

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特 許 公 報(B2)

(11) 特許番号

特許第5226367号
(P5226367)

(45) 発行日 平成25年7月3日(2013.7.3)

(24) 登録日 平成25年3月22日(2013.3.22)

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

請求項の数 9 (全 14 頁)

<p>(21) 出願番号 特願2008-107375 (P2008-107375) (22) 出願日 平成20年4月17日(2008.4.17) (65) 公開番号 特開2009-54565 (P2009-54565A) (43) 公開日 平成21年3月12日(2009.3.12) 審査請求日 平成22年12月16日(2010.12.16) (31) 優先権主張番号 特願2007-202134 (P2007-202134) (32) 優先日 平成19年8月2日(2007.8.2) (33) 優先権主張国 日本国(JP)</p>	<p>(73) 特許権者 000004271 日本電子株式会社 東京都昭島市武蔵野3丁目1番2号 (72) 発明者 沢田英敬 東京都昭島市武蔵野三丁目1番2号 日本 電子株式会社内 審査官 佐藤 仁美</p>
---	--

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 収差補正装置

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

光軸に対して一列に配置され、前記光軸に沿ってそれぞれが厚みを有する三段の多極子を備え、前記三段の多極子のうち、前段の多極子は、前記光軸に対して三回対称となる第1の磁場又は電場を生じ、前記三段の多極子のうち、中段の多極子は、前記光軸に対して三回対称となる第2の磁場又は電場を生じ、前記三段の多極子のうち、後段の多極子は、前記光軸に対して三回対称となる第3の磁場又は電場を生じ、前記第2の磁場又は電場においては、前記第1磁場または電場、あるいは前記第3磁場または電場から発生した三回対称非点を打ち消す方向ではない磁場又は電場三回対称分布を作り、前記第3の磁場又は電場においては、前記第1の磁場または電場、あるいは前記第2の磁場または電場から発生した三回対称非点を打ち消す方向ではない磁場又は電場三回対称分布を作り、前記前段の多極子において発生した三回対称収差を、前記中段の多極子を用いて回転させ、前記中段の多極子から発生した三回対称収差を前記後段の多極子を用いて回転させ、前記三段の多極子の合成として三回対称非点を打ち消し、球面収差補正と高次収差補正を行なう電子顕微鏡用収差補正装置であり、
 前記三段の多極子間の磁場又は電場の回転関係として、前記第2の磁場又は電場、或いは前記第3の磁場又は電場の何れか一方は、前記第1の磁場又は電場に対し、前記光軸に垂直な面内において電子光学的レンズによる回転作用を考慮して、 m を整数として、 $120^\circ \times m \pm 40^\circ$ 回転して分布し、前記第2の磁場又は電場、或いは前記第3の磁場又は電場、の何れか他方は、前記第1の磁場又は電場に対し、前記光軸に垂直な面内において電

10

20

子光学的レンズによる回転作用を考慮して $120^\circ \times m \pm 80^\circ$ 回転して分布し、前記第2の磁場又は電場と、前記第3の磁場又は電場は同じ方向に回転して分布することを特徴とする電子顕微鏡用収差補正装置。

【請求項2】

光軸に対して一列に配置され、前記光軸に沿ってそれぞれが厚みを有する三段の多極子を備え、前記三段の多極子のうち、前段の多極子は、前記光軸に対して三回対称となる第1の磁場又は電場を生じ、前記三段の多極子のうち、中段の多極子は、前記光軸に対して三回対称となる第2の磁場又は電場を生じ、前記三段の多極子のうち、後段の多極子は、前記光軸に対して三回対称となる第3の磁場又は電場を生じ、前記第2の磁場又は電場においては、前記第1磁場または電場、あるいは前記第3磁場または電場から発生した三回対称非点を打ち消す方向ではない磁場又は電場三回対称分布を作り、前記第3の磁場又は電場においては、前記第1の磁場または電場、あるいは前記第2の磁場または電場から発生した三回対称非点を打ち消す方向ではない磁場又は電場三回対称分布を作り、前記前段の多極子において発生した三回対称収差を、前記中段の多極子を用いて回転させ、前記中段の多極子から発生した三回対称収差を前記後段の多極子を用いて回転させ、前記三段の多極子の合成として三回対称非点を打ち消し、球面収差補正と高次収差補正を行なう電子顕微鏡用収差補正装置であり、

前記三段の多極子間の磁場又は電場の回転関係として、前記第2の磁場又は電場は、前記第1の磁場又は電場に対し、前記光軸に垂直な面内において電子光学的レンズによる回転作用を考慮して、 m を整数として、 $120^\circ \times m \pm 略72^\circ$ 回転して分布し、前記第3の磁場又は電場は、前記第1の磁場又は電場に対し、前記光軸に垂直な面内において電子光学的レンズによる回転作用を考慮して $120^\circ \times m \pm 略24^\circ$ 回転して分布することを特徴とする電子顕微鏡用収差補正装置。

【請求項3】

前記前段の多極子と前記中段の多極子の間に設けられ、二段の軸対称レンズを有する第1の転送レンズ対と、前記中段の多極子と前記後段の多極子の間に設けられ、二段の軸対称レンズを有する第2の転送レンズ対を、更に備えることを特徴とする請求項1または請求項2に記載の電子顕微鏡用収差補正装置。

【請求項4】

前記後段の多極子の後方に設けられ、二段の軸対称レンズを有する第3の転送レンズ対を更に備えることを特徴とする請求項3に記載の電子顕微鏡用収差補正装置。

【請求項5】

前記三段の多極子はそれぞれ、独立に励磁可能な磁極又は、独立に電圧印加可能な電極を有することを特徴とする請求項1または請求項2に記載の電子顕微鏡用収差補正装置。

【請求項6】

前記三段の多極子はそれぞれ六極子を有することを特徴とする請求項1または請求項2に記載の電子顕微鏡用収差補正装置。

【請求項7】

前記三段の多極子はそれぞれ十二極子を有することを特徴とする請求項1または請求項2に記載の電子顕微鏡用収差補正装置。

【請求項8】

前記三段の多極子のそれぞれを前記光軸に垂直な面内で回転させる回転手段を備えることを特徴とする請求項1乃至請求項5の何れか一項に記載の電子顕微鏡用収差補正装置。

【請求項9】

前記三段の多極子は、三段とも多極子の厚みがおなじものを有することを特徴とする請求項1または請求項2に記載の電子顕微鏡用収差補正装置。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は透過型電子顕微鏡に用いられる収差補正装置に関し、特にそれぞれが三回対称

10

20

30

40

50

場を生じる三段の多極子を用いた収差補正装置に関する。

【背景技術】

【0002】

電子顕微鏡の空間分解能を制限する要因の1つとして、光学系における収差の問題がある。特に、この収差の1つである球面収差は、軸対称レンズが常に正の球面収差係数を有することから空間分解能を制限する本質的な問題となっている。

【0003】

この問題に対し、非特許文献1において、光軸に沿って厚みを有する一段の六極子が負の球面収差係数を有する理論的解析結果が示された。これは六極子を光学系に導入することによって、球面収差の低減が可能になることを示唆するものであった。その後、上記一段の六極子のみでは、光軸から外れた領域において二次の収差が生じるため、透過型電子顕微鏡に用いた場合はこの収差によって視野径が著しく制限されることが指摘された。従って、一段の六極子を透過型電子顕微鏡に搭載する有用性は低いものであったが、六極子が負の球面収差を生じる結果は球面収差補正に対して非常に有用であり、六極子による球面収差技術は更に改良が進められた。

10

【0004】

光軸に沿って厚みを有し、負の球面収差をもつ六極子を備えた収差補正装置を、透過型電子顕微鏡に適用した例が非特許文献2において提案された。この収差補正装置は、順次設けられた第1の転送レンズと、第1の六極子と、第2の転送レンズと、第2の六極子とを備えている。なお、この装置の転送レンズは2つの軸対称レンズを有している。

20

【0005】

更に、それぞれが光軸に沿って厚みを有する二段の多極子を備えた収差補正装置は特許文献1に示されている。この装置は、二段の多極子（例えば六極子）と、その間に配置された転送レンズを備えている。各多極子は三回対称場を発生して、三回非点と負の球面収差が生じさせる。

【0006】

上記特許文献1の装置において、後段の多極子は前段の多極子で生じた三回非点を相殺するように動作するので、全体の光学系としては負の球面収差が生じることになる。従って、この装置の前または後に正の球面収差を生じる軸対称のレンズ（例えば対物レンズ）を配置した場合、全体の光学系としては球面収差が低減されることになる。

30

【0007】

【非特許文献1】A. V. Crewe, D. Kopf, Optik, Vol. 55 (1980) p. 1-10

【非特許文献2】H. Rose, Optik, Vol. 85, (1990) p. 19-24

【特許文献1】特開2003-92078号公報

【発明の開示】

【発明が解決しようとする課題】

【0008】

しかしながら、上述の収差補正技術は四次の収差までの補正であり、更に高次の収差に対しては完全な補正が出来ていない。例えば、五次の球面収差は対物レンズと収差補正装置の距離を光学的に制御すれば補正できるが、同次数の非点収差（即ち六回非点収差）の補正は実現できていない。これが収差補正の制限要因となっているため、更なる空間分解能の向上が期待できない。

40

【0009】

実際の多極子は光軸に沿って有限な厚みを有する。この多極子が三回対称の磁場或いは電場を生じる場合、その多極子によって球面収差を補正すると、逆に上記の厚みに依存した高次の収差、および二段の組み合わせとして生まれる高次の収差が現れる。このため、収差補正が可能となる電子線の入射角の範囲が制限されてしまう。更に、この制限によって回折収差の低減が困難になる。

【0010】

この角度制限については、図7に示したロンチグラム（Ronchigram）図を用いて説明す

50

る。この図は、光軸に対して三回対称となる磁場を生じる 2 段の多極子を通過する電子線に対して収差補正を行ったときに得られたものである。図の中央に現れたコントラストの少ない領域は、適切に収差補正された電子線の多極子に対する入射角に対応している。この入射角の最大値を概算する場合は、当該領域の中央を中心として、同領域のみを含む最大の円を当てはめ、更にこの円の半径から電子線の入射角を換算する。この図 7 によれば、収差が適正に行われた電子線の最大入射角は約 50 mrad であることがわかる。

【 0 0 1 1 】

しかしながら、円の周りの領域に着目すると、非晶質の像が見える領域が六角形になっていることが判別できる。これは、五次の非点収差で現れる六回非点収差の残留によるものである。図 7 を得た多極子の場合、収差補正が可能な電子線の最大入射角はせいぜい 50 mrad であり、それ以上の入射角を有する電子線に対して適切な収差補正は困難になる。従って、回折収差の低減を図ろうとしても、この入射角の制限があるために空間分解能が制限されてしまう。

10

【 0 0 1 2 】

三回対称場を生じる多極子から発生する高次収差（六回非点）は、多極子がそれぞれの三回対称非点を打ち消し合う方向に磁場（或いは電場）の分布を配置させているために発生しており、つまり、従来用いられているそれぞれの多極子間の回転関係が、磁場または電場に対して 60° 或いは 180° の回転関係では、高次収差が発生してしまう。

【 0 0 1 3 】

そこで本発明は、負の球面収差を有しつつ上記の高次収差を補正する電子顕微鏡用の収差補正装置を提供することを目的とする。

20

【課題を解決するための手段】

【 0 0 1 4 】

本発明は上記の課題を解決するためになされたものであり、光軸に対して一列に配置され、前記光軸に沿ってそれぞれが厚みを有する三段の多極子を備え、前記三段の多極子のうち、前段の多極子は、前記光軸に対して三回対称となる第 1 の磁場又は電場を生じ、前記三段の多極子のうち、中段の多極子は、前記光軸に対して三回対称となる第 2 の磁場又は電場を生じ、前記三段の多極子のうち、後段の多極子は、前記光軸に対して三回対称となる第 3 の磁場又は電場を生じ、前記第 2 の磁場又は電場においては、前記第 1 磁場または電場、あるいは前記第 3 磁場または電場から発生した三回対称非点を打ち消す方向ではない磁場又は電場三回対称分布を作り、前記第 3 の磁場又は電場においては、前記第 1 の磁場または電場、あるいは前記第 2 の磁場または電場から発生した三回対称非点を打ち消す方向ではない磁場又は電場三回対称分布を作り、前記前段の多極子において発生した三回対称収差を、前記中段の多極子を用いて回転させ、前記中段の多極子から発生した三回対称収差を前記後段の多極子を用いて回転させ、前記三段の多極子の合成として、三回対称非点を打ち消すことを特徴とする。上記の回転というのは、多極子の作る場が次の多極子に転送されたときの電子光学的回転関係を示しており、レンズによる回転作用を考慮している。即ち、磁場レンズは、転送や倍率変化だけでなく、光軸に対して回転作用を持っており、その回転作用は、加速電圧や磁場の強さによって異なり、その磁場レンズの前後に配置した多極子分布は、回転関係を加味して回転関係を議論しなければならない。本発明の説明では、この回転関係をゼロとして角度関係を記述しており、電子光学的回転関係を考慮するとは、この回転関係を加味することを意味している。

30

40

【 0 0 1 5 】

また本発明は、多極子間の磁場又は電場の回転関係として、前記第 2 の磁場又は電場、或いは前記第 3 の磁場又は電場、の何れか一方は、前記第 1 の磁場又は電場に対し、前記光軸に垂直な面内において電子光学的レンズによる回転作用を考慮して 40° 回転して分布し、前記第 2 の磁場又は電場、或いは前記第 3 の磁場又は電場、の何れか他方は、前記第 1 の磁場又は電場に対し、前記光軸に垂直な面内において電子光学的レンズによる回転作用を考慮して 80° 回転して分布し、前記第 2 の磁場又は電場と、前記第 3 の磁場又は電場は同じ方向に回転して分布することを特徴とする。三回対称場は、 120° の回転対

50

称性があり、また鏡面对称系を考えると、 40° と 80° という角度関係は、 $120^\circ \times m \pm 40^\circ$ と $120^\circ \times m \pm 80^\circ$ と等価である。

【0016】

また本発明は、多極子間の磁場又は電場の回転関係として、前記第2の磁場又は電場は、前記第1の磁場又は電場に対し、前記光軸に垂直な面内において電子光学的レンズによる回転作用を考慮して、 m を整数として、 $120^\circ \times m \pm$ 略 72° 回転して分布し、前記第3の磁場又は電場は、前記第1の磁場又は電場に対し、前記光軸に垂直な面内において電子光学的レンズによる回転作用を考慮して $120^\circ \times m \pm$ 略 24° 回転して分布することを特徴とする。

【発明の効果】

10

【0017】

上記の構成によれば、負の球面収差を生じさせつつ三回非点収差と六回非点収差を除去できるので、空間分解能が向上する。また、収差補正が可能な入射角の範囲を広げることが可能となり、回折収差が低減され、空間分解能が更に向上する。

【発明を実施するための最良の形態】

【0018】

まず、電子線が光軸に沿って厚みを有する一段の多極子と対物レンズを通過したときに生じる収差について説明する。図1は、電子線が一段の多極子を通過したときの試料面上に生じる収差について模式的に示した図である。

【0019】

20

一段の多極子（例えば六極子）102と対物レンズ103は光軸101に対して一列に配置され、この多極子102は光軸101に対して三回対称となる磁場又は電場（以下、三回対称場と称する）を生じるものとする。電子線100は多極子102を通過した後、対物レンズ102によって試料面104に集束される。

【0020】

この多極子102に入射する電子線の複素角 Ω_0 を下記の式(1)により定義する。

【0021】

【数1】

$$\Omega_0 = \alpha \exp(i\phi) \cdots (1)$$

30

【0022】

複素角 Ω_0 は試料への角度 θ_0 に入射する方向（位相角） ϕ_0 を変数として兼ね備えたものであって、 θ_0 と ϕ_0 の二つの変数で記述される。円筒座標における (r, θ, ϕ) を用いず、直交座標 (u, v) を用いて、 $\Omega_0 = u + i v$ とも書ける。ただし、逆空間の空間周波数を (u, v) とすると、 $(-u, -v) = (u, v)$ となる。この複素共役は下記の式(2)で表される。

【0023】

【数2】

$$\bar{\Omega}_0 = \alpha \exp(-i\phi) \cdots (2)$$

【0024】

40

次に、多極子102の光軸101に沿った厚み（長さ）を z 、対物レンズの焦点距離を f とし、多極子102と対物レンズ103の光学的距離 L が0（ゼロ）であるとする。この光学的距離 L の調整は当該多極子102と当該対物レンズ103の間に転送レンズを挿入するなどして達成可能である。

【0025】

このような条件において、試料面104における電子線100の位置を r 、その傾き（光軸となす角）を r' とすると、 r 、 r' はそれぞれ、

【0026】

【数 3】

$$r = -\frac{1}{2f} A_3 \bar{\Omega}_0^2 z^2 + \frac{|A_3|^2}{12f^3} \bar{\Omega}_0 \Omega_0^2 z^4 - \frac{\bar{A}_3 |A_3|^2}{120f^5} \Omega_0^4 z^6 - \frac{A_3 |A_3|^2}{180f^5} \Omega_0 \bar{\Omega}_0^3 z^6 + \frac{A_3^2 |A_3|^2}{3360f^5} \bar{\Omega}_0^5 z^8$$

・・・ (3)

【0027】

【数 4】

$$r' = -\frac{1}{f} A_3 \bar{\Omega}_0^2 z + \frac{|A_3|^2}{3f^3} \bar{\Omega}_0 \Omega_0^2 z^3 - \frac{\bar{A}_3 |A_3|^2}{20f^5} \Omega_0^4 z^5 - \frac{A_3 |A_3|^2}{30f^5} \Omega_0 \bar{\Omega}_0^3 z^5 + \frac{A_3^2 |A_3|^2}{420f^5} \bar{\Omega}_0^5 z^7$$

10

・・・ (4)

【0028】

と表される。ここで、 A_3 は三回非点収差係数（単位長さ当たり）であり、 a_3 を三回非点収差強度、 θ を A_3 三回非点収差方位角とすると、

【0029】

【数 5】

$$A_3 = a_3 \exp(i3\theta) \cdots (5)$$

20

【0030】

と表される。なお、

【0031】

【数 6】

$$\bar{A}_3 \cdots (6)$$

【0032】

は A_3 の複素共役である。

【0033】

式(3)及び式(4)の右辺の各項は収差を表しており、具体的には、各式の右辺第一項が二次の三回非点収差、同第二項が三次の負の球面収差、同第三項及び第四項が四次のスリーローブ(Three lobe)収差、そして同第五項が五次の六回非点収差を表している。

30

【0034】

以上が、一段の多極子を用いたときに現れる収差である。

【0035】

多極子を二段用意して、一段目の多極子から発生する三回非点をキャンセルするようにした場合、二段目の多極子を出た後の電子線の位置は、以下となる。

【0036】

【数 7】

$$r' = -\frac{2|\tilde{A}_3|^2}{3f^3} \Omega_0 \Omega_0^2 z^3 + \frac{\tilde{A}_3^2 |\tilde{A}_3|^2}{14f^7} \Omega_0^5 z^7 + \dots \cdots (7)$$

40

【0037】

(7)式の第一項は、対物レンズの球面収差を打ち消すために意図的に発生させた負の球面収差であるが、第二項目は高次収差（六回非点）が発生しており、これは、多極子を二段用意して、一段目の多極子から発生する三回非点をキャンセルするようにしたことが原因である。

【0038】

そこで本発明では、三段の多極子を用意し、これら何れの二段の組み合わせでも三回非

50

点を打ち消すように動作させず、三段で三回非点を打ち消すようにし、高次収差を打ち消す光学系を構築する。

本発明に係る収差補正装置の一実施形態について説明する。図2(a)は、本発明の一実施形態に係る収差補正装置の模式図である。

【0039】

図2(a)に示すように本実施形態に係る収差補正装置は、光軸11に対して三回対称場を生じる多極子を三段備える。この図において、電子線10は前段の多極子21から後段の多極子23へ通過する。さらに電子線10は、対物レンズ40のコマフリー面(対物レンズ40の前方焦点面にほぼ相当)41を通過した後、試料面42に集束するものとする。なお、各多極子の例としては六極子や十二極子が挙げられるが、各多極子は光軸11

10

【0040】

本実施形態に係る収差補正装置において、中段の多極子22が生じる三回対称場(第2の三回対称場)は、前段の多極子21が生じる三回対称場(第1の三回対称場)に対し、光軸11に垂直な面内において40°回転して分布する。さらに、後段の多極子23が生じる三回対称場(第3の三回対称場)は、前段の多極子21が生じる三回対称場に対し、光軸11に対して垂直な面内において、80°回転して分布する。前段の多極子21によって生じる三回対称場に対して、中段及び後段の多極子22、23によって生じる三回対称場は同じ方向に回転して分布するものとする。

【0041】

20

上記のように三つの三回対称場が分布する場合においても、一つの三回対称場によって生じる収差の特性は基本的に式(3)、式(4)で表される。従って、本実施形態における三つの三回対称場によって生じる収差は、該の三回対称場が互いに回転関係を有することを考慮しつつ、これらの式の合成によって求められる。

【0042】

そこで、前段、中段、後段の多極子21、22、23による三回非点収差係数をそれぞれ A_{3A} 、 A_{3B} 、 A_{3C} として、これらの係数だけに着目する。それぞれの三回対称場によって生じる三回非点収差係数は、

【0043】

【数8】

30

$$\begin{aligned} A_{3A} &= a_3 \exp i(3\theta) \\ A_{3B} &= a_3 \exp i(3(\theta + 40^\circ)) = a_3 \exp i(3\theta + 120^\circ) \cdots (8) \\ A_{3C} &= a_3 \exp i(3(\theta + 80^\circ)) = a_3 \exp i(3\theta + 240^\circ) \end{aligned}$$

【0044】

と表される。従って、その総和は、

【0045】

【数9】

$$|A_{3A} + A_{3B} + A_{3C}| = 0 \cdots (9)$$

40

【0046】

となり、三回非点収差が相殺されることが判る。

【0047】

一方、負の球面収差係数は各三回対称場の回転関係に依存しないので、一つの三回対称場から生じる強度の三倍となり、対物レンズの球面収差補正に用いることができる。

【0048】

式(4)から、一つの多極子内から現れる六回非点収差に関して取り上げて議論すると、式(8)と同様に各多極子が有する六回非点収差係数は、

【0049】

50

【数 1 0】

$$\begin{aligned}
 A_{3A}^2 &= a_3^2 \exp i(6\theta) \\
 A_{3B}^2 &= a_3^2 \exp i(6(\theta+40^\circ)) = a_3^2 \exp i(6\theta+240^\circ) \quad \dots (10) \\
 A_{3C}^2 &= a_3^2 \exp i(6(\theta+80^\circ)) = a_3^2 \exp i(6\theta+480^\circ) = a_3^2 \exp i(6\theta+120^\circ)
 \end{aligned}$$

【0 0 5 0】

と表される。その結果、

【0 0 5 1】

【数 1 1】

$$|A_{3A}^2 + A_{3B}^2 + A_{3C}^2| = 0 \dots (11)$$

10

【0 0 5 2】

が得られる。つまり、前段の多極子が生じる三回対称場に対して、中段と後段の多極子 2 2、2 3 が生じる三回対称場が、光軸 1 1 に垂直な面内において、それぞれ、同方向に 4 0° 及び 8 0° 回転して分布していると、式 (4) から導出される六回非点収差が打ち消される。

【0 0 5 3】

従って、上記のような三回対称場を生じる三段の多極子 2 1、2 2、2 3 は、負の球面収差を生じつつ、三回非点収差と六回非点収差を打ち消す。

20

【0 0 5 4】

なお、上記によれば、前段の多極子 2 1 が生じる三回対称場に対して 4 0° および 8 0° 回転して分布する三回対称場の互いの前後関係は問わないことが判る。即ち、中段の多極子 2 2 が、前段の多極子 2 1 が生じる三回対称場に対して 8 0° 回転して分布する三回対称場を生じ、後段の多極子 2 3 が、前段の多極子 2 1 が生じる三回対称場に対して 4 0° 回転して分布する三回対称場を生じても良い。この場合も、負の球面収差を生じさせつつ、三回非点収差と、六回非点収差が打ち消される。

上記のような三つの三回対称場を生じる多極子の配置としては、前段の多極子 2 1 の配置を基準として、中段又は後段の多極子 2 2、2 3 の何れか一方を、光軸 1 1 に垂直な面内において 4 0° 回転して配置し、中段又は後段の多極子 2 2、2 3 の何れか他方を、光軸 1 1 に垂直な面内において 8 0° 回転して配置する。このとき、中段及び後段の多極子 2 2、2 3 は同じ方向に回転して配置する。図 2 (b) ~ (d) は、このような配置に基づいた各多極子の配置の一例を示したものである。これら各図は、図 2 (a) に示す光軸 1 1 上の原点 O から A 方向に見て、2 1 a が前段の多極子 2 1 の配置を、2 2 a が中段の多極子 2 2 の配置を、2 3 a が後段の多極子 2 3 の配置を表している。この回転関係は、転送するレンズでの回転後に着目する必要があるが、物理的に 4 0° の回転関係になくとも、転送レンズにより電子光学的に 4 0° の回転関係になっていればよい。三回対称場は、1 2 0° の回転対称性があり、また鏡面对称系を考えると、4 0° と 8 0° という角度関係は、1 2 0° × m ± 4 0° と 1 2 0° × m ± 8 0° と等価である。

30

40

以上は、式 (4) を用いて一枚の多極子内で発生する六回非点に着目して議論した。

次に、式 (7) を用いて、二つ以上の多極子が発生する三回非点の干渉によって生じる六回非点を考慮した系を考える。

三段の多極子を用意し、三段で三回非点を打ち消すようにした場合の、三段目の多極子からでた六回非点に対する電子線の傾きは、前段、中段、後段の多極子による三回非点収差係数をそれぞれ A_{3A} 、 A_{3B} 、 A_{3C} とすると、以下となる。

【0 0 5 5】

【数 1 2】

$$\begin{aligned} & \frac{\overline{A_{3A}A_{3A}^3\Omega^5}}{420f^7} + \frac{\overline{A_{3A}A_{3A}^2A_{3B}\Omega^5}}{30f^7} + \frac{\overline{A_{3B}A_{3A}^2A_{3B}\Omega^5}}{30f^7} + \\ & \frac{\overline{A_{3B}A_{3B}^3\Omega^5}}{420f^7} - \frac{\overline{A_{3A}A_{3A}^2A_{3C}\Omega^5}}{30f^7} + \frac{\overline{A_{3B}A_{3A}^2A_{3C}\Omega^5}}{30f^7} - \frac{\overline{A_{3B}A_{3A}A_{3B}A_{3C}\Omega^5}}{15f^7} - \\ & \frac{\overline{A_{3C}A_{3A}A_{3B}A_{3C}\Omega^5}}{15f^7} + \frac{\overline{A_{3B}A_{3B}^2A_{3C}\Omega^5}}{30f^7} + \frac{\overline{A_{3C}A_{3B}^2A_{3C}\Omega^5}}{30f^7} + \frac{\overline{A_{3C}A_{3C}^3\Omega^5}}{420f^7} \dots (12) \end{aligned}$$

10

【0056】

式(12)で表されるように、三段の三回対称場を用いれば、第二項の高次収差(六回非点)の大きさが、各三回非点の係数からなるので、第二項の高次収差(六回非点)を打ち消すように設定することができる。なお、先に述べた三回対称収差のスリーローブ収差(五次収差)は、従来の二段型でも図7に示すように補正できており、本発明の三段型でも補正できる。

【0057】

(11)式を用いて、図8は、高次収差の値を、横軸を A_{3A} と A_{3C} の回転角度関係、縦軸を二段による多極子の場合に発生する高次収差(六回非点)を1とした場合の六回非点の相対的な量を示したグラフである。ただし、三回非点は三段の三回対称場の合成で打ち消すように設定している。

20

【0058】

A_{3A} と A_{3C} の回転関係を変化させると、六回非点の量が減り、 24° 付近で極小値をとることがわかる。また 24° を挟む $\pm 6^\circ$ 以内の領域(A_{3A} と A_{3B} の関係は 72° を挟む $\pm 6^\circ$ 以内)では、六回非点が二段の多極子を組み合わせた場合の半分以下となり、有効に補正されている様子が分かる。

【0059】

以上から、本発明のもうひとつの実施形態に係る収差補正装置において、中段の多極子22が生じる三回対称場(第2の三回対称場)は、前段の多極子21が生じる三回対称場(第1の三回対称場)に対し、光軸11に垂直な面内において凡そ 72° 回転して分布させる。さらに、後段の多極子23が生じる三回対称場(第3の三回対称場)は、前段の多極子21が生じる三回対称場に対し、光軸11に対して垂直な面内において、凡そ 24° 回転して分布させる。

30

【0060】

三回場は、 120° 回転すると元に戻り、また鏡面对称の光学系でも実現できるため、以上の回転関係は数学的な対称性から、 m を整数として、一段目の多極子と二段目の多極子の回転関係は、光軸11に対して垂直な面内において、 $120^\circ \times m \pm 略72^\circ$ 、二段目の多極子と三段目の多極子の回転関係は、光軸11に対して垂直な面内において、 $120^\circ \times m \pm 略24^\circ$ と一般化できる。

40

【0061】

一方、負の球面収差係数は各三回対称場の回転関係に依存しないので、三つの三回対称場から生じる強度の合成となり、対物レンズの球面収差補正に用いることができる。

図2(e)~(f)は、このような配置に基づいた各多極子の配置の一例を示したものである。これら各図は、図2(a)に示す光軸11上の原点OからA方向に見て、21bが前段の多極子21の配置を、22bが中段の多極子22の配置を、23bが後段の多極子23の配置を表している。この回転関係は、転送するレンズでの回転後に着目する必要があり、物理的に $120^\circ \times m \pm 72^\circ$ と $120^\circ \times m \pm 24^\circ$ の回転関係になくとも、転送レンズにより電子光学的にその回転関係になっていけばよい。

【0062】

50

従って、上記のような三回対称場を生じる三段の多極子 2 1、2 2、2 3 は、負の球面収差を生じつつ、三回非点収差を打ち消し、高次収差の六回非点も補正される。

【0063】

また、上記のような三つの三回対称場を生じさせるため、光軸 1 1 に垂直な面内において各多極子 2 1、2 2、2 3 を回転させるような回転手段（図示せず）を設けても良い。

【0064】

さらに、本実施形態に係る収差補正装置には、前段の多極子 2 1 と中段の多極子 2 2 の間に第 1 の転送レンズ対 3 1 を配置し、中段の多極子 2 2 と後段の多極子 2 3 の間に第 2 の転送レンズ対 3 2 を配置しても良い。

【0065】

第 1 の転送レンズ対 3 1 は二つの軸対称レンズ 3 1 a、3 1 b を有し、前段の多極子 2 1 で得られた像と等価な像を中段の多極子 2 2 に転送する。また、第 2 の転送レンズ対 3 2 は二つの軸対称レンズ 3 2 a、3 2 b を有し、中段の多極子 2 2 で得られた像と等価な像を後段の多極子 2 3 に転送する。つまり、各転送レンズ対 3 1、3 2 によって多極子間の光学的距離は 0 となる。

【0066】

この場合、各転送レンズ対 3 1、3 2 は、等価な像を各多極子間に転送するのみであるので、三つの三回対称場による光学的特性に影響を及ぼさない。なおかつ、各多極子間の距離を持たせることができるので、各多極子の配置に対する自由度が上がる。

【0067】

さらに、上記第 1、第 2 の転送レンズ 3 1、3 2 に加え、対物レンズ 4 0 と後段の多極子 2 3 の間に、第 3 の転送レンズ対 3 3 を設けても良い。

【0068】

第 3 の転送レンズ対は二つの軸対称レンズ 3 3 a、3 3 b を有し、後段の多極子 2 3 で得られた像と等価な像を対物レンズ 4 0 に転送する。つまり、この間の光学的距離は 0 となる。第 3 の転送レンズ対は、第 1、第 2 の転送レンズ 3 1、3 2 と同様に、等価な像を対物レンズ 4 0 に転送するだけであるので、三つの三回対称場による光学的特性に影響を及ぼさない。従って、後段の多極子 2 3 と対物レンズ 4 0 の配置に対する自由度が上がる。

【0069】

本発明の一実施形態に係る収差補正装置を透過型電子顕微鏡に搭載した例について図 5 及び図 6 を用いて説明する。

【0070】

図 5 は上記収差補正装置を照射系収差補正器として用いた透過型電子顕微鏡 5 0 の例である。

【0071】

電子銃 5 1 は、高圧制御部 5 8 によって電子線（図示せず）を発生し、併せて所望のエネルギーに電子線を加速する。次に第 1 集束レンズ 5 2 が加速された電子線を集束する。集束された電子線は照射系収差補正器 5 3 を通過する。このとき、上記した収差補正が行われる。さらに照射系収差補正器 5 3 を通過した電子線は、第 2 集束レンズ 5 4 によって集束され、対物レンズ及び試料ステージ 5 5 を通過する。なお、試料ステージには試料が装着されている。

【0072】

試料を透過した電子線は中間・投影レンズ 5 6 によって拡大され、観察室 5 7 の蛍光板（図示せず）に入射する。この蛍光板に投影された試料像は、カメラ等によって撮像される。

【0073】

対物レンズ及び試料ステージ 5 5 を通過するとき、対物レンズは電子線を更に集束させるが、対物レンズによる正の球面収差は、試料面における電子線のスポット径を広げるように作用する。しかしながら、照射系収差補正器 5 3 によって生じた負の球面収差によ

10

20

30

40

50

て、この正の球面収差が打ち消される。従って、試料面において微小な電子線が得られることになる。

【0074】

また試料面において、三回非点収差、六回非点収差などが除去される。従って、照射系において、収差補正が可能な電子線の入射角の範囲が広がる。

【0075】

そして、電子線の入射角の範囲が広がると回折収差が低減されるので、透過型電子顕微鏡の空間分解能が更に向上する。

【0076】

また、試料面において微小なスポットが得られるので、透過型電子顕微鏡50の光学系に偏向器(図示せず)を備えた時には、空間分解能の高い特性X線分析などが可能となる。

【0077】

図6は本発明の一実施形態に係る収差補正装置を結像系収差補正器として用いた透過型電子顕微鏡60の例である。

【0078】

電子銃61は、高圧制御部68によって電子線(図示せず)を発生し、併せて所望のエネルギーに電子線を加速する。次に第1集束レンズ62、第2集束レンズ63が加速された電子線を集束する。集束された電子線は対物レンズ及び試料ステージ64において更に集束され、試料ステージ上の試料に照射される。

【0079】

試料を透過した電子線は結像系収差補正器65を通過する。このとき、上記した収差補正が行われる。さらに結像系収差補正器65を通過した電子線は、中間・投影レンズ66によって拡大され、観察室67の蛍光板(図示せず)に入射する。この蛍光板に投影された試料像は、カメラ等によって撮像される。

【0080】

電子線が結像系収差補正器65を通過するとき、対物レンズによって生じた正の球面収差は、結像系収差補正器65が有する負の球面収差によって相殺される。また、この収差補正装置によって三回非点収差、六回非点等が除去される。従って、透過型電子顕微鏡の空間分解能が向上する。

【0081】

また、結像系収差補正器65による収差補正によって、収差補正が可能な電子線の入射角の範囲が広がる。電子線の角度の範囲が広がると絞リ(図示せず)等による回折収差が低減されるので、透過型電子顕微鏡の空間分解能が更に向上する。

【0082】

なお、上記は、照射系収差補正器53若しくは結像系収差補正器65の何れか一方を搭載した透過型電子顕微鏡の例であったが、これら両方を透過型電子顕微鏡に搭載することも可能である。

【図面の簡単な説明】

【0083】

【図1】光軸に沿って厚みを有する一段の多極子によって生じる収差についての説明図である。

【図2】図2(a)は本発明の実施形態に係る収差補正装置の模式図、図2(b)~(g)は各多極子の配置を示す模式図である。

【図3】本発明の一実施形態に係る収差補正装置の模式図であり、第1及び第2の転送レンズを設けた実施形態である。

【図4】本発明の一実施形態に係る収差補正装置の模式図であり、第1、第2及び第3の転送レンズを設けた実施形態である。

【図5】本発明の一実施形態に係る収差補正装置を照射系収差補正器として透過型電子顕微鏡に搭載した実施形態である。

10

20

30

40

50

【図6】本発明の一実施形態に係る収差補正装置を結像系収差補正器として透過型電子顕微鏡に搭載した実施形態である。

【図7】光軸に沿って厚みを有する二段の多極子に電子線を通過させて得られたロンチグラム図である。

【図8】前段と後段との多極子の三回対称場がなす角度と六回非点量との関係を表すグラフ。

【符号の説明】

【0084】

10：電子線

11：光軸

21：前段の多極子

22：中段の多極子

23：後段の多極子

31：第1の転送レンズ

32：第2の転送レンズ

33：第3の転送レンズ

40：対物レンズ

50、60：透過型電子顕微鏡

53：照射系収差補正器

65：結像系収差補正器

100：電子線

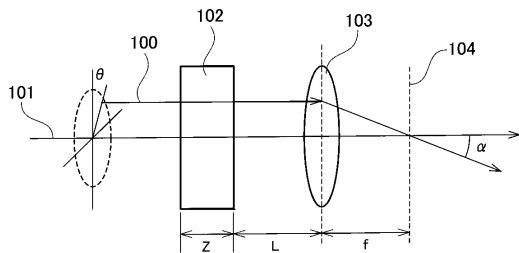
101：光軸

102：多極子

103：対物レンズ

104：試料面

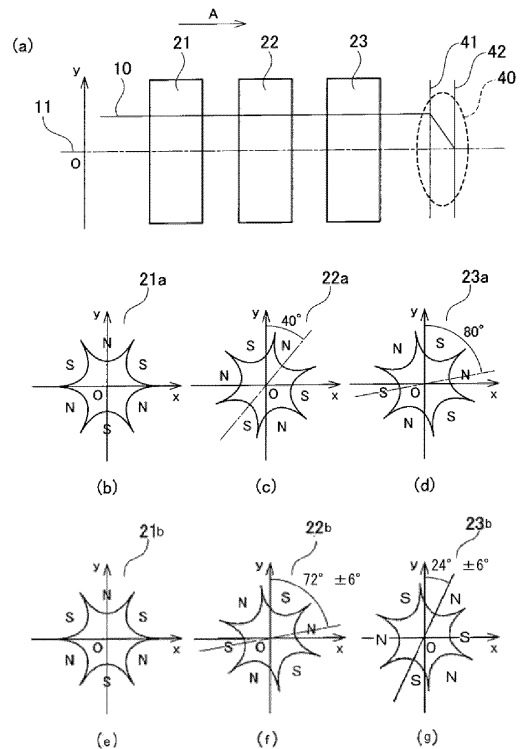
【図1】



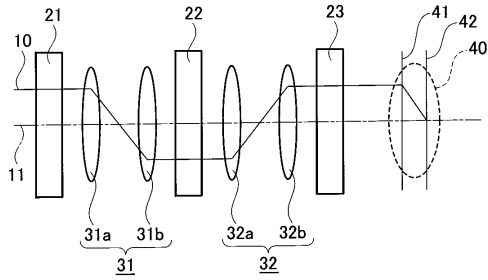
10

20

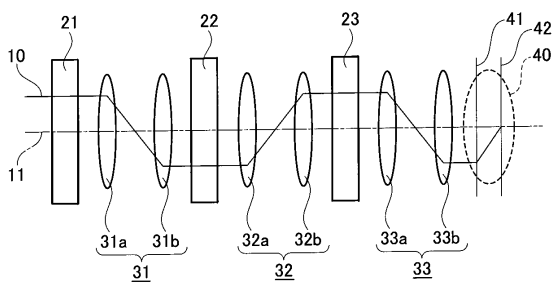
【図2】



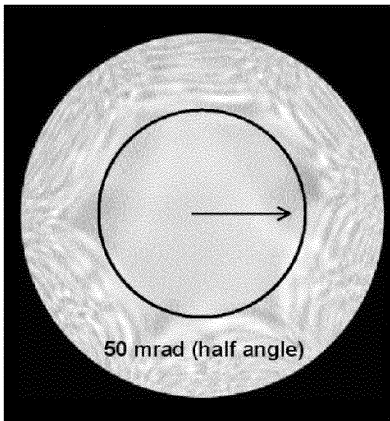
【図3】



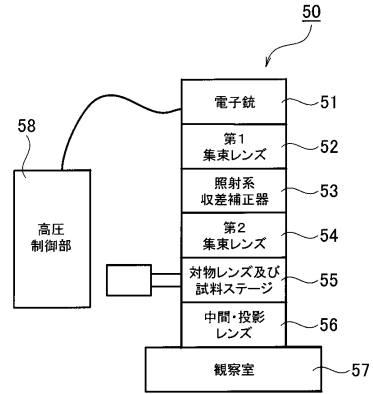
【図4】



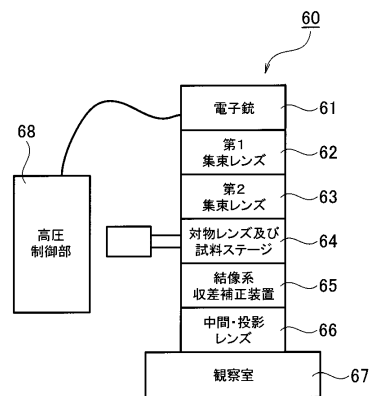
【図7】



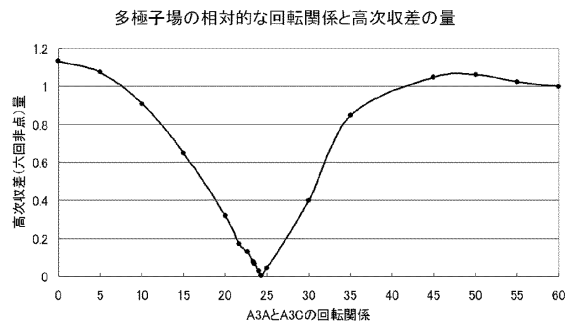
【図5】



【図6】



【図8】



フロントページの続き

(56)参考文献 国際公開第2007/065388(WO, A1)

特開2003-092078(JP, A)

特開2001-244195(JP, A)

特表2003-520427(JP, A)

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

H01J 37/00 - 37/02、37/05、37/09 - 37/18、

37/21、37/24 - 37/244、

37/252 - 37/295