

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 公開特許公報(A)

(11) 特許出願公開番号

特開2015-118940

(P2015-118940A)

(43) 公開日 平成27年6月25日(2015.6.25)

| (51) Int.Cl. | F I | テーマコード (参考) |
|------------------------|----------------------|-------------|
| HO 1 J 37/22 (2006.01) | HO 1 J 37/22 5 O 1 Z | 5 C 0 3 3 |
| 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 | |

審査請求 有 請求項の数 13 O L (全 18 頁)

(21) 出願番号 特願2014-255245 (P2014-255245)
 (22) 出願日 平成26年12月17日 (2014.12.17)
 (31) 優先権主張番号 13198059.1
 (32) 優先日 平成25年12月18日 (2013.12.18)
 (33) 優先権主張国 欧州特許庁 (EP)

(71) 出願人 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
 7451 NW Evergreen P
 arkway, Hillsboro,
 OR 97124-5830 USA
 (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

最終頁に続く

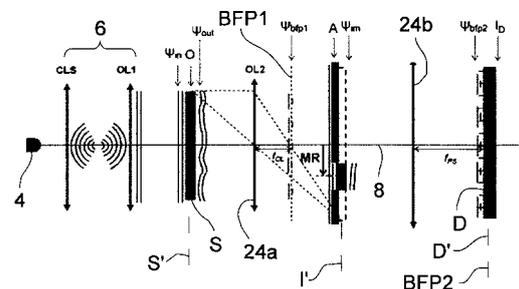
(54) 【発明の名称】 荷電粒子ビームの波面を調査する方法

(57) 【要約】 (修正有)

【課題】従来技術に係る方法よりも自由度が高く多様性のある方法を提供する。

【解決手段】試料面 S' を通り抜けて検出器 D へ到達するように、ビーム源 4 から照射体 6 を介するように導かれる荷電粒子ビームの波面を調査する方法であって、検出器 D の出力は、検出器 D へ向かう経路に沿った所定の位置での波面の位相情報及び振幅情報のうちの少なくとも1つを計算するように、数学的再構成手法と併用され、当該方法では、ビームが、試料面 S' と検出器 D との間に設けられた粒子光学レンズ系を通り抜け、ビーム源 4 から検出器 D までの経路中での選択された位置にて、変調器 A が、波面の所与の変調を局部的に生成するのに用いられ、一連の測定において、様々な変調が用いられ、かつ、様々な変調に係る検出器出力が、前記数学的再構成手法においてまとめて用いられる。

【選択図】 図 2 D



【特許請求の範囲】**【請求項 1】**

試料面を通り抜けて検出器へ到達するように、ビーム源から照射体を介するように導かれる荷電粒子ビームの波面を調査する方法であって、前記検出器の出力は、前記検出器へ向かう経路に沿った所定の位置での前記波面の位相情報及び振幅情報のうちの少なくとも1つを計算するように、数学的再構成手法と併用され、当該方法では、

- 前記ビームが、前記試料面と前記検出器との間に設けられた粒子光学レンズ系(LS)を通り抜け、
 - 前記ビーム源から前記検出器までの経路中での選択された位置にて、変調器が、前記波面の所与の変調を局所的に生成するのに用いられ、
 - 一連の測定において、様々な変調が用いられ、かつ、該様々な変調に係る検出器出力が、前記数学的再構成手法においてまとめて用いられる、
- ことを特徴とする方法。

10

【請求項 2】

前記変調器は、振幅変調、位相変調、及び両者の組み合わせからなる群から選ばれる、請求項1に記載の方法。

【請求項 3】

前記選択された位置が前記レンズ系の画像空間内に設けられる、請求項1又は2に記載の方法。

20

【請求項 4】

前記選択された位置が前記レンズ系の画像面又は該面付近に設けられる、請求項3に記載の方法。

【請求項 5】

前記変調器が：

少なくとも1つのマスク板；

前記レンズ系の光軸に対する前記マスク板の位置、前記光軸に対する前記マスク板の回転姿勢、前記マスク板の形状、前記マスク板のサイズ、及び上記の組み合わせからなる群から選ばれるパラメータを調節するのに用いることのできるアクチュエータシステム；を有する、請求項1乃至4のうちいずれか一項に記載の方法。

30

【請求項 6】

前記変調器が位相変調器を含む、請求項1乃至5のうちいずれか一項に記載の方法。

【請求項 7】

前記変調器が：

少なくとも1つの位相変調素子；

前記レンズ系の光軸に対する前記素子の位置、前記光軸に対する前記素子の回転姿勢、前記素子に印加される電位又は電流、及び上記の組み合わせからなる群から選ばれるパラメータを調節するのに用いることのできる調節システム；を有する、請求項1乃至6のうちいずれか一項に記載の方法。

【請求項 8】

前記照射体が、実質的に平坦な波面によって前記試料面を照射する、請求項1乃至7のうちいずれか一項に記載の方法。

40

【請求項 9】

前記試料面内に試料が存在せず、

前記波面が前記試料面に入射する際に波面の再構成が実行される、請求項1乃至8のうちいずれか一項に記載の方法。

【請求項 10】

前記試料面内に試料が存在し、

前記波面が前記試料面を飛び出す際に波面の再構成が実行される、請求項1乃至8のうちいずれか一項に記載の方法。

【請求項 11】

50

荷電粒子ビームの波面再構成を実行する装置であって：

荷電粒子源；

前記荷電粒子源からの荷電粒子を前記試料面へ案内する照射体；

前記試料面に位置する試料ホルダ；

前記試料面を通り抜ける荷電粒子を検出する検出器；

前記検出器までの前記波面の経路に沿った所定の位置での前記波面の位相情報及び振幅情報のうちの少なくとも一を計算するように、前記検出器からの出力を解析し、かつ、前記出力を数学的再構成法において利用する制御装置；

前記試料面と前記検出器との間に設けられた粒子光学レンズ系；

前記荷電粒子源から前記検出器までの経路中での選択された位置で前記波面の所与の変調を生成する変調器；

を有することを特徴とする装置。

【請求項12】

前記粒子光学レンズ系が、対物レンズと投影レンズの直列配置を有し、

前記対物レンズが、前記試料面を画像面上で結像し、

前記変調器が、前記画像面又は該面付近に設けられる、

請求項11に記載の装置。

【請求項13】

透過型電子顕微鏡内に含まれる、請求項11又は12に記載の装置。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、試料面を通り抜けて検出器へ到達するように、ビーム源から照射体を介するように導かれる荷電粒子ビームの波面を調査する方法に関する。当該方法では、前記検出器の出力は、前記検出器へ向かう経路に沿った所定の位置での前記波面の位相情報及び振幅情報のうちの少なくとも1つを計算するように、数学的再構成手法と併用される。

【0002】

本発明はさらに当該方法を実行する装置に関する。

【0003】

本発明はさらに、当該方法が機能し得る、及び/又は、当該装置が含まれ得る荷電粒子顕微鏡に関する。

【背景技術】

【0004】

本願全体を通じて用いられるように、以下の用語は以下のような説明で一貫して解釈されなければならない。

- 「荷電粒子」という用語は、電子又はイオンを指称する（一般的には、たとえばガリウムイオン又はヘリウムイオンのような正のイオンだが、負イオンも可能である。問題のイオンは電荷を有する原子又は分子であって良い）。この語はまたたとえば陽子をも指称して良い。

- 「波面」という用語は、（原子よりも小さな）荷電粒子の波-粒子二重性の観点から解釈されなければならない。空間を伝播するときのそのような粒子に係る波では、波面は、（略）同一位相を示す点の軌跡（抽象的な表面）である。一般的な意味においては、そのような波面は、係る粒子がある種の物理的相互作用を起こす試料を通り抜けるときに修正され得る。如何なる波でも、荷電粒子に係る波は、経路に沿った任意の所与の点で振幅と位相を有する。

- 「照射体」という用語は、たとえば前記荷電粒子ビームにある焦点又は偏向を与え、並びに/又は、1つ以上の収差を緩和するように機能する、ビーム源（たとえばショットキー源又はイオン銃）からの「生の」荷電粒子ビームを操作するのに用いられ得る1つ以上の静電及び/若しくは磁気レンズを有する粒子光学鏡筒を指称する。

10

20

30

40

50

- 「顕微鏡」という用語は、一般に裸眼で満足できるように詳細を見るには小さすぎる対象物、特徴部位、又は部材の拡大像を生成するのに用いられる装置を指称する。荷電粒子顕微鏡(CPM)では、荷電粒子の撮像ビームが、所謂「荷電粒子鏡筒」を用いることによって試料へ向かうように案内される。前記荷電粒子鏡筒は、前記ビームを操作する - たとえば集束若しくは偏向させる - 、かつ/又は、内部の1種類以上の収差を緩和するのに用いられ得る静電レンズ及び/又は磁気レンズの一群を有する。撮像機能を有することに加えて、CPMはまた他の機能 - たとえば分光、回折、(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 - を有して良い。

【0005】

荷電粒子顕微鏡 - 具体的には電子顕微鏡 - は、微少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 - たとえば透過型電子顕微鏡(TEM)、走査電子顕微鏡(SEM)、及び走査型透過電子顕微鏡(STEM) - 及び様々な付属装置 - たとえば支援活動(たと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(たとえばFIB-SEM) - へ発展してきた。TEMでは、前記電子ビームを構成する電子が前記試料の深さまで完全に侵入することが可能となるように、試料への照射に用いられる前記電子ビームのエネルギーは概して、SEMの場合よりも顕著に高い(たとえば300keV vs 10keV)。関連する理由として、TEM内で調査される試料はまた概して、SEM内で調査される試料よりも薄い必要がある。従来の電子顕微鏡では、撮像ビームは、所与の撮像期間中の拡張された期間「オン」状態である。しかし相対的に短い「フラッシュ」又は「バースト」に基づいて撮像が行われる電子顕微鏡も利用可能である。係る方法はたとえば、動く試料又は放射線感受性を有する試料の撮像を試みるときに潜在的な利点がある。上で説明した話題の一部に関するさらなる情報はたとえば、以下の非特許文献1~4からわかる。

【0006】

「技術分野」で述べた方法はたとえば、非特許文献5で説明されている。非特許文献5は、所謂「電子タイコグラフィ」、及び、SEM内での「レンズなし顕微鏡」を実行する用途について論じている。非特許文献5で論じられた方法は、X線撮像の分野からの関連技術の修正とみなすことができる。X線撮像の分野では、満足行くX線光学系を生成することが困難であることからレンズなし技術が魅力的である。非特許文献5では、照射体が、CCD検出に衝突するように、(試料面内の)試料に集束されてその試料を通り抜ける収束電子ビームを生成する。収束電子ビームは「プローブ」と呼ばれる。このプローブは、一連の測定期間中に試料全体にわたって走査される。各測定期間では、回折パターンがCCDによって記録され、かつ、これらの様々なパターンは、試料を飛び出す電子ビーム波面の振幅/位相を再構成しようとする際に反復的数学的逆問題を解く方法(ある程度でコンボリューション方に類似する)への入力として用いられる。このため、使用された試料の構造に関する情報が与えられる。この方法についてのさらなる情報については非特許文献6を参照して欲しい。

【先行技術文献】

【特許文献】

【0007】

【特許文献1】米国特許第5814815号明細書

【特許文献2】米国特許第8071954号明細書

【非特許文献】

【0008】

【非特許文献1】http://en.wikipedia.org/wiki/Electron_optics

【非特許文献2】http://en.wikipedia.org/wiki/Electron_microscope

【非特許文献3】http://en.wikipedia.org/wiki/Scanning_electron_microscope

【非特許文献4】http://en.wikipedia.org/wiki/Transmission_electron_microscopy

【非特許文献5】M.J. Humphry et al. in Nature Communications, 3:730, DOI

10

20

30

40

50

10:1038/ncomms1733, Macmillan Publishers Limited, 2011

【非特許文献6】J. M. Rodenburg and H. M. L. Faulkner in Appl. Phys. Lett. 85, pp. 4795 - 4798 (2004)

【非特許文献7】Kuniaki Nagayama and Radostin Danev, Phase contrast electron microscopy: development of thin-film phase plates and biological applications, Phil. Trans. R. Soc. B, 363, pp. 2153 - 2162 (2008)

【非特許文献8】Marek Malac, Michael Bergen, Masahiro Kawasaki, Marco Belggia, Ray Egerton, M. Shimizu, H. Furukawa, Practical Hole-Free Phase Plate Imaging: Principles, Advantages and Pitfalls, Microscopy and Microanalysis 18 (Suppl. 2), pp. 484 - 485 (2012)

10

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0009】

本発明の目的は、上述した従来技術に係る方法の代替手法を提供することである。具体的に本発明の目的は、当該代替手法が、従来技術に係る方法における対応する態様よりも自由度が高く/多様性のある態様を含むことである。

【課題を解決するための手段】

【0010】

上記及び他の目的は、「技術分野」で述べた方法によって実現される。当該方法は以下の特徴を備える。

20

- 前記ビームが、前記試料面と前記検出器との間に設けられた粒子光学レンズ系(LS)を通り抜ける。
- 前記ビーム源から前記検出器までの経路中での選択された位置にて、変調器が、前記波面の所与の変調を局所的に生成するのに用いられる。
- 一連の測定において、様々な変調が用いられ、かつ、該様々な変調に係る検出器出力が、前記数学的再構成手法においてまとめて用いられる。

【0011】

本願において用いられている「レンズ系」(LS)という用語は、該LSの入力面に位置する対象物の画像を生成するのに用いられ得る1つ以上の静電レンズ及び/又は磁気レンズを含む粒子光学鏡筒を指称するものとして広義に解されなければならない。当業者は以下のことを理解する。

30

- 前記LSは様々な機能を有する部品を有して良い。たとえば前記LSは(とりわけ)対物レンズと投影レンズの直列配置を含んで良い。前記対物レンズと前記投影レンズの一方又は両方は複合体 - 多部品 - であって良い。
- 前記LSは、該LS内部の1つ以上の内部面/中間面で画像を生成することが可能である。たとえば前記LSへ入射する平行ビーム(遠視野モード)は、前記対物レンズによって、前記LS内部の投影レンズの前に位置する焦点面(前記対物レンズの所謂「後焦点面」)内の焦点へ運ばれ得る。
- 同様に上述の前記試料面は、前記LSの第1部分(たとえば対物レンズ)によって、前記第1部分に係る画像平面上に結像され得る。前記LSの第2部分(たとえば投影レンズ)は、この画像平面を射出面に投影させ得る。前記射出面には前記検出器が(たとえば)設けられて良い。
- 必要な場合には、アジャスタレンズ(複合体であっても良い)が、上述の射出面の位置を調節するのに用いられて良い。たとえば複数の検出器が用いられる場合、これら(の一部)は様々な位置に設けられ、かつ、前記アジャスタレンズは、前記様々な面のうちの選ばれた面に前記射出面を移動/投影させるのに用いられて良い。
- 「レンズ」という用語の使用は、純粋に屈折性部品しか含まない前記LSに限定されない。前記LSは原則として、非屈折性機能を備える部品をも含んで良い。

40

【0012】

対象物の画像を生成する際、前記LS(の一部)は一般的に1よりも大きい倍率Mを導入す

50

る。とはいえこれが必ずしも当てはまらない場合もある。前記LSにおける不完全性は一般的に、前記LSに入射する完全に均一とは言えない荷電粒子ビームに収差を導入する。しかし典型的なLSは、係る収差（の一部）を緩和（しようと）する機能を有する特殊レンズ素子（たとえば四重極素子、六重極素子、及び/又は八重極素子）を含んで良い。

【0013】

本発明のより良い理解及び評価を容易にするため、以下の留意事項を記す。

(i) 本発明は、「レンズなし」だったことが本来の利点であったある種の手法にレンズ系(LS)を故意に導入するという点で本質的に直感に反する。

(ii) このようにして前記LSを導入することは望ましくないと考えられるかもしれない。なぜならかかるレンズ系によって導入される不可避な収差は、波面の再構成に必要な数学的処理を複雑にすると考えられ得るからである。

(iii) しかしかかるLSを導入することで、空間的に分離された対象物空間（前記試料面が位置する）と該対象物空間に係る画像空間という基本概念が生成される。このようにして画像空間を生成することで、後述するように顕著に大きな自由度が与えられる。

(iv) 前記LSを利用することで、ある測定期間とそれに続く測定期間との間で前記試料面の照射条件を変化させず、かつ、その代わりに他の手段（たとえば調節可能なマスク面又は位相変調器）を用いることで、ある測定期間とそれに続く測定期間との間で前記波面の局在化された操作を実行することが可能となる。（上述の非特許文献において行われていることとは対照的に）前記照射条件を一定にすることで、ある測定期間とそれに続く測定期間との間で実効的（数学的）仕事関数が増加しないという有利な状況が発生する。

(v) 特別な実施例では、(iv)で言及した手段は、前記LSの前記画像空間内に設けられて良い。これは有利となり得る。なぜなら前記LSが $M>1$ の倍率を生成する場合に、(iv)で言及した局在化した操作が、前記LSの対象物側での対応する操作よりも M 倍優れた空間分解能/精度で、前記画像空間内で実行可能であるからである。

(vi) 本発明の構成は、以下の2つの異なる種類の波面調査の実行を可能にする。

(a) 前記試料面は何もないままである。この場合、前記照射体を飛び出す波面が調査されて良い。それにより前記波面が前記試料面に到達する前に、前記波面中に存在する収差に関する情報が与えられる。

(b) 前記試料面は試料によって占められる。この場合、前記照射体を飛び出す波面が調査されて良い。それにより前記試料の（内部）構造に関する情報が与えられる。

(a)の調査から得られる情報は（とりわけ）、(b)の調査から得られる結果を改善させるのに用いられ得る。試料へ入射する波面と試料を飛び出す波面とを比較することによって、前記波面が前記試料を通り抜ける間に、前記試料が前記波面に対してどのようなことを及ぼしたのかをより正確に得ることが可能となる。

(vii) 前記LSによって導入される収差は、尋常ではない負担を伴うことなく係る収差の効果を数学的に取り扱うことが可能であることを示した本願発明者等によって緩和された波面再構成の数学を複雑にするとと思われる。

(viii) 本発明を実施する一の方法は、TEM内で、前記TEMの結像系（上述）が本発明のレンズ系LSの機能を充足し、かつ、前記TEMの試料ホルダが上述の試料面を占めることである。このようなTEMの利用、（たとえば標準的な（位相コントラスト）撮像を実行するように）TEMを用いる従来の方法に対する革新的な補助対策を表す。本発明は、完全（複雑）な射出波面を相対的に簡単な方法 - たとえば一連の焦点の再構成又はホログラフィのような面倒な従来の射出波解析法とは異なり - で解析するのにTEMを用いること可能にする。

これらの様々な点について以降でより詳細に説明する。

【0014】

本発明による方法の特別な実施例では、用いられた変調器は、振幅変調、位相変調、及び両者の組み合わせからなる群から選ばれる。最初に、第1の場所で波面変調を実行する理由は以下の類推によってよりよく理解され得る。前記波面を局所的に変調/変更し、かつ、前記波面の関数としての検出器データを収集することによって、所望の波面再構成の

基礎として機能する数学的逆問題を解くのに利用され得る浮動パラメータの数が実効的に増大する。これはある程度、複数の連立式的式を解く必要があるが、変数の数が利用可能な式の数を超えている問題にたとえられる。式の数を増やすことで、対応する解空間のサイズが小さくなり、その結果、解くべき問題が単純化される。第2に、波面は振幅と位相情報を含むので、前記波面は一般的に、本発明において、前記波面の振幅及び/又は位相を制御しながら局所的に変化させることによって適切に変調することができる。たとえば以下のようなことが可能である。

- 調節可能（可動式/交換可能）なマスク板（空間変調器）の使用が可能である。前記調節可能なマスク板は、該調節可能なマスク板を通り抜ける波面の選択可能な第1部分を阻止し、かつ、前記波面の選択可能な第2部分を通過させる。

- 代替方法又は補助的方法では、位相変調器（たとえば所謂「位相板」）を用いることが可能である。前記位相変調器は、該位相変調器を通り抜ける波面の位相を予め選択された量 - たとえば $1/2$ 又は π - だけ変化させる。

これらの態様について以降でより詳細に説明する。

【0015】

「技術分野」で述べた本発明の特別な実施例では、前記変調器は以下を有する。

- 少なくとも1つのマスク板。前記マスク板はたとえば実質的に不透明な板を含んで良い。前記不透明な板は、該不透明な板内に1つ以上の孔を含む（よって所謂「アパーチャ板」が形成される）。係る板はたとえばAlによりコーティングされたSiで作られて良い。前記板内のアパーチャはたとえば約 $10\mu\text{m}$ のオーダーの幅を有して良い。他の種類のマスク板は、たとえば閉塞ディスクの形態をとって良い（概念上はアパーチャ板の「写真のネガ」と考えることができる）。

- 前記LSの光軸に対する前記マスク板の位置、前記光軸に対する前記マスク板の回転姿勢、（たとえば内部のアパーチャに関する）前記マスク板の形状、（たとえば内部のアパーチャに関する）前記マスク板のサイズ、及び上記の組み合わせからなる群から選ばれるパラメータを調節するのに用いることのできるアクチュエータシステム。

前記マスク板はたとえば、該マスク板の面が前記LSの光軸に対して実質的に垂直になるような向きをとる（とはいえこれは厳密には必要ではない）。たとえばこのような構成では、前記マスク板（中の前記アパーチャ）のサイズ、形状、及び位置/回転姿勢が、前記検出器へさらに向かうように処理を進めることを可能にする波面の一部の特性を決定する。以下の機構のうちの1つ以上が利用されて良い。

(i) 前記光軸に対する前記マスク板の横方向位置が調節されて良い。その際、前記マスク板（内のアパーチャ）は、前記波面の予め選択された領域へ移動する。あるいはその代わりに及び/又はそれに加えて、前記マスク板（内のアパーチャ）の回転姿勢は、前記光軸の周りを前記マスク板を回転/部分的に回ることによって調節されて良い。非円形のマスク板（中のアパーチャ）については、係る角度変更は（一般的に）波面の変化をもたらす。

(ii) 前記マスク板の形状は調節されて良い。これを実現する一の方法は、（たとえば様々な形状のアパーチャを備える）様々なマスク板の「ライブラリ」と前記ビーム路中の位置へ選ばれたマスク板を移動させ得る交換器機構を有することである。必要な場合には、係る交換器機構は、前記選ばれたマスク板を、(i)で言及した横方向/角度方向調節機構へ受け渡して良い。

(iii) 前記マスク板（中のアパーチャ）のサイズは変化して良い。これを行うための一の方法は、たとえば調節可能な虹彩ダイアフラムを有するマスク板を用いることである。必要な場合には、係るマスク板はたとえば、(i)で言及した横方向/角度方向調節機構と併用されて良い。あるいはその代わりに、上の(ii)で述べた機構が用いられても良い。前記機構では、前記ライブラリが、様々なサイズ（のアパーチャ）を有するマスク板をも含む。

(i) - (iii)の場合では、問題となる調節は、適切なアクチュエータ - たとえばステッパモータ、ボイルコイルモータ、ニューマチックモータ、静水圧モータ等からなる群から選

10

20

30

40

50

ばれる - の助けを借りることによって実現されて良い。当業者は、所与の状況の要求に合うアクチュエーション機構を選ぶことができる。

【0016】

前の段落で述べた方法に対する代替方法（及び/又は補助方法）では、前記変調器は位相変調器を含む。荷電粒子光学系において用いられる位相変調器には様々な変化型がある。たとえば以下のようなものがある。

(A) 所謂ゼルニケ位相板は、（10～40nmの典型的な厚さで、たとえばアモルファスC, Au, Geを含む）薄膜を有する。前記薄膜には、小さな孔が空けられている。前記板は前記LSの光軸に対して垂直な向きをとる。前記光軸は前記孔を通り抜ける。前記膜は $\lambda/2$ の位相遅延を生成する。前記孔内での位相遅延はゼロである。

(B) 所謂ヒルベルト位相板も薄膜を有する。しかしこれは、ゼルニケ位相板に含まれる薄膜の厚さの2倍である。しかも前記膜は、前記光軸に沿った視野の半分にしか及ばず、かつ、中心孔を含まない。前記ヒルベルト位相板によって生成される位相遅延は $\lambda/4$ である。

(C) 前記ゼルニケ位相板及び前記ヒルベルト位相板において用いられる原理/機構の一般化として、様々な厚さの薄膜を用いる位相板が考えられ得る。係る板を通り抜ける粒子光学ビームによって受ける位相シフトは、前記ビームが衝突する位置での前記ビームの局所的な厚さに依存する。

(D) 所謂ポッシュ位相変調器は基本的に、伝導層/絶縁層のサンドイッチ/積層構造を有する相対的に小さな環状デバイスである。所与の静電ポテンシャルに係るデバイスに印加されるとき、前記デバイスの中心領域を通り抜ける荷電粒子ビームは、位相シフトを受け得る。たとえば係る装置についてさらなる情報は特許文献1を参照のこと。

(E) ゼルニケ位相板が設けられているポッシュ位相変調器を有するハイブリッド位相板が用いられて良い。たとえば係る装置についてさらなる情報は特許文献2を参照のこと。

(F) 原則として、所謂「粒子光学プリズム」 - たとえば粒子光学ホログラフィとして用いられるようなもの - の形態をとる位相変調器が用いられても良い。

前の段落で述べた状況の類推で、（必要な場合には）以下の機能を実行するアクチュエータシステムが用いられて良い。

- 前記LSの光軸に対する所与の位相変調素子（たとえば位相板又はプリズム）の位置の調節

- 前記光軸に対する係る素子の回転姿勢の調節

- 交換器機構と係る素子の「ライブラリ」との併用による前記荷電粒子ビームのビーム路への各異なる種類の位相変調素子の切り換え

あるいはその代わりに及び/又はそれに加えて、「能動型の」（つまり電氣的に調節可能な）位相変調器 - たとえば上述した(D) - (F)型の - へ供給される電位/電流が調節されて良い。これらの手法を用いることによって、実現される位相変化の大きさを意のままに変化させることが可能となる。位相板に関する一般的な情報については、非特許文献7,8を参照のこと。

【0017】

これまでの3つの段落を参照すると、振幅変調と位相変調の直接配置を含む変調器を考えることが可能である。前記振幅変調と前記位相変調は、互いに独立して用いられて良いし、及び/又は、一体として用いられても良い。係る配置は、本発明において用いられる波面操作に関して顕著な自由度/多様性を可能にする。

【0018】

本発明の特別な実施例では、上述の「選択された位置」 - 局在化した波面変調が行われる - が、前記レンズ系LSの画像空間内に設けられる。たとえば前記LSが対物レンズとそれに続いて投影レンズを有する場合、前記選択された位置は前記対物レンズの画像空間内に設けられて良い。原則として、前記選択された位置は必要に応じて選ばれて良く、かつ、波面変調は任意の位置 - たとえばビーム源/照射体と試料面との間、及びより詳細には試料面自体で - で実行されて良い。しかし本願発明者等は、（対象物側での位置とは対照的

10

20

30

40

50

に)使用されたLSの画像空間内で係る変調を実行することが有利であることを発見した。この理由の1つが、上述したように、前記LSが、対象物空間とそれに係る画像空間との間で $M>1$ となる倍率を生成する場合、大きさが の対象物空間の(前記LSの粒子光学軸に垂直な)横方向変位は、大きさ M の画像空間の横方向変位に対応し得る(つまり M 倍大きくなる)。これにより、前記対象物空間での分解能/精度よりも前記LSの画像空間での分解能/精度が M 倍になるように、上述の局在化した波面調節を実行することが実効的に可能となる。たとえば可動式マスク板又は位相変調器が、(前の段落で述べた)所望の波面調節を実現するのに用いられる場合、実現された効果は、係る板が前記LSの画像空間内に設けられている場合に、前記板の横方向位置の調節を実行するのに用いられるアクチュエータは、 M 倍の厳密さに関する余裕を持ち、あるいはその代わりに、前記LSの対象物空間に位置する場合よりも、 M 倍微細な調節を行う。

10

【0019】

前の段落で述べたシナリオの別な実施例では、前記「選択された位置」は、前記LSの画像面(付近)に設けられる。前記LSの上述した画像空間内での様々なとりうる位置のうち、画像面は、デフォーカスが最小となる(前記LSの粒子光学軸に沿った)軸上の位置を表す。従って前記画像空間を通り抜ける荷電粒子ビームでの情報は、前記画像面にて(前記LSの光軸を横切る方向で)最大の空間分解能/最も鮮明となる。従って上述のマスク板又は位相変調器は、前記画像面内で用いられるときに最大の空間選択性を実現する。前記画像面内に使用される変調器を設けることの別な利点は、校正の検討に関する。たとえば本発明がTEM内で(本発明のLSとして前記TEMの結像系を用いることによって)実行される場合、係るTEMは「通常結像」モードで動作して良い。その場合、振幅変調器が前記画像面内に設けられている場合、前記振幅変調器は、使用された検出器上に鮮明な画像を与える。これにより、各異なる変調器の状態間での相対移動及び/又は回転の校正を容易に行うことが可能となる。しかも、後述の実施例1で述べるアパーチャ関数 A (式(1)参照のこと)に良好な初期値を選ぶことが可能となる。さらに既知の校正用試料-顕著かつ既知の回折ピーク又はリングを示す-が前記振幅変調器と併用される場合、前期試料に対する前記変調器の実効的な幾何学形状は、効率的に校正され得る(十分に校正された系では、測定された回折ピーク/リングは、「通常結像」モードで得られた画像のパワースペクトルと一致する)。このことから、(使用されたコンピュータによる再構成法に関する)純粋に数学的な視座から、前記変調器の設置のために選ばれた厳密な「選択された位置」に関する厳重な制約は存在しないことに留意して欲しい。計算上、(前記LS(内の対物レンズ)の他の収差が数学的に補償され得るように)必要な場合には、焦点に合わせるように戻すこともできる。

20

30

【0020】

当業者は、本願で用いられている「近接する」という用語を理解し、かつ、その用語に適切な意味を与えることができる。それでもな疑義を回避するため、「近接する」という用語に具体的に限定された定義を与える。たとえば(前記粒子光学軸に沿った)ある物とある面との距離が、前記面に係るレンズの焦点距離の20%未満である場合、前記物は、前記面に「近接する」とみなされて良い。よってたとえば、前の段落では、(前記粒子光学軸に沿った)前記画像面からのある物の間隔が、前記対物レンズの焦点距離の最大20%である場合、前記物は前記画像面に「近接する」。言うまでもないことだが、この間隔が小さければ小さいほど、デフォーカスの程度は小さくなる。しかしときには、計画的な大きさのデフォーカスが望ましい場合もある。

40

【図面の簡単な説明】

【0021】

【図1】本発明の実施例が実行可能なCPMの断面図を表している。

【図2A】荷電粒子波面再構成法に含まれる物理的及び数学的处理を説明するための本発明の基礎となる態様を示している。

【図2B】荷電粒子波面再構成法に含まれる物理的及び数学的处理を説明するための本発明の基礎となる態様を示している。

50

【図2C】荷電粒子波面再構成法に含まれる物理的及び数学的处理を説明するための本発明の基礎となる態様を示している。

【図2D】荷電粒子波面再構成法に含まれる物理的及び数学的处理を説明するための本発明の基礎となる態様を示している。

【発明を実施するための形態】

【0022】

ここで本発明について、典型的実施例と添付図面に基づいてより詳細に説明する。

【0023】

図中、適切な場合には、対応する部品は対応する参照符号を用いて示される。一般的には、図は正しい縮尺ではないことに留意して欲しい。

10

【0024】

図1は、本発明との併用に役立つ荷電粒子顕微鏡1の実施例の概略図である。図中、真空筐体2はCPMを封止する。この場合CPMはTEMである。図示されたTEM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、試料面S'内に位置する（実質的に平坦な）試料S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、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。

【0025】

試料Sは、設置装置（台）12によって多重自由度で位置設定可能な支持装置10上に保持されている。たとえば支持装置10は、（とりわけ）XY平面（図示された直交座標系を参照のこと）で移動可能な指部を有して良い。係る移動は、軸8に沿って進行する電子ビームによる試料Sの様々な領域の照射/撮像/検査を可能にし、かつ、STEMモードにおける走査運動をも可能にする。任意の冷却装置14は、支持装置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支持装置10を極低温に維持することが可能である。

20

【0026】

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Sから放出されるように試料Sと相互作用する。必要な場合には、これらの放射線の種類のうちの1種類以上が検出器22によって検出されて良い。検出器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）検出器であって良い。しかしTEMにおける主要な関心は、試料を通過し、試料から放出され、かつ、軸8に沿って伝播し続ける電子である。係る透過電子は結像系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。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、必要な場合には、（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/引き込まれてよい。試料S（の一部）の画像はスクリーン26上で結像系24によって生成される。これは、壁2の適切な部分に設けられたビューポート30を介して見ることができる。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（図示されていない）。

30

40

【0027】

図示されているように、結像系24は、第1部分24a、第2部分24b、及び第3部分24cの直列配置を有する。第1部分24a、第2部分24b、及び第3部分24cはそれぞれ、対物レンズ24a、投影レンズ24b、及びアジャスタレンズ24c（上述）の役割を果たす。対物レンズ24aは、 $M > 1$ の倍率で（たとえば $M=50$ ）、（中間）画像面I'上に試料面S'を結像することができる。続いて投影レンズ24bは、前記スクリーンが位置する（付近の）第1射出面E'上に画像面I'を投影して良い。スクリーン26上で画像を見る方法の代替として、画素化された検出器 - たとえばCMOS又はCCD検出器 - が利用されて良い。このため、アジャスタレンズ24cは、投影レンズ24bから放出される電子の焦点を移動させ、かつ、その電子を第1射出面E

50

' (スクリーン26が引き出された(上述))ではなく第2射出面E'' (検出器32が設けられる)へ再案内/集束させるように機能し得る。検出器32では、電子は、制御装置50によって処理され、かつ、表示装置(図示されていない)-たとえばフラットパネルディスプレイ-上に表示され得る画像を生成する。当業者はこれら様々な可能性についてよく知っているため、これ以上の詳細については説明しない。

【0028】

制御装置(コンピュータプロセッサ)50は、制御線(バス)50'を介して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-たとえば同期作用、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。当業者は、筐体2の内部が厳密な真空中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」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。

【0029】

本発明の特別な実施例において、図示されたTEM1の結像系24は、上述のレンズ系LSの役割を果たすのに用いられて良い。このため、TEM1の結像系24は、画像面I'を結像系24の外部から(より)アクセス可能にするように調節されて良い。これにより(たとえば)、変調器(図1には示されていない。図2参照)を画像面I'へ挿入し、かつ画像面I'内で移動/調節することが可能となる。よってTEM1は以下のように利用されて良い。

- 前記変調器の所与の設定/位置では、検出器32は、電子波面が試料面S'、(変調された)画像面I'、及びLS24を通り抜け、かつ、射出面E''へ衝突するときに生成されるディフラクトグラムを記録するのに用いられて良い。このようにして「測定期間」 m_n が実行される。

- 前記変調器の設定/位置を変更し、かつ、検出器32で生成された係る(偏向された)ディフラクトグラムを記録することによって、異なる測定期間 m_{n+1} が実行される。

- この処理を繰り返す結果、一連の測定期間 $\{m_n\}$ が得られる。この一連の測定期間 $\{m_n\}$ の間に取得されるデータは、(たとえば)本発明による数学的波面再構成を実行する制御装置50によって処理されて良い。

- 集合 $\{m_n\}$ の濃度C(つまりデータに取得に用いられる各異なる測定期間の数)は、選択の問題であり、かつ、一般的には因子(たとえば使用される変調器の幾何学形状、撮像される試料のサイズ、及び射出波が試料面で結像される分解能)の数によって影響される。

この処理について次の実施例でより詳細に説明する。

【実施例1】

【0030】

図2A~図2Dは、荷電粒子波面再構成法に含まれる物理的及び数学的処理を説明するための本発明の基礎となる態様を示している。これらの図は以下を示している。

- 図2Aは従来技術の状況を表している。

- 図2Dは、「発明を実施するための形態」で説明した実施例と同様/類似の本発明の実施例を表している。

- 図2Bと図2Cは、図2Dの数学的議論を発展させるのに用いられる中間シナリオを表す。図2A-図2Dと図1との比較を容易にするため、図同士のある程度(近似的に)対応する部位には同一の参照符号が与えられた。さらに図1は上から下への処理として粒子光学軸を図示しているが、図2A-図2Dは、左から右への処理として粒子光学軸を図示している。図2B-図2Dに図示される構成がCPM(たとえば図1のTEM)中に含まれ得るとしても、これらの構成は必ずしも含まれていなくても良い。つまり本発明によって供される波面再構成を実行する専用装置を構築することも可能である。

[例1]従来技術

図2Aは、たとえば非特許文献5において用いられている従来技術に係る電子ビームタイコグラフィ装置を示している。図では、電子ビームは、光軸8に沿ってビーム源4から照射体6と試料面S'を通り抜けるように伝播して検出器面D'に衝突する。照射体6は、直列に

10

20

30

40

50

配置される収束レンズCLSと対物レンズOL1を（少なくとも）有する。試料面S'は試料S（つまり対象物O）に占められる。検出器面D'は検出器Dによって占められる。変調器A - この場合ではアパーチャ面 - は試料面S'の直前に設けられる。照射体6は、変調器Aに平面波を照射する。検出器面D'は機能的には、図1の射出面E'に対応する。試料面S'と検出器面D'との間にレンズ系が存在しないことに留意して欲しい。そのため図2Aの装置は基本的に、SEMの特殊な実施形態に相当する。

【0031】

ここで検出器D上での画像の生成についての数学的な説明を行う。図2Aを参照すると、試料面（対象物側）S'内での射出波が次式によって与えられる。

【0032】

【数1】

$$\Psi_{out}(\vec{r}) = \Psi_{in}(\vec{r})O(\vec{r})A_{\vec{R}}(\vec{r}) (= \Psi_{in}OA) \quad (1)$$

- Ψ_{in} は入射電子波で、平面波では $\Psi_{in}=1$ である。
 - ベクトル r は、光軸8に対して垂直な面内での位置を表す（光軸8と面が交わる点を原点とする）。
 - O （ベクトル r ）は、所謂対象物関数で、電子波の伝播方向に沿った対象物の投影ポテンシャルを（CTF（コントラスト伝達関数）理論に従って）表す指数関数である。
 - $A_{\vec{R}}$ （ベクトル r ）は変調器関数である。本願の場合では、阻止アパーチャ関数で、ベクトル R を中心とするアパーチャ内では1で、他では0である。
- ホイヘンスの原理を用いることによって、無限大での最終画像は出力波のフーリエ変換(F T)となる。

$$\Psi_{inf} = FT\{\Psi_{out}\} = FT\{\Psi_{in}OA\} \quad (2)$$

従って検出器Dによって記録される画像は次式によって与えられる。

$$I_D = |\Psi_{inf}|^2 \quad (3)$$

ここで一連の測定期間 $\{m_n\}$ が実行されて良い。 $n=\{1, \dots, N\}$ である。これらの測定期間の各々の範囲内では、変調器の状態 $A^n = A_{\vec{R}_n}$ （ベクトル r ）（本願ではアパーチャの位置ベクトル $R = \text{ベクトル}R_n$ のみによって与えられる）が定義され、かつ、画像 $I_D = I_D^n$ が取得される。よってたとえば以降の実施例2で説明するような反復的方法が適用されて良い。係る方法は式(2)を用いて、各測定期間 m_n についての試料面S'と検出器面D'の間での推定前進電子波と後退電子波を数学的に伝播させる。再構成法では、式(3)は、各反復での Ψ_{inf} （又は明示的に $|\Psi_{inf}| = I_D$ ）の振幅を補正するのに用いられる。この方法は、再構成された照射 Ψ_{in} （ベクトル r ）と対象物関数 O （ベクトル r ）を得る。換言すると、全出力電子波 Ψ_{out}^b （ベクトル r ） $= \Psi_{in}(\text{ベクトル}r)O(\text{ベクトル}r)$ が生成されて良い。

[例2]修正された従来技術

図2Aに示された状況に対して、さらなる部品が図2Bには表されている。特に図2Bは、対物レンズ24a(OL2)と投影レンズ24bの直列配置を有する。対物レンズ24a(OL2)と投影レンズ24bは一体となって、上述のレンズ系LSを構成する。対物レンズ24aは後焦点面BFPを有する。しかも対物レンズ24aは、（中間）画像面I'上に試料面S'を結像する。投影レンズ24bは焦点距離 f_{ps} を有する。（図2Aと比較して）変調器Aが存在しないことに留意して欲しい。この結果、画像面I'での画像は、試料Sの「完全画像」となる。

【0033】

10

20

30

40

50

図2Cでの状況は、変調器Aが図2Aに示された位置と同一の位置に導入されたことを除けば図2Bに図示された状況と同一である。この変調器Aが存在する結果、画像面I'での画像は(変調器Aによって試料Sへの照射が縮小されるため)試料Sの「部分画像」ではない。

【0034】

図2Bと図2Cの両方において、対物レンズ24aは倍率Mを生成する。従って対物レンズ24aの対象物側でのベクトルRは画像側でベクトルMRとなる。対物レンズ24aが完全ではない場合には、画像面I'には収差が生じる。他方、投影レンズ24bが事実上完全 - つまり収差の導入に関しては無視できる効果しか有していない - とみなされる。対物レンズ24aと投影レンズ24bの両方が完全でかつ焦点が合っている場合、図2A及び図2Cに図示された状況は実効的に同一となる ($i_{nf} = b_{fp}$)。変調器Aが存在しない場合、図2Bでの状況は、図2A及び図2Cでの状況とさらに実効的に同一となる。

10

【0035】

(以降の実施例とも関連して)上の例1で説明した数学的再構成法は、図2Cに示された状況に直接適用されて良い。最初に、検出器Dによって記録された最終電子波と強度を求める(上の式(2)と式(3)と類似する)。BFPでの電子波は次式のようになる。

$$b_{fp} = FT\{ \text{out} \} K_{CS}(\text{ベクトル}q) e^{-i \dots} \quad f_{q^2} = FT\{ i_n OA \} K_{CS}(\text{ベクトル}q) e^{-i \dots} \quad (4)$$

ベクトル $q = (q_x, q_y)$ は逆空間での座標である。式(4)は次式のように書き直すことができる。

20

$$b_{fp} = FT\{ (i_n OA)(x) IFT\{ K_{CS}(\text{ベクトル}q) e^{-i \dots} \} \} e^{-i \dots} \quad f_{q^2} \quad (5)$$

- IFTは逆フーリエ変換を示す。
- 演算子(x)はコンボリューション演算子である。
- $K_{CS}(\text{ベクトル}q)$ は、ビーム源4のインコヒーレント関数である。
- $e^{-i \dots}(\text{ベクトル}q)$ は、対物レンズ24aのデフォーカスを除いた収差関数である。
- $e^{-i \dots} f_{q^2}$ は、対物レンズ24aの純粋なデフォーカス fに起因する収差関数である。
- λ は電子波の波長である。

投影レンズ24bでの収差を無視すると、検出器Dの前方での最終電子波は、BFPでの最終電子波に等しくなる(BFPからIまで、電子波はIFTによって得られる。検出器Dに到達するため、他のFTが適用される)。投影レンズのとり得る倍率はここでは関心事ではなく影響もないので、1に設定される。この例では、照射波動関数 i_n は、平面波(よって $i_n=1$)であるとみなされる。部分的には一定である阻止アパーチャ関数Aは変調器に関連づけられる。このことを考慮すると、 i_n とアパーチャ関数Aはコンボリューション演算子(x)の外側に設けられて良く、かつ、式(5)は次式のように再定式化されて良い。

30

$$b_{fp} = FT\{ (i_n(O(x) IFT\{ K_{CS}(\text{ベクトル}q) e^{-i \dots} \} \} \} e^{-i \dots} \quad f_{q^2} \quad (6)$$

検出器Dによって生成される画像は単純に次式のようになる。

$$I_D = | b_{fp} |^2 \quad (7)$$

ここで式(6)と(7)は、式(2)と(3)と同じようにして用いられて良い。例1で実行された一連の測定期間と同様に一連の測定期間 $\{m_n\}$ がここでも実行されて良い。 $n=\{1, \dots, N\}$ である。これらの測定期間の各々では、アパーチャ位置ベクトル $R = \text{ベクトル}R_n$ が設定されるので、アパーチャ関数 $A^n = A_{\text{ベクトル}R_n}(\text{ベクトル}r)$ が定義され、係る画像 $ID = (I_n)^D$ が取得される。続いてたとえば以降の実施例2で説明する数学的再構成法が適用されて良い。係る方法は式(6)を用いて、各測定期間 m_n について、試料面S'と検出器面D'との間で推定される前進電子波と後退電子波を数学的に伝播させる(FTと逆FTのみを適用する)。式(7)(又は明示的に $| b_{fp} | = I_D$)を用いた各反復において振幅 b_{fp} を補正することによって、その方法は、再構成された再構成された照射 $i_n(\text{ベクトル}r)$ と対象物関数 $O_{res}(\text{ベクトル}r)$ を得る。 $O_{res}(\text{ベクトル}r) = O(\text{ベクトル}r)(x) IFT\{ K_{CS} e^{-i \dots}(\text{ベクトル}q) \}$ によって明示的に与えられる。式(6)でのデフォーカス因子 $e^{-i \dots} f_{q^2}$ がガウス関数なので、そのFTとIFTもガウス関数である。従ってこの因子は、試

40

50

料面S'と検出器面D'との間で前進及び後退するときにも変化しない。さらに b_{fp} の振幅のみが、各反復において $|b_{fp}| = I_D$ に従って補正されるので、デフォーカス $e^{-i f q^2}$ はここでも影響を持たない（純粋に位相の寄与だけなため）。まとめると、この修正された例では、最終的に再構成された部分は、照射 i_n （ベクトル r ）（この場合完全に既知の平面波）と収差の存在する対象物関数 O_{res} （ベクトル r ） $= O(\text{ベクトル } r)$ （ \times ） $IFT\{K_{CS} e^{-i(\text{ベクトル } q)}\}$ である。収差が対物レンズ24aにおいて無視できて（ $\text{ベクトル } q = 0$ ）、かつ、照射が完全（インコヒーレンスが存在せず $K_{CS}=1$ ）であるとき、式(6)は、

$$b_{fp} = FT\{i_n O A\} e^{-i f q^2} \quad (8)$$

これは、焦点合わせされているとき（ $f=0$ ）には厳密に式(2)と同一である。説明したように焦点合わせされていないとき、純粋なガウス因子 $e^{-i f q^2}$ は、変化せず、かつ、再構成に影響を及ぼさない。

[例3]さらなる修正

図2Dは、変調器Aが画像面I'での位置へ移動されたことを除けば図2Cに表された状況と似ている。この結果、2つの後焦点面 - 具体的には対物レンズ24aのBFP1（図2Bと図2CのBFPに相当する）と投影レンズ24bのBFP2 - 同士を区別することが必要となる。前記区別は検出器面D'と一致する。なぜなら変調器Aは、BFP1とBFP2との間で関数を実行するからである（式(11)参照のこと）。

【0036】

図2Dに図示された構成では、（以降で説明する実施例2に関連して）上で述べた例1と例2で説明した数学的再構成法はここでも、直接適用されて良い。最初に（式(2)と(3)に類似する）検出器Dによって記録される最終電子波と強度が求められる。BFP1での電子波は次式のようになる。

$$b_{fp1} = FT\{i_{out}\} K_{CS}(\text{ベクトル } q) e^{-i(\text{ベクトル } q)} e^{-i f q^2} = FT\{i_n O\} K_{CS}(\text{ベクトル } q) e^{-i(\text{ベクトル } q)} e^{-i f q^2} \quad (4)$$

ベクトル $q = (q_x, q_y)$ はフーリエ領域での座標である。

画像面I'では、アパーチャが存在しない状態での電子波（試料の出力波の画像）は次式のようになる。

$$i_m = IFT\{b_{fp1}\} = (i_n O)(\times) IFT\{K_{CS}(\text{ベクトル } q) e^{-i(\text{ベクトル } q)} e^{-i f q^2}\} \quad (10)$$

アパーチャAが画像面I'内に存在するときには、式(10)は次式のようになる。

$$i_m = ((i_n O)(\times) IFT\{K_{CS}(\text{ベクトル } q) e^{-i(\text{ベクトル } q)} e^{-i f q^2}\}) A \quad (11)$$

さらにBFP2での画像は次式のようになる。

$$b_{fp2} = FT\{i_m\} = FT\{((i_n O)(\times) IFT\{K_{CS}(\text{ベクトル } q) e^{-i(\text{ベクトル } q)} e^{-i f q^2}\}) A\} \quad (12)$$

又は照射体6からの照射が一定の平面波であることを利用する場合、最終結果は次式のようになる。

$$b_{fp2} = FT\{i_n(O(\times) IFT\{K_{CS}(\text{ベクトル } q) e^{-i(\text{ベクトル } q)} e^{-i f q^2}\}) A\} \quad (13)$$

検出器Dが生成する画像は次式で表される。

$$I_D = |b_{fp2}| \quad (14)$$

ここで式(13)と(14)は、式(2)と(3)と同じようにして用いられて良い。例1,2で実行された一連の測定期間と同様に一連の測定期間 $\{m_n\}$ がここでも実行されて良い。 $n = \{1, \dots, N\}$ である。これらの測定期間の各々では、アパーチャ位置ベクトル $R = \text{ベクトル } R_n$ が設定されるので、アパーチャ関数 $A^n = A_{\text{ベクトル } R_n}(\text{ベクトル } r)$ が定義され、係る画像 $ID = (I_n)^D$ が取得される。続いてたとえば以降の実施例2で説明する数学的再構成法が適用されて良い。係る方法は式(13)を用いて、各測定期間 m_n について、試料面S'と検出器面D'との間で推定される前進電子波と後退電子波を数学的に伝播させる（FTと逆FTのみを適用する）。式(14)（又は明示的に $|b_{fp2}| = I_D$ ）を用いた各反復において b_{fp2} の振幅を補正することによって、その方法は、再構成された再構成された照射 i_n （ベクトル r ）（この場合、完全に既知で一定である）と結果として生じる収差が存在してデフォーカスされた対

10

20

30

40

50

象物関数 $O_{res}(ベクトルr) = O(ベクトルr)(x) IFT\{K_{CS}e^{-i(ベクトルq)}\}$ を得る。
 これは面 l' での対象物関数である。試料面 S' での収差の存在する焦点合わせされた射出波は、逆伝播によって画像面 l' で再構成された電子波から得られて良いことに留意して欲しい。対物レンズ24aの収差が既知である場合、その収差はデコンボリューションによって排除されて良い。収差が対物レンズ24aにおいて無視できて ($(ベクトルq) = 0$)、かつ、照射が完全 (インコヒーレンスが存在せず $K_{CS} = 1$) であるとき、式(13)は、

$$b_{fp2} = FT\{i_n(O(x) IFT\{e^{-i(ベクトルq)}\})A\} \quad (15)$$

デフォーカスがゼロであるとき ($f=0$)、式(15)は厳密に式(2)と同一となる。

$$b_{fp2} = FT\{i_n(O(x) IFT\{e^{-i(ベクトルq)}\})A\} = FT\{i_n(O(x))A\} = FT\{i_nOA\} \quad (16)$$

なぜなら任意の関数 $f(ベクトルr)$ について、 $f(ベクトルr)(x) (ベクトルr) = f(ベクトルr)$ が成立するからである。

[例4] 試料が存在する場合と存在しない場合のシミュレーション

式(2)と(16)とを比較すると、図2B/例1の従来技術に係る方法と本発明による方法は、対物レンズ24aが完全かつ焦点合わせされていて、かつ、試料 S が照射体6からの平面波によって照射されるときには同一の結果を得る。本発明の重要な態様について、式(12)を出発点として説明する。

[状況4.1]

試料面 S' に何も無い場合 (つまり試料が電子ビームを遮断しない場合)、対象物関数は $1(O=1)$ となり、かつ、式(12)は次式のようになる。

$$b_{fp2} = FT\{i_m\} = FT\{1 \cdot (i_n(x) IFT\{K_{CS}e^{-i(ベクトルq)}\})e^{-i(ベクトルq)}\} \cdot A \quad (12a)$$

よって数学的再構成法における再構成された項は、 $i_n(x) IFT\{K_{CS}e^{-i(ベクトルq)}\}e^{-i(ベクトルq)}$ である。これは、照射体6から放出される収差を有してデフォーカスされた照射の波面である。この波面は、数学的伝播によって焦点合わせされて良い。収差が既知である場合、収差関数はデコンボリューションされ、かつ、元の波面 i_n に戻される。照射の構成が既知である場合 (たとえば平面波)、直接的な結果は系の収差関数である。

[状況4.2]

試料 S が試料面 S' 内に存在し、かつ、照射が任意である場合、 $o_{out} = i_n O$ であるため、次式のようになる。

$$b_{fp2} = FT\{i_m\} = FT\{1 \cdot (o_{out}(x) IFT\{K_{CS}e^{-i(ベクトルq)}\})e^{-i(ベクトルq)}\} \cdot A \quad (12b)$$

数学的方法によって与えられる項は、 $o_{out}(x) IFT\{K_{CS}e^{-i(ベクトルq)}\}e^{-i(ベクトルq)}$ である。これは、照射体6から放出される収差を有してデフォーカスされた照射の波面である。この波面は、数学的伝播によって焦点合わせされて良い。収差が既知である場合、収差関数はデコンボリューションされ、かつ、試料面 S からの元の射出電子波波 o_{out} に戻される。照射の構成が既知である又は (たとえば状況4.1での構成を用いることによって) 決定される場合、対象物関数は完全に回復され得る。

【実施例2】

【0037】

以下の関係を考慮する (上の記載を参照)。

$$I_D^n = |res^n|^2$$

$$res^n = FT\{i_n O_{res} A^n\}$$

ここで I_D^n と A^n はそれぞれ、 n 番目の測定期間に関する画像と変調器関数である。一連の測定期間 $\{m_n\}$ 、 $n = \{1, \dots, N\}$ 中に得られた式(2) - (3) (例1)、式(6) - (7) (例2)、及び式(13) - (14) (例3) の3つの対のうちの任意の対によって表される状況の一般化された形態であることがわかる。 res^n と O_{res} は具体例における具体的形態を仮定している。解かれるべき各異なる問題は以下のように定式化されて良い。

() I_D^n, A^n , 及び i_n が与えられると、 O_{res} が求められる。

() I_D^n が与えられると、 A^n と i_n と O_{res} が求められる。

問題 () は非ブラインド再構成と呼ばれる。問題 () はフルブラインド再構成と呼ば

10

20

30

40

50

れる。これらの問題のいずれも、Aをパラメータ化し、かつ、解かれるべき問題を線形化することによって単純化され得る。()の場合では、係る単純化された問題は以下のように特定されて良い。

() $|Px| = b$ となるようなxを求める。

- 行列Pは使用されるパラメータ化を表す変調作用で構成されるフーリエ変換である。
- bは測定 I_D で構成される。
- 複素変数xは、試料面S'での(収差を含む可能性のある)射出波を表す。

Pとbが与えられたときにxを求めるのに用いられ得るアルゴリズムは多数存在する。たとえば所謂「貪欲法」が用いられて良い。係るアルゴリズムは、 $|x_1| = b$ となるようなランダムな初期推定チルダ x_1 をとり、続いてチルダ x_1 をPの画像へ投影することによって機能する。従ってこの投影の結果の振幅は、ここでもbと等しくなるように補正される。この処理の反復は徐々に問題の解に近づく。係るアルゴリズムの例にはたとえば、エラー低減アルゴリズム、基本入出力アルゴリズム、基本出力 - 出力アルゴリズム、ハイブリッド入出力アルゴリズム、差分マップアルゴリズム、溶媒フリップアルゴリズム(solvent flipping algorithm)、平均逐次反射アルゴリズム、ハイブリッド投影反射アルゴリズム、及び、緩和平均交互反射アルゴリズムが含まれる。上述の方法はまた、 O と A^n に関する最適化を交互に行うことによってブラインド問題()を解くのに用いられても良い。これら2つの問題を交互に解くのに用いられる特別な方法は変化して良い。使用された再構成アルゴリズムでは、必要な場合には、補助的な(これまでの)情報 - たとえば境界及び非負制約 - が解法プロセスに組み込まれて良い。

10

20

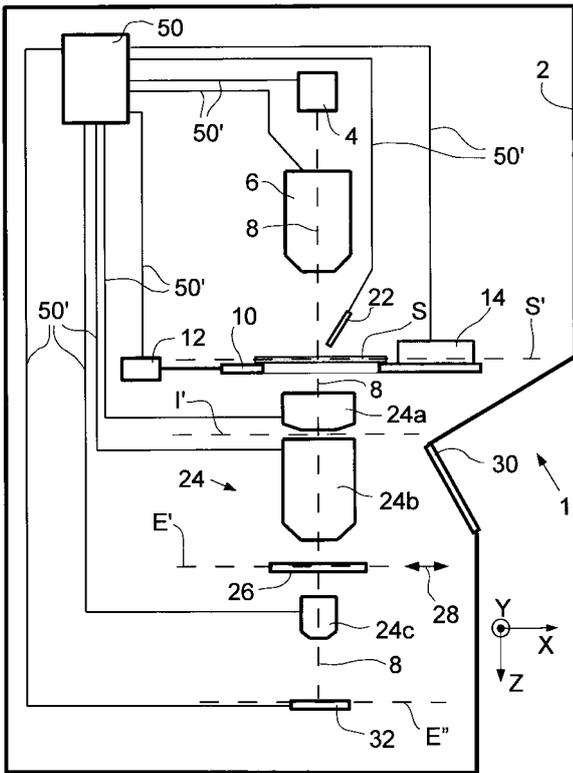
【符号の説明】

【0038】

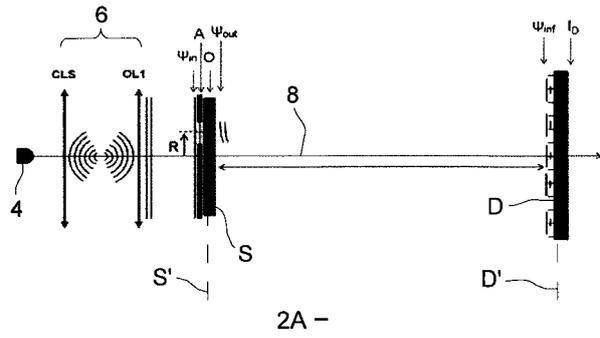
- 1 荷電粒子顕微鏡
- 6 電子光学照射体
- 8 粒子光学軸
- 24a 対物レンズ
- 24b 投影レンズ
- A 変調器
- D 検出器
- S 試料
- BFP 後焦点面

30

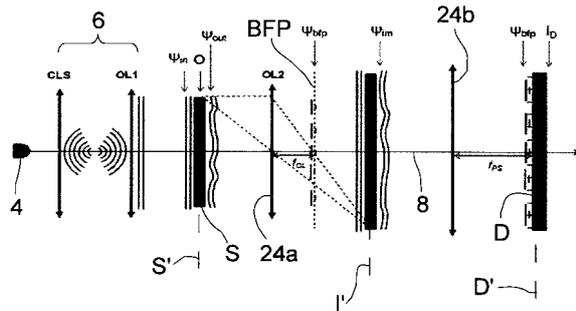
【 図 1 】



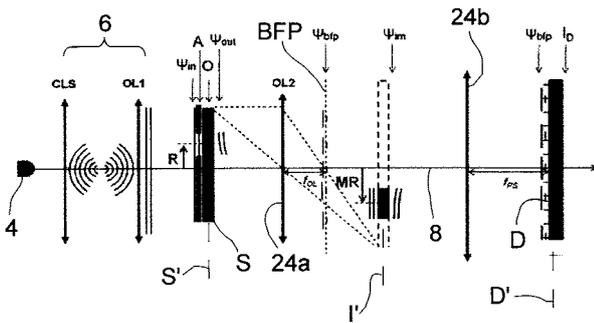
【 図 2 A 】



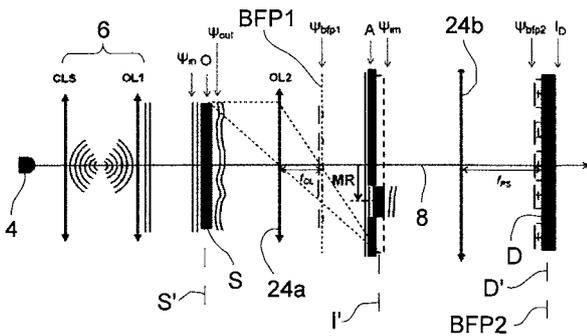
【 図 2 B 】



【 図 2 C 】



【 図 2 D 】



フロントページの続き

- (72)発明者 バルト ヨゼフ ヤンセン
オランダ国, 5 6 1 1 イクスセー エイントホーフエン, リヒトストラート 1 2 8
- (72)発明者 イヴァン ラジッチ
オランダ国, 5 6 5 3 エンセー エイントホーフエン, ステルケンブルグ 5 3 / 0 1
- (72)発明者 ハイス ファン ドウイネン
オランダ国, 3 5 2 3 フェーウェー ユトレヒト, コンスタント エルゼアイストラート 5 4
- (72)発明者 ウーヴェ ルーケン
ドイツ国, 2 6 6 2 4 スートブロークマーランド, ジーベルヘルナーシュトラッセ 5
- (72)発明者 ロス デビッド サベージ
オランダ国, 5 6 1 6 エスヘー エイントホーフエン, クリューゲルストラート 4 6
- (72)発明者 ステファヌス ヒューバータス レオナルダス ファン デン ブーム
オランダ国, 5 6 6 3 イェーカー ゲルドロップ, ウィンネンスラント 1 7
- Fターム(参考) 5C033 BB01 SS03