



Title	電子源輝度および電子ビームコヒーレンスの精密測定法の開発
Author(s)	畑中, 修平
Citation	大阪大学, 2024, 博士論文
Version Type	VoR
URL	<a href="https://doi.org/10.18910/98784">https://doi.org/10.18910/98784</a>
rights	
Note	

*The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA*

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

The University of Osaka

## 論文内容の要旨

氏 名 ( 畑 中 修 平 )	
論文題名	電子源輝度および電子ビームコヒーレンスの精密測定法の開発
論文内容の要旨	
<p>本論文は、電子ビームの空間コヒーレンス測定と、それを応用したWigner関数の再構成法の提案、さらにWigner関数の議論から電子源輝度の精密な測定について述べたものであり、以下に示す6章で構成した。</p> <p>第1章は序論であり、電子顕微鏡に使用されている主な電子源について述べ、異なる電子源による主要な違いが輝度およびコヒーレンスであることを述べた。試料面の空間コヒーレンスは照射レンズ系にも依存する物理量である一方、輝度は光軸に沿って保存するため電子源の性能を示す指標として重要であるが、既存手法による輝度測定は精度が悪く、電子源の性能向上研究や新規電子源開発に正確かつ高精度な輝度測定手法が必要であることを背景として述べた。それを受けた本論文の目的として、電子波動場の計測に基づく空間コヒーレンス測定とWigner関数の再構成に取り組み、光軸上の輝度（軸上輝度）を高い精度と確度で求める手法の確立を掲げた。さらに、現在幅広く使用されている電界放出電子銃および熱電子銃に対して開発した手法を適用し、大まかな比較に留まっている電子源タイプによる輝度の違いを定量測定することも目的とした。本章の最後に、論文の全体構成をまとめた。</p> <p>第2章では、測定対象であるコヒーレンスと輝度について述べた。波動のコヒーレンスと量子力学における状態の対応関係について述べ、部分コヒーレントな電子波を密度演算子と同様に、位相空間表現であるWigner関数で記述できることを説明した。無限小の面積、無限小の立体角内の電流で定義される輝度は既存手法で厳密に測定できないが、位相空間の擬確率密度関数であるWigner関数の原点での値とビーム電流を用いて表されることを述べた。</p> <p>第3章では、透過電子顕微鏡内での空間コヒーレンス測定について述べた。まず単孔絞りのFraunhofer回折であるAiryパターンの強度分布を解析する手法を紹介し、従来は測定が困難だった熱電子銃からの低コヒーレンスビームに適用するための手法拡張について述べた。具体的には、集束イオンビーム装置を用いて加工限界に近い極小の単孔絞りを作製し、さらに電界放出電子銃とは異なり非対称な強度分布を持つ熱電子銃の特性を考慮した解析モデルを考案した。これらの改良によって、熱電子銃からの電子ビームの空間コヒーレンスを初めて定量測定した結果を示した。また、一般的な電子ビームコヒーレンス測定法であるパイブリズムを用いる手法と比較し、本手法の優位性について議論した。電界放出電子銃の測定結果についても示し、同じ電流密度で試料面を照明した場合、電界放出電子銃からの電子ビームの空間コヒーレンスが熱電子銃よりも1桁半優れることを初めて定量的に示した。</p> <p>第4章では、電子ビームのWigner関数の再構成について述べた。まず光学分野で実現しているWigner関数の再構成手法が電子顕微鏡のレンズを用いて実行できないこと、そのため電子ビームでWigner関数の再構成が実現されていないことを説明した。本論文では、密度演算子を通したWigner関数の再構成手法を提案し、まず密度演算子が試料面のビームの振幅分布、レンズ収差による位相分布、およびコヒーレンス関数を用いて表されることを示した。またこれら全ての情報を、Airyパターン強度分布解析から決定することによって、Wigner関数を再構成できることを示した。提案手法を用いて、電界放出電子銃と熱電子銃からの電子ビームのWigner関数の再構成に成功した。</p> <p>第5章では、Wigner関数に関する考察を通して軸上輝度の算出について論じた。再構成したWigner関数は絞りによる回折の影響のため、位相空間原点の電流密度が軸上輝度に直接対応しないことを述べた。試料面の波動が一樣振幅かつ2回回転対称の位相分布という近似の下で、軸上輝度がコヒーレンス関数の積分によって求まることを示した。磁場レンズの特性と、Airyパターン解析結果から求めた波動の振幅分布と位相分布から、これらの近似の妥当性を示した。電子源強度分布がGaussian分布に近似できる電界放出電子銃では、コヒーレンスと電流密度を用いた簡単な式で軸上輝度が表されることを示した。非対称な強度分布を持つ熱電子銃では、実験データへのフィッティングによって軸上輝度を求める方法を考案した。開発した手法を用いて、電界放出電子銃および熱電子銃の軸上輝度を決定し、従来の平均輝度測定と比較して高い精度および確度で電子源性能を評価可能であることを示した。</p> <p>第6章は結論であり、本論文で得られた成果についてまとめるとともに、提案手法を活用した将来の展望について述べた。</p>	

## 論文審査の結果の要旨及び担当者

氏 名 ( 畑 中 修 平 )			
	(職)	氏 名	
論文審査担当者	主 査	教授	山崎 順
	副 査	教授	片山 竜二
	副 査	教授	小島 一信
	副 査	教授	尾崎 雅則
	副 査	教授	近藤 正彦
	副 査	教授	片山 光浩
	副 査	教授	森 伸也
	副 査	教授	森 勇介
	副 査	教授	廣瀬 哲也
	副 査	教授	丸山 美帆子

## 論文審査の結果の要旨

本論文は、電子ビームの空間コヒーレンス測定と、それを応用した Wigner 関数の再構成法の提案、さらに Wigner 関数の議論から電子源輝度の精密な測定について述べたものであり、以下に示す 6 章で構成されている。

第 1 章は序論であり、電子顕微鏡に使用されている主な電子源について述べ、異なる電子源による主要な違いが輝度およびコヒーレンスであることが述べられている。試料面の空間コヒーレンスは照射レンズ系にも依存する物理量である一方、輝度は光軸に沿って保存するため電子源の性能を示す指標として重要であるが、既存手法による輝度測定は精度が悪く、電子源の性能向上研究や新規電子源開発に正確かつ高精度な輝度測定手法が必要であることが背景として述べられている。それを受けた本論文の目的として、電子波動場の計測に基づく空間コヒーレンス測定と Wigner 関数の再構成に取り組み、光軸上の輝度（軸上輝度）を高い精度と確度で求める手法の確立が掲げられている。さらに、電子顕微鏡を始めとする様々な電子ビーム装置に広く使用されている電界放出電子銃および熱電子銃に対して開発した手法を適用し、従来は大まかな比較に留まっている電子源タイプによる輝度の違いを定量測定することも目的としている。本章の最後に、論文の全体構成がまとめられている。

第 2 章では、測定対象であるコヒーレンスと輝度について述べている。波動のコヒーレンスと量子力学における状態の対応関係について述べ、部分コヒーレントな電子波を密度演算子と同様に、位相空間表現である Wigner 関数で記述できることを説明している。無限小の面積、無限小の立体角内の電流で定義される輝度は既存手法で厳密に測定できないが、位相空間の擬確率密度関数である Wigner 関数の原点での値とビーム電流を用いて表されることを述べている。

第 3 章では、透過電子顕微鏡内での空間コヒーレンス測定について述べている。まず単孔絞りの Fraunhofer 回折である Airy パターンの強度分布を解析する手法を紹介し、従来は測定が困難だった熱電子銃からの低コヒーレンスビームに適用するための手法拡張について述べている。1 つ目は実効径 10 nm 程度の極小の単孔絞りを作製した点であり、2 つ目は電界放出電子銃とは異なり、非対称な強度分布を持つ熱電子銃の特性を考慮した解析モデルを考案した点である。これらの改良によって、熱電子銃からの電子ビームの空間コヒーレンスを初めて定量測定した結果を示している。また、一般的な電子ビームコヒーレンス測定法であるパイプリズムを用いる手法と比較し、本手法の優位性について議論している。電界放出電子銃の測定結果についても示し、同じ電流密度で試料面を照明した場合、電界放出電子銃からの電子ビームの空間コヒーレンスが熱電子銃よりも 1 桁半優れることを初めて定量的に示している。

第 4 章では、電子ビームの Wigner 関数の再構成について述べている。まず光学分野で実現している Wigner 関数の再構成手法が電子顕微鏡のレンズを用いて実行できないこと、そのため電子ビームで Wigner 関数の再構成が実現され

ていないことを説明している。本論文では、密度演算子を通した Wigner 関数の再構成手法を提案し、まず密度演算子が試料面のビームの振幅分布、レンズ収差による位相分布、およびコヒーレンス関数を用いて表されることを示している。またこれら全ての情報を、Airy パターン強度分布解析から決定することによって、Wigner 関数を再構成できることを示している。提案手法を用いて、電界放出電子銃と熱電子銃からの電子ビームの Wigner 関数の再構成に成功している。

第 5 章では、Wigner 関数に関する考察を通して軸上輝度の算出について論じている。再構成した Wigner 関数は絞りによる回折の影響のため、位相空間原点の電流密度が軸上輝度に直接対応しないことを述べている。試料面の波動が一樣振幅かつ 2 回回転対称の位相分布という近似の下で、軸上輝度がコヒーレンス関数の積分によって求まることを示している。磁場レンズの特性と、Airy パターン解析結果から求めた波動の振幅分布と位相分布から、これらの近似の妥当性を示している。電子源強度分布が Gaussian 分布に近似できる電界放出電子銃では、コヒーレンスと電流密度を用いた簡単な式で軸上輝度が表されることを示している。非対称な強度分布を持つ熱電子銃では、実験データへのフィッティングによって軸上輝度を求める方法を考案している。開発した手法を用いて、電界放出電子銃および熱電子銃の軸上輝度を決定し、従来の平均輝度測定と比較して高い精度および確度で電子源性能を評価可能であることを示している。

第 6 章は結論であり、本論文で得られた成果についてまとめるとともに、提案手法を活用した将来の展望について述べている。

以上のように、本論文は電子ビームの空間コヒーレンス測定法、Wigner 関数の再構成法、電子源輝度の精密な測定法の開発について述べたものであり、それらを適用して電子源タイプによる輝度の違いを高い精度と確度で初めて比較することに成功した内容を報告している。これらの成果は、電子顕微鏡を始めとする様々な電子ビーム装置に広く使用されている各種電子銃の性能向上および新規電子源の開発に大きく貢献できるものであると判断できる。また密度演算子を介した計測手法は、電子顕微鏡を用いた量子測定という基礎計測手法への展開も期待できるものである。

よって本論文は博士論文として価値あるものと認める。