

令和 3 年 5 月 18 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18K04937

研究課題名(和文) 磁気力顕微鏡を用いたナノ領域の金属探知機の研究

研究課題名(英文) Study on nano metal detector using magnetic force microscopy

研究代表者

若家 富士男 (Wakaya, Fujio)

大阪大学・基礎工学研究科・准教授

研究者番号：60240454

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：磁気力顕微鏡は、磁気モーメントをもつ探針を振動させながら磁性材料のもれ磁場を計測する装置として一般に知られている。しかし、本研究では、非磁性金属の上で磁気モーメントが振動することにより金属中に渦電流が発生し、その渦電流により発生した磁場を磁気力顕微鏡の探針が検出する現象を見出した。本研究では、その現象の理論を構築し、実験結果と比較するところまで達成できた。この現象は、絶縁体中に埋もれた金属を非破壊でナノメートル分解能で検出することを可能にし、高集積化された集積回路の配線層の検査などへの応用が期待できる。さらに感度を向上されると半導体の不純物濃度の非破壊測定も可能であると考えられる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

磁気力顕微鏡自体は磁性材料のもれ磁場の計測手段としてよく知られているが、それをを用いて非磁性金属の検知ができることを見出した点が独創的であり学術的意義が大きい。また、この現象を応用すれば、高度集積化された半導体集積回路の断線診断を非破壊で簡便に実行することが可能になる。また、さらに感度を向上させれば半導体中の不純物濃度の非破壊非接触計測も可能となる。このように社会的意義も大きい。

研究成果の概要(英文)：Magnetic force microscopy (MFM) is generally utilized for detecting stray field of magnetic material. In this study, a new phenomenon described below is reported. The oscillating magnetic dipole at the MFM tip induces eddy current in non-magnetic metallic material and produces magnetic field around the magnetic dipole itself. As a result, MFM can detect the presence of non-magnetic metallic material even if it is buried in insulator. The theory of such interaction between oscillating magnetic dipole and non-magnetic metal thin film is established and compared with the experimental results. This phenomenon can be applied, for example, for detecting defects of metal lines in high-density integrated circuits. If the sensitivity is improved, this phenomenon can be applied for measuring impurity density of semiconductor without destruction or even touching.

研究分野：ナノエレクトロニクス

キーワード：磁気力顕微鏡

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

磁気力顕微鏡 (Magnetic force microscopy; MFM) は、原子間力顕微鏡の一種であり、磁気モーメントをもった探針を共振周波数付近で振動させて、探針付近の磁場を検出し可視化するために用いられる。したがって、通常は測定対象は磁性体の表面のもれ磁場である。研究代表者は、非磁性材料中に電流が流れているときに、その電流が流れている場所や電流の大きさを測定するために MFM を用いた実験を行っていた。そのとき、材料に電流を流さなくても MFM が微小な信号を検出することに気づいた。その信号の起源について、振動する磁気モーメントが非磁性金属にうず電流を誘起し、そのうず電流が磁場を発生し、その磁場を MFM が検出しているのではないかと考えた。そのような振動する磁気モーメントと金属薄膜との相互作用は、理論的には極めて複雑ではあるが、大胆に近似すれば、解析的に解くこともできていた。

2. 研究の目的

まずは、振動する磁気モーメントと金属薄膜の相互作用についての理論を確立し、実験結果を説明できるようにすること。さらに、実験結果を積み重ね、理論と比較検討することにより、「絶縁体中に埋もれた金属の探知法」を確立すること、を目的とした。この手法は、絶縁体中に埋もれた金属を、非破壊・非接触で、ナノメートル分解能で検出できる可能性を秘めており、成功すれば、高集積化された半導体集積回路の配線層の断線診断などへの応用が期待できる。さらに感度を向上させれば、金属だけではなく不純物をドーピングした半導体の不純物濃度の検出も、非破壊・非接触で可能となり、応用面からも非常に興味深い。

3. 研究の方法

まず、共振周波数付近で振動する磁気モーメントと金属薄膜の相互作用の理論について、一連の微分方程式(あるいは積分方程式)を導く。その後、相互作用のべきで無限級数に展開し、厳密な解析解を得る。さらに、相互作用の 1 次までで級数展開を中止した場合の近似的な解析解を得る。数値計算としては、空間座標を離散化すれば、積分核の逆行列を数値的に求めることができるため、相互作用については正確に評価する。実験は、まずは絶縁体表面に金属薄膜を堆積した試料を MFM で計測する。このとき、MFM の探針の磁気モーメントの大きさが異なるものを準備し、それらを使ったデータを取得する。また、探針と試料表面の距離、探針の周波数、などを変化させたときのデータを取得し、理論と比較検討することにより、理論の妥当性の評価を行う。さらに、絶縁体中に埋め込まれた多層金属薄膜を準備し、その表面から MFM 計測することにより、絶縁体中に埋め込まれた金属の検出という当初の目的についても実験的に検証する。

4. 研究成果

まず、振動している MFM 探針の磁気モーメントが金属薄膜中にうず電流を誘起し、そのうず電流が発生する磁場を MFM 探針が検出する過程のみを考慮すると、半径 r のところのうず電流の電流密度 $J(r)$ は、

$$J(r) = \frac{3}{4\pi} \frac{p}{\rho} \frac{z_m r}{(z_m^2 + r^2)^{5/2}} \dot{z}_m \quad (1)$$

となる。ここで、 p は探針の磁気モーメント、 ρ は金属薄膜の抵抗率、 z_m は試料表面から探針までの距離である。このうず電流が誘起する磁場から探針が受ける力は

$$F = -\frac{3}{64\pi} \frac{p^2}{\rho} \frac{z_m}{z_m^4} \quad (2)$$

となり、この力によって探針の振動が影響をうけ変化する位相が MFM が検出している測定データとなるが、その位相変化は

$$\Delta\phi \approx -\frac{1}{2} \frac{z_c^4}{z_{m0}^4} \quad (3)$$

となることを明らかにした。ここで、 z_{m0} は探針の振動の中心の座標であり、 z_c は、

$$z_c = \frac{3}{64\pi} \frac{\omega_0}{k} \frac{p^2}{\rho} \quad (4)$$

で定義される特性距離である。ここで、 ω_0 は探針の共振周波数、 k はバネ定数である。ここまでの理論は、渦電流が発生した磁場によって渦電流自身が影響を受ける、いわゆるインダクタンスの効果、あるいは電流間相互作用の効果を見逃している。電流間相互作用の効果を含めた理論は非常に複雑であるが、以下のようになることを明らかにした。

$$J(r) = -\frac{1}{2\pi r \rho} \left[\frac{d\Phi}{dt} + \int_0^\infty M(r, r') \frac{dJ(r')}{dt} dr' \right] \quad (5)$$

この [] の中の第 1 項のみを考慮したのが式(1)である。[] の第 2 項がうず電流 J 自身が発生した磁場によって渦電流の分布が変化する「電流間相互作用」あるいは「インダクタンスの効果」を表している。この積分方程式を相互作用に関して逐次近似し無限級数に展開して解を求めると、

$$J(r) = -\frac{1}{2\pi r \rho} \frac{d\Phi}{dt} - \frac{1}{2\pi r \rho} \int_0^\infty dr' M(r, r') \left(\frac{-1}{2\pi r' \rho} \right) \frac{d^2\Phi}{dt^2} - \frac{1}{2\pi r \rho} \int_0^\infty dr' \int_0^\infty dr'' M(r, r') M(r', r'') \left(\frac{-1}{2\pi r' \rho} \right) \left(\frac{-1}{2\pi r'' \rho} \right) \frac{d^3\Phi}{dt^3} + \dots \quad (6)$$

となる。この第 1 項で級数を打ち切ったのが式(1)である。この第 2 項までを残すと電流間相互作用の 1 次まで残す近似を採用したことになる。相互作用の 1 次までの近似をして、被積分関数の発散点などを注意深く処理すれば、探針の位相の変化を解析的に求めることができ、

$$\Delta\phi \approx -\text{atan} \left(\frac{2Q_0}{1 - \frac{9\pi}{8} C \frac{z_c^3}{z_{m0}^3}} \left\{ 1 + Q_0 \frac{z_c^4}{z_{m0}^4} \right\} \right) + \text{atan}(2Q_0) \quad (7)$$

となることを明らかにした。ここで、 C は相互作用の強さを表す定数で、

$$C = \frac{\omega_0 z_c \mu_0}{2\pi \rho}$$

である。式(7)を探針の試料表面からの高さの関数としてプロットした結果を図 1 に示す。

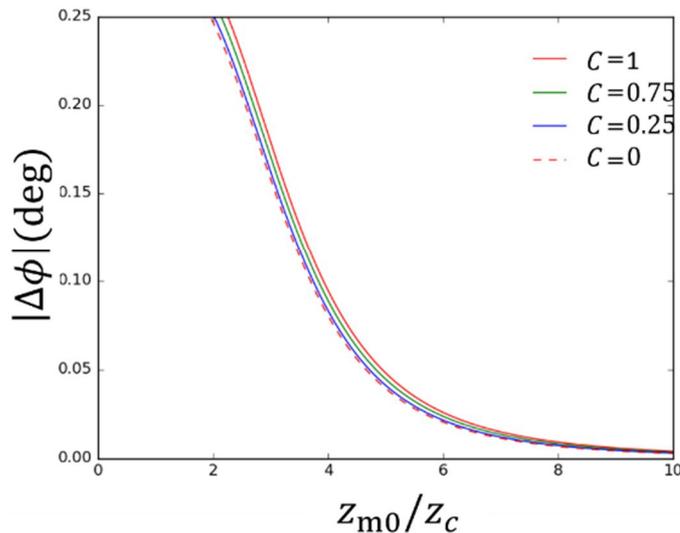


図 1: MFM 探針の位相変化を探針試料距離の関数としてプロットしたもの

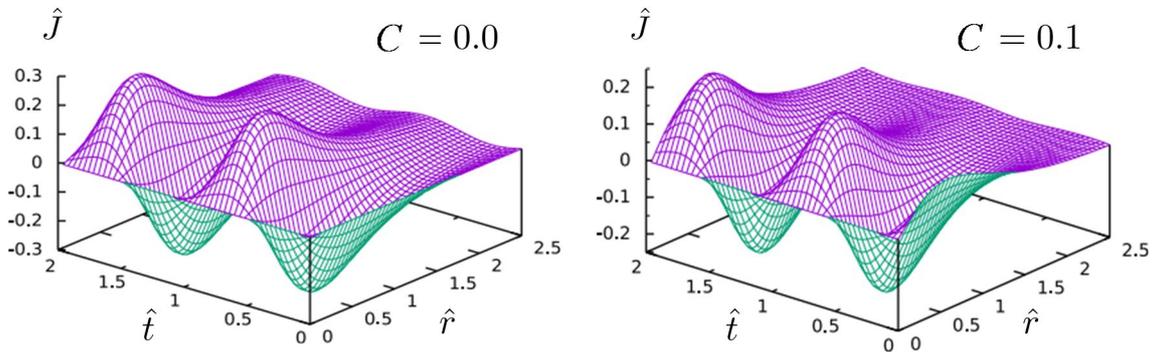


図2 渦電流密度を時間 t と半径 r の関数としてプロットしたもの。 C が相互作用の強さを表す。

また、空間に有限サイズのメッシュをきれば、式(6) を相互作用の1次までで展開を中止せずに厳密に扱う数値計算も可能である。そのようにして数値計算した結果を図2に示す。このように正確な数値計算で渦電流密度を求めることまでは成功したが、MFM で実際に計測しているのは位相変化 である。この数値計算から探針がうける力を数値的に求めてさらに探針の振動も数値的に計算するのは膨大な計算量になるため、やはり、式(7) や 図1のように相互作用を1次まで残した近似理論は非常に有用である。

絶縁体表面に金属を成膜し、MFM で検出した実験データに式(3)の理論式を重ねてプロットしたのが図3である。この実験条件の範囲では式(3)が実験結果を比較的性格にあらわしていることがわかる。さらに、図4に示すように、絶縁体中に埋め込まれた2層の金属の検出にも成功している。

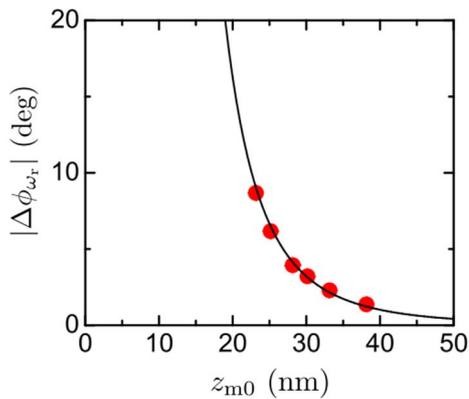


図3 結晶表面の金属を MFM で計測したときの実験データ(赤丸)と式(3)の理論曲線を加算得たもの。

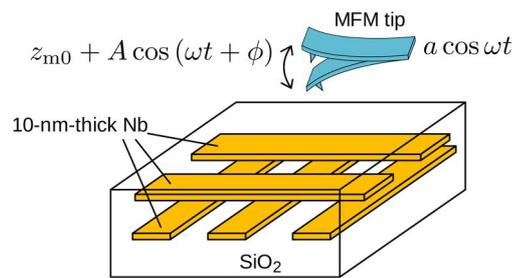


図4 絶縁体中に埋め込まれた2層金属構造を MFM で計測している模式図。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 S. Abo, A. Seidl, F. Wakaya, M. Takai	4. 巻 456
2. 論文標題 Tertiary electrons in single-event time-of-flight Rutherford backscattering spectrometr	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Nucl. Instr. & Methods in Phys. Res. B	6. 最初と最後の頁 12-15
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.nimb.2019.06.042	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 F. Wakaya, K. Oosawa, M. Kajiwara, S. Abo, M. Takai	4. 巻 113
2. 論文標題 Detection of nonmagnetic metal thin film using magnetic force microscopy	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Appl. Phys. Lett.	6. 最初と最後の頁 261601(4pages)
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1063/1.5079763	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 F. Wakaya and K. Oosawa	4. 巻 31
2. 論文標題 Interaction between eddy currents induced by oscillating magnetic moment in magnetic-force microscopy	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Technical Digest of 31st International Microprocesses and Nanotechnology Conference	6. 最初と最後の頁 15P-7-78
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 0件/うち国際学会 3件）

1. 発表者名 F. Wakaya, H. Ishihara, K. Murakami, M. Nagao, Y. Miyato, H. Yamashita, S. Abo, M. Abe
2. 発表標題 Membrane break process in atomic force microscopy
3. 学会等名 The 4th International Symposium on Biomedical Engineering (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yuto Takeuchi, Fujio Wakaya, Satoshi Abo, Katsuhisa Murakami, Masayoshi Nagao
2. 発表標題 Self-Sensing Cantilever Using Graphene Strain Sensor
3. 学会等名 International Symposium for Nano Science (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 武内勇人, 若家富士男, 阿保智, 村上勝久, 長尾昌善
2. 発表標題 グラフェン歪センサーを用いた自己検出型カンチレバー
3. 学会等名 第80回応用物理学会秋季学術講演
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 大澤謙太, 若家富士男
2. 発表標題 磁気力顕微鏡を用いた絶縁体中の三次元構造可視化
3. 学会等名 第67回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 F. Wakaya, K. Oosawa
2. 発表標題 Interaction between eddy currents induced by oscillating magnetic moment in magnetic-force microscopy
3. 学会等名 31st International Microprocesses and Nanotechnology Conference (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 大澤謙太, 若家富士男
2. 発表標題 磁気力顕微鏡を用いたナノ領域での非磁性金属検出における電流間相互作用
3. 学会等名 第79回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	村上 勝久 (Murakami Katsuhisa) (20403123)	国立研究開発法人産業技術総合研究所・エレクトロニクス・製造領域・主任研究員 (82626)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------