総 説

マイクロ磁気デバイスと微細加工技術

山口 正洋, 荒井 賢一

東北大学電気通信研究所, 〒980-77 仙台市青葉区片平2-1-1.

Micromagnetic Devices Fabricated by Micromachining Techniques

Masahiro Yamaguchi and Ken-Ichi Arai

Research Institute of Electrical Communication, Tohoku University, 2-1-1 Katahira Aoba-ku, Sendai 980-77.

Received August 25, 1995

SYNOPSIS

This article describes the recent remarks in the technology field of micromagnetic devices and micromagnetic actuators. The technology bases of these devices include material development, process technology, device design technology and high-density packaging technology. The fabrication techniques are most important for realizing these devices. LIGA process and anodic oxidation process for thick metallic structure are explained.

KEYWORDS

micromagnetic devices, micromagnetic actuators, micromachining, skin depth, characteristic length.

1 まえがき

インダクタやトランスなどの磁心を薄膜化する研究¹⁾は1970年にSalehによって試みられ²⁾, その後, 1984年の白江らの平面コイルの研究を端緒³⁾として日本で研究が本格化した。薄膜磁心では磁束を環流させるための閉磁路構造や巻線構造などの立体的構造が必要となるため, 様々な微細加工技術が導入されている。多くの場合, 数 μm ルールと比較的マクロな微細加工ではあるものの膜厚は $10\mu\text{m}$ を越すことが多く, 開口部のアスペクト比が1を越す立体的加工技術が要求される。薄膜磁心の用途として期待される分野は, 携帯機器用のマイクロ電源, 携帯機器用LCフィルタ, フラックスゲートセンサ(倍周波形磁気変調器), MIGヘッド用集積化巻線, 電磁型マイクロマシン駆動機構など, エネルギー変換から計測・情報処理まで多岐に渡っている。

筆者らは, このような薄膜磁心を始めとして磁気表面弾性波素子, マイクロ磁気弾性素子, トンネルトランジスタなど, 集積化可能な静止形の薄膜磁気素子とバルク材料による平面形磁気素子を総称してマイクロ磁気デバイスと呼んでいる¹⁻²²⁾。

一方, マイクロ磁気アクチュエータ²³⁾⁻³⁶⁾は, マイクロマシン分野におけるアクチュエータ開発への要求, とくに μm オーダーの微細機構を持つミリサイズのマシン(ミリマシン)への関心の高まり, 及び厚膜コイルの微細加工技術の進展等によって, 1993年初頭頃から活発化している。マイクロマシンの駆動源としては従来から静電力, 圧電力, 熱膨張などが検討されているが, およそ mm サイズであれば, これらの従来方式より電磁形の方が駆動力や変位を増大させることが可能で, 実用的なミリマシンを実現する上で有用性が高いと考え

られている。また磁歪膜の応用も検討されている。期待される用途には、光スキャナ・光フィルタ、マイクロバルブ・マイクロリレー、マイクロモータ（回転形、直進形）などが挙げられている。ふつうシリコンマイクロマシニングにより作製され、磁性体構造はフレームめっき法による場合が多い。

微細加工法から見た場合、マイクロ磁気デバイスとマイクロ磁気アクチュエータはともに厚膜微細加工、閉磁路構造・巻線構造の形成などの点で共通している。本稿では、これらの研究開発の現状と微細加工法から見た特徴を述べる。

2 マイクロ磁気デバイスの概要

Fig. 1は薄膜磁心に関する主要技術とその内容をまとめたもので、マイクロ磁気デバイスやマイクロ磁気アクチュエータ全般にも適用できる関係を示している。磁性材料としては、およそ薄膜・厚膜化が可能なものは何でも使用されるが、スパッタ法による多元パーマロイ薄膜とCo基非晶質膜、めっき法によるパーマロイ

膜・Ni膜など、比較的容易に作製可能な材料がよく用いられる。高周波用薄膜磁心では渦電流の抑制が主要な問題になっており、高抵抗薄膜は開発が急速に進展している。フェライトチップは、NiCuZnフェライトとAg系導体材料を交互にスクリーン印刷し、900℃前後で焼成して得られる。導体材料はスパッタ法とめっき法ではCu或いはAu、フェライトチップではフェライト材料と同時焼成が可能なAg系材料が使用されている。絶縁材料は基本的に磁性材料への相互拡散や応力などの問題のない材料が選ばれる。厚膜構造では、スピントロニクスなどにより数十μmの膜厚が得られるレジストやポリイミドなどが使用される場合が多い。ポリイミドは耐圧が高い点も特徴である。LIGAプロセス（シンクロトロン放射光による～1mm厚膜微細加工プロセス）ではPMMAも使用される。

プロセス上は、磁性薄膜は一般に難エッチング材料に属し、反応性イオンエッチング（RIE）が適用困難な点の特徴である。CCl₄ガスによるFeAlSi膜の昇温RIEや、CO+NH₃ガスによる常温RIEなどが報告され始めているが、

Fig. 1 Technology area of the micro magnetic devices.

当面は厚膜微細加工にはフレームめっき法が不可欠と思われる。

設計の中心は、微細構造の中で所望の磁束分布を得る技術である。電磁形マイクロ磁気デバイスの場合、とくに磁性膜の中に磁束を集中させ、漏れ磁束を最小にする工夫が重要であり、表皮深さと特性長はその基本パラメータである。電源用マイクロ磁心などパワー応用では磁心の電力密度が高いため、設計上、温度上昇と磁束飽和の両方を考慮する必要がある。およそ100MHzを越す高周波応用では金属磁性膜と導体層を電極とするような漂遊容量を考慮し、磁心の使用帯域がLC共振で制限されないよう注意する。

実装上、薄膜磁心が単独で用いられることは少ない。フェライトチップのような表面実装部品、半導体集積回路とのハイブリッドモジュール、さらには半導体集積回路とモノリシックに集積化したMCM (Multi-Chip Module) など、用途と実装技術の進展に合わせた方式を選択する必要がある。これは作製プロセスやクロストークなどの雑音問題にも関わる事項である。

Fig. 1には掲載していないが、高周波透磁率や磁心の高周波特性計測など、計測に関わる周辺技術も重要である。また硬磁性薄膜材料の進展に期待が高い。個別応用については文献1)~20)を参照して頂きたい。

3 マイクロ磁気アクチュエータの概要

ミリマシンの駆動力として電磁力が有用との考えは、電磁力が寸法の3~4乗に比例して変化するのに対し、例えば静電力は2乗で変化するというスケーリング則に基づいている。静電力、圧電力、熱膨張など、従来からマイクロマシンの駆動力として検討されているものと比べた電磁駆動型並びに磁気駆動型の特徴を列举すれば、以下の通りである。

(1) 場の磁気エネルギーを利用することにより非接触駆動が可能である。これにより電力供給線が不要となるため、アクチュエータが軽量で構造が簡単になり、微細加工も容易になる。更に、管内や真空装置内などにある可動部を外部から駆動・制御可能となるため新規な応用分野の開発が可能となる。

(2) 磁気アクチュエータは基本的に電流による磁界のエネルギーで駆動されるため、電源からみると高速、低インピーダンス、低電圧駆動となる。静電、圧電アクチュエータが高速、高インピーダンス、高電圧駆動であることと比べると、低電圧でよいことは設計上の自由度を増し、パッケージングも容易になる。

(3) 以上をまとめて、駆動力や変位が大きく、実用的なミリマシンの駆動方式として有用である。

(4) 磁性体には、軟磁性材料、硬磁性材料、磁歪材料、機能性磁性材料(磁気抵抗効果、光磁気材料等)をはじめ、各種の薄膜ならびにバルク材料がある。これらを利用することにより新規なデバイス、アクチュエータの実現が可能と考えられる。

薄膜・厚膜を使用する以上、マイクロマシン・ミリマシンの駆動力や変位はバルク材料を用いた小形機械に比べて小さくなる。この小さな駆動力・変位を実用に結実させるためのアプローチがマイクロマシン全般の基本的問題である。これに対して、光スキャナ、光フィルタなどの光応用と、マイクロバルブ、マイクロリレーなどが現実性を帯びてきている。磁気駆動形マイクロマシンの応用例は文献21)~36)を参照されたい。

なお、マイクロマシン・ミリマシンの微細構造の中に良質の磁性材料を製作し、その良さを生かして行くためには、磁気研究者の参入と異分野の研究者との有機的な情報交換が不可欠と考えられている。

4 高周波微小磁気回路の設計技術

薄膜インダクタ、トランスにおける鎖交磁束量は磁心体積から考えてバルク磁心に比べて小さく、磁心として必要なインピーダンスや電圧を確保するためには高周波動作が必須となり、用途にもよるが1MHz~3GHz程度が興味の対象となっている。コイルパターンは磁化困難軸方向に磁性膜を励磁するように決定される。

100MHz以上の帯域では磁心のインダクタンスと漂遊容量によるLC共振の影響が顕著になるが、それ以下の周波数領域では磁性薄膜とコイル導体薄膜の表皮深さ、並びに特性長が素子設計上の基本パラメータになっている。低周波素子では膜厚を増加させればインダクタンスが増加し、トランスでは結合係数が向上するため厚膜化は設計上有用であるが、高周波領域では膜厚を表皮厚さの約2倍以上に厚くしても単に渦電流を増加させるばかりで透磁率は低下し、素子特性は劣化する。表皮深さ δ を式で表せば、

$$\delta = (\rho / \pi \mu f)^{1/2}$$

ただし、 ρ は抵抗率、 μ は透磁率、 f は周波数である。

Fig. 2 は代表的な薄膜材料の表皮深さを示す。周波数を10MHzとすると、既知の軟磁性薄膜としては高抵抗(120×10⁻⁸Ωm程度)を示すCoZrNbでも、 δ は高々4

μm 程度である。一方、薄膜コイル材料として使用されるCuの δ は同じ10MHzで20 μm に及ぶ。コイル膜厚は δ の $\pi/2$ 倍の範囲内³⁹⁾で厚膜化し、低抵抗化することが設計の基本である。したがって、およそ10MHz以下の低周波帯域では、数 μm 厚の磁性薄膜と数10 μm 厚のコイルの組合せが可能になる。

次に、この膜厚条件が与えられると、コイルとコイルの隙間から磁束を漏洩させないための条件、すなわち特性長^{40, 41)}によって許容する最大のコイル間隔が決定される。Fig. 3は内部コイル形薄膜インダクタにおける特性長 λ を説明したものである。

$$\lambda = (\mu r \cdot t \cdot g)^{1/2}$$

ただし、 μr は比透磁率、 t は磁性薄膜の膜厚、 g は上下の磁性膜の間隔である。磁性薄膜の比透磁率を500~1000程度の現実的な値と想定して、内部コイル形薄膜インダクタについて必要とされるコイル間隔を計算すると数 μm 以下のオーダーとなる。以上の考察は、10 μm 以上の厚膜導体を数 μm 間隔で配置するような微細加工技術や平坦化処理の必要性を示している。現在実用化が期待されている1~10MHz帯域用薄膜インダクタはこの考え方に沿うものである。

なお、磁性膜のサイズが小さくなるとその透磁率も変化する。Fig. 4はこれを説明したものの⁴²⁾で、磁性層の総厚 T_m が2 μm の条件下では $t_m=0.1\mu\text{m}$ 、 $t_i=0.05\mu\text{m}$ で薄膜インダクタのQに直接比例する材料パラメータと考えられる Q_{film} が最大値70を示している。同じ積層構造でも膜サイズが10mm $\times$ 20mmの場合は $Q_{film}=3$ 以下であり、寸法効果が顕著である。

Fig. 5(a)は、薄膜インダクタ用の磁性膜パターンを模した格子状CuMo-NiFe膜の構成を示している⁴³⁾。同図(b)は困難軸方向に励磁した場合の透磁率を示している。実線、破線、一点鎖線は電磁界シミュレータ(MAGNA/FIM)による計算値、○印は実験値である。試料はスパッタ製膜後にイオンミリングによって所期の形状とした。微細加工前の比透磁率は1500である。単位格子が孤立している場合は、一点鎖線で示したように反磁界によりみかけの比透磁率は100に低下する。逆にすべての格子を間隔零で集合させたとすると、破線のように微細加工前の比透磁率にほぼ等しい値が得られると計算される。単位格子の間隔 dm が十分大きい場合は孤立格子の比透磁率に漸近し、間隔が十分小さい場合は集合格子の比透磁率まで増大する。実験結果も計算値

に一致している。以上の結果は直感的にも理解される事項であるが、微細構造中の分布磁束の制御及びデバイス特性の設計上は定量的に把握する必要のある事項でもある。現状では数値計算に頼っているが、簡素な計算モデルが開発されると設計、解析上きわめて有用である。

Fig. 2 Skin depth of metallic films.

Fig. 3 Characteristic length of flux flow.

Fig. 4 Relation between the dimension and permeability for CoFeSiB/SiO₂ stacked film.

(a) Slitted film structure

(b) Permeability

Fig. 5 Apparent permeability of the slitted CuMo-NiFe film.

Fig. 6 Schematic explanation of LIGA process⁴⁵⁾.

5 厚膜微細加工技術

Fig. 6 は、LIGAプロセスと呼ばれる厚膜微細構造形成法を示したものである⁴⁴⁾。基板上に電気めっき用の種層を製膜した後にPMMAを付与し、シンクロトン放射光とX線マスクによって近接露光し、現像してめっきフレームを得る。次に電気めっきによってフレームを満たして厚膜微細構造を形成し、PMMAを除去して完成

される。数100 μm に及ぶ厚膜微細構造が形成可能な点の特徴であるが、放射光を得るための設備とX線マスクが必要なため簡単には導入できない。当初は直径数kmに及ぶ放射光リングの一部から微細加工用の線源を得ていたが、最近では直径数mの小形の設備も開発されている。

放射光を使用せず、一般的な紫外線露光によっても100 μm 程度までの厚膜構造を得ることが可能で、多くの報告が行われている。更に最近、Alの陽極酸化による立体的微細加工法が報告された⁴⁶⁾。これは、適当な条件下でAlを陽極酸化すると表面に直径数10nm、深さ100 μm 程度のポアが数 μm 間隔でほぼ均一に形成できることを利用したもので、陽極酸化後の表面にレジストを塗布し紫外線露光によってレジストをパターンニングした後、ウェットエッチングによって隣接ポアが接触するまで極端にポアを拡大させると、レジストパターンのない部分がおおよそポアの深さまで除去されるという方法である。これによって、120 μm 厚の構造体が試作されている。

6 まとめ

マイクロ磁気デバイス、マイクロ磁気アクチュエータの開発状況とこれを支える厚膜微細加工技術について概説した。紙面の都合でデバイス・アクチュエータの実例を直接紹介できなかったので、文献を参照していただきたい。

文 献

- 1) 応用磁気セミナー「携帯機器への磁気応用」1995.
- 2) N. Saleh, A. H. Qureshi, ELECTRONICS LETTERS 31st December 1970 No. 6 (1970) 850.
- 3) K. Kawabe, H. Koyama, K. Shirae, IEEE Trans. Magn., **MAG-20** (1984) 1804.
- 4) 浅田規裕, 松木英敏, 江刺正喜, 電学論 **A-114** (1994) 53.
- 5) T. Nishikawa, IEICE TRANS. **74** (1991) 1556.
- 6) TDKカタログ, CATALOG No. CVJ-005B(1994).
- 7) Y. Hamasaki, T. Ide, Transducers'95 and Euro sensors IX (1995) 265-A10.
- 8) N. Asada, H. Matsuki, K. Minami, M. Esashi, IEEE Trans. Magn., **30** (1994) 4647.
- 9) H. Ota, T. Oda, M. Kobayashi, MEMS 95 (1995) 197.
- 10) T. Sato, H. Tomiya, A. Sawabe, T. Inoue, T. Mizoguchi, M. Sahashi, IEEE Trans. Magn., **30** (1994) 217.
- 11) 三野, 塚本, 谷内, 柳沢, 田子, 電気学会マグネティックス研究会 (1994) MAG-94-191.
- 12) 西島, 日高, 斎藤, 山沢, 信学論 **C-II**, **J78-C-II**

- (1995) 339.
- 13) C. R. Sullivan, S. R. Sanders, 1995 Power Electronics Specialists Conference (PESC '95) Record (1995) 658.
  - 14) 三野, 塚本, 柳沢, 田子, 谷内, 電気学会全国大会, (1995) 508.
  - 15) S. Kawahito, H. Satoh, M. Sutoh and Y. Tadokoro, Transducers'95 and Eurosensors IX (1995) 290-A12.
  - 16) 中西, 吉見, 務中, 飯島, 山田, 電気学会全国大会, (1995) 483.
  - 17) R. Gottfried-Gottfried, W. Budde, R. Jahne, H. Kuck, B. Sauer, S. Ulbricht, U. Wende, Transducers'95 and Eurosensors IX (1995) 289-A12.
  - 18) 高山, 鈴木, 丹羽, 日本応用磁気学会誌, 17(1993) 227.
  - 19) 斎藤, 長谷, 若宮, 電気学会全国大会, (1993)1827.
  - 20) 面実装電子部品カタログ, TDK EVJ-001K (1994).
  - 21) M. Inoue, N. Fujita, T. Fujii, J. Appl. Phys., 73 (1993) 6159.
  - 22) 内山, 毛利, 神保, 網島, 日本応用磁気学会誌, 19 (1995) 481.
  - 23) H. Guckel, T. R. Christensen, K. J. Skrobis, T. S. Jung, J. Klein, K. V. Hartojo, I. Widjaja, MEMS 93 (1993) 7.
  - 24) B. Wagner, M. Kreutzer, W. Benecke, J. Microelectromechanical Systems, 2 (1993) 23.
  - 25) M. G. Allen, Transducers '93 (1993) 60.
  - 26) 伊東, 日本応用磁気学会誌, 18 (1994) 922.
  - 27) K. Yanagisawa, H. Kuwano, A. Tago, Transducers '93 (1993) 102.
  - 28) H. Hosaka, H. Kuwano, MEMS 94 (1994) 313.
  - 29) E. Hashimoto, H. Tanaka, Y. Suzuki, Y. Uenishi, A. Watabe, MEMS 94 (1994) 108.
  - 30) C. H. Ahn, M. G. Allen, MEMS 94 (1994) 91.
  - 31) C. H. Ahn, M. G. Allen, MEMS 95 (1995) 408.
  - 32) T. R. Ohnstein, J. D. Zook, J. A. Cox, B. D. Speldrich, T. J. Wagner, H. Guckel, T. R. Christenson, J. Klein, T. Earles, I. Glasgow, MEMS 95 (1995) 170.
  - 33) F. Cardot, J. Gobet, M. Bogdanski, F. Rudolf, Transducers '93 (1993) 32.
  - 34) 本田, 荒井, 菅原, 石山, 山口, 日本応用磁気学会誌, 19 (1995) 501.
  - 35) K. I. Arai, W. Sugawara, T. Honda, Transducers '95 and Eurosensors XI (1995) 316.
  - 36) T. Honda, K. I. Arai, M. Yamaguchi, J. Appl. Phys., 76 (1994) 6994.
  - 37) E. Quandt B. Gerlach, K. Seemann, J. Appl. Phys., 76 (1994) 7000.
  - 38) E. Quandt, K. Seemann, MEMS 95, (1995) 273.
  - 39) 榊原, 信学論 J73-B-1 (1991) 618.
  - 40) R. E. Jones, IEEE Trans. Magn., MAG-14 (1978) 509.
  - 41) 白江, 電気学会全国大会シンポジウム (1990) S. 18-1.
  - 42) 白川, 倉田, 野瀬, 三寺, 中島, 村上, 電気学会マグネティックス研究会 (1993) MAG-93-265.
  - 43) M. Yamaguchi, A. Arakawa, K. I. Arai, F. Kumagai, S. Kikuchi, IEEE Trans. Magn., 29 (1993) 5210.
  - 44) W. Ehrfeld, Micro System Technologies 90 (1990) 521.
  - 45) A. B. Frazier, M. G. Allen, J. Microelectromechanical Systems, 2 (1993) 87.
  - 46) S. Tan, M. Reed, H. Han, R. Boudreau, MEMS 95 (1995) 267.
  - 47) 日本応用磁気学会誌, 18 (1994) 895.