

Title	Development of a Monochromator with Offset Cylindrical Lenses for Electron Microscopy
Author(s)	小川, 貴志
Citation	大阪大学, 2018, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.18910/70740
rights	
Note	

Osaka University Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

Osaka University

論文内容の要旨

氏 名 (小 川 貴 志)

論文題名

Development of a Monochromator with Offset Cylindrical Lenses for Electron Microscopy
(オフセット配置したシリンドリカルレンズによる電子顕微鏡用モノクロメータの開発)

論文内容の要旨

本論文はオフセット配置したシリンドリカルレンズ (CL) による電子顕微鏡用モノクロメータ (MC) の開発について、理論と実験による研究成果をまとめたものである。MCは電子線のエネルギー幅を縮小する電子光学装置である。

第1章では、本研究の背景と主題を記述した。近年の電子顕微鏡分野の動向として、観察条件の低エネルギー化がある。走査型電子顕微鏡 (SEM) においては、半導体デバイスに対し試料内の電子線散乱領域を縮小するために、数100eVでの観察が提案されている。透過型電子顕微鏡 (TEM) においては、グラフェン等の軽元素への電子線照射によるノックオンダメージを回避するために、20-60keVでの観察が重視されている。低エネルギー化は色収差の影響により空間分解能の低下をもたらすが、最先端の電子顕微鏡はMCを採用し性能改善を実現した。これまでに様々な種類のMCが開発され、高性能化が達成されている。しかし、既存のMCは非常に複雑な構造を持ち、困難な製作、多数の電源の必要性、調整の複雑化、価格の高騰という問題があった。そこで、本研究では高性能かつ簡易な構造をもつMCの開発を主題とした。産業上の重要性からSEMを主な応用先とし、先行研究でのSEM用MCのエネルギー分解能が150meVであることから、本研究では100meV以下を目標仕様とした。

第2章では、軌道計算に基づき、一段のオフセット配置したCLに対し、光軸を決定し、一次 (ガウス) 光学系の結像関係を行列表示した。行列表示をもとに多段のCLを使用したMC光学系を構築した。このMCは中心対称位置で線状集束し、エネルギー分散を持つこと、出射位置において円状集束し、エネルギー分散がキャンセルされることを示した。また、エネルギー分解能と機械公差の影響について見積もりを行った。

第3章では、軌道計算結果に対し回帰分析を適用し、MCの三次までの収差係数を算出した。出射位置において二次の開口収差とエネルギー分散がキャンセルされることを収差係数から明確に示した。これは光学系と光軸が中心対称、かつ二組の一次軌道が対称、反対称という条件を満たしていることに起因している。収差係数に基づき、ビーム径、エネルギー分解能、輝度等のMC特性を明らかにした。エネルギー分解能は中心対称位置での二次の開口収差により制限され、輝度は出射位置における三次の収差により制限される。MC性能の光源依存性を見積もり、最適な使用条件を明らかにした。以上の定量化された特性は、MCの具体化設計ならびに電子顕微鏡へ応用する上で重要である。

第4章では、本MCを1keV以下の低エネルギー条件におけるSEMに適用した場合について理論検討を行った。球面収差、色収差がともに1mmである高性能SEMを仮定し、試料位置でのビーム径を算出した。本MCを用いることで色収差の影響は軽減され、入射エネルギー100eVにおいて、SEMのビーム径は19.7nmから4.4nmに大幅に向上した。より低い10eVのエネルギー条件では、MCの効果がより顕著となった。本MCは低エネルギー条件におけるSEM性能の向上に有効である。

第5章では、MCの試作機を製作し、実験による評価を行った。エネルギー分解能を主に決定する一段のCLを含むMC前半部について評価した。電子源エネルギー幅の測定値と理論値の比較から、入射エネルギー (E_0) 3.1keVにおいて、エネルギー分解能 (dE) は半値幅で88meVであり、性能指標 dE/E_0 は 2.7×10^{-5} に達することを示した。光学計算の結果は85meVであり、実験結果を支持した。測定装置全体の精度と安定性は3meVより優れていた。本光学系は少ない電源構成で動作可能であること、使用条件は比例関係にあり容易に調整できることを明らかにした。

第6章では、二段のCLを備えたMC光学系について評価を行った。後段にエネルギー分析器を追加し、より直接的にエネルギー分解能を評価した。本MCのエネルギー分解能は73meVであり、電子源本来のエネルギー幅の10%まで縮小されることを示した。MCのON、OFF二条件の比較により、ビーム位置が一致し、良好なビーム分布が得られることがわかった。これらは光学系の中心対称性により得られている。本MCが電子顕微鏡への適性を持つことをより確かにした。

本研究では、理論と実験に基づき、高性能かつ簡易構造を持つ電子顕微鏡用MCの開発を行った。主にSEMへの応用について検討し、先行研究より優れたエネルギー分解能を得ることができた。本MCは簡易な構造により、製作上の困難の軽減、制御電源構成の最小化、簡便な調整を実現した。これらは実用上重要であり、本MCの高い可能性を示している。本論文は新型MCの開発について記述し、電子顕微鏡学ならびに荷電粒子光学の発展に寄与するものである。

論文審査の結果の要旨及び担当者

氏 名 (小川 貴志)			
	(職)	氏 名	
論文審査担当者	主 査	教授	高井 義造
	副 査	教授	大政 建史
	副 査	教授	中山 健一
	副 査	教授	菊地 和也
	副 査	教授	伊東 忍
	副 査	教授	渡部 平司
	副 査	教授	兼松 泰男

論文審査の結果の要旨

本論文は、オフセット配置したシリンドリカルレンズ (CL) による電子顕微鏡用モノクロメータ (MC) の開発について、理論と実験による研究成果をまとめたものである。

第 1 章では、本研究の背景と主題について述べている。近年の電子顕微鏡において、観察条件の低エネルギー化にともなう空間分解能の低下を改善するために、MC の採用が進んでいることを説明している。これまでに様々な種類の MC が開発され、高性能が達成されているが、反面、非常に複雑な光学構成を必要とするという問題点を指摘している。そこで、高性能かつ簡易な構造を持つ MC の開発の必要性を提起するとともに、MC の目標仕様、応用先を明確化し、本論文の位置づけを明らかにしている。

第 2 章では、オフセット配置した CL による MC について、一次 (ガウス) 光学系に関する理論研究を行っている。オフセット配置した CL は、一般的な軸対称レンズに対する近軸理論で取り扱うことが困難であるため、軌道計算に基づく新たな手法を採用している。まず、一段のオフセット配置した CL について、結像関係を行列表示できることを示している。つぎに行列表示をもとに二段の CL について結像関係を明らかにし、さらに前後に軸対称レンズを配置した光学系が MC として動作することを示している。ビーム形状の計算結果から、エネルギー選択位置ではビームが線状収束し、出射位置では円状集束していることを明らかにしている。MC 光学系のエネルギー分解能を算出するとともに、機械公差の影響の検討を行っている。

第 3 章では、MC 光学系について高次収差を考慮したより詳細な理論研究を行っている。軌道計算に回帰分析を適用する手法を用いて、三次までの収差係数を算出し、出射位置において二次開口収差とエネルギー分散がキャンセルされることを示している。これは電子顕微鏡へ応用する上で重要な結果である。算出した収差係数をもとに、エネルギー分解能や輝度の電流依存性を明らかにするとともに、性能を制限する収差を示している。既存の MC と比較を行ない、本 MC 光学系はエネルギー分散が大きく、電源数が最少であるという利点を持つことを示している。

第 4 章では、MC を搭載した走査型電子顕微鏡 (SEM) の性能について理論研究を行っている。第 3 章で算出した MC の収差係数と特性をもとに、SEM 光学系により集束される試料位置でのビーム径を算出し、エネルギー条件や光源種類に対する性能特性を明らかにしている。本 MC を使用することで、100eV という極低エネルギー条件において、SEM のビーム径が 19.7nm から 4.4nm に大幅に改善するという計算結果を示し、本 MC は低エネルギー条件における SEM 性能の向上に有効であることを明らかにしている。

第 5 章ならびに第 6 章は、MC 光学系の理論研究に基づき開発した試作機の評価結果について記述している。

第 5 章では、MC 試作機の試験による評価を行っている。まず、試作機の装置構成とエネルギー分解能評価法につい

で説明している。つぎに、本 MC の重要な光学要素であるオフセット配置した CL の動作評価を行い、レンズとしての集束作用のみならず偏向作用を有することを示している。さらに、電子線エネルギー幅について実験による測定結果と理論の比較により、MC のエネルギー分解能として 88meV が得られたことを示している。測定装置全体の精度と安定性は 3meV 以下であり、本試作機が優れた精度と安定性を有していることを示している。本 MC 光学系の動作条件が比例関係にあり、容易に調整でき、かつ少ない電源構成で使用できることを明らかにし、従来の MC と比較してより簡易な構造を持つ本 MC の利点を明確に示している。

第 6 章では、MC 試作機のより詳細な評価を行っている。MC のエネルギー分解能を後段に配置した別のエネルギー分析器でより直接的に測定することで、73meV が得られたことを示している。二つの評価法で得られたエネルギー分解能は、ほぼ同等であり、評価の信頼性を高めるとともに、SEM 用 MC の先行研究の 150meV よりも優れた結果である。また二段に配置した CL を使用することで、ビーム位置を補正できること、良好なビーム形状が得られることを示し、本 MC の電子顕微鏡への適性をより確実なものとしている。

本論文では、高性能かつ簡易構造を持つ電子顕微鏡用 MC の開発について、MC 光学系の理論研究、SEM への応用、ならびに実験による試作評価を含む一連の研究成果について述べている。本研究において開発した MC は、SEM 用 MC の先行研究よりも優れたエネルギー分解能が得られている。本 MC は簡易な構造に特徴があり、少ない電源でかつ簡便な調整で使用できることから実用上優れており、将来の実用化が期待できる。

以上のように、本論文はオフセット配置した CL による電子顕微鏡用 MC の開発について記述しており、電子顕微鏡学ならびに荷電粒子光学の発展に寄与するものである。よって本論文は博士論文として価値あるものと認める。