磁気力顕微鏡による電流路周囲の磁場勾配検出

Detection of Magnetic Field Gradient around a Current Path by Magnetic Force Microscopy

才田大輔・高橋琢二

東京大学生産技術研究所,東京都目黒区駒場 4-6-1(〒153-8505)

D. Saida and T. Takahashi

Institute of Industrial Science, University of Tokyo, 4-6-1 Komaba, Meguro-ku, Tokyo 153-8505

For a purpose of measuring local transport properties in fine structures, a novel current detection method through magnetic force microscopy was proposed and demonstrated. Around an 8 µm wide GaAs/AlGaAs mesa stripe, the magnetic fields induced by AC currents were observed by MFM simultaneously with topographies. Since a direction of the magnetic field gradients is perpendicular to the mesa stripe, the obtained magnetic field images strongly depended on the measuring configurations, in which the cantilever beam and the mesa stripe were in parallel or in perpendicular. As we expected, the amplitude was under the noise level in the perpendicular configurations, while we clearly observed the enhancement of amplitude and the phase inversion at the both sides of the mesa stripe in the parallel configuration. These results agreed very well with the numerical simulation which showed the existence of the large magnetic field gradients at the both sides of the mesa stripe. Linear relationship between the peak amplitude values and the AC current was also confirmed.

Key words: magnetic force microscopy (MFM), current detection, magnetic field gradient, electrostatic force, GaAs/AsGaAs mesa stripe

1. はじめに

電極間に複数の電流路が存在する分子細線ネットワークのよう な系の伝導特性評価では、回路への電流計の挿入が困難であり、 また挿入自体が擾乱となる可能性がある. このような場合, 回路 へ挿入することなく非接触測定が可能である電流計が望まれる. その一つの方法として、電流により作られる磁場を検出する方法 がある.磁場センサには様々なものがあるが、感度という面から 見れば超伝導量子干渉素子(SQUID: superconducting quantum interference device)が優れている 1),2). Chatraphorn らは SQUID 顕微鏡を利用して集積回路周囲に作られる±25 nTの磁場を検出 し、得られた磁場信号をフーリエ変換して電流密度像に変換する ことで50 µm 程度の空間分解能を実現したことを報告している². しかし、分子細線ネットワークのような微細構造周囲の磁場観察 を目的として使用するためには大幅な空間分解能の向上が要求さ れる.一方で高い空間分解能を持つ磁気力顕微鏡(MFM: magnetic force microscopy)を用いると、複数の近接する電流路が作る磁場を 電流路の形状と合わせて観察することが可能である. これまでに, Auで構成された半径2.4 µmのリング型電流路に10 mAの直流電 流を流したときの周辺磁場勾配をMFM で観察した例がCarlらに より報告されている³⁾. これに対して我々は MFM を利用した交 流電流検出系を提案し、静電引力を抑制することで10 µA 程度以 下の電流が作る周辺磁場勾配を高感度に捉えられることを示して きた ^{4,5)}. 今回, 幅 10 μm 以下で長さ 200 μm の GaAs/AlGaAs メサストライプ型電流路を作製し、交流電圧を印加してヘテロ界

面を流れる交流電流が作る磁場勾配を MFM で観察した.本論文 では、カンチレバーと電流路の位置関係を変えたときの磁気力信 号の変化から測定系の磁場勾配検出の妥当性について検討する. また、電流路周辺磁場分布の計算値と磁気力信号を比較すること で磁場勾配検出の正当性についても議論する.

2. 試料構造と測定系

表面から 90 nm の位置にヘテロ構造を持つ GaAs/AlGaAs 基板 に対してフォトリソグラフィーとりん酸系のウェットエッチング (H₂O:H₃PO₄:H₂O₂ = 8:1:1)を行うことにより,高さ 0.4 μm,長さ 200 μm,幅がそれぞれ2 μm と 8 μm の電流路を作製した(Fig. 1).

Fig. 2に MFM を利用した電流誘起磁場測定系の概要を 示す. 作製した試料に対して交流電圧を印加したときにへ テロ界面を流れる電流が作る磁場の様子を室温、窒素1気 圧雰囲気中にて MFM で観察した. 測定では磁性材料であ る Co でコーティング(厚さ約 50 nm)された探針(先端曲率 半径約70 nm)を用いて,光てこ方式でカンチレバーの変位 を検出している.カンチレバーを縦モード共振(約26kHz) で励振(励振振幅 300 nm)して試料に周期的に接触させな がら、その縦方向変位量を形状像を得るための高さ方向制 御に利用した.一方、電流路周囲に作られる磁場から探針 は磁気力を受けるため、交流電流に同期してカンチレバー に変位が生じる.本実験では特にねじれ変位を取り出して 磁気力信号として,その振幅値(R)ならびに交流電圧との位 相差(のを測定した.このようにねじれ信号を取り出してい るため、我々の測定系はカンチレバーの長手方向に直交す る向きの磁気力に対して感度を持つと考えられる.また, 同じ電流値に対するねじれ変位量を増加させるために、電 流路に印加する交流電圧周波数としてカンチレバーのねじ れ共振周波数(約 300 kHz)を利用した. このようにカンチ



Fig. 1 Schematic illustration of our sample structure. Mesa stripes of 2 or 8 μ m wide and 0.4 μ m high including a GaAs/AlGaAs single hetero structure at a 90 nm depth from the surface was fabricated on a GaAs substrate.



Fig. 2 Experimental setup. We extracted the amplitude (R) and the phase (θ) difference synchronized with a frequency of AC current from the cantilever torsional displacement to evaluate the magnetic force, while the vertical displacement signal due to the mechanical vibration was used for the height control of the tip.



Fig. 3 (a) Tip magnetization directions and schematic illustrations of configuration relationship between current path and cantilever in (b) perpendicular and in (c) parallel. The tip was magnetized along perpendicular to the cantilever longitudinal direction symbolized as "1" and "2".

レバーの縦モード共振とねじれ共振を利用することで、測 定では形状像と磁気力信号を同時かつ独立に検出している。 探針と試料の間の電位差が交流電圧に同期して変化するこ とで生じる静電引力の影響は、ケルビンプローブ法で用い られるものと同様のポテンシャルフィードバックによって 制御された直流オフセット電圧を印加して抑制している ^{4),5)}. この時,電流路両側の電極に同じ直流オフセット電圧 値を印加することで、探針の電位とその直下の試料電位を バランスさせつつ,試料中には交流電流のみが流れるよう な状態を実現している.その結果、交流電流の作る磁場の 様子が MFM でより正確に捉えられるようになったものと 考えている.なお探針の磁化方向は、各実験前に永久磁石 を用いて Fig. 3(a)に示すようなカンチレバーに対して直交 する A₁,もしくは A₂ 方向にそろえた.

3. 電流路周辺磁場分布の計算

3.1 計算方法

ヘテロ界面を流れる電流が電流路周囲に作る磁場分布を 計算した.簡単のため,透磁率は電流路内外で一様であり, 真空透磁率µ0に等しいと仮定している.ヘテロ構造を内包 する電流路をFig. 4(a)のように幅wのメサストライプ形状 としてモデル化した場合に,周囲に作られる磁場分布のx 成分,y成分,合成磁場分布を考える.y方向はヘテロ界面 がある位置を原点とした.このとき電流路中のヘテロ界面



Fig. 4 (a) The simulation model to calculate the magnetic field around the mesa stripe and obtained (b) B_x component, (c) B_y component and (d) total B of the magnetic field.

を流れる全電流が点P(x,y)に作る磁場は,微小領域t× dxo を流れる電流素片が作る磁場の寄与を0からwまで積分し て足し合わせることで解析的に求めることができる.なお, 以下の計算では電流はヘテロ界面付近に集中している(tは 考慮するyの値と比べて十分小さい)との近似を行っている.

$$B_{x} = \frac{\mu_{0}I}{2\pi w} \int_{0}^{w} \frac{y}{(x-x_{0})^{2} + y^{2}} dx_{0}$$
$$= \frac{\mu_{0}I}{2\pi w} \left(\tan^{-1}\frac{x}{y} + \tan^{-1}\frac{w-x}{y} \right)$$
(1)

$$B_{y} = -\frac{\mu_{0}I}{2\pi w} \int_{0}^{w} \frac{x - x_{0}}{(x - x_{0})^{2} + y^{2}} dx_{0}$$
$$= -\frac{\mu_{0}I}{2\pi w} \left(\ln \left| \frac{\cos \left(\tan^{-1} \frac{x - w}{y} \right)}{\cos \left(\tan^{-1} \frac{x}{y} \right)} \right| \right)$$
(2)

$$B = \sqrt{B_x^2 + B_y^2}$$

(3)

幅8 µmの電流路中のヘテロ界面を15.6 µAの電流が流れ たときに、y = 90 nm の位置に作られる磁場分布 B_x , B_y , Bの計算結果をそれぞれ Fig. 4(b), (c), (d)に示す. ここで y = 90 nm は電流路表面からヘテロ界面までの距離であり, 測定中、探針が電流路に接触したときにその先端が感じる 磁場分布を計算していることに相当する.探針先端は電流 が流れているヘテロ界面からみて 90~390 nm の間を周期 的に行き来しているが、この間では磁場の高さ依存性は小 さく、磁気力信号に含まれる磁気力の平均化の影響はほと んど無視できることを上式(1)~(3)を使った数値計算から 確かめている⁴⁾. Fig. 4(d)より x 方向に沿って電流路の両 端で大きな磁場勾配が存在し、その向きは左右で反転する ことがわかる. また, 15.6 µA の交流電流がヘテロ界面を 流れたときに作られる磁場の大きさは、ピーク値で約 190 nTであることがわかる. K. L. Babcock らは MFM の探針 が 4.2×10⁴ T の磁場中に置かれると磁化方向が変化する と報告している 6)が、本実験での磁場の大きさは高々10-7 T 程度であるため、電流の作る磁場によって探針磁化が擾 乱を受けることはないと考えられる.

4 測定系の磁場勾配検出の妥当性と正当性に対する検証

4.1 カンチレバーと電流路方向の配置関係に対する磁気力信号の 依存性

我々のシステムはカンチレバーのねじれ変位量を磁気力 信号として取り出しているため、カンチレバーの長手方向 に直交する向きの力成分に対して感度を持つと考えられる. ところで磁場中におかれた磁石は、磁場そのものからトル クを,また磁場勾配から重心運動が生じるような力を受け る. MFM 探針のモデルとしては,探針先端に小さな磁石 がついているものと、探針全体をひとつの磁石にみなすも のに大別される. 前者のモデルでは磁石に働くトルクはカ ンチレバーをねじる力にはならないので、磁場勾配のみが ねじれ変位を与えることになる.後者では磁場とその勾配 の両方の寄与がある.なお、いずれのモデルの場合でも、 カンチレバー長手方向に対して電流路を平行に配置したと きのように、ねじれ変位の方向と磁場またはその勾配の方 向が一致する場合には磁気力信号が検出される一方で、電 流路を長手方向に直交するように配置したときは、ねじれ 変位の方向と磁場(勾配)の方向が直交するため磁気力信号 が検出されないと考えられる. これを確かめるために, Fig. 3(b), (c)に示すようにカンチレバーの長手方向に対して電 流路を直交、及び平行配置させた場合についてそれぞれ電 流路周辺での磁気力信号を調べた.

直交配置,および平行配置させた電流路に 15.6 μA の交 流電流を流したときに A₁ 方向に磁化させた探針を用いて 検出された電流路の形状像と磁気力信号の振幅成分,位相 差成分を Fig. 5(a)(i) ~ (iii)に, A₂ 方向に磁化させた探針で



Fig. 5 (a) Line profiles of (i) topography of an 8 μ m wide mesa stripe and (ii) amplitude (*R*) and (iii) phase (θ) differences of the magnetic force signals obtained by A₁ magnetized tip in perpendicular (gray line) and parallel (black line) configuration. (b) Line profiles of topography and magnetic force signals obtained by A₂ magnetized tip.



Fig. 6 Current dependence of the peak values of amplitude component.

得られたものを Fig. 5(b)に示す. 直交配置の場合(グレーの 線),探針をいずれに磁化させた場合でも磁気力信号の振幅 値はほぼノイズレベルであることがわかる.一方,平行配 置の場合(黒い線),電流路の両端の位置で磁気力信号の振 幅が増加し、位相差が 180 度変化する様子が確認できる. ところで、数値計算からはストライプ直上において磁場が 一様となること、即ち磁場勾配が存在しないことがわかっ ている.実際にストライプ直上で得られた磁気力信号の振 幅はほぼノイズレベルであることから、我々の測定系では 通常の MFM と同様に磁場勾配に感度があるものと考えら れる. これは前述のモデルのうち, 探針先端に小さな磁石 がついた MFM 探針として考えた場合に相当する. また, 電流路の両端において磁気力信号の振幅と位相差が大きく 変化している様子は、計算で示したような大きな磁場勾配 (dB/dx)の存在と、その向きの反転が正しく検出されている ことを示している. さらに探針の磁化方向を反転させた場 合,位相差が反転していることがわかる.この位相差の反



Fig. 7 (a) Topography of a 2 μ m wide mesa stripe, and (b), (c), and (d) are line profiles of the topography, the amplitude of the magnetic force signal, and its phase difference, respectively, along L-L' indicated in (a). (e)Calculated magnetic field gradient around the topography.

転は探針の磁化方向の反転に伴って探針と磁場勾配との作 用するモードが 180 度変化する様子を捉えていることに対 応する.ここで,磁化方向の反転は検出される磁気力信号 の振幅値には影響しないと思われるが,実際には磁気力信 号の振幅値が異なった値となっているのは,磁化方向を変 えるときに磁化強度が変化してしまったためと考えられる. このような測定毎の磁気力信号のバラツキを防ぐためには, 電流が流れたときに作られる磁場強度が予め判明している 標準試料を用いて,各測定毎に探針の磁化状態を校正する 必要がある.

次に、平行配置において A2 方向に磁化させた探針を用いた場合に、磁気力信号振幅成分のピーク値の電流依存性について調べた結果を Fig. 6 に示す、電流の増加に伴い、ほぼ比例して増加する傾向が得られている、ここで低電流側において振幅値が原点を通る直線上にのらないのは、用いているロックインアンプの雑音に信号が埋もれたためと考えられる。このような磁気力信号の電流依存性・探針磁化依存性は幅 2 μ m の電流路周辺磁場勾配を直交、及び平行配置で観察した場合でも確認されていることから、我々の

測定系が幅数μm 程度の電流路周囲に作られる磁場勾配分 布を正しく検出できていることが確かめられた.

4.2 磁場勾配検出の空間分解能の検証

幅2µmの電流路に16.6µAの交流電流を流したときに, A2方向に磁化させた探針を用いてFig.7(a)に示した長さ1 µmの領域での形状像と磁気力信号のラインプロファイル をFig.7(b),(c),(d)にそれぞれ示す.また,この領域で存 在する磁場勾配の計算値をFig.7(e)に示す.計算より約 500 nmの領域で磁場勾配が変化し,勾配にほぼ対応する 形で磁気力信号が検出できていることから,我々の測定系 が電流路周囲の磁場勾配分布を正確に検出しており,その 空間分解能は500 nmよりも十分小さいことがわかった. より正確な空間分解能を見積もるためには,近接する2本 の電流路を作製し,それぞれを流れる電流がどこまで判別 できるかを議論することが必要である.

5. まとめ

我々は、幅 10 μm 以下,長さ 200 μm の GaAs/AlGaAs メサストライプ型電流路を作製し,交流電圧を印加したと きに電流路周囲に作られる磁場勾配分布を MFM を利用し た交流電流検出系によって観察した.カンチレバーと電流 路の配置関係を直交,および平行とした場合にそれぞれ磁 気力信号の検出を試みた結果,直交配置の場合は磁気力信 号はほぼノイズレベルであったのに対して,平行配置の場 合には磁場勾配に対応する信号が検出された.これより測 定系の磁場勾配検出の妥当性が確かめられた.また,磁気 力信号の振幅が概ね電流に比例する特徴を持つこと,磁場 勾配検出の空間分解能が 500 nm よりも十分小さいことを 確かめ,電流路周囲に作られる磁場勾配分布を正確に検出 できていることを明らかにした.今後,測定系のより正確 な空間分解能の検証を試みることで,微小なネットワーク 系の伝導特性評価へと応用できると考えている.

謝辞

GaAs/AlGaAs 基板を提供していただいた東京大学生産技術研究所の平川一彦教授ならびに大塚由紀子助手に深く感謝します.

文 献

- K. Mohri, T. Uchiyama, L. P. Shen, C. M. Cai, L. V. Panina, Y. Honkura and M. Yamamoto: *IEEE Trans. Magn.*, 38, 3063 (2002).
- S. Chatraphorn, E. F. Fleet, F. C. Wellstood, L. A. Knauss and T. M. Eiles: *Appl. Phys. Lett.*, 76, 2304 (2000).
- A. Carl, J. Lohau, S. Kirsch and E. F. Wassermann: J. Appl.Phys., 89, 6098 (2001).
- 4) D. Saida and T. Takahashi: Jpn. J. Appl. Phys., 42, 4874 (2003).
- 5) D. Saida and T. Takahashi: *IEICE Trans. Electron.*, J86, 204 (2003).
- 6) K. L. Babcock, V. B. Elings, J.Shi, D. D. Awschalom and M. Dugas: Appl. Phys. Lett., 69, 705 (1996).

2003年10月23日受理,2004年1月15日採録