Highly Sensitive Ferromagnetic Resonance Measurements Using Coplanar Waveguides

N. Toda, K. Saito, K. Ohta, H. Maekawa, M. Mizuguchi, M. Shiraishi, and Y. Suzuki

Graduate School of Engineering Science, Osaka University, 1-3 Machikaneyama, Toyonaka, Osaka 560-8531, Japan

Ferromagnetic resonance (FMR) measurements using coplanar waveguides (CPWs) make it possible to perform highly sensitive magnetization measurements, since a CPW can concentrate electromagnetic waves onto a narrow signal line. In this study, we aimed to perform FMR measurements of a minute individual magnet, and investigated the dependence of the sensitivity on the signal line width. We fabricated CPWs on MgO wafers and placed an individual NiFe dot on each of CPWs. NiFe dots with a thickness of 30 nm and various lateral sizes, i.e. 50×100 , 50×80 , 50×30 , 50×20 , and 50×10 μm , were fabricated. The signal line widths of these samples were 150, 100, 50, 30, and 15 μm , respectively. The external magnetic field dependence of the resonance frequency was well fitted by Kittel's formula. As expected, we obtained larger signals from smaller samples, because narrower signal lines that create larger rf fields were employed for smaller samples.

Key words: FMR, coplanar waveguide, precession, microwave, microfabrication

コプレーナウェーブガイドを用いた強磁性共鳴の高感度測定

戸田順之・斎藤和広・太田健太・前川裕昭・水口将輝・白石誠司・鈴木義茂

大阪大学大学院基礎工学研究科, 大阪府豊中市待兼山町 1-3 (〒560-8531)

1. はじめに

近年, デバイスの高密度化, 多機能化がますます求められるようになり, 電子の電荷に加えもう一つの重要な性質であるスピンを利用した, スピントロニクスが注目されるようになってきた. その一例である磁気ランダムアクセスメモリ (MRAM)¹⁾ の記録セルにおいて, その小型化を図るには, 非常に小さなサイズにおける磁性体のダイナミクスを解明する必要がある. そこで我々は, 磁化ダイナミクスの測定法の一つである強磁性共鳴 (FMR) に注目した. 従来の FMR 測定では, 導波管と共鳴器を用いていたため, 測定が一つの周波数領域に限られ, 試料のサイズも制約を受けていた²⁾. しかし, 微細加工技術の進歩により, 導波管をウェーブガイドで代替することで, 広い周波数領域での測定とともに, ウェーブガイドの狭い信号線上に高周波磁界を集中させることでより小さな試料での FMR 測定が可能となってきた^{3,4)}. 特にウェーブガイドを用いると過渡応答を時間領域で測定できるという優れた点もある⁵⁾.

本論文では, 微小磁性体の周波数領域での FMR の測定法について報告する. これまでも非常に小さな磁性体の FMR をウェーブガイドを用いて測定した例はあるが, 信号を大きくするために多数の試料を同一のウェーブガイドの信号線上に集積して測定する必要があった⁶⁾. これに対して本論文では, 単一の微小磁性体においてどこまで小さな試料の測定が可能であるかを明らかにするために, ウェーブガイドの信号線幅が FMR 信号強度に与える影響について調べた. またここでは, 周波数領域の測定について報告するが, 時間領域の測定も同様に行うことができる.

2. 実験方法

500 μm) 上に信号線と接地線からなる Cr(5 nm)/Cu(150 nm)/Cr(5 nm) で構成されるウェーブガイドを真空蒸着法とリフトオフ法により作製した. その信号線上にサンプルとして酸化防止のため Au(5 nm) キャップをした NiFe(30 nm) を配置した. なお, ウェーブガイドとしてはサンプル部における電流の強度を大きくするために信号線と接地線が右端で接続されたショート型のコプレーナウェーブガイドを採用した. コプレーナウェーブガイドとは, 誘電体基板の上に例えば 50 μm 程度の幅の信号線とその両側に 22 μm 程度の幅のギャップを隔てて接地線が設けられた構造の伝送線をいう. 基板の誘電率と信号線幅に合わせてギャップ幅を適当に調整することでインピーダンスマッチングをとることが出来る. 本実験では, MgO 基板 (誘電率 $\epsilon_r = 9.65$)⁷⁾ において伝送線路の特性インピーダンスが 50 Ω となるように信号線幅とギャップ幅の比率はどの試料においても 25 : 11 とした⁸⁾.

測定を行った 5 種類のサンプル形状を Fig. 2 に示す. 微小磁性体の FMR 測定を可能にする手段として, 信号線幅を狭くすることの有効性を調べるため, 横方向のサンプル (Au/NiFe) サイズ

Fig. 1 Schematic diagram of a sample on a coplanar waveguide with a signal line width of 30 μm , and the experimental setup (S: signal line, G: ground line).

Fig. 1 に試料の構造と測定の概念図を示す. MgO 基板 (厚さ :

Fig. 2 Top view of the sample on the coplanar waveguide. NiFe dots with a thickness of 30 nm and various lateral sizes, i.e. 50×100 , 50×80 , 50×30 , 50×20 , and $50 \times 10 \mu\text{m}$, were fabricated. The signal line widths of these samples were 150, 100, 50, 30, and $15 \mu\text{m}$, respectively.

を $50 \mu\text{m}$ で一定とし、縦方向のサイズを 100, 80, 30, 20, $10 \mu\text{m}$ と小さくするとともに試料直下のウェーブガイドの信号線幅も 150, 100, 50, 30, $15 \mu\text{m}$ と狭くしたサンプル/ウェーブガイドを作製し、その FMR 信号強度を測定した。なお、 $100 \mu\text{m}$ ピッチの GSG (Ground/Signal/Ground) 型のプローバーで接触をとるために、ウェーブガイドの左端の信号線幅は $50 \mu\text{m}$ とし、左端の信号線と試料直下の信号線をつなぐ部分では 15 度の絞り角 (開き角) となるように信号線の幅を変化させた。

この 5 種類のサンプルそれぞれに対して、Fig. 1 のようにプローバーによりウェーブガイドとの接触を取り、ネットワークアナライザーで高周波の振幅反射率 ($S_{11} = V_{\text{out}} / V_{\text{in}}$; ただし、 V_{in} は入力電圧、 V_{out} は出力電圧を意味する) を測定した。外部磁界を信号線と平行な方向に印加することによりサンプルを信号線の方に磁化した状態で、ウェーブガイドに高周波電流を流すと、信号線と垂直な方向に高周波磁界が発生して試料の磁化にトルクを与える。その結果、試料の磁化の歳差運動が促される。歳差運動が生じると、インダクタンスが増大するため S_{11} が変化する。すなわち、 S_{11} の変化を測定することにより磁化の共鳴的な応答を検出することができる。

サンプルサイズが $50 \times 10 \mu\text{m}$ の試料において、外部磁界を信号線と平行方向に 550 Oe 印加した時の試料の反射率 $S_{11, \text{para}}$ の実部、虚部、絶対値を Fig. 3 に示す。本実験ではショート型のウェーブガイドを用いているので、原理的には $S_{11, \text{para}}$ の実部は -1 になるはずである。しかし、Fig. 3 をみると -1 からずれており、そのずれは周波数が上がるほど大きくなる。周波数のゼロ近くにおいても -1 にならないのは、ウェーブガイドの実抵抗のためである。また、高周波数側での実部のずれ、そして虚部の増大はウェーブガイドによる信号の時間遅れに起因する。次に周波数が上がるにつれて $S_{11, \text{para}}$ の絶対値が減少するのはウェーブガイドに減衰がある

Fig. 3 Real part, imaginary part, and absolute value of the reflectivity $S_{11, \text{para}}$ obtained by using a sample with a size of $50 \times 10 \mu\text{m}$. This measurement was performed under an external magnetic field of 550 Oe .

ためである。これらを全てモデル化すると(1)式で表される。

$$S_{11, \text{para}} = (S_{11}(0) + \Delta S_{11}) e^{2\pi i f(\tau + i\kappa)} \quad (1)$$

ここで、 $S_{11}(0)$ は周波数ゼロにおける反射率、 ΔS_{11} は試料の共鳴による反射率の変化、 f は周波数、 τ はウェーブガイドによる時間遅れ (今回は数百 psec であり、ウェーブガイドの長さから期待される時間遅れとなっている)、 κ は減衰定数である。Fig. 3 の信号には(1)式に示したように試料による反射率の変化 ΔS_{11} が含まれているが、 ΔS_{11} は非常に小さくこのままでは見ることができない。

そこで、外部磁界を信号線と垂直方向に 100 Oe 印加し、試料の磁化にトルクがかからない状態で反射率 $S_{11, \text{perp}}$ を測定した。

$$S_{11, \text{perp}} = S_{11}(0) e^{2\pi i f(\tau + i\kappa)} \quad (2)$$

そして、 $S_{11, \text{para}}$ と $S_{11, \text{perp}}$ の値から(3)式によりバックグラウンド、強度および位相の補正を行い、純粋な FMR による信号の変化 ΔS_{11} を求めた。

$$\Delta S_{11} = S_{11}(0) (S_{11, \text{para}} - S_{11, \text{perp}}) / S_{11, \text{perp}} \quad (3)$$

このことにより、試料の共鳴による S_{11} の変化を高感度に測定できるとともに、定量的な測定が可能となる。なお、今回の測定周波数 (50 GHz 以下) では、高周波は準 TEM モードで伝送していると考えられる⁹⁾。

3. 実験結果及び考察

作製した 5 種類の試料において FMR 測定を行った結果、全ての試料で FMR による信号の変化を確認できた。サンプルサイズが $50 \times 10 \mu\text{m}$ の試料における ΔS_{11} の実部と虚部を Fig. 4 に示す。室温下で、高周波電力を -15 dBm ($\approx 31.6 \mu\text{W}$) 投入し、外部磁界の大きさを $0 \sim 650 \text{ Oe}$ と変化させて測定を行った。(3)式により

Fig. 4 (a) FMR spectra of $\text{Re}[\Delta S_{11}]$ (the real part of ΔS_{11}) obtained by using a sample with a size of $50 \times 10 \mu\text{m}$. (b) FMR spectra of $\text{Im}[\Delta S_{11}]$ (the imaginary part of ΔS_{11}). Each spectrum was measured under an external magnetic field (0 – 650 Oe).

Fig. 3 に示したバックグラウンドがほぼ完全に取り除かれ、実部には上に凸なピーク状、虚部には分散型の FMR スペクトルが明瞭な形として観測された。このピークは外部磁界を大きくしていくにつれて、高周波側へシフトしていった。これは(4)式に表される共鳴周波数と外部磁界の関係⁹⁾によく一致する。

$$f = \frac{|\gamma|}{2\pi} \sqrt{(H_{a,||} + H_{\text{ext}})(H_{a,\perp} + H_{\text{ext}})}. \quad (4)$$

ここで、 f は共鳴周波数、 γ はジャイロ磁気定数 ($\gamma < 0$)、 $H_{a,||}$ は面内方向の異方性磁界 (保磁力に關係している)、 $H_{a,\perp}$ は面直方向の異方性磁界 (反磁界にほぼ一致する)、 H_{ext} は外部磁界を表す。実験で得られた共鳴周波数と外部磁界の関係を(4)式でフィッティングした結果、 $50 \times 10 \mu\text{m}$ のサンプルの $H_{a,||}$ と $H_{a,\perp}$ はそれぞれ 35 Oe と 9390 Oe となった。 $H_{a,||}$ はサンプルサイズが $50 \times 20 \mu\text{m}$, $50 \times 30 \mu\text{m}$, $50 \times 80 \mu\text{m}$, $50 \times 100 \mu\text{m}$ と変化すると、28 Oe, 17

Fig. 5 Sample size dependence of the FMR signal intensity. Each spectrum was measured under an external magnetic field of 550 Oe.

Oe, 14 Oe, 13 Oe と変化していった。これは、サンプル形状の縦横比が変化したこと起因するものである。なお、 $H_{a,\perp}$ はどのサンプル形状においてもほぼ同じ値で、NiFe の飽和磁化 1.05 T と比較してもある程度妥当な値が得られていることが分かる。

次に ΔS_{11} の実部で得られた FMR スペクトルの線幅より、磁化の歳差運動におけるダンピング定数 α を求めた。スペクトルの半値幅 Δf は次のような式で表される⁴⁾。

$$\Delta f = \alpha(f_{||} + f_{\perp}). \quad (5)$$

$$f_{||} = -\frac{\gamma}{2\pi}(H_{a,||} + H_{\text{ext}}), f_{\perp} = -\frac{\gamma}{2\pi}(H_{a,\perp} + H_{\text{ext}}). \quad (6)$$

そこで、550 Oe の外部磁界を印加した時の FMR スペクトルの半値幅、さらに(4)式のフィッティングより得られた $H_{a,||}$ と $H_{a,\perp}$ を(5)式に代入すると、 $50 \times 10 \mu\text{m}$, $50 \times 20 \mu\text{m}$, $50 \times 30 \mu\text{m}$, $50 \times 80 \mu\text{m}$, $50 \times 100 \mu\text{m}$ それぞれのサンプルにおけるダンピング定数は 0.0145, 0.0143, 0.0141, 0.0138, 0.0138 となった。これらの値はいずれも FMR の実験で得られているバルクの NiFe におけるダンピング定数の値 0.008 に比べて大きな値となっている。この原因は定かではないが、NiFe の成膜段階での成長様式に起因する異方性分散、サンプル側面での NiFe の酸化、高周波磁界の不均一性などの影響によりサンプル内の磁化の歳差運動が完全に一様ではなく、共鳴周波数がわずかに異なり、全体として半値幅の広がりとなったのかもれない。

最後に強度について考察してみると、Fig. 4 において $H_{a,\perp}$ に比べて外部磁界が無視できるほど小さい領域では、外部磁界が大きくなると信号強度が一定となる様子が観測された。そこで、5 種類の試料において信号強度が一定となる外部磁界の大きさ (550 Oe) で ΔS_{11} を測定し、ウェーブガイドの信号線幅が信号強度に与える影響を調べた。Fig. 5 に各サンプルサイズと ΔS_{11} の実部での信号

強度の関係を示す。強度の比較を容易にするため、各スペクトルは 0.001 ずつ縦軸方向にシフトしている。サンプルサイズが小さくなると信号強度に寄与する磁性体の体積が小さくなるのにも関わらず徐々に信号強度は大きくなり、一番小さい試料において最も大きな信号強度が得られた。これはサンプルサイズを小さくするとともにウェーブガイドの信号線幅を狭くし高周波磁界を増大させたことで、サンプルに大きな歳差運動が誘起されたことに起因する。なお(4)式によると、サンプルの縦横比が異なると $H_{a//}$ が異なるため、同じ大きさの外部磁界を印加していてもわずかに共鳴周波数が変化すると予想される。今回の実験ではそのわずかな共鳴周波数の変化も観測された。

以上より、ウェーブガイドを用いた FMR 測定で微小磁性体のダイナミクスを簡便に測定するには、ウェーブガイドの信号線幅を狭くすることが有効であることが分かった。今回は信号線幅を最小で 15 μm まで狭くし測定を行ったが、さらに信号線幅を狭くすることでナノスケールといった非常に小さな磁性体の測定も可能であると思われる。実際には、信号線幅がウェーブガイドの膜厚と同程度の値まで狭くなると、発生する高周波磁界が減少するとともに、ウェーブガイド自体の抵抗が無視できなくなり特性インピーダンスにずれが生じてくるので、これらがこの手法による FMR 測定の限界を決めるはずである。

4. まとめ

ショート型のウェーブガイドを使用し、その信号線幅の FMR 信号強度への影響を調べた。今回作製した全てのサイズのサンプルにおいて、十分な S/N 比の FMR 信号が確認され、そのスペクトルよりサンプルの $H_{a//}$, $H_{a\perp}$, ダンピング定数を求めた。また、信号強度に関してサンプルサイズを小さくするとともにウェーブ

ガイドの信号線幅も狭くした結果、サンプルの磁化に歳差運動を促す高周波磁界の増大が実現され、予想していた通り一番小さいサンプルにおいて最大の信号強度が得られた。以上より、微小磁性体の FMR 測定を可能にする手段として、ウェーブガイドの信号線幅を狭くすることが有効であることが明らかになった。今後、信号線幅が 15 μm 以下のウェーブガイドを作製することにより、さらに高感度で簡便な磁化測定が実現されるとともに、ウェーブガイドを用いた FMR の測定限界を調べ、測定法自体の確立に貢献できると思われる。

謝辞 本研究の一部は財団法人 三菱財団の補助により行われた。

References

- 1) G. A. Prinz: *Science* **250**, 1092 (1990).
- 2) J. H. E. Griffiths: *Nature* **158**, 670 (1946).
- 3) G. Counil, J.-V. Kim, K. Shigeto, Y. Otani, T. Devolder, P. Crozat, H. Hurdequint, and C. Chappert: *J. Magn. Magn. Mater.* **272**, 290 (2004).
- 4) G. Counil, J.-V. Kim, T. Devolder, C. Chappert, K. Shigeto, and Y. Otani: *J. Appl. Phys.* **95**, 5646 (2004).
- 5) T. J. Silva, C. S. Lee, T. M. Crawford, and T. Rogers: *J. Appl. Phys.* **85**, 7849 (1999).
- 6) V. Novosad, F. Y. Fradin, P. E. Roy, K. S. Buchanan, K. Yu. Guslienko, and D. Bader: *Phys. Rev. B* **72**, 024455 (2005).
- 7) M. Kamiyama: *Thin Film Handbook*, p. 13 (Ohmsha, Tokyo, 1983).
- 8) K. Honjou: *Tyokousyuuha Erekutoronikusu nyuumon* (in Japanese), p.74 and p. 78 (Nikkankougyoushinbunsha, Tokyo, 1999).
- 9) C. Kittel: *Introduction to Solid State Physics*, 6th eds. P.481 (John Wiley and Sons Inc., New York 1986).

2006 年 12 月 06 日受理、2007 年 9 月 11 日採録