス）束を検出するように選ばれて良い。

【 0 0 4 0 】

試料 4 1 0 にわたってビーム 4 0 4 を走査させることによって、出力放射線 - たとえば X 線、赤外 / 可視 / 紫外光、2 次電子、及び後方散乱（B S）電子の束を含む - が、試料 4 1 0 から放出される。係る出力放射線は（走査運動に起因して）位置に敏感なので、検出器 4 2 0、4 2 8 から得られる情報もまた位置依存性を有する。この事実によって、検出器 4 2 0 の出力は、（たとえば）試料 4 1 0（の一部）の後方散乱電子画像の生成に用いることが可能となる。前記後方散乱電子画像は基本的に、試料 4 1 0 上の走査経路位置の関数とする検出器 4 2 0 の出力のマップである。

【 0 0 4 1 】

検出器 4 2 0、4 2 8 からの信号は、制御ライン（バス）4 2 4' に沿って伝達され、制御装置 4 2 4 によって処理され、かつ、表示装置 4 2 6 上に表示される。当該処理は、たとえば結合、積分、減算、偽着色、輪郭改善、及び当業者に既知の他の処理のような操作を含んで良い。それに加えて、自動化された認識処理（たとえば粒子解析で用いられるような）は、当該処理に含まれて良い。

【 0 0 4 2 】

係る設定の精緻型及び代替型の多くは当業者に知られていることに留意して欲しい。係る設定の精緻型及び代替型は以下を含むが、これらに限定されない。

- デュアルビーム - たとえば撮像用の電子ビーム 4 0 4 と試料 4 1 0 の加工（場合には撮像）様のイオンビーム - の使用
- 試料 4 1 0 での - たとえば（所謂環境制御型 S E M で用いられているような）数 m b a r の圧力を維持するか、又は、気体 - エッチング気体又は前駆体気体 - を収容することによる - 制御された環境の使用等

図 1 に図示された走査型顕微鏡は S E M だが、図 1 に図示された走査型顕微鏡は、本発明においては、たとえば S T E M も有効なものとしてあり得る（以降の実施例 2 参照）。

【 0 0 4 3 】

本発明（の実施例）によると、上で説明した（たとえば実施例 1 で説明されている）型の絞り板 A は、C P M 4 0 0 の照射体内に（取り外し可能 / 調節可能）なように設けられている。この場合、絞り板 A は最終レンズ素子 4 1 6 に近接して設けられる。一般的には、絞り板 A はホルダ（図示されていない）上に設けられて良い。前記ホルダは上述の交換器型であって良い。ビーム 4 0 4 が出ているとき、ビーム 4 0 4 は、板 A の開口領域の複数の孔（たとえば図 2 A と図 2 B 内の各対応する 5 2 と 5 2 を参照のこと）を通過し、かつ、複数の分割ビームに分割される。それにより前記孔の特定の分布 / 特性に従って「パターンニング」される。前述 / 後述するように、係るパターンニングは、有効な数学的 / 物理的效果の実現を可能にする。

【 実施例 1 】

【 0 0 4 4 】

図 2 A は、本発明による絞り板 A の特別な実施例の上面図を表している。板 A はたとえ

10

20

30

40

50

ば、厚さが約 0.1 mm のオーダーで横方向寸法（直径）が約 3 mm × 3 mm のオーダーの金属シート 50（プラチナ又はモリブデン）を含む。シート 50 の領域内には、板 A が使用されるときに板 A に衝突する荷電粒子ビームの意図した跡に対応する開口領域 52 が存在する。図示されているように、開口領域 52 は、たとえば約 1 mm のオーダーの直径を有する円である。領域 52 の周辺部内には、複数の（相対的に小さな）孔 54 の分布が存在する。複数の（相対的に小さな）孔 54 はこの場合、様々な形状、サイズ、及び方位である。図示された孔 54 は長方形だが、孔 54 は他の形態 - たとえば円、三角形、六角形等 - を有しても良い。本願の例では、孔 54 の分布は、その分布の重心 56（図示されているように開口領域 56 の中心）に対して非等方的であることを示している。孔 54 は一般的に、約数十（十）ミクロンのオーダーの幅を有する。

10

【0045】

絞り板 A が CPM 内で使用中のとき、地点 56 が（略）CPM の照射体の粒子光学軸（たとえば図 1 の軸 404' 又は図 3 の軸 8）上に位置するように、絞り板 A は通常位置設定される。前記粒子光学軸に沿って伝播する入射粒子ビームは、板 A によって選択的に隠される。ビームの透過は孔 54 を介してしか起こらない。このようにして、絞り板 A は、「パターンング板」又は空間フィルタとして機能し、かつ、入射ビームを複数の放出分割ビームへ分割する役割を果たす。前述及び後述のように、パラメータ - たとえば孔 54 の特別な分布並びに / 又は孔 54 のサイズ、形状、及び方位 - は、所望の全体パターンを生成するように（基本的には意のままに）選ばれて良い。このとき、たとえば板 A を介する照射に係る PSF 及び CTF のような部分への付随する特定の効果が生じる。本発明のこ

20

【実施例 2】

【0046】

図 3 は、本発明による他の CPM の実施例の概略図である。より具体的には図 3 は、透過型顕微鏡 M の実施例を示す。透過型顕微鏡 M は TEM / STEM（つまり走査機能を備える TEM）である（とはいえ本発明においては、透過型顕微鏡 M は、たとえば有効なものとしてイオン系顕微鏡であっても良い）。図中、真空筐体 2 内部では、電子源 4（たとえばショットキー銃）が、電子光学照射体 6 を通り抜ける電子ビームを生成する。電子光学照射体 6 は、（たとえば（局所的に）薄く / 平坦化されて良い）試料 P の選ばれた領域に電子ビームを案内 / 集束する役割を果たす。この照射体 6 は、電子光学軸 8 を有し、かつ、一般的には様々な静電 / 磁気レンズ、（走査）偏向子、補正器（たとえばスティグメータ）等を有する。典型的には照射体 6 は収束系をも有して良い（6 の全体が「収束系」と呼ばれることもある）。

30

【0047】

試料 P は、設置装置（台）12 によって多重自由度で位置設定可能な試料ホルダ 10 上に保持されている。たとえば試料ホルダ 10 は、（とりわけ）XY 平面で移動可能な指部を有して良い（図示された直交座標系を参照のこと。Z 軸に平行な運動と X / Y に関する傾斜も可能である）。係る移動は、軸 8 に沿って（Z 方向に）進行する電子ビームによる試料 P の様々な領域の照射 / 撮像 / 検査（及び / 又はビーム走査の代わりに走査運動を実行すること）を可能にする。任意の冷却装置 14 は、試料ホルダ 10 と緊密に熱的接触をし、かつ、たとえば循環極低温冷媒を用いて所望の低温を実現及び維持することによって試料ホルダ 10 を極低温に維持することが可能である。

40

【0048】

軸 8 に沿って進行する集束電子ビームは、様々な種類の「誘導」放射線 - （たとえば）2 次電子、後方散乱電子、X 線、及び光放射線（カソードルミネッセンス）を含む - が試料 P から放出されるように試料 P と相互作用する。望ましい場合には、これらの放射線の種類のうちの 1 種類以上が解析装置 22 によって検出されて良い。解析装置 22 はたとえば、結合されたシンチレータ / 光電子増倍管又は EDX（エネルギー分散型 X 線分光）モジュールであって良い。そのような場合、画像は、SEM と基本的には同一の原理を用い

50

て構築されて良い。しかし、代わりに又はそれに加えて、試料Pを通り抜け（通過し）、試料から放出（放射）され、かつ、（実質的には多少偏向／散乱するが）軸8に沿って伝播し続ける電子が調査されて良い。係る透過電子は結像系（組み合わせられた対物／投影レンズ）24へ入射する。結像系24は一般的に、様々な静電／磁気レンズ、偏向子、補正器（たとえばスティグメータ）等を有する。通常の（非走査）TEMモードでは、この結像系24は、透過電子を蛍光スクリーン26へ集束させて良い。蛍光スクリーン26は、望ましい場合には、（矢印28によって概略的に示されているように）軸8から外れるように引き出され／引き込められてよい。試料P（の一部）の画像（又はディフラクトグラム）は結像系24によってスクリーン26上に生成される。これは、壁2の適切な部分に設けられたビューポート30を介して見るができる。スクリーン26用の引き込み機構はたとえば、基本的には機械及び／又は電気によるものであって良い（ここでは図示されていない）。

10

【0049】

スクリーン26上で画像を閲覧する代わりとして、結像系24から放出される電子束の焦点深度は一般的に非常に大きい（たとえば1mのオーダー）ということが利用されて良い。従って、たとえば以下に述べるような様々な他の種類の解析装置が、スクリーン26の下流で用いられて良い。

- TEMカメラC。カメラCでは、電子束は、制御装置50によって処理され、かつ、たとえばフラットパネルディスプレイのような表示装置（図示されていない）上に表示可能な静的画像（ディフラクトグラム）を生成し得る。必要ないときには、カメラCは、（矢印28によって概略的に示されているように）軸8から外れるように引き出され／引き込められてよい。

20

- STEM偏向素子C'。素子C'からの出力は、試料P上の走査ビームの位置（X，Y）の関数として記録され、かつ、X，Yの関数としてのC'からの出力の「マップ」である画像が構築されて良い。素子C'は、カメラC内に特徴として存在する複数の画素からなるマトリックスとは対照的に、たとえば20mmの直径を有する単一画素を有して良い。しかも素子C'は一般的に、カメラCの取得速度（たとえば 10^2 点／秒）よりもはるかに高い取得速度（たとえば 10^6 点／秒）を有する。繰り返しになるが、必要ないときには、カメラCは、（矢印28によって概略的に示されているように）軸8から外れるように引き出され／引き込められてよい（係る引き出しはドーナツ形状の環状暗視野検出装置C'の場合には必要だが、たとえば係る装置では、その装置が使用されないときには中央孔がビームの通過を可能にする）。

30

- カメラC又は素子C'を用いた撮像の代わりに、分光装置C''たとえばEELS（EELS = 電子エネルギー損失分光）であって良い。

【0050】

C、C'、及びC''の順序／位置は厳密ではなく、多くの可能な変化型が考えられることに留意して欲しい。たとえば分光装置C''は、結像系24に組み込まれても良い。

【0051】

制御装置（コンピュータプロセッサ）50は、制御ライン（バス）50'を介して様々な図示された部品に接続されることに留意して欲しい。この制御装置50は、様々な機能

40

- たとえば作用の同期、設定点の提供、信号処理、計算の実行、及び表示装置（図示されていない）上でのメッセージ／情報の表示 - を供して良い。言うまでもないことだが、（概略的に図示された）制御装置50は、（部分的に）筐体2の内部又は外部に存在し、かつ、希望に応じて単一構造又は複合構造を有して良い。当業者は、筐体2の内部が厳密な真空状態に維持される必要がないことを理解する。たとえば所謂「環境制御型TEM／STEM」では、所与の気体のバックグラウンド環境圧力が、故意に筐体2の内部に導入／維持される。当業者はまた、原則的には、筐体2の容積を制限することが有利であることを理解する。それにより、可能な場合には、筐体2は基本的に軸8を中に抱えた状態をとる。その結果筐体2は、使用された電子ビームが通過するような小さな管の形態となるが、荷電粒子ビーム源4、試料ホルダ10、スクリーン26、カメラC、検出装置C'、分

50

光装置 C' ' 等のような構造物を収容する程度には広がっている。

【 0 0 5 2 】

本発明（の実施例）によると、上述した型の絞り板 A は、C P M M の照射体 6 内で（取り外し可能 / 調節可能なように）設けられる。この場合、絞り板 A は照射体 6 内でビームのクロスオーバー（図示されていない）（の付近）に設けられる。繰り返しになるが、絞り板 A は、望ましい場合には、交換器型のホルダ（図示されていない）上に設けられて良い。

【実施例 3】

【 0 0 5 3 】

以降の説明は、如何にして本発明の絞り板が、C P M - より具体的には（S）T E M - においてコントラスト伝達関数を増大させるのに用いられるのかについての数学的説明を与える。

・ S E M / S T E M のプローブプロファイル

顕微鏡 - たとえば S E M 又は S T E M - を形成するプローブを考える。ここで $\phi_0(G)$ は、対物レンズ（= 最終プローブ生成レンズ）上に入射する平行波を表す。G は、レンズでの電子波の横方向位置（レンズ後での横方向運動量に対応する）である。時間と z 軸座標（又は軸方向運動量 G_z ）の（重要ではない）依存性を無視すれば、 $\phi_0(G)$ はビーム直径内部で一定の関数である。入射波の直径は、開口関数 $A(G)$ によって考慮される。ここで、 $G < G_{max}$ の場合には $A(G) = 1$ で、 $G > G_{max}$ の場合には $A(G) = 0$ である。 G_{max} は入射ビームの半径を表す。

よって、次式が成立する。

$$\phi_0(G) = A(G)$$

対物レンズの収差は、周知の位相収差関数に従って入射波に影響を及ぼす。

$$\phi(G) = (1/2) F G^2 + (1/4) C_s G^4$$

ここで、F はデフォーカスで、 C_s は球面収差（他の収差は簡明を期すために無視した）で、かつ、 λ は電子波の波長である。対物レンズ後の波は次式のようにになる。

$$\phi(G) = \exp[2i\phi(G)] \quad \phi_0(G) = \exp[2i\phi(G)] A(G)$$

試料でのプローブのプロファイルは $\phi(G)$ のフーリエ変換である。

$$\phi(x) = \int dG \{ \exp[2i\phi(G)x] \phi(G) \} = \int dG \{ \exp[2i\phi(G)x] A(G) \}$$

本発明の絞り板が対物レンズ（の付近）に設けられる場合、 $A(G)$ は、本発明の絞り板によって阻止される空間周波数でも 0 となるように修正される。本発明の絞り板内での孔の分布について適切な選択がされるとき（つまり $A(G)$ が 0 となる領域について適切な選択が用いられるとき）、従来の絞り板で得られた $\phi(x)$ （つまり $A(G)$ は 1 つの単一領域でしか非ゼロにならない）よりも明確な端部 / 特徴部位を有する $\phi(x)$ を生成することが可能となる。プローブプロファイル $\phi(x)$ が、S E M / S T E M 画像から適切にデコンボリューションされるとき、そのような明確な端部 / 特徴部位は良好な画像分解能となる。

・ T E M のコントラスト伝達関数

T E M における画像生成過程は、S E M / S T E M における画像生成過程よりも複雑であるが、T E M の画像生成への本発明の絞り板の効果もまた、以下のように前の節での（S E M / S T E M についての）説明と同様の数学的説明に基づいて説明できる。試料を通過する平行電子波 $(v) = 1$ を考え、かつ、時間と z 軸座標の（本質的に需要ではない）依存性を無視する。ここで X Y 平面内の 2 次元位置がベクトル v によって表される。

$(v) = 1$ のフーリエ変換は $\phi_0(G) = \phi(G)$ である。ここで 2 次元空間周波数は $G = v / |v|^2$ である。試料内での周波数成分 G の効果を考える。試料を飛び出す際、周波数成分によって生じる小さな吸収 $\phi(G)$ と小さな位相シフト $\phi(G)$ は次式のようにビームを修正する。

$$\phi(G) = \phi(G) - \phi(G) - i \phi(G)$$

その後が続いて通り抜けられる対物レンズは、デフォーカス及び収差によるさらなる位相

10

20

30

40

50

シフトを引き起こす。

$$(G) = (G) - [(G) + i(G)] \exp[2i(G)]$$

ここで は (繰り返しになるが) 周知の位相収差関数である。

$$(G) = (1/2) FG^2 + (1/4) {}^3C_s G^4$$

ここで、Fはデフォーカスで、 C_s は球面収差(他の収差は簡明を期すために無視した)で、かつ、 は (繰り返しになるが) 電子波の波長である。画像検出器での記録された強度は、 とその複素共役とのコンボリューション(*)に比例する。

$$\begin{aligned} I(G) &= {}^*(G) * (G) \\ &= \{ (G) - [(G) - i(G)] \exp[-2i(G)] \} \\ &* \{ (G) - [(G) + i(G)] \exp[2i(G)] \} \end{aligned} \quad 10$$

$$= (G) - (G) \{ \exp[-2i(G)] + \exp[2i(G)] \}$$

$$+ i(G) \{ \exp[-2i(G)] - \exp[2i(G)] \} + \dots$$

$$= 1 - 2(G) \cos[2i(G)] - 2(G) \sin[2i(G)] + \dots$$

3つの点(…)は と の2次の項を表す。これらは無視されて良い。見ればわかるように、因子 $\cos[2i(G)]$ は振幅コントラスト伝達関数と呼ばれ、かつ、因子 $\sin[2i(G)]$ は位相コントラスト伝達関数と呼ばれる。

20

・空間コヒーレンス減衰包絡関数

ビームの収束は、仮想源のサイズが有限であるため非ゼロである。このことは、入射波 $\phi_0(G) = (G)$ を分布 $P(G)$ に置き換えることによって考慮される。通常 $P(G)$ は、ガウス関数をとる(これは源の画像内での強度分布の良い近似である)。

$\phi_0(G) = P(G) = \exp[-(1/2)(G/q_0)^2]$ ($q_0^2/2$)^{-1/2} RMS(2乗平均平方根)幅は q_0 である。このパラメータ q_0 は、通常のコヒーレンス角 と、関係式 $\theta = q_0$ によって関連づけられる。画像強度 $I(G)$ の表式では、指数部分と、 (G) ではなく $P(G)$ とのコンボリューションを行わなければならない。

$$\begin{aligned} & \int dq \{ \exp[2i(G+q)] P(q) \} \\ &= \int dq \{ \exp[2i((1/2)FG^2 + (1/4){}^3C_s(G+q)^4)] \\ &\cdot \exp[-(1/2)(q/q_0)^2] (q_0^2/2)^{-1/2} \} \end{aligned} \quad 30$$

$$\begin{aligned} &= \int dq \{ \exp[2i((1/2)FG^2 + 2Gq + \dots) + (1/4){}^3C_s(G^4 + 4G^3q + \dots)] \} \\ &\cdot \exp[-(1/2)(q/q_0)^2] (q_0^2/2)^{-1/2} \} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \exp[2i((1/2)FG^2 + (1/4){}^3C_sG^4)] \\ &\cdot \int dq \{ \exp[2i(FGq + {}^3C_sG^3q) - (1/2)(q/q_0)^2] \\ &\} (q_0^2/2)^{-1/2} \} \end{aligned} \quad 40$$

$$= \exp[2i(G)] \exp[-2q_0^2(FG + {}^3C_sG^3)^2]$$

積分は、有限の収束角が、所謂「空間コヒーレンス減衰包絡関数」によってコントラスト伝達関数を減衰させることを示している。

$$E_s(G) = \exp[-2q_0^2(FG + {}^3C_sG^3)^2]$$

$$E_s(G) = \exp[-2q_0^2(FG + {}^2C_sG^3)^2]$$

又はより一般的には、

$$E_s(G) = \exp[-2q_0^2 | \quad |^2] \quad 50$$

ここで Δ は、 G に関する導関数（ナブラ）である。球面収差及び他の収差が存在しなければ、この包絡関数は、小さな Δ では近似的に 1 であり、かつ、大雑把には $\Delta > 1 / (F G)$ のときに減少し始める。この関係は、図 4 から理解することができる。図 4 は、横方向距離 $v = |v| = 1 / G$ によって離間される（試料 P の原子に衝突する）ビームが m デフォーカス $F = v / \Delta$ で重なり始めることで、分解能の損失が $\Delta > v / F = 1 / (F G)$ で起こることを示している。

・本発明の絞り板による空間コヒーレンス減衰包絡関数

本発明の絞り板が源の画像面（付近）に設けられる場合、 $P(G)$ は、ガウス分布の上部に $P(G)$ がゼロに等しい範囲を有する。

$$P(G) = A(G) \exp \left[- \left(1/2 \right) \left(G / q_0 \right)^2 \right] \left(q_0^2 / 2 \right)^{-1/2} \quad 10$$

ここで、 $A(G)$ は本発明の絞り板を表すブロック関数（フィルタ関数）である。絞り板内の孔に対応する空間周波数では $A(G) = 1$ で、絞り板によって阻止される空間周波数では $A(G) = 0$ である。上述のコンボリューションはもはや解析的には計算できない。しかし依然として $P(G)$ のフーリエ変換 $P(u)$ に関する結果を表すことはできる。導関数は以下ようになる。

$$\begin{aligned} & d q \{ \exp [2 i (G + q)] P (q) \} \\ &= d q \{ \exp [2 i ((G) + q + \dots)] P (q) \} \\ &= \exp [2 i (G)] d q \{ \exp [2 i q] P (q) + \dots \} \\ &= \exp [2 i (G)] P () + \dots \end{aligned}$$

3つの点（ \dots ）は q の高次の項を表す。これらは無視されて良い。積分は、本発明の絞り板によって生成される収束角の分布が、修正された空間コヒーレンス減衰包絡関数によってコントラスト伝達関数を減衰させることを示している。 20

$$E_s(G) = P()$$

本発明の絞り板の本質的な利点は、従来のガウス分布（図 5 A）の場合よりも、より高い周波数を $P(G)$ にもたらすことである。従ってフーリエ変換 $P()$ は、図 5 B で表されているように高い周波数 G で大きくなる。

この文脈では、以下のことがわかる。

- 図 5 A は、従来の絞り板（破線）と本発明によるパターンニングされた絞り板（実線）の両方について、空間周波数 G の関数として源の画像 $P(G)$ を表している。

- 図 5 B は、繰り返しになるが従来の絞り板（破線）と本発明によるパターンニングされた絞り板（実線）の両方について、選ばれた高い周波数での $P(G)$ のフーリエ変換を示している。前者（破線）が非対称的にゼロになった後も長い間、後者（実線）は、ゼロよりもはるかに大きな値のままであることを留意して欲しい。 30

【0054】

よって本発明の絞り板による $E_s(G)$ は、従来の $E_s(G)$ よりも、高い周波数で減衰しにくい。これは空間分解能を改善する。

【実施例 4】

【0055】

パターンニングされた絞り板の再構成アルゴリズム

以降では、結像過程が、従来操作を用いてモデル化される。ここで、 y は測定された画像で、 h は点拡がり関数のカーネルで、 x は未知の「ちらつきのない」画像である。 40

$$y = h * x \quad (1)$$

ベイズの項では、既知の画像 y が与えられると求められるべき画像 x の確率を表すことができる。

$$P(x | y) = \exp \left(- |y - h * x|^2 / \sigma^2 \right) \quad (2)$$

典型的には、再構成されるべき画像に関する先験的知識は、項 $P(R(x))$ によって次式のようにモデル化される。

$$P(x | y) = \exp \left(- |y - h * x|^2 / \sigma^2 \right) \cdot P(R(x)) \quad (3)$$

通常 $R(x)$ は、所望の強度分布についての先験的確率を最大にするユーザー定義関数である。 $R(x)$ についての一般的な選択は、次式のような既知の統計分散 σ_x を有する画 50

像勾配にガウス関数的な挙動を与える先験的分布である。

$$R(x) = -|x|^2 / x^2 \quad (4)$$

よって再構成過程は、以下のような最尤画像 x^* を発見する段階で構成される。

$$x^* = \arg \min \{ \exp(-|y - h^* x|^2 / x^2 + R(x)) \} \quad (5)$$

(5) の反復解はたとえば、勾配降下に基づく方法 - たとえば擬ニュートン法又は他の先端数値最適化法 - を用いて発見されて良い。(5) では、カーネル h の先験的知識が仮定されることに留意して欲しい。そのような知識はたとえば、理論的光学モデル化又はシミュレーションからの点源応答の測定によって得ることができる。事前にはっきりと h を認めることができない場合、その代わりに所謂ブラインド再構成問題において両変数 x と h を解けば良い。

$$x^*, h^* = \arg \min_{x, h} \{ \exp(-|y - h^* x|^2 / x^2 + R(x)) \} \quad (6)$$

h は、結像される物体から本発明のパターニングされた絞り板までの距離 (ワーキングディスタンス) に依存することにも留意して欲しい。所与のワーキングディスタンスについてカーネル h_d を測定し、続いて (5) を解く再構成アルゴリズムを適用することで、距離 d に位置する領域について明確な特徴部位を備える画像が得られる。局所的な明確さ自体は、とりわけ画像端部の応答強度及びそれに割り当てられる対応距離 / 深さ値から決定され得る。一連の距離について h_d を測定することによって、結像領域全体の表面形状を回復させる処理が用いられて良い。それに加えてカーネル h が、たとえば測定、理論的知識、又はシミュレーションを用いて高分解能を有することを特徴とする場合、圧縮センシング法を用いて観測画像から超解像画像を回復することができる。この処理では、 x と y をシリアル化することによる行列とベクトルの積によって (1) のコンボリューション結像過程が表される一方で、カーネル h を対応する行列演算子 H によって表される。その結果次式が得られる。

$$y = D \cdot H \cdot x \quad (7)$$

ここで D はダウンサンプリングされた行列演算子である (たとえばすべての他の画素をサンプリングする)。周知の圧縮センシング法では、再構成処理は、制約された l_1 最小化問題と考えることができる。

$$\min_x ||x||_1 \quad (8)$$

このとき $y = D \cdot H \cdot x$ である。

様々な方法が (8) を解くのに用いられて良い。様々な方法とはたとえば、線形プログラミング、基底探索脱ノイズ法 (Basis Pursuit Denoising)、直交一致探索 (Orthogonal Matching Pursuit) 法、及び繰り返しハード閾値処理 (Iterated Hard Thresholding) である。

【符号の説明】

【0056】

- 400 荷電粒子顕微鏡
- 402 粒子光学鏡筒
- 404 荷電粒子ビーム
- 404' 粒子光学軸
- 406 真空チャンバ
- 408 試料ホルダ
- 410 試料
- 412 電子源
- 414 レンズ
- 416 複合レンズ系
- 418 偏向ユニット
- 420 検出器
- 422 電源

10

20

30

40

50

- 4 2 4 制御装置
- 4 2 4 ' 制御ライン (バス)
- 4 2 6 表示装置
- 4 2 8 検出器
- 4 3 0 中央開口
- 5 0 シート
- 5 2 孔
- 5 4 孔
- 5 6 重心
- 2 真空筐体
- 4 荷電粒子ビーム源
- 6 電子光学照射体
- P 試料
- 8 電子光学軸
- 1 0 試料ホルダ
- 1 2 設置装置 (台)
- 1 4 冷却装置
- 2 2 解析装置
- 2 4 結像系
- 2 6 蛍光スクリーン
- 2 8 矢印
- 3 0 ビューポート
- 5 0 制御装置
- 5 0 ' 制御ライン (バス)

10

20

【図 1】

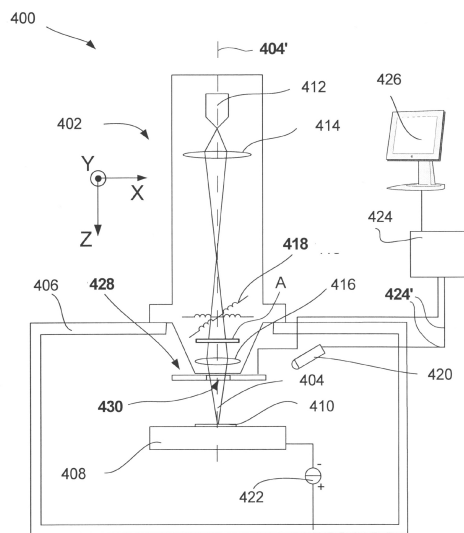


Fig. 1

【図 2 A】

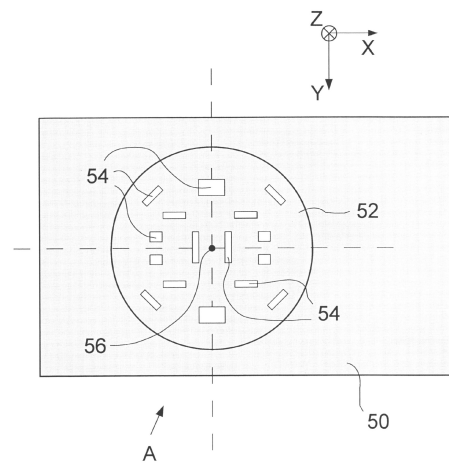


Fig. 2A

【図 2 B】

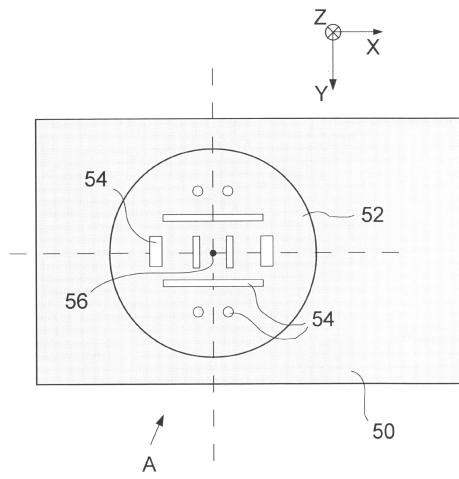


Fig. 2B

【図 3】

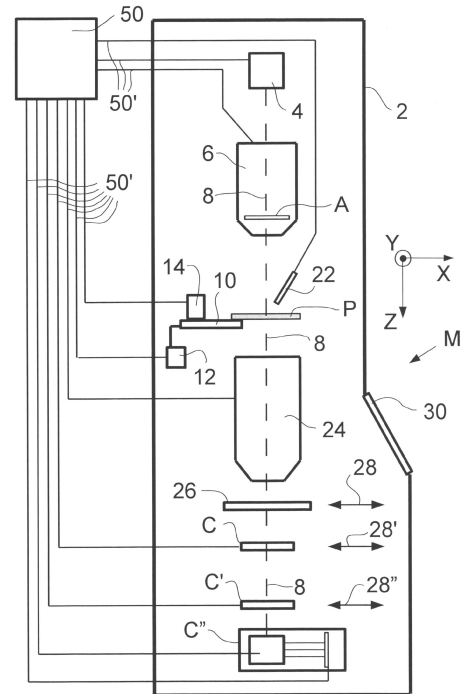


Fig. 3

【図 4】

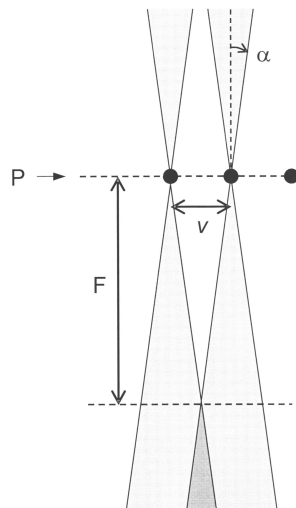


Fig. 4

【図 5】

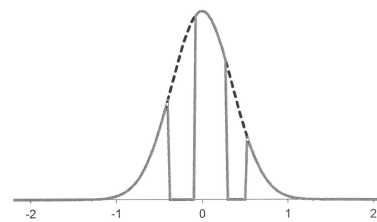


Fig. 5A

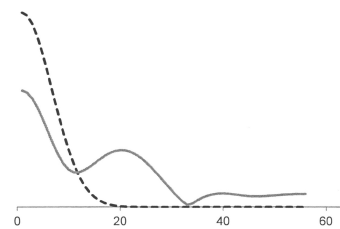


Fig. 5B

フロントページの続き

(51)Int.Cl.

F I

H 0 1 J 37/28

B

(72)発明者 フランシス マルチネス ヘンリクス マリア ヴァン ラールホヴェン
オランダ国, 5 5 8 2 ハーエム ワールレ, スコーノールトストラート 1 4

(72)発明者 フェイサル ボウクホルベル
オランダ国, 5 6 2 9 ゲーアー エイントホーフェン, ホンドスルグラーン 8 0

(72)発明者 レムコ ショエンマケルス
オランダ国, 5 6 8 5 ハーエー ベスト, クーフェルデン 1 7

(72)発明者 ピーター クリスチャン ティエメイエール
オランダ国, 5 6 1 5 エーエー エイントホーフェン, ブルーレラーン 1 2

審査官 杉田 翠

(56)参考文献 特開平 0 7 - 3 2 0 6 7 4 (J P , A)
特表 2 0 0 7 - 5 2 2 6 5 4 (J P , A)
国際公開第 2 0 1 0 / 0 3 5 3 8 6 (W O , A 1)

(58)調査した分野(Int.Cl. , D B 名)

G 0 1 B 1 5 / 0 0 - 1 5 / 0 8
G 0 1 N 2 1 / 0 0 - 2 1 / 0 1
2 1 / 1 7 - 2 1 / 6 1
2 1 / 8 4 - 2 1 / 9 5 8
2 3 / 0 0 - 2 3 / 2 2 7
H 0 1 J 2 7 / 0 0 - 2 7 / 2 6
3 7 / 0 0 - 3 7 / 1 8
3 7 / 2 1
3 7 / 2 4 - 3 7 / 3 6
H 0 1 L 2 1 / 0 2 7
2 1 / 2 0 5
2 1 / 3 0
2 1 / 3 1
2 1 / 3 6 5
2 1 / 4 6
2 1 / 4 6 9
2 1 / 6 4 - 2 1 / 6 6
2 1 / 8 6