

報告番号

※ 甲 第 1736 号

# 主論文の要旨

題名 薄膜レンズによるプローブフォーミングレンズの  
球面収差補正の研究

氏名 花 井 孝 明

## 主 論 文 の 要 旨

報告番号	※甲第	号	氏名	花 井 孝 明
------	-----	---	----	---------

電子ビームを極めて細く絞ったいわゆる電子プローブは、電子の短いde-Broglie波長と位置制御の容易さのため、局在した微細構造の直接観察および定性、定量分析さらには微細加工など、多岐にわたり応用されている。そして、応用分野の範囲の拡大に伴い、電子プローブを利用した装置の基本性能の向上に対する要請が強まってきている。例を挙げれば、医学、生物学、材料科学の分野においては原子、分子レベルあるいはそれに近いレベルでの観察および分析が、また半導体デバイス作製の分野ではサブミクロン領域での超LSIの電子ビーム描画が重要な課題であり、これらを実現できる空間分解能をもった装置が待望されている。このような目的のためには、既存の装置で得られるものより径が小さく、しかも高電子流密度の電子プローブを実現しなければならない。しかるに、得られる最小の電子プローブ径は、プローブ作製の電子レンズすなわちプローブフォーミングレンズの球面収差によって制限されているのが現状であり、この球面収差の低減あるいは補正が、電子プローブ装置の性能向上のために不可欠である。現在利用されているプローブフォーミングレンズは、この型のものとしてはすでに最高水準の性能を有しており、球面収差に関してもこれ以上の格段の改善は期待できない。したがって、このような通常型のレンズとは異なった特殊なレンズによる補正が必要であり、そのための研究が電子光学の分野における重要な課題となっている。そこで、種々の補正法のなかで実用化の可能性の高い薄膜レンズによる補正法に着目し、プローブフォーミングレンズの球面収差の薄膜レンズを用いた補正によるプローブ径の減少、およびそれによる電子プローブ装置の性能向上を目的とした基礎的研究を行った。本論文はその成果についてまとめたものである。

本論文は7章から成る。

第1章の緒論では、本論文の目的を明確にするため、プローブフォーミングレンズの球面収差補正が必要とされる背景について述べ、さらに、薄膜レンズを用いた球面収差補正に関連して明らかにされるべき問題点を簡単にまとめている。また、本論文の概要を記している。

第2章では、本論文の内容に関する基本的な事項について述べている。まず最初に、電子プローブ装置における球面収差補正の意義を明らかにするた

# 主論文の要旨

報告番号

※甲第

号

氏名

花井孝明

め、プローブ径を決定する要因について議論し、球面収差が最も重要な要因であることを示している。次に、これまでに提案されてきた種々の補正法の比較検討を行い、球面収差補正の研究の現状を述べている。最後に、本研究以前に確認されていた薄膜レンズの動作特性をまとめ、他の補正法に対する特長を述べている。

第3章では、プローブフォーミングレンズに適用する際の薄膜レンズの球面収差補正特性の計算について述べている。通常の電子レンズにおいては、3次の球面収差だけを考慮してレンズの特性を議論すれば十分であるが、本研究においては3次の球面収差が補正された後に残る5次の球面収差を評価することが重要である。そこでまず、3次と5次の球面収差係数の式を、電子計算機を用いた数値計算に適した形で導いている。次に、導いた式を用いて、薄膜レンズをプローブフォーミングレンズに適用したときの球面収差係数を計算し、薄膜レンズ各部の寸法が補正特性に与える影響を調べている。計算は、薄膜レンズに電圧を印加することにより薄膜に加わる静電力が過大とならないという条件のもとで、3次の球面収差係数が零となるとき5次の球面収差係数の大きさに着目して行っている。その結果として、薄膜レンズの薄膜と円孔平板電極との距離が大きいときに小さな5次の球面収差係数が得られることを示し、良好な特性をもつ薄膜レンズの設計の指針を与えている。

第4章では、球面収差補正によるプローブ径の減少を実証するための準備として、プローブ径の理論的検討に必要なプローブ電子流密度の計算法、および微小なプローブ径の測定法を確立している。まず、プローブ電子流密度の計算の際に5次までの球面収差を考慮するため、軌道計算により求めた球面収差係数を波動光学的なプローブ電子流密度に結びつける式を導き、この式を用いてプローブ径を計算する手法を述べている。次に、従来測定不可能であった微小なプローブ径を測定する必要から、従来のナイフエッジ法を改良した新しい方法として薄い板状試料の走査透過型電子顕微鏡 (STEM) 像を用いる測定法を開発し、その測定精度を調べている。この方法で測定したプローブ径をプローブ電子流密度の計算から得た値と比較した結果、2.2 - 60nmの広い範囲のプローブ径に対して測定誤差は常に±10%以内であり、

## 主論文の要旨

報告番号

※甲第

号

氏名

花井孝明

従来の測定法と比較して格段に小さなプローブ径を高精度で測定できることが示されている。

第5章では、第3章の計算結果に基づいて行った、薄膜レンズによるプローブフォーミングレンズの球面収差補正実験について述べている。薄膜レンズを用いてプローブフォーミングレンズの球面収差を補正したときのプローブ径の変化を、第4章で述べた方法により測定し、プローブ電流を一定に保ったままプローブ径を減少できることを示している。また、薄膜レンズ寸法のプローブ径に対する影響を調べるため、薄膜レンズの円孔平板電極と薄膜との距離 $d$ および円孔平板電極の厚さ $t$ を変えてプローブ径の測定を行っている。その結果、最小のプローブ径は $d$ と $t$ が大きいときに得られ、このときのプローブ径の値は、薄膜レンズを用いないときのプローブ径と比較してプローブ収束角 $43.2\text{mrad}$ のとき約 $1/8$ 、 $23.0\text{mrad}$ のとき約 $1/3$ に減少することが示されている。さらに、球面収差補正により得られたプローブの径を決める要因を明らかにするため、プローブフォーミングレンズ系の回転対称からのずれに起因する2次の軸上収差についての検討を行っている。そのために、細かい粒子の陰画像を用いた測定法を考案し、薄膜レンズを動作させた状態での2次の軸上収差を測定している。その測定結果および第4章で述べたプローブ電子流密度の計算から求めたプローブ径を、プローブ径の測定値と比較して、5次の球面収差よりむしろ2次の軸上収差が補正後のプローブ径に大きく影響していることを示し、薄膜レンズ寸法の変化によるプローブ径の減少が、薄膜レンズの工作における許容誤差の緩和による2次の軸上収差の減少に起因することを明らかにしている。球面収差補正によるプローブ径の減少を実験的に示したのは本研究が最初であり、このことは薄膜レンズの高い実用性を実証するものである。

第6章では、薄膜レンズが実際の電子プローブ装置に及ぼす影響を明らかにするため、例として走査型電子顕微鏡 (SEM) およびSTEMのプローブフォーミングレンズに薄膜レンズを適用し、その球面収差を補正することの効果調べている。薄膜レンズをSEMに応用した実験により、薄膜レンズを動作させることによる像コントラストの改善が示されている。この像から測定したコントラストの値は、実験に用いた試料のモデルに対してプロ

# 主論文の要旨

報告番号	※甲第 号	氏名
		花井孝明
<p>プローブ電子流密度の計算から求めた像コントラストの計算値と一致し、薄膜レンズの効果によるプローブ径の減少が像コントラストの改善をもたらすことが示されている。一方、薄膜レンズの薄膜による電子の散乱は像のS/N比を低下させ、薄膜レンズの応用上の制約となることも明らかにしている。SEMにおいては、高い2次電子効率を得るために低い加速電圧を用いるのが有利であるが、このとき薄膜で散乱される電子の割合は大きくなる。したがって、薄膜レンズのSEMへの効果的な応用を実現するためには、より散乱能の小さな薄膜の開発が必要である。STEMにおいても同様に、球面収差補正による像コントラストの改善が実験的に示され、その結果はプローブ電子流密度分布の計算により定性的に説明されている。STEMの場合には、SEMと違って高い加速電圧で用いるのが有利であるので、薄膜で散乱された電子の影響はあまり問題とならず、薄膜レンズが有効に使用できることが示されている。</p>		
<p>第7章では本論文を総括し、本研究により得られた成果をまとめている。</p>		