

(19) 世界知的所有権機関
国際事務局(43) 国際公開日
2007 年 11 月 8 日 (08.11.2007)

PCT

(10) 国際公開番号
WO 2007/125652 A1(51) 国際特許分類:
H01J 37/153 (2006.01) H01J 37/28 (2006.01)

(21) 国際出願番号: PCT/JP2007/000455

(22) 国際出願日: 2007 年 4 月 25 日 (25.04.2007)

(25) 国際出願の言語: 日本語

(26) 国際公開の言語: 日本語

(30) 優先権データ:
特願2006-124590 2006 年 4 月 28 日 (28.04.2006) JP

(71) 出願人 (米国を除く全ての指定国について): 独立行政法人物質・材料研究機構 (NATIONAL INSTITUTE FOR MATERIALS SCIENCE) [JP/JP]; 〒3050047 茨城県つくば市千現一丁目 2 番地 1 Ibaraki (JP).

(72) 発明者; および

(75) 発明者/出願人 (米国についてのみ): 木本浩司 (KI-MOTO, Koji) [JP/JP]; 〒3050047 茨城県つくば市千現一丁目 2 番地 1 独立行政法人物質・材料研究機構内 Ibaraki (JP). 石塚和夫 (ISHIZUKA, Kazuo) [JP/JP]; 〒3050047 茨城県つくば市千現一丁目 2 番地 1 独立行政法人物質・材料研究機構内 Ibaraki (JP). 松井良夫 (MATSUI, Yoshio) [JP/JP]; 〒3050047 茨城県つくば市千現一丁目 2 番地 1 独立行政法人物質・材料研究機構内 Ibaraki (JP).

(74) 代理人: 西義之 (NISHI, Yoshiyuki); 〒2350033 神奈川県横浜市磯子区杉田 1-1-7 西特許事務所 Kanagawa (JP).

(81) 指定国 (表示のない限り、全ての種類の国内保護が可能): AE, AG, AL, AM, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG, KM, KN, KP, KR, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LY, MA, MD, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PG, PH, PL, PT, RO, RS, RU, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, SV, SY, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW.

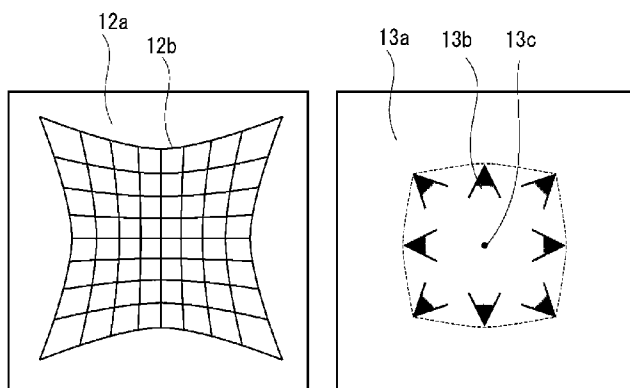
(84) 指定国 (表示のない限り、全ての種類の広域保護が可能): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LS, MW, MZ, NA, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), ユーラシア (AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU, TJ, TM), ヨーロッパ (AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MT, NL, PL, PT, RO, SE, SI, SK, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

添付公開書類:
— 国際調査報告書

2 文字コード及び他の略語については、定期発行される各 PCT ガゼットの巻頭に掲載されている「コードと略語のガイダンスノート」を参照。

(54) Title: ELECTRON MICROSCOPE AND METHOD FOR MEASURING ABERRATION CHARACTERISTIC OF OBJECTIVE LENS SYSTEM THEREOF

(54) 発明の名称: 電子顕微鏡とその対物レンズ系収差特性の計測方法



the aberration, and a control device for adjusting the operation condition of the electron microscope according to the measured aberration are needed.

(57) Abstract: A method for measuring the aberration of an electron microscope and an electron microscope equipped with a device having a function of correcting the aberration according to the results of the measurement. In the method, at least one Ronchigram (12a) is observed, diffractograms (13a) at at least one position are computed, and the aberration is measured from the figures. The electron microscope has a function of displaying the measured aberration and a function of adjusting the operation condition of the electron microscope according to the measurement results. To use the principle of the invention, an image capturing device for observing a Ronchigram, an image analyzing device for analyzing the Fourier transform figure of the Ronchigram and computing

/ 続葉有 /

WO 2007/125652 A1



(57) 要約:

本発明は電子顕微鏡における収差の計測方法、その計測結果に基づき収差補正を行う機能を有する装置を備えた電子顕微鏡に関するものである。

本発明で提供される電子顕微鏡における収差の計測方法では、少なくとも1以上のロンチグラム（12 a）を観察し、その少なくとも一カ所以上のフーリエ変換図形（13 a）を計算し、その図形から収差を計測する。本発明で提供される電子顕微鏡では、計測した収差を表示する機能、その計測結果に基づき、電子顕微鏡の動作条件を調整する機能を有する。本発明の原理を利用するためには、ロンチグラムを観察する画像取得装置と、ロンチグラムのフーリエ変換図形を解析し収差を計算するための画像解析装置、計測した収差に基づき電子顕微鏡の動作条件を調整するための制御装置が必要である。

明 細 書

電子顕微鏡とその対物レンズ系収差特性の計測方法

技術分野

- [0001] 本発明は、試料の近傍に電子を収束する対物レンズ系を有し、前記電子を前記試料に透過させてロンチグラム（Ronchigram）を得る電子顕微鏡の対物レンズ系収差特性の計測方法とその計測結果に基づき対物レンズ系の収差補正を行う機能を有する装置を備えた電子顕微鏡に関する。

背景技術

- [0002] 走査透過電子顕微鏡（Scanning Transmission Electron Microscope；以下「STEM」という）は、微小領域の材料評価手法として、近年広く用いられつつある。入射電子の走査信号と同期して様々な透過電子強度等を計測することにより、明視野像や暗視野像の観察が行われている。STEMによって高い空間分解能で正しく観察するためには、STEMの適切な軸調整を行うことが不可欠であり、そのためには対物レンズ系の収差特性を計測する必要がある。
- [0003] 当該対物レンズ系とは、電子を収束するために用いる電子銃、収差補正手段、偏向手段及び対物レンズ等の光学要素全体を指す。また、当該収差特性とは、対物レンズ系について、焦点（焦点位置の試料位置からのずれの値）、2回の非点収差、コマ収差、3回の非点収差、球面収差及び、高次の収差（例えば、4回非点や5次の球面収差など）を指す。
- [0004] 従来、STEMの軸調整には、ロンチグラムを観察する手法が用いられていた（例えば、特許文献1）。ロンチグラムとは、試料に入射電子を収束し、透過した電子が作る電子散乱図形で、電子顕微鏡では、電子回折図形を観察する設定条件等で観察される。前記入射電子の焦点位置を前記試料の観察領域から意図的にずらすことにより、電子散乱図形中に試料の投影像が見られることからシャドーイメージ（Shadow image）と呼ばれる場合もある。

- [0005] 従来のSTEMの軸調整では、非晶質試料のロンチグラムを観察し、ロンチグラムの中心に見られるコントラストが一様な領域が円形になるように、焦点又は、非点収差の軸調整等を行っていた。
- [0006] 近年になり球面収差の補正装置が使われるようになり、焦点や非点収差に加え、球面収差等も制御できるようになってきた。それに伴い、軸調整を行うために計測する対象となる収差や、動作条件を調整する対物レンズ系の光学要素（例えば、収差補正手段や電子線の偏向手段）も増えてきた。そのため、対物レンズ系の収差を計測する新しい方法も用いられている。
- [0007] 新しい方法の一つは、ロンチグラムを用いる方法である。意図的に試料の観察領域から焦点位置をはずしてロンチグラムを観察し、場所による倍率の違いを用いるものである（非特許文献1）。多くの場合、コントラストが明瞭な軸調整用の試料を用いることが多く、実際の観察のためには試料を入れ替えることなどが必要である。
- [0008] もう一つの新しい方法は、入射電子の試料面への入射角を意図的に変えて、暗視野像の変化を観察するものである。TEMの軸調整でZemlin Tableau（非特許文献2）と呼ばれているものと類似した方法で、deconvoluted probe tableau法と呼ばれている。この場合には、試料面への入射電子の入射角を変えた暗視野像を多数計測する必要があり、長時間の計測時間を必要とする。

[0009] 特許文献1：特開2003-331773号公報

非特許文献1：N. Delibby, O. L. Krivanek, P. D. Nellist et al. Journal of Electron Microscopy, vol. 50, p177

非特許文献2：F. Zemlin, et al., Ultramicroscopy, vol. 3, (1978), p49

発明の開示

発明が解決しようとする課題

- [0010] 最近のSTEMの高分解能化に伴って、収差特性を迅速かつ定量的に計測

する必要性は、ますます高まっている。しかし、その一方、STEM装置は未だ広く普及するに至っていない。最新のSTEM装置の普及を阻んでいるのは、軸調整の複雑さの問題であり、収差特性をいかに計測するかが喫緊の課題になっている。

[0011] 従来から用いられているロンチグラムを用いた収差計測の方法では、非晶質薄膜試料が必須である。そのため、試料上の所望の観察領域とは異なる場所で、ロンチグラムを観察し、軸調整をする必要があった。また、この従来の収差計測の方法により推定できるのは焦点と非点収差であり、定量的な計測はできない。

[0012] また、球面収差の補正装置の使用に伴って用いられるようになった新しい収差計測の方法においても、収差特性の計測のために特殊な試料が必要であり、計測に長時間が必要であるなど、汎用性・迅速性に問題がある。

[0013] 汎用性の欠けた収差計測方法では、例えば、試料の実際に観察したい領域では収差特性の計測や対物レンズ系の光学要素（例えば、収差補正手段や電子線の偏向手段）の調整ができないため、わざわざ異なる試料や異なる場所に視野を移動しなくてはならない。また、収差計測方法が迅速性に欠け、収差の計測に時間がかかる場合には、電子照射による試料の損傷や、装置の不安定性による対物レンズ系の光学要素の再調整の必要なども生じる。特に、STEMで観察対象となるのは結晶性の試料が多いが、その場合、従来の収差計測技術では対物レンズ系の収差特性を計測できないという深刻な問題があった。

[0014] 以上のことから、試料上の実際に観察したい領域で収差特性を計測し、対物レンズ系の光学要素を補正できる汎用性があり、試料損傷を起こすことなく迅速に収差特性を計測できる方法と、その計測結果に基づき収差補正を行う機能を有するSTEM装置の開発が望まれている。

課題を解決するための手段

[0015] 上記の課題を解決するための方法として、本発明では、対物レンズ系の収差特性を計測する新たな方法と、それに基づく装置が提供される

- [0016] すなわち、発明 1 の電子顕微鏡の対物レンズ系収差特性の計測方法は、ロンチグラムの少なくとも一部のフーリエ変換図形の、構成要素の相対距離又は／及び形状が、前記対物レンズ系収差特性により変化することを用いて計測することを特徴とする。
- [0017] 発明 2 は、発明 1 の電子顕微鏡の対物レンズ系収差特性の計測方法において、フーリエ変換するのは、前記ロンチグラム全体であることを特徴とする。
- [0018] 発明 3 は、発明 1 又は 2 の電子顕微鏡の対物レンズ系収差特性の計測方法において、フーリエ変換するのは、前記ロンチグラムの異なる複数部分であって、得られた複数の前記フーリエ変換図形の、構成要素の相対距離又は／及び形状における相対差により、前記対物レンズ系収差特性を計測することを特徴とする。
- [0019] 発明 4 は、発明 1 から 3 の何れかの電子顕微鏡の対物レンズ系収差特性の計測方法において、動作条件の異なる対物レンズ系から得られた複数のロンチグラムのフーリエ変換図形の、構成要素の相対距離又は／及び形状の相対差により、前記対物レンズ系の収差特性を計測することを特徴とする。
- [0020] 発明 5 は、電子顕微鏡であって、発明 1 から 4 の何れかの対物レンズ系収差特性の計測方法に基づき、得られた収差特性の結果を表示する機能及び／又は手段を有することを特徴とする。
- [0021] 発明 6 は、電子顕微鏡であって、発明 1 から 4 の何れか発明の対物レンズ系収差特性の計測方法に基づき、得られた収差特性を用いて、前記対物レンズ系の収差補正装置の設定を変更させる機能及び／又は手段を有することを特徴とする。

発明の効果

- [0022] 従来の収差特性の計測方法では、特殊な非晶質試料を必要としたり、多く（例えば、10枚以上）の画像を観察したりする必要があり、汎用性、迅速性、簡便性に問題があった。ロンチグラムを用いる収差特性の計測手法は従来も存在したが、ロンチグラムのフーリエ変換図形を用いて対物レンズ系の

収差特性を効率よく抽出し、定量的に計測する手法は、従来まったく報告されていなかった。

[0023] ロンチグラムのフーリエ変換図形を計算し解析対象とする収差特性の計測方法は、これまでに報告された例が無く、本発明により初めてその有効性が示されるものである。本発明により、従来とは全く異なる、新規な収差特性の計測手法が提供される。

[0024] 本発明は、実際の観察対象であることが多い結晶性試料でも非晶質性試料でも適用できる、汎用性のある収差特性の計測手法を提供する。この計測手法は、収差特性の計測に多数の画像を必要としないので、操作の簡便性又は迅速性を有する利点がある。また、本発明は、1枚あるいは2枚程度のロンチグラムで収差を効率よく抽出できることから、オンライン化などにも適している。

[0025] 本発明により、汎用性、迅速性、簡便性に優れた、収差特性の計測方法とその計測結果に基づき収差補正を行う機能を有する装置を備えた電子顕微鏡が提供され、走査透過電子顕微鏡の操作性・精度の向上と、適用範囲の拡大が図られる。

発明を実施するための最良の形態

[0026] 以下、図面を参照して本発明の実施の形態を説明する。

図1は、本発明による実施形態の一例である。電子銃1から出射した電子は、収差補正手段3で収差を調整され、電子線の偏向手段4により偏向され、対物レンズ5により収束された結果、試料6の所望の位置に入射電子2aとして入射する。

[0027] 試料6を透過した透過電子2bは、ロンチグラム画像7を形成する。ロンチグラム画像7は画像取得装置8により取得され、ロンチグラムのフーリエ変換図形を解析し収差を計算するための画像解析装置10においてロンチグラムのフーリエ変換図形中に見られる図形の位置及び形状を用いて、対物レンズ系の収差特性（例えば、焦点や非点）が解析される。

[0028] 解析結果は、画像表示装置11において表示され、又は解析結果に基づき

制御装置 9 で電子顕微鏡の収差補正手段 3 の動作条件、偏向手段 4 の動作条件、又は対物レンズ 5 の動作条件を所望の条件に自動的に変化させる。所望の条件とは、例えば、試料上に極微小電子線プローブを形成して高い空間分解能を得るために、非点や焦点はずれ量をゼロ近傍にするなどの条件であり、そのために対物レンズのレンズ電流値や収差補正装置の設定等が変更される。

[0029] 図 2 は、本発明の実施形態の一例である。試料は結晶性試料であり、試料を透過した電子は結晶の有する周期性により回折を起こす。図 2 の左図に示すロンチグラムの模式図 1 2 a には、結晶性試料により回折を起こした電子が干渉した干渉縞 1 2 b が観察される。この干渉縞 1 2 b の間隔は対物レンズ系の収差特性によって決定される。2 回非点、コマ収差、3 回非点、球面収差及びそれよりも高次の収差（例えば、4 回非点や、5 次球面収差など）が全く無い理想的なレンズの場合には、干渉縞には歪みが無く、格子状となる。

[0030] 一方、焦点以外の収差がある場合には、干渉縞が歪む。したがって、この歪みを詳細に解析すれば原理的には収差の知見が得られるはずである。しかし、ロンチグラム図形が複雑であるために、ロンチグラム中の干渉縞の間隔や歪みを定量的に取り扱うことは技術的に困難であった。また、ロンチグラムのフーリエ変換図形を収差特性の計測に用いられることは、これまでなかった。

[0031] 本発明は、ロンチグラムの少なくとも一部のフーリエ変換図形の、構成要素の相対距離又は／及び形状が、前記対物レンズ系収差特性により変化することを用いて対物レンズ系収差特性を計測することを特徴とする。

ロンチグラムのフーリエ変換図形においては、図 2 から図 8 に示すように、原点周辺に規則的に散乱する構成要素の散乱具合とその構成要素の形状が、対物レンズ系収差特性によって様々に異なるのである。

従来手法がロンチグラムを観察対象としていたの比べると、本発明では、ロンチグラムのフーリエ変換図形を計算する点で全く異なっている。フー

リエ変換図形の形状は、対物レンズ系収差特性により変化する。本発明ではロンチグラムのフーリエ変換図形中に見られる図形の位置及び形状を用いて、対物レンズ系の収差特性を解析する。ロンチグラム全体のフーリエ変換図形には、図2の右図に示すロンチグラムのフーリエ変換図形の模式図13aにあるように、各ブラッグ回折の干渉縞に対応する離散状図形のくさび形図形13bが観察される。ここにおいて模式図13aの中心は原点13cであり、この原点13cはロンチグラムに含まれる周波数成分が0であることを意味する。焦点以外の収差が無い場合、ロンチグラム全体には歪みがないことから、電子回折図形と同様のスポット（点）として観察される。一方、収差が顕著な場合には、干渉縞の間隔がロンチグラム中の位置によって変化するため、離散状図形は点ではなく、くさび形図形13bとして観察される。このくさび形図形13bはロンチグラムにおける対物レンズ系の収差の影響を、効率的に抽出している。

[0032] 離散状図形の形状が、点ではなくくさび形図形13bになっていることから、収差の有無が判別できる。くさび形図形13bの形状が点になるように球面収差補正装置中のレンズ電流を変化させることにより、球面収差の補正装置の動作条件を最適化できる。また、このくさび形図形13bの位置の対称性から、2回及び3回の非点収差を計測できる。さらに、このくさび形図形13bの中心からの距離から、焦点などを計測できる。また、くさび形図形13bの個々の形状について、中心に対する対称性からコマ収差が計測できる。このようにロンチグラム全体のフーリエ変換図形中に見られるくさび形図形13bの位置及び形状から、焦点、コマ収差、非点、および球面収差などの対物レンズ系の収差特性が解析できる。

[0033] なお、図2においては、ロンチグラム全体よりフーリエ変換を行ったが、ロンチグラム中心のみをフーリエ変換することにより、くさび形図形13bの大きさが小さくなり、離散状図形の位置の検出がしやすくなり、収差特性を解析し易くすることも可能である。

[0034] 図3は、本発明の実施形態の一例である。図3の左図はロンチグラムの一

例 1 4 a（観察写真）、図 3 の右図はそのフーリエ変換図形の一例 1 5 a（観察写真）を示している。ロンチグラムの一例 1 4 a として SrTiO_3 試料を用いて、結晶構造における C 軸に沿って電子線を入射した（以下 C 軸入射と呼ぶ）結果を示している。多くのブラッグ回折を起こした結果、多方向に干渉縞 1 4 b が現れている。

[0035] 図 3 の右図に示すこのロンチグラムのフーリエ変換図形の一例 1 5 a には、図 2 の右図に示すロンチグラムのフーリエ変換図形の模式図 1 3 a で示したように、くさび形の図形が離散状図形の一例 1 5 b として観察される。ロンチグラムのフーリエ変換図形の一例 1 5 a の中心は原点 1 5 c である。くさび形の離散状図形の一例 1 5 b に付けられている数字（例えば、1 1 0, 2 0 0 など）は、ブラッグ回折の指数である。

[0036] くさび形の離散状図形の位置及び形状から焦点、コマ収差、球面収差や非点収差の値を知ることができる。例えば、コマ収差、非点収差が無視し得るとすると、ブラッグ回折の指数 $h k l$ のくさび形図形の、中心からの距離 $P_{h k l}$ は、次の式（1）で表される。

$$[0037] \quad P_{h k l} = (z + 4 C_s \theta_{h k l}^2) / d_{h k l} \quad (1)$$

ただし、 z は焦点、 C_s は球面収差係数、 $d_{h k l}$ 及び $\theta_{h k l}$ は指数 $h k l$ の各ブラッグ回折の面間隔とブラッグ回折角である。

[0038] 式（1）において、対物レンズ系の収差特性の変数は、焦点 z と球面収差係数 C_s との 2 つである。一方、他のパラメータ（ $P_{h k l}$ 、 $\theta_{h k l}$ 、 $d_{h k l}$ ）はブラッグ回折の指数 $h k l$ と結晶構造により一義的に決まる。したがって、2 つ以上の異なる指数 $h k l$ について、中心からの距離 $P_{h k l}$ と面間隔 $d_{h k l}$ 及びブラッグ回折角 $\theta_{h k l}$ が分かれば、対物レンズの収差特性である焦点 z や球面収差係数 C_s が解析的に求められる。

[0039] 以上の議論では、非点収差等の収差は省略したが、それらの非点の影響は、式（1）からのずれとして検出できる。また、図 3 に見られる 2 2 0 や 3 1 0 などのより多くの離散状図形の位置を用いれば、より精度良く収差が求められる。

[0040] 図4は、本発明の実施形態の一つで、2枚のロンチグラムのフーリエ変換図形を用いて、焦点の変化を検出した例である。図4の右図と左図に、焦点の値を変えた2つの収差特性条件下の、ロンチグラムのフーリエ変換図形（16及び17）を示した。試料は SrTiO_3 試料で、C軸入射である。焦点の値を変えたことにより、矢印で示すように、離散状図形の位置が変化している。

[0041] 焦点の値を変えた後のフーリエ変換図形17では、離散状図形は全て中心に近づいている。最適焦点条件、すなわち、STEMでもっとも重要なプローブ径が最小になる条件では、離散状図形が中心一点に集まるため、この2枚の条件から焦点（試料に対する入射電子の焦点位置）を最適な値にするための条件が容易に求められる。

[0042] 図5は、本発明の実施形態の一つで、2枚のロンチグラムのフーリエ変換図形を用いて、2回非点の変化を検出した例である。図5の右図と左図は、2回の非点の向き及び大きさを変えた2つの収差特性条件下の、ロンチグラムのフーリエ変換図形（18及び19）である。試料は SrTiO_3 試料であり、C軸入射である。非点の向き及び大きさを変えたことにより離散状図形の位置が矢印で示す方向に変化している。

[0043] 焦点を除く収差がゼロとなる条件では、離散状図形は、電子回折図形と基本的に等しくなる。したがって、図5の右図に示したように、フーリエ変換図形19の離散状図形の位置における歪みの方向と歪み量から、非点の方向および大きさを知ることができ、この場合には、指数020方向に非点が残存していることが分かる。また、この歪みが無くなるように収差補正装置を用いて非点補正を行うこともできる。

[0044] 図6は、本発明の実施形態の一つで、ロンチグラムの複数の部分からのフーリエ変換図形を用いて、3回非点の有無を検出した例である。ここでは、計算により求めた3回非点を有するロンチグラム20で説明する。計算に用いた結晶はダイヤモンド構造を有するシリコンであり、電子顕微鏡の断面観察で一般的に用いられる結晶の110方向を電子線の入射方向としている。

焦点と3回非点以外の収差は0としている。

[0045] フーリエ変換する位置を図6のようにA、B及びCと変えていくにしたがって、破線の楕円で示したように、フーリエ変換図形(21, 22及び23)は歪む方向が変化していることが分かる。これを用いて3回の非点を検出することができる。すなわち、ロンチグラムの異なる複数部分場所のフーリエ変換図形において、離散状図形の位置の歪みの方向の差異から、収差特性の一つである3回の非点を求められる。また、図6で示したダイヤモンド構造の110方向からの観察のように、結晶が4回対称などの特定の対称性を有していなくても、本発明が適用可能であることが分かる。

[0046] 図7は、本発明の実施形態の一つで、非晶質試料を用いて、ロンチグラム24の複数の部分からのフーリエ変換図形を用いて、収差特性を検出した例である。フーリエ変換する位置をD、E及びFと変えていくにしたがって、破線円及び楕円で示したように、フーリエ変換図形(25, 26及び27)の歪む方向が変化するなどの、歪みの有無又は歪みの方向の差異を示していることが分かる。非点がない場合、フーリエ変換をする位置(例えばE)の、中心からの方位角を ϕ_r とすると、ロンチグラムのフーリエ変換図形26において楕円で示した歪みの角度 ϕ_f は、方位角 ϕ_r と同じになる。一方、非点がある場合には、 ϕ_r と ϕ_f とが一致しない。例えば2回非点がある場合には、歪みの角度 ϕ_f には ϕ_r の2倍に比例する成分が含まれる。これを用いて非点の方向と大きさを検出することができる。

[0047] 本発明の方法は、結晶性試料でも非晶質試料でも適用可能であり、それらが混在している試料でも適用することができる。また、本発明において、収差補正手段は、2回又は3回の非点を補正する機能のみを有したもので、多極子レンズ等を用いた球面収差及びそれ以外の高次の収差特性(例えば、4回非点や5次の球面収差)を補正する機能を有したもので、それ以外の収差補正機能を有したもので可能である。

[0048] 図8は本発明の実施形態の一つで、球面収差の有無を検出した例である。球面収差係数 C_s が0.5mmの場合の、ロンチグラムのフーリエ変換図形

28において見られる、離散状図形の形状31は、球面収差が小さくなるにしたがって、小さくなる。例えば球面収差係数 C_s が0.05mmの場合の、ロンチグラムのフーリエ変換図形29においては、離散状図形の形状31は小さいがまだ確認できる。離散状図形の形状31がほぼ点と見なせるのは、球面収差係数 C_s が0.005mmの場合である。球面収差補正装置では、残存球面収差を0.05mm程度にする場合が多く、本手法により、球面収差補正装置で要求される、残収差検出感度を有していることが確認できる。

[0049] 図9は本発明の実施形態の一つで、画像解析装置により、収差の一つである焦点を自動的に調整する手順を示したフローチャートである。まず、ロンチグラムのフーリエ変換図形に見られる離散状図形から任意の離散状図形Aを選択し、その原点からの距離 P_1 を計測して求める。次に、対物レンズの焦点をわずかに DF だけ（例えば、500nm程度）変更する。次に、前記離散状図形A中の原点15c（図3参照）からの距離を再度計測しその値を P_2 とする。これらの結果に基づき、例えば、対物レンズの焦点を $DF \times P_2 / (P_1 - P_2)$ だけ変更させることにより、自動的に焦点を0とすることができる。ここでは、一例として焦点を自動調整する方法を示したが、焦点に限らず他の収差係数も自動調整することが可能である。

[0050] 図10は本発明による電子顕微鏡の動作手順を、図1に示す実施形態に基づいて示す概念図である。本発明ではまず対物レンズ系を用いて、電子を試料に照射する。次に、画像取得装置8を用いてロンチグラム9を計測する。次に、画像解析装置10を用いて、画像を解析する。

画像解析装置10での画像解析では、まずロンチグラム9のフーリエ変換図形を計算し、例えば、離散状図形13bの原点13c（図2参照）からの距離と形状を計測する。次に、前記の式1等に基づき C_s 及び z 等の収差を計測して求める。解析結果は画像表示装置11を用いて表示される。画像解析結果が所望の値でない場合には、制御装置9を用いて対物レンズ系の動作条件を変化させ、上記の動作手順を繰り返す。以上のように動作させること

により、本発明による電子顕微鏡の機能が実現される。

図面の簡単な説明

[0051] [図1] 本発明の実施の形態を示す概念図である。

[図2] 本発明による収差特性の計測方法を示す模式図である。

[図3] 本発明による収差特性の計測方法を示す図面代用写真である。

[図4] 本発明による収差特性の計測方法を示す図面代用写真である。

[図5] 本発明による収差特性の計測方法を示す図面代用写真である。

[図6] 本発明による収差特性の計測方法を示す図面代用写真である。

[図7] 本発明による収差特性の計測方法を示す図面代用写真である。

[図8] 本発明による収差特性の計測方法を示す図面代用写真である。

[図9] 本発明による収差特性の計測方法を示す概念図である。

[図10] 本発明による電子顕微鏡の動作手順を示す概念図である。

符号の説明

[0052] 1…電子銃

2 a…入射電子

2 b…透過電子

3…収差補正手段

4…偏向手段

5…対物レンズ

6…試料

7…ロンチグラム画像

8…画像取得装置

9…制御装置

10…画像解析装置

11…画像表示装置

12 a…ロンチグラムの模式図

12 b…干渉縞

13 a…ロンチグラムのフーリエ変換図形の模式図

- 1 3 b…離散状図形のくさび形図形
- 1 3 c…ロンチグラムのフーリエ変換図形の原点
- 1 4 a…ロンチグラムの一例
- 1 4 b…干渉縞の一例
- 1 5 a…ロンチグラムのフーリエ変換図形の一例
- 1 5 b…離散状図形の一例
- 1 5 c…ロンチグラムのフーリエ変換図形の原点
- 1 6…焦点を変える前のロンチグラムのフーリエ変換図形の一例
- 1 7…焦点を変えた後のロンチグラムのフーリエ変換図形の一例
- 1 8…2回の非点を変える前のロンチグラムのフーリエ変換図形の一例
- 1 9…2回の非点を変えた後のロンチグラムのフーリエ変換図形の一例
- 2 0…3回の非点を含んだロンチグラム
- 2 1…ロンチグラム20の一部分（A）から取得したフーリエ変換図形の一例
- 2 2…ロンチグラム20の一部分（B）から取得したフーリエ変換図形の一例
- 2 3…ロンチグラム20の一部分（C）から取得したフーリエ変換図形の一例
- 2 4…非晶質試料のロンチグラム
- 2 5…ロンチグラム24の一部分（D）から取得したフーリエ変換図形の一例
- 2 6…ロンチグラム24の一部分（E）から取得したフーリエ変換図形の一例
- 2 7…ロンチグラム24の一部分（F）から取得したフーリエ変換図形の一例
- 2 8…球面収差係数 C_s が0.5 mmの場合の、ロンチグラムのフーリエ変換図形の一例
- 2 9…球面収差係数 C_s が0.05 mmの場合の、ロンチグラムのフーリエ

変換図形の一例

3 0...球面収差係数 C_s が 0. 0 0 5 mm の場合の、ロンチグラムのフーリ

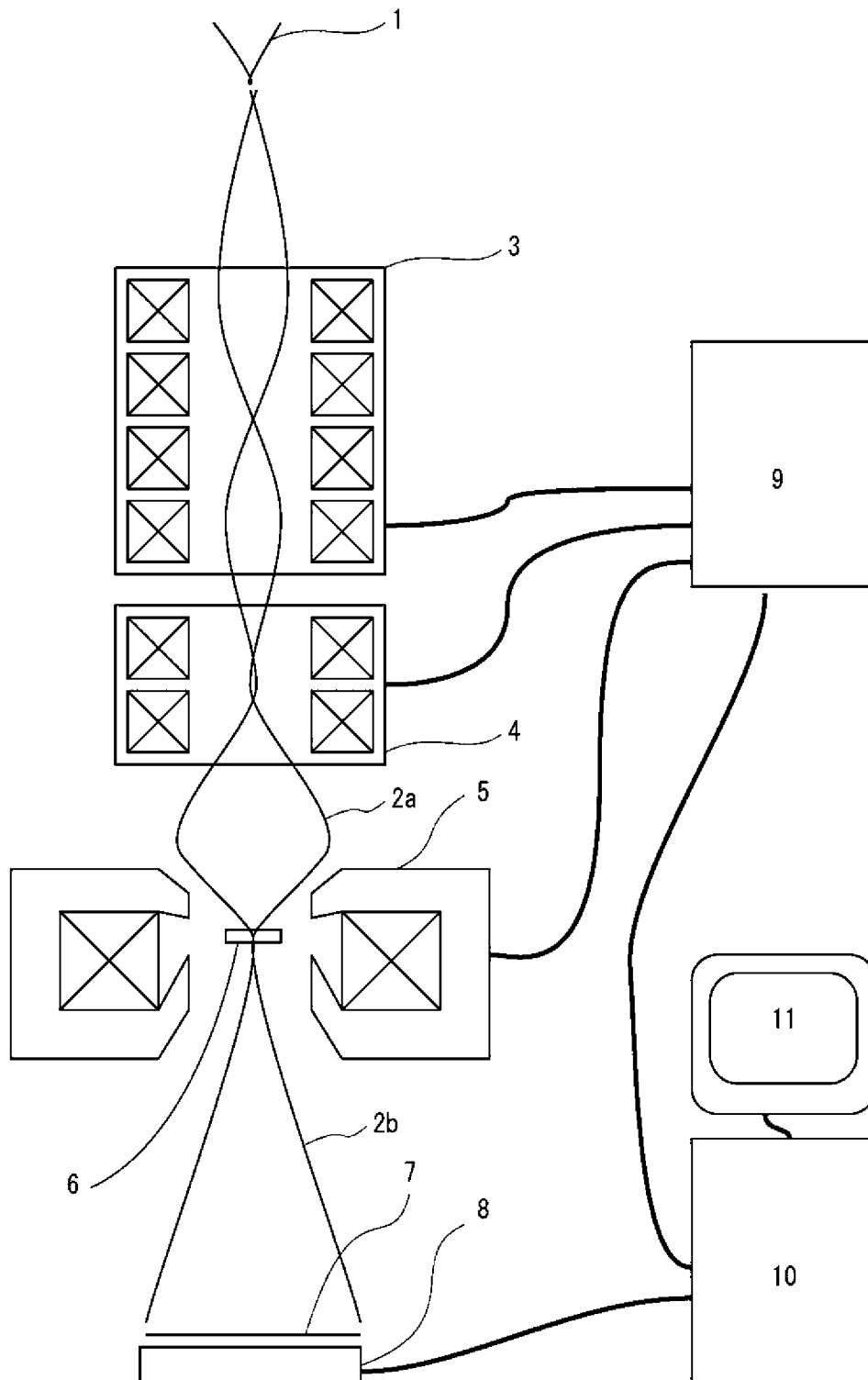
エ変換図形の一例

3 1...離散状図形の形状

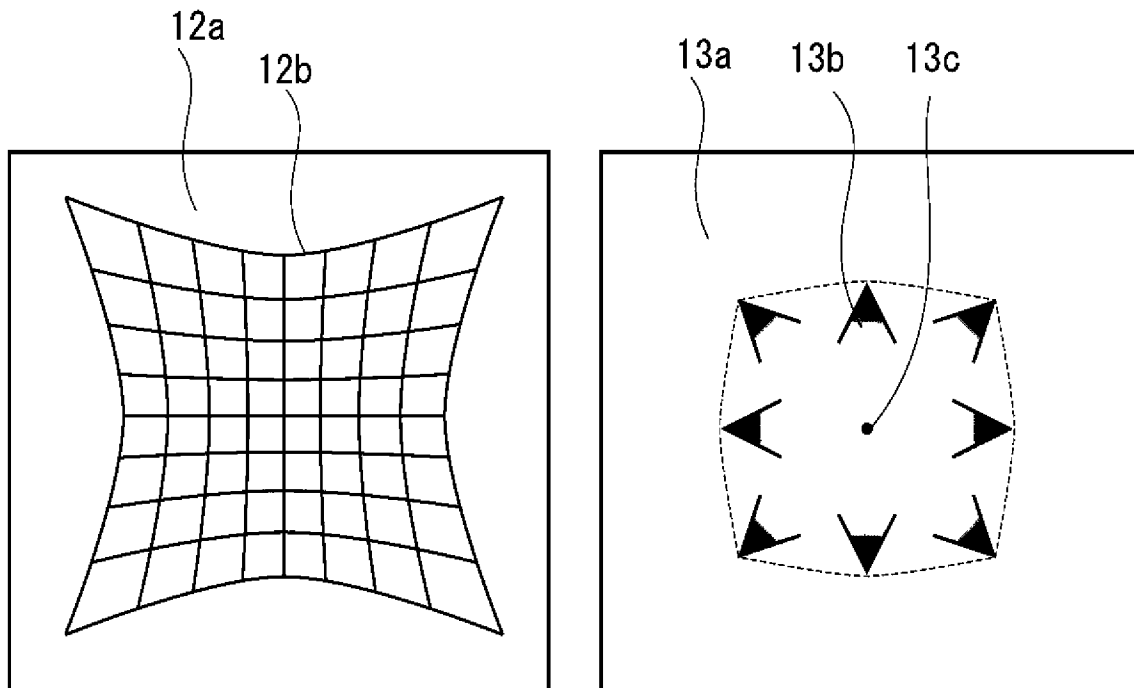
請求の範囲

- [1] 試料の近傍に電子を収束する対物レンズ系を有し、前記電子を前記試料に透過させてロンチグラムを得る電子顕微鏡の対物レンズ系収差特性の計測方法であって、前記ロンチグラムの少なくとも一部のフーリエ変換図形の、構成要素の相対距離又は／及び形状が、前記対物レンズ系収差特性により変化することを用いて該対物レンズ系収差特性を計測することを特徴とする、電子顕微鏡の対物レンズ系収差特性の計測方法。
- [2] 請求項 1 に記載の電子顕微鏡の対物レンズ系収差特性の計測方法において、フーリエ変換するのは、前記ロンチグラム全体であることを特徴とする、電子顕微鏡の対物レンズ系収差特性の計測方法。
- [3] 請求項 1 から 2 の何れかに記載の電子顕微鏡の対物レンズ系収差特性の計測方法において、フーリエ変換するのは、前記ロンチグラムの異なる複数部分であって、得られた複数の前記フーリエ変換図形の、構成要素の相対距離又は／及び形状における相対差により、前記対物レンズ系収差特性を計測することを特徴とする、電子顕微鏡の対物レンズ系収差特性の計測方法。
- [4] 請求項 1 から 3 の何れかに記載の電子顕微鏡の対物レンズ系収差特性の計測方法であって、動作条件の異なる対物レンズ系から得られた複数のロンチグラムのフーリエ変換図形の、構成要素の相対距離又は／及び形状の相対差により、前記対物レンズ系の収差特性を計測することを特徴とする、電子顕微鏡の対物レンズ系収差特性の計測方法。
- [5] 請求項 1 から 4 の何れかに記載の対物レンズ系収差特性の計測方法に基づき、得られた収差特性の結果を表示する機能及び／又は手段を有することを特徴とする、電子顕微鏡。
- [6] 請求項 1 から 4 の何れかに記載の対物レンズ系収差特性の計測方法に基づき、得られた収差特性を用いて、前記対物レンズ系の収差補正装置の設定を変更させる機能及び／又は手段を有することを特徴とする、電子顕微鏡。

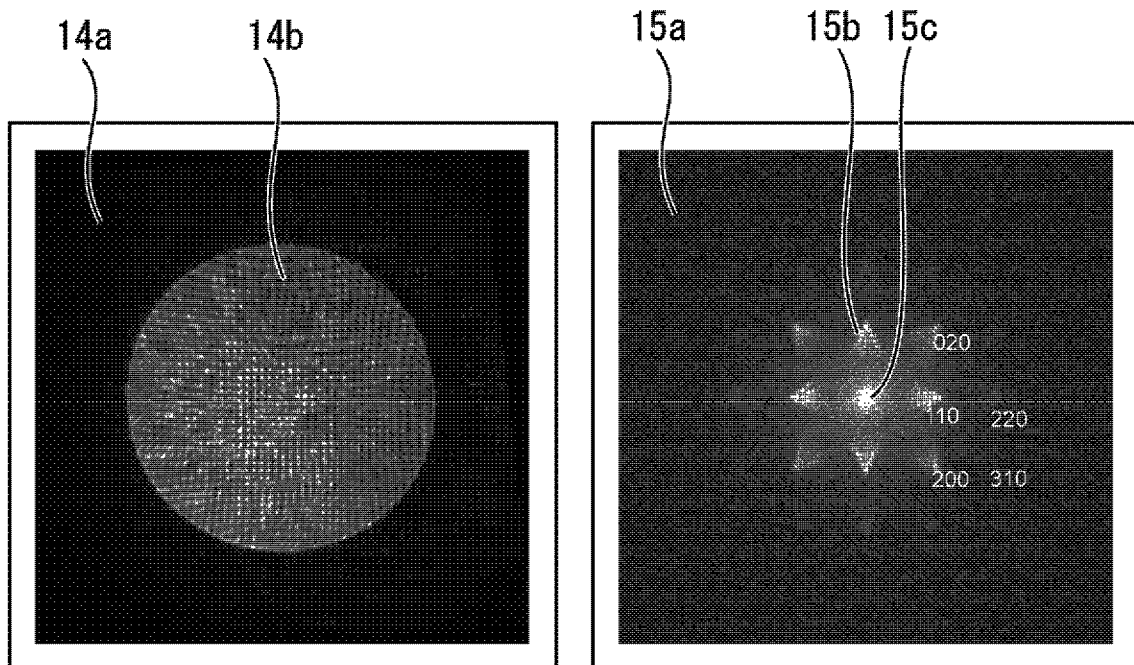
[図1]



[図2]

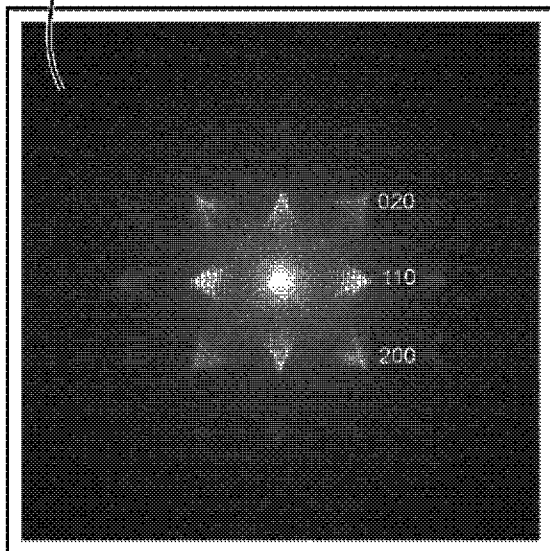


[図3]

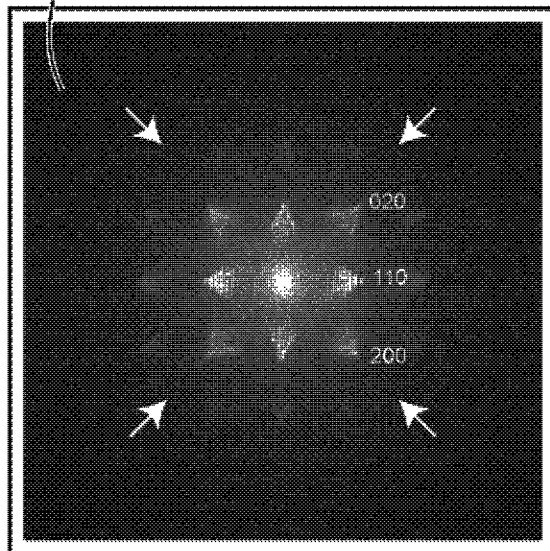


[図4]

16

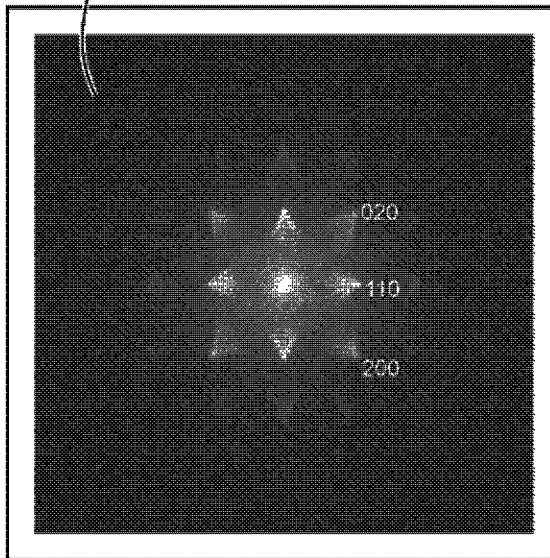


17

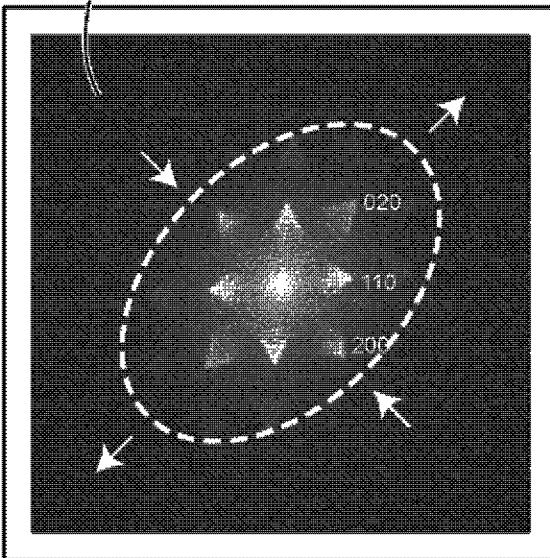


[図5]

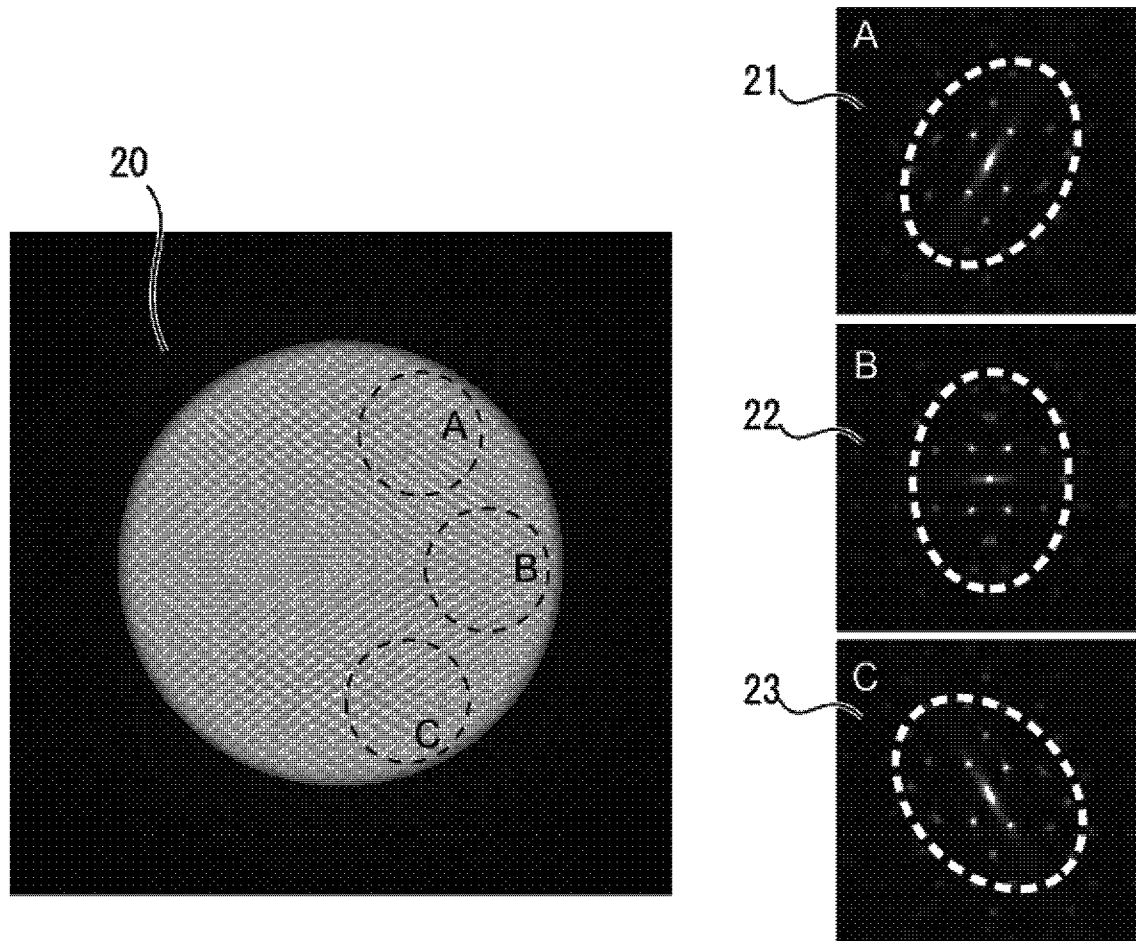
18



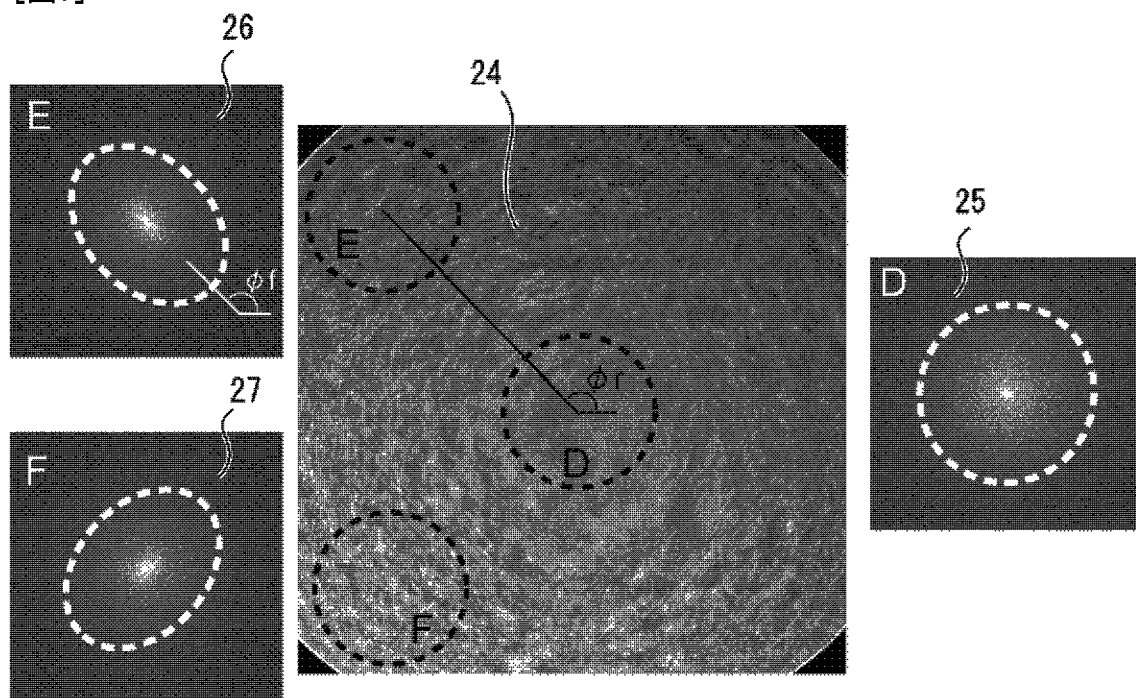
19



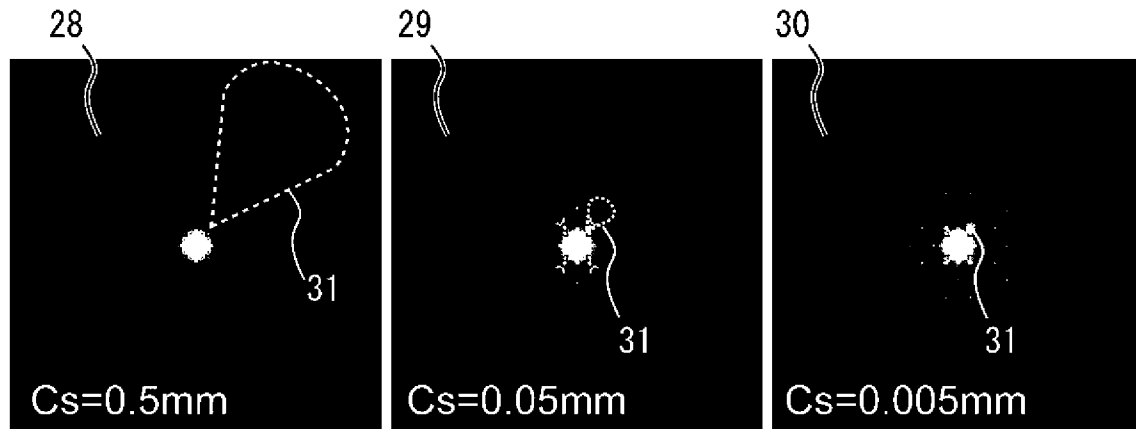
[図6]



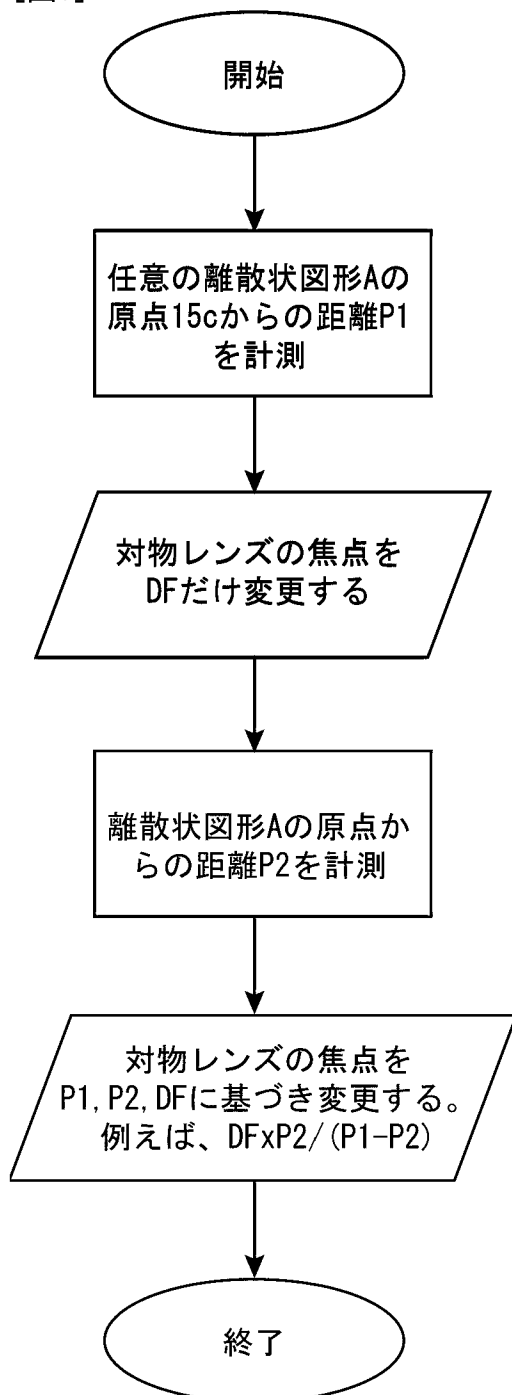
[図7]



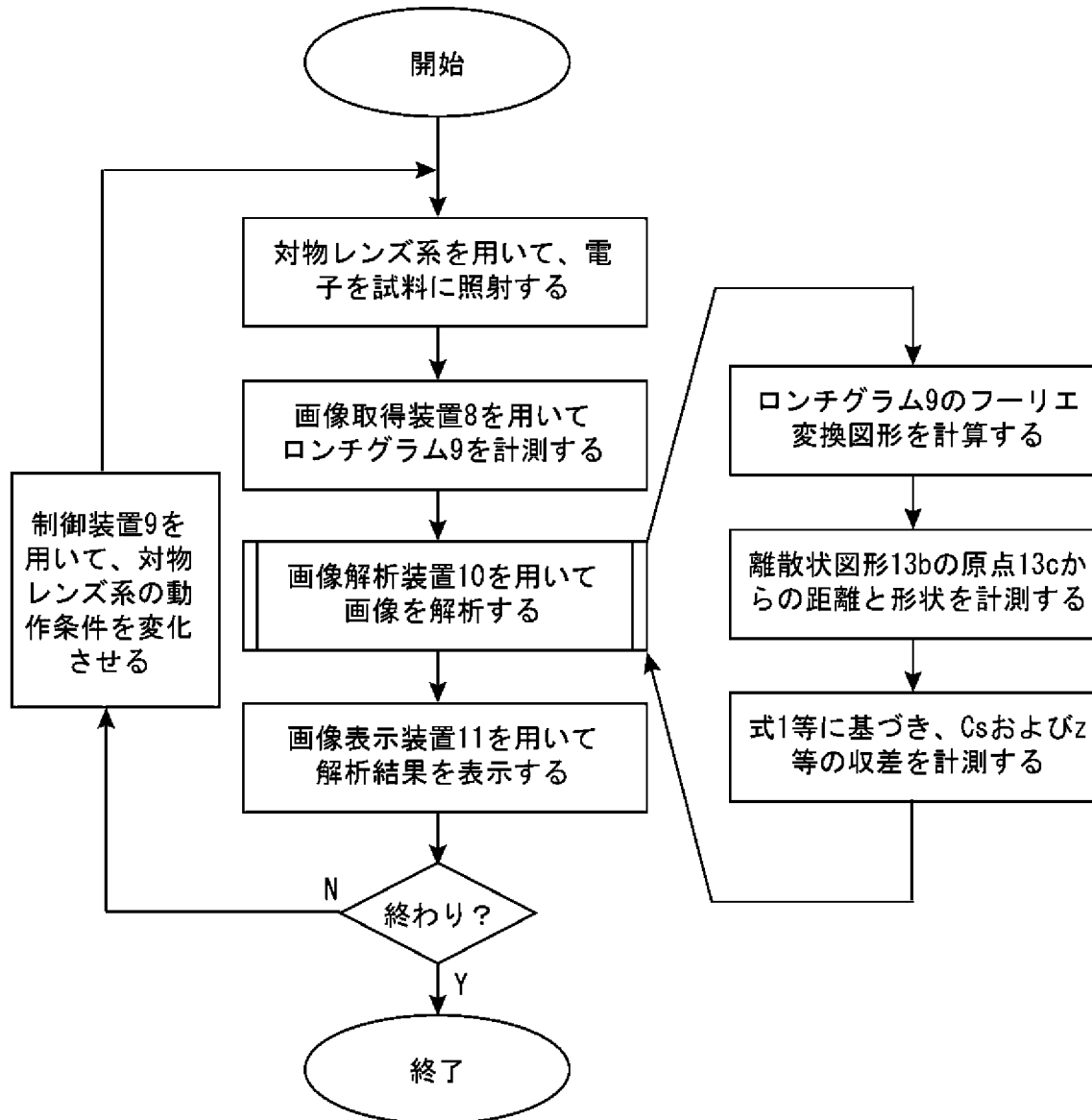
[図8]



[図9]



[図10]



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2007/000455

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

H01J37/153(2006.01) i, H01J37/28(2006.01) i

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

H01J37/153, H01J37/28

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Jitsuyo Shinan Koho	1922-1996	Jitsuyo Shinan Toroku Koho	1996-2007
Kokai Jitsuyo Shinan Koho	1971-2007	Toroku Jitsuyo Shinan Koho	1994-2007

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X Y A	JP 2003-521801 A (CEOS Corrected Electron Optical Systems GmbH.), 15 July, 2003 (15.07.03), Full text & US 2003/0001102 A & DE 010003127 A	1-2, 4 5-6 3
Y	JP 63-43251 A (Hamamatsu Photonics Kabushiki Kaisha), 24 February, 1988 (24.02.88), Page 3, upper left column, line 10 to page 4, lower left column, line 19; Figs. 1 to 2 & US 2004/0031921 A	5-6

☐ Further documents are listed in the continuation of Box C.

☐ See patent family annex.

* Special categories of cited documents:

"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance

"E" earlier application or patent but published on or after the international filing date

"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)

"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means

"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention

"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone

"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art

"&" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search
05 June, 2007 (05.06.07)

Date of mailing of the international search report
19 June, 2007 (19.06.07)

Name and mailing address of the ISA/
Japanese Patent Office

Authorized officer

Facsimile No.

Telephone No.

A. 発明の属する分野の分類（国際特許分類（I P C））
Int.Cl. H01J37/153(2006.01)i, H01J37/28(2006.01)i

B. 調査を行った分野

調査を行った最小限資料（国際特許分類（I P C））

Int.Cl. H01J37/153, H01J37/28

最小限資料以外の資料で調査を行った分野に含まれるもの

日本国実用新案公報	1922-1996年
日本国公開実用新案公報	1971-2007年
日本国実用新案登録公報	1996-2007年
日本国登録実用新案公報	1994-2007年

国際調査で使用した電子データベース（データベースの名称、調査に使用した用語）

C. 関連すると認められる文献

引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求の範囲の番号
X Y A	JP 2003-521801 A（ツェーエーオーエス コレクテッド エレクト ロン オプチカル システムズ ゲーエムベアー） 2003.07.15, 全文 & US 2003/0001102 A & DE 010003127 A	1-2, 4 5-6 3
Y	JP 63-43251 A（浜松ホトニクス株式会社） 1988.02.24, 第3頁左上 欄10行-第4頁左下欄19行、第1-2図 & US 2004/0031921 A	5-6

☐ C欄の続きにも文献が列挙されている。

☐ パテントファミリーに関する別紙を参照。

* 引用文献のカテゴリー

「A」特に関連のある文献ではなく、一般的技術水準を示すもの
「E」国際出願日前の出願または特許であるが、国際出願日以後に公表されたもの
「L」優先権主張に疑義を提起する文献又は他の文献の発行日若しくは他の特別な理由を確立するために引用する文献（理由を付す）
「O」口頭による開示、使用、展示等に言及する文献
「P」国際出願日前で、かつ優先権の主張の基礎となる出願

の日の後に公表された文献

「T」国際出願日又は優先日後に公表された文献であって出願と矛盾するものではなく、発明の原理又は理論の理解のために引用するもの
「X」特に関連のある文献であって、当該文献のみで発明の新規性又は進歩性がないと考えられるもの
「Y」特に関連のある文献であって、当該文献と他の1以上の文献との、当業者にとって自明である組合せによって進歩性がないと考えられるもの
「&」同一パテントファミリー文献

国際調査を完了した日

05.06.2007

国際調査報告の発送日

19.06.2007

国際調査機関の名称及びあて先

日本国特許庁（I S A/J P）
郵便番号100-8915
東京都千代田区霞が関三丁目4番3号

特許庁審査官（権限のある職員）

遠藤 直恵

電話番号 03-3581-1101 内線 3273

21

3701