

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特 許 公 報(B2)

(11) 特許番号

特許第6163063号  
(P6163063)

(45) 発行日 平成29年7月12日(2017.7.12)

(24) 登録日 平成29年6月23日(2017.6.23)

(51) Int.Cl.	F I
HO 1 J 37/153 (2006.01)	HO 1 J 37/153 A
HO 1 J 37/28 (2006.01)	HO 1 J 37/28 C

請求項の数 15 (全 21 頁)

(21) 出願番号	特願2013-190966 (P2013-190966)	(73) 特許権者	501387839
(22) 出願日	平成25年9月13日(2013.9.13)		株式会社日立ハイテクノロジーズ
(65) 公開番号	特開2015-56376 (P2015-56376A)		東京都港区西新橋一丁目2 4 番 1 4 号
(43) 公開日	平成27年3月23日(2015.3.23)	(74) 代理人	100091096
審査請求日	平成28年2月25日(2016.2.25)		弁理士 平木 祐輔
		(74) 代理人	100105463
			弁理士 関谷 三男
		(74) 代理人	100102576
			弁理士 渡辺 敏章
		(72) 発明者	吉田 高穂
			東京都千代田区丸の内一丁目6番6号 株 式会社日立製作所内
		審査官	山口 敦司

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 走査透過電子顕微鏡及びその収差測定方法

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項 1】

電子ビームを発生する電子源と、  
前記電子ビームを所定のエネルギーに加速する加速手段と、  
加速された前記電子ビームを収束させるレンズ又はレンズ群と、  
前記レンズ又はレンズ群の下流側に配置された観察試料の面上に電子プローブを結像する対物レンズと、  
前記電子プローブを前記観察試料の表面方向に規定範囲内で二次元走査する走査系と、  
前記観察試料を透過した電子を検出し、ロンチグラムを取得するイメージング部と、  
前記イメージング部と同期動作する制御部であって、1枚のロンチグラムの取得中に、  
前記観察試料の表面又はその近傍に結像される前記電子プローブの焦点と前記観察試料の高さの関係を微小に変動させる制御部と  
を有する走査透過電子顕微鏡。

10

【請求項 2】

請求項 1 に記載の走査透過電子顕微鏡において、  
前記制御部は、前記対物レンズの励磁電流を微小に変動させることにより、前記高さの関係を微小に変動させることを特徴とする走査透過電子顕微鏡。

【請求項 3】

請求項 1 に記載の走査透過電子顕微鏡において、  
前記制御部は、前記観察試料を保持するホルダの取り付け高さを微小に変動させること

20

により、前記高さの関係を微小に変動させることを特徴とする走査透過電子顕微鏡。

【請求項 4】

請求項 1 に記載の走査透過電子顕微鏡において、

前記制御部は、前記対物レンズとは別の焦点調整用レンズの励起を微小に変動させることにより、前記高さの関係を微小に変動させることを特徴とする走査透過電子顕微鏡。

【請求項 5】

請求項 1 に記載の走査透過電子顕微鏡において、

1 回以上の周期の焦点変動と同期して取得された前記 1 枚のロンチグラムから測定される収差情報に基づいて、前記対物レンズを含む電子プローブ結像系の軸上収差を高次まで計算する測定部を更に有することを特徴とする走査透過電子顕微鏡。

10

【請求項 6】

請求項 5 に記載の走査透過電子顕微鏡において、

前記測定部は、前記 1 枚のロンチグラム内の複数の局所領域からそれぞれ局所伸び歪み量を測定し、これら複数の局所伸び歪み量に基づいて前記軸上収差を計算することを特徴とする走査透過電子顕微鏡。

【請求項 7】

請求項 5 に記載の走査透過電子顕微鏡において、

前記 1 枚のロンチグラム内の複数の局所領域からそれぞれ測定された局所伸び歪み量が適正長さを有しない場合、前記制御部は、前記局所伸び歪み量が適正長さを満たすように前記高さの関係を調整し、前記測定部は、前記高さの関係を調整を通じて取得された複数のロンチグラムに基づいて前記局所伸び歪み量を測定することを特徴とする走査透過電子顕微鏡。

20

【請求項 8】

請求項 5 に記載の走査透過電子顕微鏡において、

前記測定部は、前記高さの関係の第 1 の変動により取得された第 1 のロンチグラムから第 1 の領域の局所伸び歪み量を測定し、前記高さの関係の第 2 の変動により取得された第 2 のロンチグラムから第 2 の領域の局所伸び歪み量を測定することを特徴とする走査透過電子顕微鏡。

【請求項 9】

電子ビームを発生する電子源と、

前記電子ビームを所定のエネルギーに加速する加速手段と、

加速された前記電子ビームを収束させるレンズ又はレンズ群と、

前記レンズ又はレンズ群の下流側に配置された観察試料の面上に電子プローブを結像する対物レンズと、

前記電子プローブを前記観察試料の表面方向に規定範囲内で二次元走査する走査系と、

前記観察試料を透過した電子を検出し、ロンチグラムを取得するイメージング部と、

前記イメージング部と同期動作する制御部であって、1 枚のロンチグラムの取得中に、前記観察試料の表面又はその近傍に結像される前記電子プローブの焦点と前記観察試料の高さ関係を微小に変動させる制御部と、

30

前記 1 枚のロンチグラムから収差情報を測定し、前記収差情報に基づいて、前記対物レンズを含む電子プローブ結像系の軸上収差を計算する測定部と、

を有する走査透過電子顕微鏡を用いる収差測定方法であって、

制御部が、前記観察試料の表面又はその近傍に結像される前記電子プローブの焦点と前記観察試料の高さの関係を微小に変動させるステップと、

前記制御部と同期動作するイメージング部が、前記高さの関係の微小な変動による投影像の変化情報を画像内に含む 1 枚のロンチグラムを取得するステップと、

前記測定部が、前記 1 枚のロンチグラムから収差情報を測定するステップと、

を含むことを特徴とする収差測定方法。

40

【請求項 10】

請求項 9 に記載の収差測定方法において、

50

前記制御部は、前記対物レンズの励磁電流を微小に変動させることにより、前記高さの関係を微小に変動させる

ことを特徴とする収差測定方法。

【請求項 1 1】

請求項 9 に記載の収差測定方法において、

前記制御部は、前記観察試料を保持するホルダの取り付け高さを微小に変動させることにより、前記高さの関係を微小に変動させることを特徴とする収差測定方法。

【請求項 1 2】

請求項 9 に記載の収差測定方法において、

前記制御部は、前記対物レンズとは別の焦点調整用レンズの励起を微小に変動させることにより、前記高さの関係を微小に変動させることを特徴とする収差測定方法。

10

【請求項 1 3】

請求項 9 に記載の収差測定方法において、

前記測定部が、1 回以上の周期の焦点変動と同期して取得された前記 1 枚のロンチグラムから測定される収差情報に基づいて、前記対物レンズを含む電子プローブ結像系の軸上収差を高次まで計算するステップを更に含む、

ことを特徴とする収差測定方法。

【請求項 1 4】

請求項 1 3 に記載の収差測定方法において、

前記測定部は、前記 1 枚のロンチグラム内の複数の局所領域からそれぞれ局所伸び歪み量を測定し、これら複数の局所伸び歪み量に基づいて前記軸上収差を計算することを特徴とする収差測定方法。

20

【請求項 1 5】

請求項 1 3 に記載の収差測定方法において、

前記 1 枚のロンチグラム内の複数の局所領域からそれぞれ測定された局所伸び歪み量が適正長さを有しない場合、前記制御部は、前記局所伸び歪み量が適正長さを満たすように前記高さ関係を調整し、前記測定部は、前記高さ関係の調整を通じて取得された複数のロンチグラムに基づいて前記局所伸び歪み量を測定することを特徴とする収差測定方法。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

30

【0 0 0 1】

本発明は、走査透過電子顕微鏡 (STEM: Scanning Transmission Electron Microscope) の収差を精密に測定する技術に関する。

【背景技術】

【0 0 0 2】

近年、走査透過電子顕微鏡 (STEM) や透過電子顕微鏡 (TEM) においては、球面収差補正技術が実用化されている。これに伴い、以前では、電子レンズの大きな球面収差に隠れ、あまり重視されてこなかったような微小な各種の収差の影響を適切に取り扱う方法が重要となっている。例えば球面収差補正器が実用化される以前では、STEMにおいて問題となる三次以下の収差は、せいぜいデフォーカス、二回対称非点、三回対称非点の 3 収差であり、それらについてのみ評価し、または、補償の対策を講じれば良かった。

40

【0 0 0 3】

しかし、球面収差補正器が実用化されてから以後は、前記 3 収差に加え、球面収差を補正して残る 4 収差 (軸上コマ収差、スター収差、四回対称非点収差、球面収差自体) を含む計 7 収差を適切に取り扱うことが必要となった。さらに最高分解能を得るためには、より高次 (2 0 1 2 年の段階では一般的には 5 次以下) の計 1 4 個の軸上開口収差を評価し、調整または抑制する必要性がいわれている。

【表 1】

表 1 5 次以下の軸上レンズ収差の次数と対称性

		対 称 性						
		0回 (回転対称)	1回	2回	3回	4回	5回	6回
次 数	1次	$C_1$ : デフォーカス		$A_1$ : 二回対称 非点				
	2次		$B_2$ : 三回対称 非点		$A_2$ : 三回対称 非点			
	3次	$C_3$ : 3次球面		$S_3$ : 3次スタ ー		$A_3$ : 四回対称 非点		
	4次		$B_5$ : 三回対称 非点		$D_4$ : トリロー ブ		$A_4$ : 五回対称 非点	
	5次	$C_5$ : 5次球面		$S_5$ : 5次スタ ー		$R_5$ : ロゼッタ		$A_5$ : 六回対称 非点

10

20

## 【0004】

以上より明らかのように、各レンズ収差の評価（すなわち、収差係数の精密測定法）は、電子顕微鏡の収差補正技術が確立される以前とは桁違いに重要性を増している。従来、収差補正STEM装置（球面収差補正器を備えるSTEM装置）においては、収差補正時の精密収差測定法として、主に、プローブタブロー法（非特許文献1）が用いられてきた。この方法は、電子線の入射角度を可変して（複数の入射角度により）適宜なデフォーカスを与えた状態のSTEM像を複数撮影し、次に、垂直入射正焦点時のSTEM像（収差が十分少ないSTEM像と仮定）を参照像としてデコンボリューション演算を実行して各電子線入射角度での収差による電子プローブの歪みを推定し、これらの推定結果から軸上収差を算出する方法である。

30

## 【0005】

推定されるプローブ形状からは、元のSTEM像を撮影した入射角度におけるデフォーカス  $C_1$  ( ) と二回対称非点収差  $A_1$  ( ) を求めることができるので、これら2つの収差を複数の入射角度について測定し、後述する軸上収差と傾斜収差の関係式から多元連立方程式を立て、結果的に表1に列記した各軸上収差の係数を算出する。ここで、各々の収差係数に付された は、電子線の入射角度の指定を示している。表1に示す各収差のうち非回転対称収差（すなわち対称性が1～6回の列にある収差）には大きさとは方位の2つのパラメータがあり、表1の軸上収差を求めるためには25個の未定数を決定しなければならない。すなわち、少なくとも未定数と同数の独立な連立方程式を立てる必要がある。

40

## 【0006】

プローブタブロー法においては、1つの電子線の入射角度に対して  $C_1$  ( ) の大きさ、  $A_1$  ( ) の大きさと方位の計3つの方程式を得ることができるので、最低9つの入射角度を用いてこれらを測定できれば、五次までの軸上収差を求めることができる。実際の例では、統計的に測定精度を上げるために、17～25個の入射角度で各々適宜なアンダーフォーカスとオーバーフォーカスでSTEM像を撮影して  $C_1$  ( ) と  $A_1$  ( ) を決め、軸上収差を算出する。

## 【0007】

すなわち、参照像とする垂直入射正焦点での1枚を加え、35枚以上のSTEM像を撮影して収差測定を実行することになり、非常に煩雑で時間もかかる測定となる。このような収

50

差測定法は、STEM像自体又は電子プローブ形状の推定過程で発生する誤差だけでなくSTEM像撮影中の経時的変化によっても、算出される軸上収差係数に誤差を含み易い問題がある。

【0008】

一方、近年では、プローブタプロー法と異なる原理の収差測定法として、投影像（ロンチグラム）を用いる収差測定法（例えば特許文献1、特許文献2）が開発実用化されている。ロンチグラムの詳細については後述するが、ロンチグラム自体は収差で歪んだ電子プローブによる試料の投影図形であり、その図形には収差に関する情報が含まれる。

【0009】

さらに、十分に大きな収束角度の電子線を用いてロンチグラムを撮像すれば、その収束角度内の入射電子線に関する収差情報がロンチグラムの対応箇所に投影されることになる。このため、前述のプローブタプロー法とは異なり、ロンチグラムの局所領域毎にこれら収差情報を引き出すことで、原理的には1つのロンチグラムから軸上収差を計算することも可能である。統計的に測定精度を向上させる目的での繰り返しを含め、数条件のロンチグラムから軸上収差を算出することができる。ただし、収差を含んだロンチグラムは、複雑な歪みを持った非定形画像となる。よって、非定形画像から収差情報を抽出するには、適切な画像処理と演算が必須となる。

【0010】

例えば特許文献1においては、得られたロンチグラムを適当なサイズかつ必要な数の格子に分割し、各格子内の像ひずみと当該格子画像の自己相関を取り、自己相関により得られたパターンを楕円関数等でフィッティングすることにより定量化する。フィッティングで得られた楕円関数を決めるパラメータは、同文献内の式3、式4、式5を用いて格子内の局所収差情報と結びつけられ、さらに各格子から式2で得られる連立方程式を立て、軸上収差係数を算出する。

【0011】

この場合、格子の数が軸上収差の算出に必要な連立方程式を成立させるに十分であることは勿論だが、各格子のサイズも当該領域の局所収差情報を取り出すために適切な大きさでなければならない。格子で区分された各領域の自己相関から得られるのは領域内で平均化された歪み情報になるので、なるべく当該局所に対応する歪み情報を知るには格子のサイズは小さい方がよい。一方で、格子サイズが小さすぎると、正しく歪み情報を反映した自己相関が得られず、得られる局所収差に誤差が生じる。

【0012】

ところで、収差の状態によってロンチグラムの形状は大きく変化する。このため、格子のサイズは、収差状態に合わせて適切に選択する必要がある。ロンチグラム取得時のデフォーカスやカメラ長（ロンチグラム倍率）についても、同様の理由で収差状態に応じた注意深い選択が必要である。

【0013】

特許文献2及び特許文献3も、ロンチグラムを用いる収差測定方法を開示する。これらの文献は、光学パラメータを変えてロンチグラムの変化を測定することにより収差を測定する方法を開示する。

【0014】

このうち、特許文献2は、試料面の近傍で焦点が結ばれた電子プローブを偏向器等の電子光学的手段で微小変位させた（又は試料自体を微小変位させた）前後でロンチグラムを撮影し、これら2枚のロンチグラムを比較することで軸上収差を測定する。具体的には、特許文献1と同様、それぞれのロンチグラムを適宜複数の領域に区分し、2枚のロンチグラム間の対応領域に電子プローブの微小変位の前後で生じた局所変位を計測する。各領域の局所変位は、収差による局所倍率の変化とみなせるので、局所変位と軸上収差とを関係付ける同文献中の式1を用い、やはり各領域から連立方程式を組んで軸上収差を算出する。

【0015】

また、特許文献3中では、電子プローブを微小変位させる代わりに結像レンズの焦点を微小に変化させ、電子プローブを試料付近で上下させる前後でロンチグラムをそれぞれ取得し、これら2枚のロンチグラムを比較することで軸上収差を測定する。デフォーカスを微小変化させる前後において取得された2枚のロンチグラムの対応する複数の投影点間で変位を測定し、これを局所収差情報として軸上収差と関連付けし、前述の方法と同様に連立方程式を立てて軸上収差を算出する。

【0016】

これら特許文献2及び3に示す方法も、特許文献1の方法と同様に、局所収差情報の抽出が(ロンチグラムを領域区分する場合にはその区分方法も)適切であることに注意を要する。さらに、特許文献1の方法と異なり、異なる2枚のロンチグラム間で対応する投影点の変位を比較するので、複数の投影点で変位前後の位置を正しく結び付けを行う必要がある。一方、特許文献2及び特許文献3の方法では、特許文献1の方法と異なり、ロンチグラム内の変位量を外部で任意に制御できる電子プローブの変位とデフォーカスの量により加減できるので、これを用いて局所収差情報の抽出精度、ひいては軸上収差の測定精度の向上を図ることが可能である。

10

【先行技術文献】

【特許文献】

【0017】

【特許文献1】特許第5188846号公報

【特許文献2】米国特許第6552340号明細書

20

【特許文献3】特許第4553889号公報

【非特許文献】

【0018】

【非特許文献1】Rolf Erni “ Aberration corrected imaging in transmission electron microscopy ” (Imperial College Press,2010, ISBN-10 1-84186-836-6), p.267-276

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0019】

前述したように、従来、STEMにおいて主に用いられてきたプローブタプロー法は、電子線の入射角度を変えながら多数回の測定を繰り返す煩雑で時間を要する手順が必要であり、特に軸上収差の補正(調整)過程で用いるには、使いやすい測定法とは言い難い。

30

【0020】

一方、ロンチグラムを用いた収差測定法は、プローブタプロー法に比してより少数回の測定により(短時間で)軸上収差を与える収差係数を測定することができる。しかし、これらロンチグラムを用いる収差測定法も、前述の通り、ロンチグラムから多数の局所収差情報を抽出する画像計測工程に数々の問題を抱えている。

【課題を解決するための手段】

【0021】

上記課題を解決するため、本発明は、1枚のロンチグラムを撮像する際、試料表面又はその近傍に結像された電子プローブの焦点と試料との高さ関係を高さ方向に微小に変化させながらロンチグラムを取得する。なお、本明細書では、前述のように焦点を微小変化させながら取得するロンチグラムを、「焦点変調ロンチグラム(Focus Modulated Ronchigram)」と呼称する。

40

【発明の効果】

【0022】

本発明によれば、1枚のロンチグラム(焦点変調ロンチグラム)だけで局所的な収差情報を抽出することができる。しかも、本発明の場合、従来方式に比べ、収差情報を正確にロンチグラムから取り出すことができ、その結果、高次収差まで正確に測定することが可能となる。前述した以外の課題、構成及び効果は、以下の実施の形態の説明により明らかにされる。

50

## 【図面の簡単な説明】

【0023】

【図1】球面収差補正器を備えるSTEMの構成例を説明するための概略図。

【図2】ロンチグラムの形成原理を説明する図。

【図3】焦点変化がロンチグラムに与える影響（特に試料上の特定点に対応するロンチグラム上の投影点の変位）を説明する図。

【図4】実施例1に係るSTEMの構成例を示す図。

【図5】実施例2に係るSTEMの構成例を示す図。

【図6】実施例3に係るSTEMの構成例を示す図。

【図7】アモルファス薄膜を試料として用いる場合に得られる通常のロンチグラムと、焦点変調ロンチグラムを比較する図。 10

【図8】焦点変調ロンチグラムから局所収差情報を抽出する工程を説明する図。

【図9】図8に示す抽出工程のうち局所収差情報を数値化する方法（特に相関強度から伸び歪みを表す線素を取得する方法）を説明する図。

## 【発明を実施するための形態】

【0024】

以下、図面に基づいて、本発明の実施の形態を説明する。なお、本発明の実施の態様は、後述する実施例に限定されるものではなく、その技術思想の範囲において、種々の変形が可能である。

【0025】 20

本明細書では、STEMにおいて高精度に軸上収差を測定する手法、特に収差補正STEM装置の調整に適した収差測定法を提供する。特に、本明細書は、ロンチグラムを用いた収差測定方法に関し、測定時の恣意性の軽減により、定量的に正確な軸上収差係数を算出する高精度収差係数測定法を提供する。

【0026】

## 〔基本構成〕

まず、収差補正STEM装置の基本構成を説明する。図1に、収差補正STEM装置の概略構成を示す。収差補正STEM装置は、鏡体1の頭頂部に、電子源3と、当該電子源3から射出された電子を加速する加速手段（例えば加速管2）とを備える。なお、一部のSTEM（VG製STEM装置等）のように、最下端に電子銃2を備える装置もある。その場合の装置構成は、図1と上下反対となる。もっとも、電子源2が図1に示すように頭頂部にあるか最下部にあるかは、本発明に対して特段の影響を与えない。 30

【0027】

電子源3からは電子線20が射出される。収束レンズ4を通過した電子線20の軌道は偏向器6により調整され、さらに集束状態は収束レンズ7により調整される。これら調整後の電子線20は、対物レンズ10に導かれる。対物レンズ10は、電子線20を微小な径サイズの電子プローブとして試料9の面上に収束させる。この電子プローブを、スキャンコイル24により、試料面に沿うようにラスタースキャンする。この際、試料9の各所から透過電子、散乱電子、二次電子、反射電子、X線等が得られる。 40

【0028】

このうち、透過電子線22及び散乱電子線23は、投影レンズ12により、明視野検出器14及び環状暗視野検出器13に対して適当な検出角度になるように調整される。これにより、透過電子線22は明視野検出器14で検出され、散乱電子線23は環状暗視野検出器13で検出される。

【0029】

これらの検出信号は、電子顕微鏡制御システム17を通じ、制御計算機（制御PC）19に読み出される。制御計算機19は、試料面上でラスタースキャンされた順番に検出信号を2次元画像に再構成する。この結果、明視野検出器14の検出信号（透過電子線22に対応）からは明視野STEM像が得られ、暗視野検出器13の検出信号（散乱電子線23に対応）からは環状暗視野STEM像が得られる。以上の説明からも推察される通り、STEM装置 50

において高い分解能を得るためには、対物レンズ10において、試料9の面上に如何に微小な径サイズの電子プローブを形成するかが重要である。

#### 【0030】

従来、電磁界レンズである対物レンズでは避けがたい正の球面収差の影響により、電子プローブの径を0.1nm以下に縮小することが非常に困難であった。しかし、近年における球面収差補正器11の実用化により、対物レンズ10の球面収差補正が可能となり、電子プローブの径を0.1nm以下に縮小することが可能となった。実際、収差補正STEM装置においては、電子プローブの径を0.1nm未満(すなわち、0.08~0.05nm)に縮小でき、個々の原子を明確に識別できる分解能を得ることが可能になった。

#### 【0031】

このような収差補正STEM装置において、球面収差補正器11は、電子プローブの形成に当たり、事前に対物レンズ10が有する球面収差と等量かつ負(反対)の球面収差を発生させるため、図1に示したように対物レンズ10の上方に備え付けられる。この球面収差補正器11は、従来の電子レンズのように回転対称型の電磁レンズではなく、六極子、四極子、八極子等の多極子レンズを複数段組み合わせ用いる構造である。このため、球面収差補正器11の調整は複雑であり、当該調整を制御する収差補正制御システム18が必要となる。実際のハードウェア構成では、収差補正制御システム18は、電子顕微鏡制御システム17及び制御計算機19に統合される場合もある。いずれにしても、収差補正制御システム18は、従来の電子顕微鏡(STEM等)では用いられなかった新しい装置又はソフトウェアである。

#### 【0032】

収差補正制御システム18は、球面収差補正器11の本体を駆動させる電源の他、STEMの収差状態を評価する収差測定部と、評価された収差状態に従って補正調整を実行する調整部とから構成される。ところで、球面収差補正器11の構成や制御は複雑であり、しかも調整は精密に行う必要がある。このため、通常の収差補正手順では、1) 収差測定を最初に実行し、2) その測定結果を参照して調整内容を決定し、3) 調整を実行し、4) 再度の収差測定を実行し、5) 収差の調整効果を確認し、6) 次の調整内容を決定するといった一連のプロセスを循環的に繰り返し、球面収差補正器11及びSTEM装置を所望の収差補正状態に漸近的に導く調整操作が採用される。

#### 【0033】

ところが、このような調整操作は、収差測定や収差調整自体が煩雑であり、調整の完了までに非常に長い時間が必要になったり、最悪の場合には調整途中でSTEM装置の状態がレンズの熱ドリフト等の影響により変わって収差調整が適切に完了できなくなったりする可能性がある。

#### 【0034】

##### [実施例で採用する収差測定方法の原理]

後述する実施例では、収差測定にロンチグラムを使用する。このため、鏡体の下部には、投影面15とイメージング検出器16が配置される。ロンチグラムは、スキャンコイル24によるビームスキャンを止めた場合に、投影面15に投影される試料9の像(投影像)である。

#### 【0035】

ロンチグラムを取得する場合、絞り穴の径が大きい収束レンズ絞り5を使用する。この場合、対物レンズ10の広い範囲を透過した電子線20が、対物レンズ10により試料9の近傍に収束される。このとき、電子プローブは、対物レンズ10の各所における収差の影響により歪んだ形状となる。投影面15には、歪んだ形状の電子プローブにより形成される試料9のロンチグラム(投影像)が投影レンズ12を介して投射される。ロンチグラムは、投影面15を裏面側から撮影するCCDカメラ等のイメージング検出器16により撮影され、制御計算機19に画像データとして取り込まれる。

#### 【0036】

図2を用い、ロンチグラムの形成原理を説明する。球面収差補正器11を通過した電子

10

20

30

40

50

線 20 は、対物レンズ 10 に入射する。この時、対物レンズ 10 が理想的である（収差を持たない）場合、電子線 20 は軌道 21 a 及び 210 a を通って試料面上の一点（収束点 O）に収束される。図 2 では、理想状態での収束に対する電子線 20 の理想波面を 30 a で表している。図に示すように、理想波面 30 a は、収束点 O を中心とする球面となる。

【 0037 】

この場合、投影面 150 に投影されるロンチグラムは、ロンチグラム内の全ての領域に収束点 O の試料 9 が均等に（一様に）投射される。よって、仮に収束点 O に電子線 20 を遮断する粒子があれば、ロンチグラムの全面が一様に暗くなる。逆に、仮に電子線 20 を透過する穴があれば、ロンチグラムの全面が一様に明るくなり、目立ったパターンは現れない。これが収差のない状態のロンチグラムである。従って、球面収差補正器 11 を用いて近づけようとする状態は、特徴的なパターンを持たない一様な領域をなるべく広く持つロンチグラムである。

【 0038 】

一方、対物レンズ 10 に収差がある場合、電子線 20 は理想状態のように試料面上の一点（収束点 O）に収束されなくなる。例えば対物レンズ 10 の点 Q を通った電子線 210 b は、収差の影響を受けて試料面上の収束点 O から だけ離れた点 P を通り、電子線 221 b の軌道を通してロンチグラム内の点 R に到達する。すなわち、収差の影響を受けたロンチグラムは、試料 9 の歪み投影像になる。収差を含む場合、波面も理想波面 30 a から収差を含む波面 30 b に変形する。この波面の差が波面収差である。波面収差（式 1 の左辺）は、収差計数を用いて次式のように表される。

[ 式 1 ]

$$\chi(\omega, \bar{\omega}) = \text{Re} \left[ \frac{1}{2} C_1 \omega \bar{\omega} + \frac{1}{2} A_1 \bar{\omega}^2 + B_2 \omega^2 \bar{\omega} + \frac{1}{3} A_2 \bar{\omega}^3 + \frac{1}{4} C_2 \omega^2 \bar{\omega}^2 + S_3 \omega \bar{\omega}^3 + \frac{1}{4} A_3 \bar{\omega}^4 + B_4 \omega^3 \bar{\omega}^3 \right. \\ \left. + D_4 \omega^4 \bar{\omega} + \frac{1}{5} A_4 \bar{\omega}^5 + \frac{1}{6} C_3 \omega^3 \bar{\omega}^3 + S_5 \omega^2 \bar{\omega}^4 + R_5 \omega \bar{\omega}^5 + \frac{1}{4} A_5 \bar{\omega}^5 \dots \right]$$

【 0039 】

式 1 では、五次収差までを明記している。式中、 $\omega$  は、電子収束角度の複素表示であり、それぞれ式 2 で与えられる。

[ 式 2 ]

$$\omega = \alpha + i\beta$$

$$\bar{\omega} = \alpha - i\beta$$

【 0040 】

ここで、 $\alpha$  と  $\beta$  は、それぞれ面内と面垂直に対する入射角度である。従って、図 2 では、 $\alpha$  のみを示している。収差による試料面上での変位  $\delta$  は、 $\alpha$  と  $\beta$  を用いた複素表示により次式で表される。

[ 式 3 ]

$$\delta = \frac{\partial \chi}{\partial \alpha} + i \frac{\partial \chi}{\partial \beta} = \frac{\partial \omega}{\partial \alpha} \frac{\partial \chi}{\partial \omega} + \frac{\partial \bar{\omega}}{\partial \alpha} \frac{\partial \chi}{\partial \bar{\omega}} + i \frac{\partial \omega}{\partial \beta} \frac{\partial \chi}{\partial \omega} + i \frac{\partial \bar{\omega}}{\partial \beta} \frac{\partial \chi}{\partial \bar{\omega}} = \frac{\partial \chi}{\partial \omega} + \frac{\partial \chi}{\partial \bar{\omega}} - \frac{\partial \chi}{\partial \omega} + \frac{\partial \chi}{\partial \bar{\omega}} = 2 \frac{\partial \chi}{\partial \bar{\omega}}$$

【 0041 】

さらに、ロンチグラム内の投影点 R は、次式で与えられる。

[ 式 4 ]

$$R = \delta + \left( \frac{\delta}{f} + \omega \right) L = 2 \frac{\partial \chi}{\partial \bar{\omega}} \left( 1 + \frac{\delta L}{f} \right) + \omega L$$

式 4 において、L はいわゆるカメラ長（試料 9 から像面 150 までの距離）である。式 4 に表される通り、試料 9 のある点に対応するロンチグラム上の投影点 R は、波面収差の

10

20

30

40

50

影響を受けて決まる。

【 0 0 4 2 】

次に、図 3 を用い、電子プローブを、図 2 の状態から試料 9 の近傍で微小にデフォーカスする場合に、ロンチグラム内の投影点 R がどのように変化するかについて説明する。デフォーカスは、収差のない理想的な焦点面（ガウス焦点）が、収束点 O から収束点 E に移ることである。このとき、理想的な（収差を含まない）収束による電子線 2 0 の軌道（近軸軌道）は、軌道 2 1 0 a から軌道 2 1 1 a に変化する。また、理想波面は波面 3 0 a から波面 3 1 a に、収差を含む波面は波面 3 0 b から 3 1 b に変化する。

【 0 0 4 3 】

デフォーカスが生じると、図 3 に示す通り、もはや対物レンズ 1 0 の点 Q からの軌道 2 1 0 b を通る電子線 2 0 は試料 9 上の点 P を通過せず、対物レンズ 1 0 の新たな点 Q' からの軌道 2 1 1 b を通る電子線 2 0 が点 P を照射する。すなわち、試料 9 上の点 P は、軌道 2 2 1 b を通る電子線 2 0 によりロンチグラム上の投影点 R' に投影される。このとき、デフォーカスによる投影点の移動は、次式で与えられる

[ 式 5 ]

$$\lambda \equiv R' - R$$

【 0 0 4 4 】

ここでの  $\lambda$  は、次式で与えられる。

[ 式 6 ]

$$\lambda = \frac{L \delta \varepsilon (1 - i) (\omega \chi^{(0,2)} - \bar{\omega} \chi^{(1,1)}) + (1 + i) (\bar{\omega} \chi^{(2,0)} - \omega \chi^{(1,1)})}{2 (\chi^{(1,1)^2} - \chi^{(2,0)} \chi^{(0,2)})}$$

ただし、式 6 において、デフォーカス  $\lambda$  は微量として一次の項まで残した。

【 0 0 4 5 】

式中の  $\chi$  は、式 1 の波面収差関数であり、その上付きカッコ内は以下に示す微分を表している。

[ 式 7 ]

$$\chi^{(2,0)} = \frac{\partial^2 \chi}{\partial \omega^2}$$

$$\chi^{(1,1)} = \frac{\partial^2 \chi}{\partial \omega \partial \bar{\omega}}$$

$$\chi^{(0,2)} = \frac{\partial^2 \chi}{\partial \bar{\omega}^2}$$

【 0 0 4 6 】

ここで、式 6 の収差関数  $\chi$  に対し、式 1 を代入して具体的に計算し、さらに電子線 2 0 の収束角度 ( $\alpha, \beta$ ) も十分小さいものと仮定してその一次項まで計算すると、式 8 又は式 9 が得られる。

[ 式 8 ]

$$\lambda = \frac{L \delta \varepsilon}{A_1^2 - C_1^2} \left( (C_1 - \text{Re } A_1) \alpha + \text{Im } A_1 \beta \right) \left( \text{Im } A_1 \alpha + (C_1 + \text{Re } A_1) \beta \right)$$

[ 式 9 ]

10

20

30

40

$$|\lambda| = \frac{L \delta \varepsilon}{A_1^2 - C_1^2} \sqrt{((C_1 - \operatorname{Re} A_1)^2 + (\operatorname{Im} A_1)^2) \alpha^2 + 4 C_1 \operatorname{Im} A_1 \alpha \beta + ((C_1 - \operatorname{Re} A_1)^2 + (\operatorname{Im} A_1)^2) \beta^2}$$

$$\angle \lambda = \arctan \left( \frac{\operatorname{Im} A_1 \alpha + (C_1 + \operatorname{Re} A_1) \beta}{(C_1 - \operatorname{Re} A_1) \alpha + (\operatorname{Im} A_1)^2} \right)$$

## 【 0 0 4 7 】

ところで、ロンチグラム上における投影点の変位 を測定すれば、式 8 及び式 9 により、収束角度 ( , ) に対するデフォーカス  $C_1 = C_1( , )$  と、 $A_1 = A_1( , )$  を決めることができる。ただし、式 8 及び式 9 から明らかな通り、決定すべき未定係数は、 $C_1$  と、 $A_1$  の実部と虚部 ( $\operatorname{Re} A_1$ ,  $\operatorname{Im} A_1$ ) の 3 つであるのに対し、存在する独立方程式は 2 つである。このため、このままでは未定係数を全て決めることができない。

10

## 【 0 0 4 8 】

そこで、式 1 0 で与えられる異なるデフォーカス  $C_1'$  について同様の測定を行う。

[ 式 1 0 ]

$$C_1' = C_1 + \varepsilon$$

さらに、後述する式 1 1 で与えられる変位 ' を加えれば、全ての未定係数を決定するのに十分な数の方程式を得ることができる。ここで、焦点変化 は、外部から任意に規定の量として与えられる定数である。

20

[ 式 1 1 ]

$$\delta^r = \frac{L \delta \varepsilon}{A_1^2 - (C_1 + \varepsilon)} \left( ((C_1 + \varepsilon) - \operatorname{Re} A_1) \alpha + \operatorname{Im} A_1 \beta \right) / \left( \operatorname{Im} A_1 \alpha + ((C_1 + \varepsilon) + \operatorname{Re} A_1) \beta \right)$$

## 【 0 0 4 9 】

以上のように 2 つのデフォーカス条件において、1 枚のロンチグラムの撮像中に、電子プローブの焦点を試料 9 の近傍で微小に変動させれば、1 枚のロンチグラムから全ての未知係数を決定するのに十分な数の方程式を取得することができる。

## 【 0 0 5 0 】

[ 実施例 1 ]

図 4 に、実施例 1 に係る収差補正 STEM の一部の構成を示す。図 4 には、図 1 との対応部分に同一符号を付しており、図 1 に示す基本構成のうち球面収差補正器 1 1 よりも下方の構成を表している。従って、本実施例に係る収差補正 STEM のうち球面収差補正器 1 1 よりも上方の構成は、図 1 と同様である。なお、図 4 では、図の簡略化のため、ロンチグラムを用いた収差補正の説明には不要である明視野検出器 1 4 と暗視野検出器 1 3 の図示を省いている。

30

## 【 0 0 5 1 】

収差補正制御システム 1 8 には、収差測定を行う収差測定システム 1 8 1 が配置される。収差測定システム 1 8 1 は、収差測定実行時に対物レンズの励磁を変調するレンズ電流モジュレータ 1 7 2 とイメージング検出器 1 6 を制御する。収差測定時、電子顕微鏡制御システム 1 7 は、収束電子線 (電子プローブ) 2 1 の試料面に対する収束角度や対物レンズ 1 0 の焦点距離などの値を適宜選択することにより、ロンチグラムの取得に適した光学条件を設定する。次に、電子顕微鏡制御システム 1 7 は、スキャンコイル 2 4 の動作を停止制御した上で、投影面 1 5 上にロンチグラムを投影する。

40

## 【 0 0 5 2 】

ここでの投影倍率 (すなわち、実効的なカメラ長) は、投影レンズ 1 2 で調整可能である。投影されたロンチグラムは、投影面 1 5 の裏側 (下方) に配置したイメージング検出器 1 6 で取得する。前述したように、イメージング検出器 1 6 は、収差測定システム 1 8 1 の制御下でロンチグラムを取得する。さらに、このロンチグラムの取得と同期して、収

50

差測定システム181は、レンズ電流モジュレータ172を制御し、対物レンズに励磁を変調する電流を加える。

【0053】

すなわち、1枚のロンチグラムの取得に同期して、収束電子線21の焦点を試料9の近傍で高さ方向に微小変位(振動)させる。この焦点の微小変位により、図3を用いて説明したように、投影点Rの位置変化が1枚のロンチグラム(焦点変調ロンチグラム)に積算される形で取り込まれる。焦点の微小変位は、焦点変調ロンチグラムの取得時間内に1回又は複数(1以上の整数)回周期的に行われることが好ましい。

【0054】

[実施例2]

図5に、実施例2に係る収差補正STEMの一部の構成を示す。図5の場合も、図4と同様、装置構成の一部分のみを表している。なお、図5には図4との対応部分に同一符号を付して示している。本実施例の場合、焦点の微小変位は、対物レンズ10の励磁によってではなく、試料9自体の高さ方向への微小運動によって行う。このため、本実施例の場合には、試料9を保持する試料ホルダ8に試料高変位用アクチュエータ184を取り付ける。試料高変位用アクチュエータ184には、例えばピエゾ素子等を使用する。本実施例における試料高変位用アクチュエータ184は、試料ホルダ8の支持部を上下方向に微小変位させる。

【0055】

本実施例の場合も、ロンチグラムの取得時には、収差測定システム181による制御の下、試料9を上下(高さ)方向に微小変位させる。なお、試料9の上下変位は微小であるので、例えばアクチュエータ184を回転型とし、試料ホルダ8を軸周りに微小に回転させることにより、局所的な試料の高さ変位を生成しても良い。このように試料自体の高さを変える方法でも、焦点変化を起こすことができる。また、本実施例の場合も、実施例1と同様に、ロンチグラム取得と同期して1~数周期で焦点を変化させ、積算的に焦点変調ロンチグラムを取得する。

【0056】

[実施例3]

図6に、実施例3に係る収差補正STEMの一部の構成を示す。図6の場合も、図4や図5の場合と同様、装置構成の一部分のみを表している。なお、図6には図4との対応部分に同一符号を付して示している。本実施例の場合、微小焦点変動を引き起こすための測定用焦点調整レンズ101を対物レンズ10の上方に配置し、これを収差測定システム181で制御して焦点変動を実行する。収差測定システム181は、ロンチグラムの取得と同期して、測定用焦点調整レンズ101を用いて1~数周期の焦点変化を実行させ、積算的な焦点変調ロンチグラムの取得を実現する。

【0057】

なお、実施例1(図4)の場合には、微小ながら被補正対象である対物レンズ10自体を測定に利用するため、レンズのドリフトやヒステリシス等が、STEMの光学系に影響を与えてしまう可能性が僅かではあるが心配される。一方、実施例2(図5)の場合には、対物レンズ10や球面収差補正器11などのSTEM光学系に触れることなく焦点変調ロンチグラムを取得することが可能である。また、本実施例(図6)の場合にも、対物レンズ10自体は、実施例2と同様、測定のために励磁を変える必要がない。しかも、本実施例で使用する測定用焦点調整レンズ101もごく弱いレンズでよく、ほとんどその収差の影響は無視できる。また、測定用焦点調整レンズ101として例えば静電型レンズを用いる場合、測定用焦点調整レンズ101をオフすることで、その影響を完全に光学系から取り除くことができる。

【0058】

ロンチグラムは、前述の通り、試料近傍に焦点を有する電子プローブによる試料の遠距離投影像であるので、これを式で示せば以下の通り、試料面上のプローブ形状とコンボリューションで表現される。

10

20

30

40

50

[ 式 1 2 ]

$$probe(x, y) = F \left[ A(\alpha, \beta) e^{\frac{2\pi}{\lambda} \chi(\alpha, \beta)} \right]$$

$$ronchigram(\alpha, \beta) = F^{-1} \left[ (1 + \psi(x, y)) probe(x, y) \right] = F^{-1} \left[ \psi(x, y) F \left[ A(\alpha, \beta) e^{\frac{2\pi}{\lambda} \chi(\alpha, \beta)} \right] \right]$$

ここで、 $A(\alpha, \beta)$  は、電子プローブ形成に寄与する電子線の制限、いわゆる絞り関数である。 $1 + \psi(x, y)$  は、試料 9 による位相変化を表す関数である。試料 9 は、弱位相物体近似を用いた。

10

【 0 0 5 9 】

ロンチグラムの形成を示す式 1 2 において、デフォーカスを導入するということは、これを収差関数に含めデフォーカスに対して積分すると、式 1 3 のようになる。式 1 3 の積分範囲は  $\{-, +\}$  である。

[ 式 1 3 ]

$$ronchigram(\alpha, \beta, \delta\varepsilon) = \int d\varepsilon \sigma(\varepsilon) F^{-1} \left[ \psi(x, y) F \left[ A(\alpha, \beta) e^{\frac{2\pi}{\lambda} \left( \frac{\delta\varepsilon}{2} (\alpha^2 + \beta^2) + \chi(\alpha, \beta) \right)} \right] \right]$$

【 0 0 6 0 】

ここで、 $\sigma(\varepsilon)$  は、フォーカス分布（焦点ボケ）に関する分布関数であり、例えば巾のガウス分布を仮定すれば、式 1 4 で与えられる。

20

[ 式 1 4 ]

$$\sigma(\varepsilon) = \frac{1}{\sqrt{\pi} \delta\varepsilon} e^{-\frac{\varepsilon^2}{\delta\varepsilon^2}}$$

【 0 0 6 1 】

また、交流を用いて sin 波で振る場合を考えれば、 $\sigma(\varepsilon)$  は、式 1 5 で与えられる。

[ 式 1 5 ]

$$\sigma(\varepsilon) = \frac{1}{\delta\varepsilon} \sin^2 \left( \frac{\pi \varepsilon}{2 \delta\varepsilon} \right)$$

30

【 0 0 6 2 】

[ 各実施例で得られる焦点変調ロンチグラムによる収差の評価 ]

図 7 に、アモルファス薄膜 9 0（上段写真 a）を試料 9 とする場合に取得される 2 種類のロンチグラムを示す。左下段写真 b は通常のロンチグラム 1 5 1 であり、右下段写真 c は焦点変調ロンチグラム 1 5 2 である。通常のロンチグラム 1 5 1 と焦点変調ロンチグラム 1 5 2 は、いずれもガウス焦点から  $\gamma_1 = +50\text{nm}$  に電子プローブを結んで形成したものである。さらに、焦点変調ロンチグラムの場合、この  $\gamma_1 = +50\text{nm}$  を中心に、 $\gamma_1 = \pm 10\text{nm}$  の焦点変動を加えている。その他、各種収差量は表外に列記の通りである。

40

【 0 0 6 3 】

前述した特許文献 1 に記載の方法の場合、通常のロンチグラム 1 5 1 から局所的なアモルファス投影像の粒形状を楕円関数等のフィッティング演算を用いて評価し、これらの局所収差情報を用いて軸上収差を算出する。また、特許文献 2 及び 3 は、焦点と試料面の位置関係を高さ方向に微小に変化させる前後で 2 枚のロンチグラム 1 5 1 を取得し、対応領域間の局所変位を局所収差情報として軸上収差を算出する。

【 0 0 6 4 】

これに対し、前述の各実施例の場合には、焦点変調ロンチグラム 1 5 2 を使用し、1 枚の焦点変調ロンチグラム 1 5 2 内に投影されたアモルファス粒子の軌跡（焦点の微小変動に伴う変位量）を用いて局所収差情報とする。これらは式 6 ~ 式 8 の  $\gamma_1$  に従う。勿論、焦

50

点変調ロンチグラム 1 5 2 の取得には、前述した構成の各収差補正STEM ( 図 4 ~ 図 6 ) と駆動方法が使用される。

【 0 0 6 5 】

図 8 に、局所収差情報の具体的な抽出方法を説明する。まず、焦点変調ロンチグラム 1 5 2 から測定に用いるのに適した領域を取り出す ( ステップ a ) 。次に、当該領域を適当なサイズに分割する ( ステップ b ) 。ここでは、5 × 5 の格子状に分割する例を示す。もっとも、格子の分割数は 5 × 5 に限らないし、そもそも格子状に分割する必要もない。また、それぞれの分割区域の一部が互いに重畳していても良い。

【 0 0 6 6 】

次に、分割後の各領域について、粒子の伸び歪み量を明確化するため自己相関をとる ( ステップ c ) 。なお、分割後の各領域の伸びや歪み量を明確化するための方法は、各領域の自己相関を求める方法に限らない。例えば同じ取得条件で撮影した試料別箇所 of 焦点変調ロンチグラムを同様に領域分割し、対応する分割領域間で相互相関をとっても良い。また、焦点変調ロンチグラムと同じ試料箇所取得した通常のロンチグラム 1 5 1 ( 図 7 ) との間で、対応する部分 ( 分割 ) 領域間で相互相関を計算してもよい。

【 0 0 6 7 】

最後に、各分割領域の伸び歪み量を定量化し、各分割領域にその長さや方向を表す線素を得る ( ステップ d ) 。この線素の x - y 成分は式 7、又は、長さや方向は式 8 にそのまま対応する。よって、これらの計測値から式 7 又は式 8 の方程式を立てる。さらに、連立方程式の数に不足する分は、図 3 の説明内で述べた通り、異なる焦点位置  $( \theta_2, \theta_1 )$  で同様に焦点変調ロンチグラムを取得し、同様の方程式を立ててこれを補う。これにより、各々の分割領域についてのデフォーカス  $C_2$  と非点収差  $A_2$  を求めることができる。さらに、これらの値を以下の式 1 6 に代入し、必要な収差次数までの連立方程式を立て、軸上収差を計算する。

[ 式 1 6 ]

$$C_2(\alpha_i, \beta_i) = C_2 + \text{Re } B_2 \alpha_i + \text{Im } B_2 \beta_i + 2(C_2 + 3\text{Re } S_2) \alpha_i^2 + 12 \text{Im } S_2 \alpha_i \beta_i + 2(C_2 - 3\text{Re } S_2) \beta_i^2 \dots$$

$$\text{Re } A_2(\alpha_i, \beta_i) = \text{Re } A_2 + (3\text{Re } A_2 + 2\text{Re } B_2) \alpha_i + (3\text{Re } A_2 - 2\text{Re } B_2) \beta_i$$

$$+(C_2 + 3\text{Re } A_2 + 6\text{Re } S_2) \alpha_i^2 + 6\text{Im } A_2 \alpha_i \beta_i + (-C_2 - 3\text{Re } A_2 + 6\text{Re } S_2) \beta_i^2 \dots$$

$$\text{Im } A_2(\alpha_i, \beta_i) = \text{Im } A_2 + (3\text{Im } A_2 + 2\text{Im } B_2) \alpha_i + (-3\text{Im } A_2 + 2\text{Im } B_2) \beta_i$$

$$+3(\text{Im } A_2 + 2\text{Im } S_2) \alpha_i^2 + 2(C_2 - 3\text{Re } A_2) \alpha_i \beta_i + 3(\text{Im } A_2 + 2\text{Im } S_2) \beta_i^2 \dots$$

ここで、 $( \theta_i, \theta_i )$  は、i 番目の分割領域の中心に対する電子線の収束角度、例えば図 2 に示されるそれである。

【 0 0 6 8 】

図 8 のステップ c からステップ d への伸び歪み量測定プロセスは、例えば図 9 に示すような単純な方法で実現できる。すなわち、分割区分された 1 つの領域に関し、1 方向に列 ( 行 ) 毎の最大値とその位置を探しプロットする。例えば図 9 の例では、相関像 1 5 2 0 の中からそれぞれ縦列中の最大値を与える位置 ( ピクセル ) を見付け、これを A から B を結ぶ破線 1 5 2 2 で示し、更にこの破線に沿って測った相関強度を下グラフ 1 5 2 1 にプロットしている。この上下のグラフを参照し、適宜決めた閾値以上の相関強度を持つピクセルを選択し、これらの位置を線形近似することにより、太線で示す線素 1 5 2 4 を決めることができる。これを各分割領域で実施すれば、同様に伸び歪みを代表する線素 1 5 2 4 を得て、すなわち各領域でデフォーカス  $C_1$  と非点収差  $A_1$  を得ることができる。

【 0 0 6 9 】

10

20

30

40

50

以上の方法を用いて、2つの焦点位置にて焦点変調ロンチグラムを取得し解析する。これにより、対物レンズ10及び球面収差補正器11を含むSTEM電子プローブの形成に関わる部位の軸上収差係数を求めることができる。

【0070】

[実施例の特長]

各実施例による測定法の1つ目の特長は、特許文献2や特許文献3のように、焦点変化の前後で2枚のロンチグラムを必要とせず、1枚のロンチグラムの取得中に焦点を1～複数周期変化させる一工程により焦点変調ロンチグラムを取得できることである。

【0071】

各実施例による測定法の2つ目の特長は、特許文献2のように、試料中の特定点を焦点変化前後のロンチグラムで追跡する必要がないことである。本明細書で提案する測定法では、焦点変調ロンチグラムを分割した各領域像のパターンが各試料粒子の移動に従って現れることから、前記手法のように自己相関等を用いて当該領域パターンの伸び歪み量を測定することができる。

【0072】

各実施例による測定法の3つ目の特長は、局所収差情報の検出感度を、任意に制御可能な焦点変動量で調整できることである。例えば図8の場合、内側の3×3の領域は、外周の領域に比べて、局所収差情報を与える線素長が短く誤差を生み易く思える。線素長は式9からに比例すると考えられるので、このような場合は、試料同視野を増加させた焦点変動ロンチグラムを取得すれば良い。異なる複数の焦点変調ロンチグラムを組み合わせ、各分割領域で適当な線素長が得られるデータの組み合わせれば、測定精度の向上を見込むこともできる。

【0073】

[実施例の効果]

以上の通り、焦点変調ロンチグラムを用いた収差測定法の採用により、特に収差補正STEMにおいて高次までの軸上収差係数を測定可能とする高精度収差測定法を提供することができる。

【0074】

また、本実施例の収差測定法では、ロンチグラムを測定に用いることにより、非特許文献1に記載されたプローブタプロー法(複数の測定条件を繰り返し行う必要のある収差測定法)に比べ、各段に単純化された測定手順での収差測定が可能となる。従って、これに合わせて収差測定に要する時間の大幅な短縮も見込むことができる。

【0075】

また、従来のロンチグラムを用いた収差測定法(特許文献2、特許文献3)では、デフォーカス、ビームシフト等の測定条件の変更前後で、試料に複数の特定観察点を決めて同箇所の変位を追跡し、局所収差情報を取り出す必要がある。しかし、本実施例の収差測定法の場合には、試料内に特定の観察点を定める必要なく、焦点変調ロンチグラム自体の形態から必要な局所収差情報を抽出して軸上収差係数を計算することができる。この際に用いる焦点変調ロンチグラムとは、前述の通り、1枚のロンチグラムの撮影時間内に1～複数周期のフォーカス変調を行い取得される画像であり、前記のような測定条件の変更前後に取得された複数枚のロンチグラムの比較をする必要もない。

【0076】

本実施例の収差測定法は、特許文献1に記載された測定法に対しても同様の利点を有する。特許文献1の収差測定法では、同じく測定にロンチグラムを利用し、かつ、これを小領域に分割区分して各領域像の自己相関を計指し、各々から局所収差情報の抽出を行う。しかし、特許文献1の収差測定法は、各領域で得られた自己相関強度を楕円関数でフィッティングする等の作業を要する。

【0077】

ところが、フィッティング誤差やロンチグラムの局所領域の自己相関が主ピーク以外にサブピークを示しやすい等の性質もあり、上記のような方法で自己相関から正しい局所収

10

20

30

40

50

差情報を抽出するには注意が必要である。一方、本実施例の収差測定法によれば、焦点変調ロンチグラムを特許文献1と同様に局所領域に分け、この自己相関もしくは相互相関をとって、各々から局所収差情報の抽出を行うが、この場合に必要とされるのは各領域の相関パターンに現れる主ピークの長さとは方位のみである。これは図9に説明した単純な方法により、精度よく求めることができる。

**【0078】**

これに関連し、この相関パターンの主ピークの長さは式8又は式9に示される通り、焦点変調ロンチグラム取得時のフォーカス変調量に比例する。当該性質を利用し、収差の状態によって主ピーク長が測定に足る十分な長さを持たない時(しきい値より小さい場合)、又は、過長すぎる時(しきい値より大きい場合)には、収差測定システム181は、電子顕微鏡制御システム17を通じてフォーカス変調量を調整し、測定される主ピーク長を適正化することにより、測定精度を保証することができる。

10

**【0079】**

なお、測定回数の増加を招くことになるが、例えば焦点変調ロンチグラムを区分した各領域について局所収差情報の測定に適正な相関パターンが得られるようにフォーカス変調量を調整した複数のロンチグラムを用いれば、局所収差情報の測定精度をさらに向上させることもできる。

**【0080】**

また、特許文献1の収差測定法では、被測定試料は、純粋なアモルファス薄膜に限定されている。一方、本実施例の収差測定法においては、フォーカス変調に応じた粒子の変位軌跡が分かれば良いので、これに影響を及ぼさない程度であれば、結晶微粒子などアモルファス以外の物質が測定試料に含まれていてもよい。

20

**【0081】****[他の実施例]**

本発明は、上述した実施例の構成に限定されるものでなく、様々な変形例を含んでいる。例えば前述の実施例においては、専らSTEMを前提に説明したが、観察試料の表面に荷電粒子プローブを収束させた状態で走査する他の荷電粒子光学装置(例えば走査電子顕微鏡(SEM)、収束イオンビーム(FIB)加工機)であっても、測定試料の工夫等によりロンチグラムを取得できる場合には、本発明を適用することができる。

**【0082】**

また、本発明は、球面収差補正器11を搭載しないSTEMに対しても適用することができる。その場合、測定された軸上収差を収差補正に用いることができないが、STEMで用いられている対物レンズ11が有する収差を正確に評価し、後の使用に役立てることができる。

30

また、前述の説明では、試料の種類を問わず、前述の収差測定方法を適用する場合について説明した。しかし、試料ごとに適用する収差測定方法を予めレシピとして登録しても良い。また、レシピを自動生成する機能を収差補正STEMに搭載しても良い。

**【0083】**

また、上述の実施例は、本発明を分かりやすく説明するために、一部の実施例について詳細に説明したものであり、必ずしも説明した全ての構成を備える必要は無い。また、ある実施例の一部を他の実施例の構成に置き換えることが可能であり、ある実施例の構成に他の実施例の構成を加えることも可能である。また、各実施例の構成に他の構成を追加し、又は、各実施例の一部構成を他の構成で置換し、又は各実施例の一部構成を削除することも可能である。

40

**【0084】**

また、上述した各構成、機能、処理部、処理手段等は、それらの一部又は全部を、例えば集積回路その他のハードウェアとして実現しても良い。また、上記の各構成、機能等は、それぞれの機能を実現するプログラムをプロセッサが解釈して実行することにより実現しても良い。すなわち、各構成等をソフトウェアにより実現しても良い。この場合、各機能を実現するプログラム、テーブル、ファイル等の情報は、メモリやハードディスク、SS

50

D (Solid State Drive) 等の記憶装置、ICカード、SDカード、DVD等の記憶媒体に格納することができる。

【0085】

また、制御線や情報線は、説明上必要と考えられるものを示すものであり、製品上必要な全ての制御線や情報線を表すものでない。実際にはほとんど全ての構成が相互に接続されていると考えて良い。

【符号の説明】

【0086】

1 : 鏡体、2 : 加速管、3 : 電子源、4 : 収束レンズ、5 : 収束レンズ絞り、6 : 偏向器、7 : 収束レンズ、8 : 試料ホルダ、9 : 試料、10 : 対物レンズ、11 : 球面収差補正器、12 : 投影レンズ、13 : 暗視野検出器、14 : 明視野検出器、15 : 投影面 (蛍光板)、16 : イメージング検出器 (CCDカメラ等)、17 : 電子顕微鏡制御システム、18 : 収差補正制御システム、181 : 収差測定システム、182 : 試料高変位用電源、184 : 試料高変位用アクチュエータ、19 : 制御計算機 (制御PC)、20 : 電子線、21 : 収束電子線、21a、210a : 試料面に理想状態で収束する電子線の軌道 (近似軌道)、21b、210b : 試料面に収差を含んで収束する電子線の軌道、211a : 焦点変位後に理想状態で収束する電子線の軌道 (近似軌道)、211b : 焦点変位後に収差を含んで収束する電子線の軌道、22a、220a : 試料を理想状態で透過する電子線の軌道 (近似軌道)、22b、220b : 試料の収差を含んで透過する電子線の軌道、221a : 焦点変位後に理想状態で透過する電子線の軌道 (近似軌道)、221b : 焦点変位後に収差を含んで透過する電子線の軌道、20Ta : 照射電子線 (垂直入射)、20Tb : 照射電子線 (傾斜入射)、24 : スキャンコイル、30a : 電子線の理想波面、30b : 収差を含む電子波面、90 : 試料 (アモルファス薄膜)、101 : 測定用焦点調整レンズ、150 : 投影面、151 : ロンチグラム像、152 : 焦点変調ロンチグラム像、171 : 対物レンズ電源、172 : レンズ電流変調電源、252 : 焦点変調ロンチグラムから測定領域を取り出し分割した像、253 : 252の各領域の自己相関強度を示す像、254 : 253の各領域の自己相関強度の伸び歪み量を線素定量化して示す像、1520 : 一領域の相関強度像例、1522 : 相関強度像の各縦列中で最高強度を示す点を結ぶ折れ線、1523 : 破線A-Bに沿った相関強度プロファイル、1524 : 相関強度の伸び歪み量を定量化した線素。

10

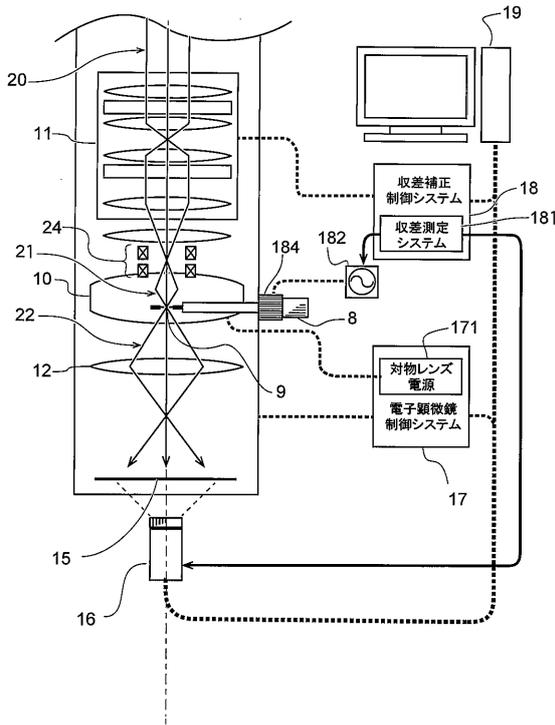
20

30



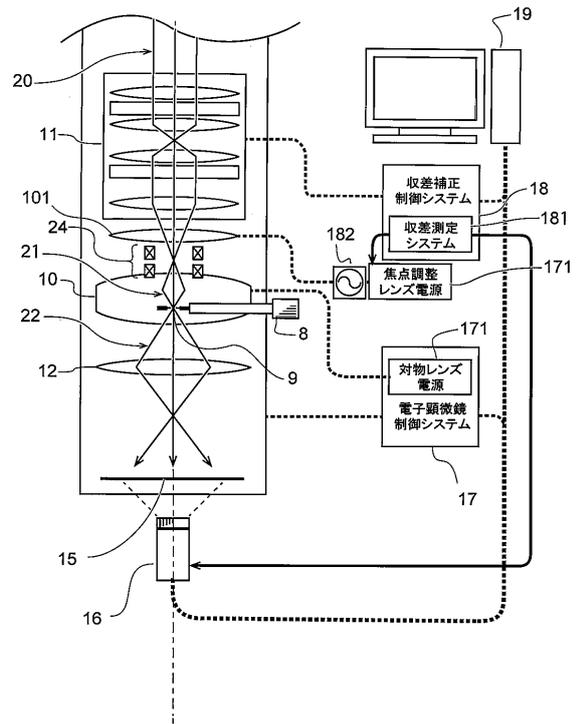
【図5】

図5



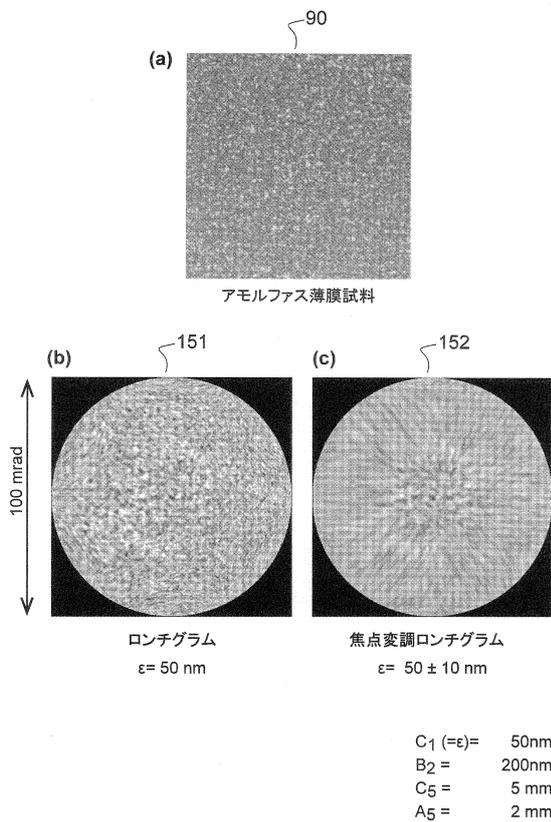
【図6】

図6



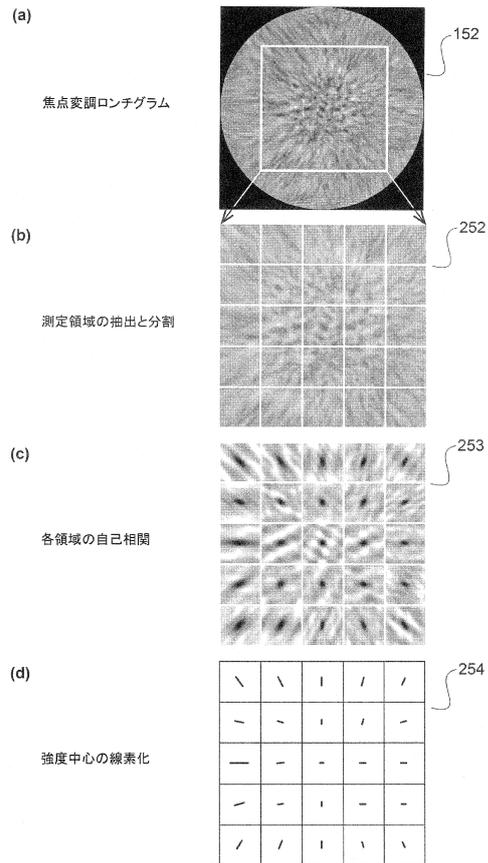
【図7】

図7



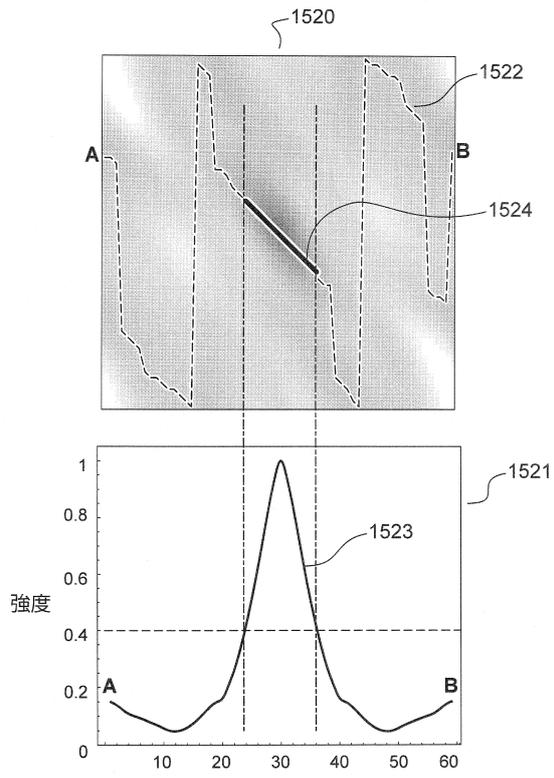
【図8】

図8



【 図 9 】

図 9



---

フロントページの続き

(56)参考文献 特開2007-157719(JP,A)  
米国特許第06552340(US,B1)  
特開2013-101791(JP,A)  
特開2007-179753(JP,A)

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)  
H01J 37/153  
H01J 37/28