

報告番号 * 甲第 894 号

主論文の要旨

題名 薄膜レンズによる電子レンズの
球面収差補正に関する研究

氏名 市橋 幹雄

本研究は電子顕微鏡をはじめ電子線装置の機能向上のために、その構成要素である電子レンズの性能を究極的に制限する球面収差の除去を目的として行なわれたものであり、本論文「薄膜レンズによる電子レンズの球面収差補正に関する研究」はその成果をまとめたものである。

第1章は本論文の概要を示すもので、電子レンズの球面収差補正の重要性を概説し、本研究の目的と意義を明確にしてその結果を要約した。

これまで球面収差補正に対して多くの提案が行なわれてきたが、これらは理論的な議論、考察にとどまり実現にはほとんど悲観的結論しか得られておらず、実際に成果を奏する補正法は全くないという過言ではない。本研究では実用化という観点から、新規な考察を加えて帯電膜を用いた薄膜レンズを採用した。これに類似した補正法も1950年頃理論的に検討された結果、薄膜印加電圧が極端に大きくなることがわかり、電子が透過するような薄膜では破損が問題となり放棄されていた。これら理論を検討して、上記の問題を解決するための新しい電極配置、すなわち円孔電極と帯電薄膜により構成される薄膜レンズに帰結した。また、帯電薄膜を用いる方法に付随した、この薄膜自体による電子線散乱の問題についても、対物レンズに適用する際には試料あるいは試料支持膜を補正用薄膜に兼用するという提案により解決された。

本研究の第1の目的は薄膜レンズによって通常の電子レンズの球面収差補正を実行し補正効果を定量的に測定することであり、またその構成における各レンズの球面収差の独立な測定値を用いて補正結果の解析法を確立することにある。さらに、収差補正に有効な薄膜レンズの条件を明確にすることである。

第2の目的として、薄膜レンズの電子光学特性をその電極寸法、印加電圧により解析的に求めて、電子光学系の収差補正に対する設計指針と基礎資料を得ることである。

以下、本論文の各章の概略を述べる。

第2章は、電子レンズの球面収差が電子顕微鏡の理論分解能および走査形電子顕微鏡、X線質量分析機などの電子プローブ装置の理論プロ

一径に対する究極的な制限を与える要因であることを述べる。また、既存の電子レンズは磁界型、静電型ともに集束作用をもつ凸レンズとしかなり得ぬことを概説し、その球面収差は常に正の量であり零にもできないこと (Scherzer による証明) を記して、球面収差補正の意義を示す。さらに、Scherzer の理論における条件を検討して得られている、従来の各種提案に対する問題点を整理して、実用性からみて本研究の帯電薄膜を用いる方法に至った経緯を述べる。過去にもこの補正法は二例が提案あり、理論的検討の段階で薄膜破損の問題で実現されなかったことは既述した。この問題点を解決すべく、薄膜印加電圧を低くしても大きな補正効果をもつよう考案したのが薄膜レンズである。

第3章では薄膜レンズによる補正法の基礎概念を述べ、このレンズの電子光学特性を解析する。まず、薄膜レンズに強い散乱作用を持たせ凹レンズを形成することにより、光学レンズと同様に組合せによって球面収差を補正しようとする。種々の電極構成を試作実験するうちに既述した、円孔平板と帯電薄膜による簡便な電極配置をもつ本論文の主題である薄膜レンズに帰結した過程を示す。次に、この薄膜レンズの特性を解析した。軸回転対称性から軸上電位分布を求め、近軸光線に対する主面位置、焦点距離を薄肉レンズ近似 (この妥当性は第6章、第7章で示される) によって導出した。また、球面収差は通常、レンズ領域での煩雑な数値積分をする必要があるが、遠軸光線に対しても薄肉レンズ近似を拡張する方法によって電極寸法と薄膜印加電圧だけで表わせる解析解が得られた。この結果、薄膜レンズは既存の電子レンズと逆符号を持つことが示される。本章の解析結果と実験結果とはよい一致をみた (第6章)。

第4章は、本研究の球面収差測定に用いた陰影電子顕微鏡法と実験装置を説明したものである。陰影法では広範囲の開口角に関する球面収差が陰影像の倍率変化として同時に得られる特徴がある。薄膜レンズの回転対称性より球面収差が開口角の偶数次項だけの級数に展開できることを利用し、多項式近似による評価法を導入した。従来の開口角の小さ

い領域における誤差の大きい測定値を用いる方法に対し、多項式近似の方法は比較的誤差の小さい、開口角の大きな領域の値も利用できるという有利性が認められた。

上記の陰影法の試料としては、薄膜レンズの帯電膜を用いた。このため、帯電膜は光軸からの距離の尺度を与え易い性質を要し、本研究では光回折格子のカーボンレプリカ膜とビディコン用メッシュにカーボン膜を付けたものを用いた。また、薄膜レンズの回転対称電界が擾乱されないよう3個の円筒電極を設けて、それら端面の弱いレンズ作用を打消す配慮をした。

第5章で実験結果を前述の多項式近似によってまとめる。被補正用磁界レンズの球面収差は3次係数 C_{30} だけで表わされ、5次以上の高次収差の影響はほとんど無視できることがわかった。一方、薄膜レンズでは高次収差の奇数が大きいが、3次、5次、7次までの収差を考える必要のあることが判明した。また、実験結果を整理して各収差係数の符号を決定できた。

薄膜レンズによる補正実験の結果、収差の減少が確認され、 10^3 rad以下の小さな開口角で補正効果が顕著であった。この補正結果は上述の薄膜レンズの性質から定性的には次のように説明できる。開口角の小さい領域では、磁界レンズの C_{30} と逆符号の3次係数 C_{31} により補正効果は大きいが、開口角の増加に伴って同符号の5次係数 C_{51} の影響で効果は低減する。それゆえ、薄膜レンズは C_{31} が大きいことが必要であり、同時に C_{51} は小さい方が有効である。

第6章では、磁界レンズと薄膜レンズの別々に測定した実験結果を用いて薄膜レンズ主面における電子軌道の屈折から、補正結果の定量的解析を行なった。この計算値は既述の開口角による補正効果の変化を示す実験結果を説明できた。これより、薄膜レンズの補正能力としては収差係数 C_{31} だけでなく、ガウス焦点距離の4乗との比 C_{31}/f^4 を採用する方が合理的であることがわかった。また、この補正能力に関しても、第3章の解析結果は実験結果とほぼ満足できる一致をみた。したがって

電子光学系の設計に必要な薄膜レンズの電子光学特性についての基礎資料が得られた。

第7章は電算機による数値計算について記す。前章の解析の出发点として用いた軸上電位分布は、電算機の計算結果と比較して3~4%以内でよく一致していることが確認された。また、補正結果の解析に対して平面であると仮定した主面位置の情報を得て、薄肉レンズによる軌道計算の妥当性が裏付けられた。

第8章では、第2章より第7章までに記述した研究成果についての総括を行なった。