

審査の結果の要旨

論文提出者氏名 才田 大輔

本論文は、「Local Current Evaluation by Magnetic Force Microscopy (磁気力顕微鏡を利用した局所的電流評価に関する研究)」と題し、英文で書かれている。本論文は、磁気力顕微鏡(MFM)による磁場勾配検出を通じて局所領域を流れる電流を定量的に評価するための測定系を実現することを目指した研究の成果について記述しており、全8章から成っている。

第1章は「Introduction(緒論)」であり、本研究の背景を概観している。プロセス技術の発達に伴い、LSIなどの回路では、数 μm 角のような極く狭い領域の中に多数の電極と電流路がネットワーク状に配置されるようになってきている。そのような系の特性評価を行うためには、回路に挿入することなく個々の経路を流れる電流を定量的に評価できるような測定手法が望ましいこと、また、実現可能な非破壊測定候補としては磁場センサによる電流誘起磁場検出が挙げられること、を指摘している。さらに、このような目的には μm を上回る高い空間分解能が要求されるため、各種磁場センサの中ではMFMに優位性があることを述べている。一方で、従来のMFMが持つ問題点として、測定の定量性や空間分解能に関する議論が不十分であることを指摘し、これらを明確にすることがMFMを当該目的に適用する上で極めて重要であることを述べるとともに、本論文の目的と構成を述べている。

第2章は「Principle of Magnetic Force Microscopy(磁気力顕微鏡の原理)」と題し、基本的なMFMの概略ならびに動作原理を述べている。MFMでは、その磁性探針が受ける磁気力は磁場勾配に起因するため、磁気力によるカンチレバー変位をその向きも含めて検出すれば、原理的に試料周囲に存在する磁場の面内方向ならびに高さ方向の勾配を分離して観察できることを示している。

第3章は「Preparation of Fine Current Paths(電流路試料の準備)」と題し、本研究で用いた各種電流路の構造と作製方法を説明している。測定系の基本動作を検討するために用意した幅 $2\sim 20\ \mu\text{m}$ のGaAs/AlGaAsメサ型ストライプ構造と、測定系の空間分解能ならびに定量性を評価する目的で作製したAu/Ti積層電流路について、それぞれの構造を示すとともに、その作製プロセスやパッケージング手順などについて述べている。

第4章は「Basic Performance of Current-Induced Magnetic Field Detection by MFM(MFMを利用した電流誘起磁場測定系の基本特性)」と題し、測定手法の概念と実際に構築した測定系の基本動作、ならびに擾乱を排除して正確な電流評価を可能とするために付加した実験的工夫について議論している。まず、電流を交流とすることで、発生する磁場によるMFMカンチレバー変位を電流に同期した交流信号とし、またカンチレバーのねじれ変位に着目することによって、形状を得るためのカンチレバーの変位と磁気力による変位、すなわち試料形状と電流、を同時かつ独立に評価できる手法を提案している。特に、試料に印加する交流電流周波数をカンチレバーのねじれ共振周波数に一致させることで、電流に対する測定系の感度が向上することを述べ、幅 $2\sim 20\ \mu\text{m}$ の電流路を流れる約 $0.04\sim 20\ \mu\text{A}_{\text{rms}}$ の電流が作る磁場勾配分布を検出できたことを示している。一方で、通電するために試料に印加する交流電圧によって電流路とカンチレバーの間に静電引力が発生し、それによるカンチレバーのねじれ変位が磁気力信号の正確な検出の妨げになるという問題を指摘している。探針-試料間の電位差をバランスさせてこの問題を解決するために新たに導入した静電引力抑制手法の原理を述べ、特に交流電流とは異なる周波数の交流電圧を利用した直流オフセット電圧制御法では、試料を流れる電流に影響を与えることなく静電引力の影響を逐次抑制できることを示している。

第5章は「Directional Selectivity in Magnetic Field Detection(磁場計測の方向選択性)」と題し、カンチレバーの長手方向と検出される磁場勾配の向きとの関係について述べている。本手法では、カンチレバーのねじれ変位を利用しているため、原理的にはカンチレバーの長手方向に直交する向きの磁場勾配に対して感度を持つことをまず指摘している。その上で、カンチレバーと電流路の相対配置関係を意図的に選択し、特定の方向に

のみ存在する磁場勾配分布に対して検出される磁気力信号の強度・位相を実験的に確かめることで測定系の磁場計測の方向選択性について検討している。特に、T字分岐型電流路周囲の磁場勾配観察の結果と、数値計算による周囲磁場分布の解析結果との比較を通じて、本手法による磁場勾配分布測定では、原理から期待される通りの方向選択性が得られていることを確認した。さらに、磁性探針の磁化方向を反転させると、磁性探針と磁場勾配との相互作用が反転することによる磁気力信号の位相反転も原理通り確認された。

第6章は「Spatial Resolution(空間分解能)」と題し、本測定系の持つ空間分解能について議論している。0.2 μm のギャップで隔てられた1組の並行電流路周囲での磁場勾配観察では、ギャップ領域内で磁気力信号の2つの強度ピークが互いに反転した位相信号とともに観測され、またこの結果は数値計算による予測とよく一致することから、本手法の空間分解能が0.2 μm よりも優れていることを実験的に検証した。この値は、他の磁場センサでは実現できていない値であり、MFMを利用する手法の優位性が示された。一方、数値計算からは電流誘起磁場の勾配分布には強い高さ依存性があることが示されており、MFM測定時におけるカンチレバーのタッピング動作が、観測したい磁場勾配を高さ方向に平均化してしまう恐れがあることが明らかとなった。実際、測定時のカンチレバーの励振振幅を低減して、探針先端の振動が磁場勾配に明確な差がある領域内に収まるような工夫をした結果、磁気力信号のコントラストが明瞭になることを確かめており、より正確な磁場勾配検出のためには、MFMの動作条件も十分吟味する必要があることを指摘している。

第7章は「Quantitative Evaluation in Current(電流の定量計測)」と題し、本手法での電流評価における定量性について検討している。まず、バイアス電圧を変化させて電流値を変えると、磁気力信号の振幅成分もそれにほぼ線形に比例して変化することを実験的に確認した。一方、静電引力のみならず機械的励振や試料との周期的接触による反発力などによって生じるカンチレバーのねじれ変位が磁気力信号にオフセットとして重畳されてしまい、電流の定量評価を妨げる要因となることを指摘している。実験上、これらを一様なオフセット信号と見なして、得られた磁気力信号の強度成分から取り除くと、定量性がより高まることが示された。特に、同一バイアス条件にても経路ごとに電流値が異なる”田”の字型電流路での観測結果に対して同様のオフセット信号除去処理を行うと、電流 / 磁気力信号の比のばらつきが25 %以下の範囲に収まっていることを確認している。一方で、カンチレバーの個体差やその装着具合によってその応答性能が変化する問題は依然として残っているため、真の定量評価を達成するためには、標準試料などを用いたカンチレバーの校正が必要であることも併せて指摘している。

第8章は「Conclusion(結論)」であり、本論文全体の研究成果をまとめて要約するとともにその意義を述べている。

以上これを要するに、本論文は、MFMを利用した電流誘起磁場測定系を提案・構築し、その基本動作を確認した上で、様々な電流路周囲の磁場観測を行い、約40 nA ~ 400 μA の交流電流が作る磁場が検出可能であること、0.2 μm より優れた空間分解能が達成されていること、電流 / 磁気力信号の振幅比のばらつきが25 %以下に収まっていること、などを実験的に明らかにして、本手法が局所領域の電流定量評価測定に有望であることを実証したものであり、電子工学上、寄与するところが少なくない。

よって本論文は、博士(工学)の学位請求論文として合格と認められる。