九州大学学術情報リポジトリ Kyushu University Institutional Repository

磁性多層膜装荷LC共振器による磁化率変調の高感度 検出

・・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・

・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・<

能崎, 幸雄 九州大学大学院システム情報科学研究院電子デバイス工学部門

松山, 公秀 九州大学大学院システム情報科学研究院電子デバイス工学部門

https://doi.org/10.15017/1654547

出版情報:九州大学大学院システム情報科学紀要.13(2), pp.89-93, 2008-09-26.九州大学大学院シス テム情報科学研究院 バージョン: 権利関係:

磁性多層膜装荷 LC 共振器による磁化率変調の高感度検出

張 明* · 能崎幸雄** · 松山公秀**

High Sensitive Detection of Susceptibility Modulation by LC Resonator Embedded with Ferromagnetic Multilayer

Ming ZHANG, Yukio NOZAKI and Kimihide MATSUYAMA

(Received June 13, 2008)

Abstract: In the present study, high sensitive detection of the reversible susceptibility modulation in the magnetic thin film was performed by an LC circuit resonant technique. A flat pick-up coil with the inductance of 0.80 μ H and a capacitance of 100 pF construct the LC resonant circuit. The reversible susceptibility χ of the magnetic thin film, embedded in the pick-up coil, was measured with a sinusoidal exciting field (*H*). The out put signal was modulated by applying an orthogonal bias field (*H*_b). A multilayer sample of [NiFe(100 nm)/Cu(10 nm)]₂₀, exhibits the most sensitive modulation effect among the fabricated samples. That is, the resonant frequency f_r was decreased from 11.58 MHz ($H_b = 0$ Oe) to 8.22 MHz ($H_b = 7$ Oe) at $H_{ex} = 2.5$ mOe, suggesting the marked increase of χ . The value of H_b , which minimizes f_r , is comparable to the anisotropy field. Thus, the observed drastic increase of χ can be associated with the compensation of the anisotropy with H_b , as confirmed from the theoretical prediction. The practical out put voltage change of 55%/Oe was realized for the fabricated resonator.

Keywords: Magnetic thin film, Induced magnetic anisotropy, Susceptibility, Magneto-inductance, Magnetic sensor, LC resonance

1.はじめに

磁界を電気信号に変換して検出する磁気センサは、代表 的なセンシングデバイスとしてモーションセンサ、セキュ リティセンサ,方位センサ等の様々な用途に供されている. 磁界強度は、生体磁界(~10⁻¹⁰ Oe)、地磁気(~10⁻¹ Oe),磁気記録磁界(10² Oe),磁石磁界(10⁴ Oe) と極 めて広範である、このため、半導体のホール効果を利用し たホールセンサ,磁性体の磁気抵抗効果を利用した MR セ ンサ、磁心を有するコイルのインダクタンス変化を差動検 出するフラックスゲートサンサ、磁性ワイヤにおけるイン ピーダンスの磁界依存性を検出する MI センサ等,検出感 度や動作周波数に応じた様々な動作原理の磁気センサが開 発されている¹⁾. このうち, フラックスゲートセンサ²⁾, MI センサ³⁾は、交流磁界に対する磁性体の磁化率が外部 磁界の印加によって変化する現象を利用しており高い磁界 感度を有しているが、バルク形状の磁性体を用いているた め、小型化、集積化が課題となっている. そこで本研究で は、微細加工技術により基板上にデバイス作成が可能な磁 性薄膜に着目し、その磁化率変調を LC 共振により高感度

に検出する新しい薄膜磁気センサについて検討を行ったの で報告する.

2. 磁気異方性補償による磁化率変調原理

強磁性体を用いた磁界センサでは、通常, Fig.1(a) に 示すように励起磁界 H を磁気異方性容易軸(容易軸)と 直交する向きに印加し、その線形磁化応答を磁気抵抗効果 や磁気インピーダンス効果により電気的に検出している. この場合、磁性体の磁化方向を一様と仮定する単磁区モデ ルでは、励起磁界 H、磁気異方性等価磁界 H_k、バイアス 磁界 H_b(容易軸方向に印加)により、容易軸と直交方向へ の励起に対する差分磁化率 χ₁ が次式のように導かれる.

$$\chi_{\perp} = M_{\rm s} \sin \phi / H$$

= $M_{\rm s} \cos \phi / (H_{\rm k} \cos \phi + H_{\rm b})$ (1)

上記のような磁界配置を以下,平行バイアス配置と称す. 一方, **Fig. 1(b)**のように,励起磁界*H*を容易軸と平行 方向に印加し,バイアス磁界*H*。を容易軸と直交方向に印 加した場合の差分磁化率 χ_ℓは次式のように定式化される.

$$\chi_{\mathscr{I}} = \frac{M_{s} [\cos(\phi_{0} + \phi) - \cos\phi_{0}]}{H}$$
(2)

ここで、 ϕ_0 はH=0のときの磁化方向であり、 H_b と H_k の トルクバランスから次式のように表される.

平成 20 年 6 月 13 日 受付

^{*} 電子デバイス工学専攻博士後期課程

^{**} 電子デバイス工学部門



$$\phi_{0} = \sin^{-1}(H_{b}/H_{k}) \dots (H_{b} \leq H_{k})$$

= $\pi/2 \dots (H_{b} > H_{k})$ (3)

(2) 式の ϕ は*H*による磁化の増分であり,*H*,*H*_b,*H*_k間の トルクバランスから次式により求められる.

$$H = \frac{-H_{k}\sin(\phi_{0}+\phi)\cos(\phi_{0}+\phi)+H_{b}\cos(\phi_{0}+\phi)}{\sin(\phi_{0}+\phi)}$$
(4)

上記の磁界配置を直交バイアス配置と称す.

(1), (2)式で表される差分磁化率の H_b 依存性を**Fig.2**に 比較して示す.実際のセンサ動作では、微弱励起磁界に対 する磁化率変化を利用するため、ここでは後述の実験条件 に合わせH = 0.5 mOe, $H_k = 7$ Oe, 4π Ms = 10 kGauss と仮 定した.図から分かるように、 χ_{ℓ} は $H_b = H_k$ で最大値 1.0×10^6 をとる単峰型の H_b 依存性を示す.この解析結果は、 容易軸と直交方向に異方性等価磁界と同じ大きさのバイア ス磁界を印加することによって、磁気異方性の効果が補償 され、大きな差分磁化率が得られることを示唆している. また、 $H_b = 0$ のとき $\chi_{\ell} = 0$ となるので、 $0 < H_b < H_k$ の範囲 で H_b の変化による顕著な磁化率変調効果が期待出来る.

 χ_{\perp} は, $H_{b} = 0$ のときに最大値 1400 をとり, H_{b} の増加に 伴い単調に減少する. χ_{\perp} の最大値は M_{s} / H_{k} に相当し, 容易軸方向の H_{b} は等価的に H_{k} と同じ作用をするため, そ の増大により χ_{\perp} が減少する.

3. 実験方法

Fig.3に、LC 共振を利用した磁化率変調検出に用いた 実験系の構成図を示す.中心軸が垂直となるように配置し た二組のヘルムホルツコイルにより,直流バイアス磁界 *H*_bと交流励起磁界*H*を発生させている.直径0.5 mmのホ ルマル線を巻線とし,磁性薄膜を成膜した1×1 cm²のガ ラス基板の周りにコイル断面がなるべく扁平となるように 巻いて検出コイルとした.検出コイルと並列に100 pFの コンデンサを接続して LC 共振器を構成している.浮遊容 量の影響を考慮し,容量の異なるコンデンサに対する共振 周波数変化から求めた検出コイルのインダクタンスは,磁 性薄膜を装荷しない状態で 0.80 μH であった.励起磁界の 周波数を零バイアス状態における LC 共振器の共振周波数



Fig. 2 Dependence of differential susceptibility (χ) on bias magnetic field (H_b) : theoretical prediction from single domain model,



Fig. 3 Schematic figures of experimental system for measurement of susceptibility modulation in magnetic film.

と一致させ、直流バイアス磁界印加による磁性薄膜の磁化 率変調効果を LC 回路の共振周波数変化を通して高感度に 評価した.検出コイルの電圧は、ブリッジ整流回路により 直流電圧に変換し DC ナノボルトメータにより測定した.

磁性薄膜材料としては、代表的な合金系軟磁性材料であ る Ni₇₈Fe₂₂合金を用い、rf マグネトロンスパッタによりガ ラス基板上に常温下で成膜を行なった。到達真空度は 5×10^{-7} Torr 以下とし、スパッタ Ar 圧は 6 mTorr、ター ゲット投入電力は 80 W/(3inch ϕ)に設定した。基板近傍に 固定した永久磁石により、成膜中に 600 Oe の静磁界を印 加することにより NiFe に磁界印加方向を容易軸とする一 軸性の成長誘導磁気異方性を付与した。NiFe 薄膜の膜厚 は触針型膜厚計により、磁気特性は試料振動型磁力計によ り測定した。

4. 磁化率変調による LC 共振周波数変化

NiFe 薄膜(膜厚 100 nm)装荷 LC 共振器における共振 特性のバイアス磁界依存性を Fig.4 に示す. バイアス磁 界H。及び励起磁界Hは、2節の解析結果に基づき、高い 磁化率変調効果が期待できる直交バイアス配置(H_b 上容 易軸, H // 容易軸)とした.振幅 0.5 mOe の励起磁界に 対し、 $H_b = 0$ Oe での共振周波数 f_0 は 11.68 MHz であった. 図に示されるように, 共振周波数f' はバイアス磁界の増 大に伴い低周波側にシフトし, H_b=7 Oe で最小値 11.2 MHzをとる. H_b をさらに増加すると, f'は減少し f_b に漸 近していく. f_0 に対するf'の変化率 $((f' - f_0)/f_0 = \Delta f/f_0$ (%))を H_b の関数として**Fig. 5(a)**に示す. $\Delta f / f_0 O H_b$ 依 存性は、単磁区モデルにより導出された磁化率 xの H。依 存性(Fig.2参照)と対応していることから、観測された LC 共振周波変化は、NiFe 薄膜の磁化率変調効果を反映し たものと考えられる. **Fig.5**において、 $\Delta f/f_0$ を最大とす るH_bの値は7Oeであるが、この値はNiFe薄膜の困難軸 方向飽和磁界(≈異方性等価磁界)の値にほぼ等しく、単 磁区モデルでの解析結果と一致している. すなわち、単磁 区モデルから予測される*H*_bによる磁気異方性の補償と, これによる高い磁化率の発現が実証された. しかしながら, 単磁区モデルでは、磁気異方性補償下で10%に及ぶ極めて 大きな磁化率が得られているのに対し、実測の∆f/faから 見積もられる磁化率は2500程度と小さな値になっている. これは, Fig.6の困難軸方向磁化曲線に若干のヒステリシ スが生じていることからも分かるように、NiFe 膜面内に 磁気異方性の方向分散が生じているためと考えられる. **Fig. 5(b)**は、比較のために平行バイアス配置(*H*_b// 容易 軸, H 上容易軸)の磁界配置で測定した共振周波数のH_b 依存性である.この場合、H。は平均磁化方向に印加され るため, H_bの増加に伴い磁化率が減少し, その結果とし て共振周波数が単調増加する. 平行バイアス配置では, 直 交バイアス配置のような H_bによる磁気異方性補償は生じ ないため、周波数変化率も直交バイアス配置の場合に比べ 1/2 程度の値となっている.

5. 磁性薄膜装荷 LC 共振器による高感度磁界検出

磁性薄膜装荷 LC 共振器の高感度磁界センサへの応用の 観点から、検出コイルの巻き数、磁性薄膜の層構成につい て検討を行った、磁性薄膜に [NiFe(100 nm)/Cu(10 nm)]。 多層膜を用い、検出コイル巻数 10, 18, 36, 54 の 4 種類の LC 共振器を試作し特性比較を行なった. Fig. 7 に各 LC 共 振器における共振周波数変化率 ($\Delta f/f_0$)のバイアス磁界 (H_b)依存性を比較して示す、巻数18のLC 共振器において 最大値 $\Delta f/f_0=11\%$ が得られている、巻数 18 以上での Δf / f_0 の減少は、巻き線の多層化により上層巻き線と磁性薄 膜との間の間隙が増加し、漏れ磁束が増大したことによる



Fig. 4 Bias field dependence of resonant properties in a LC resonator with magnetic thin film.



Fig. 5 Normalized resonance frequency change $(\Delta f/f_0)$ vs. bias (H_b) .



Fig. 6 Magnetization curves of NiFe thin film (t = 100 nm) measured along easy and hard axis of magnetic anisotropy.

ものと考えられる.また,巻き数10での△f/f₆の減少は, 巻き線部インダクタンスの減少により,磁性体磁化と鎖交 しない配線部インダクタンスの相対割合が増大し,磁化率 検出効率が低下したためと考えられる.以下では,最適巻 き数18の共振器を用いて行なった NiFe 薄膜の特性最適化 について述べる.

薄膜磁化率変調の検出効率増大のための直接的方法とし



Fig. 7 Bias field dependence of resonance properties measured for various LC resonator with different coil winding number *N*.

て、磁性体膜厚の増加によりコイル内容積に対する磁性体 占有体積を増大させることが考えられる. Fig. 8 は, 10~ 300 nm の種々の膜厚(t)のNiFe 薄膜を装荷した LC 共振器 について $\Delta f / f_0$ の最大値を比較した結果である. t = 100nmの膜厚までは体積効果により、 $\Delta f / f_0$ は概ね増加傾向 を示している. しかしながら, 150 nm 以上の膜厚では t の 増加に伴いΔf/foが減少する。特に膜厚 250 nm 以上では この傾向が顕著であり、磁化率変調効果がほぼ消失してい ることが分かる. この原因を解明するため, t = 10 nm, 40 nm, 250 nm, 300 nm の NiFe 薄膜について磁化曲線を比 較測定した(Fig. 9). Figs. 9(a), (b), Fig. 6 の各測定結果 から、t=100 nmの膜厚では、それ以下の膜厚に比べ困難 軸方向の磁気ヒステリシスが低減されており、異方性方向 分散の小さな薄膜が形成されていると考えられる. 40 nm 以下の膜厚での異方性方向分散の一因として、非磁性不純 物や構造欠陥の体積比率増加により、2元合金における誘 導磁気異方性の起因と考えられている方向性原子対配列4) の形成が不十分となることがあげられる. t=100 nm での △f /f₀の顕著な増大は、膜厚増加による体積効果と、異方 性分散低減効果の相乗作用により説明できる.一方, Figs. 9(c), (d) に示されるように, 層厚 250 nm 以上では 容易軸方向と困難軸方向との磁化曲線形状が類似している ことから,異方性方向分散の顕在化が示唆される.すなわ ち,厚膜領域でのΔf/f₀の減少は,薄膜磁気特性の膜面内 等方化によるものと考えられる。磁気特性等方化の原因と しては、方向規則性の無い膜中残留応力に起因する磁歪誘 起磁気異方性⁵⁾の影響が支配的となったため考えられる.

Fig.4に示されるように,励起磁界周波数を零バイアス 状態でのLC共振周波数に設定することにより,微小なバ イアス磁界の変化を電圧変化として高感度に検出すること が出来る.バイアス磁界を被検出磁界とした磁界検出感度 (感度) S は次式のように定義できる.

$$S(\%/\text{Oe}) = \frac{|\Delta V_{\text{out}}|}{V_{\text{ref}}} / H_b$$
(5)



Fig. 8 Dependence of resonance frequency change on NiFe thickness (*t*).



Fig. 9 Magnetization curves measured for NiFe films with various thicknesses.



上式で、 V_{ret} は零バイアス状態での出力電圧、 ΔV_{out} はバイ アス印加による出力電圧の変化分である.**Fig.8**に示した ように、NiFe 層厚の増加による磁化率変調効果の増大に は上限があるため、最適磁性層厚100 nmのNiFe 薄膜を積 層することにより磁界感度の向上を試みた.各NiFe 層間 の磁気的結合を切るためのスペーサ層として、層厚10 nm のCu 層を用いた.**Fig.10**に、感度(S)の積層数(N)依存 性を示す.N = 20まではSが単調に増大するがN = 50で は、逆に感度が低下している.**Fig.11**にN = 1, 10, 20, 50





の各積層数に対する磁化曲線を示す. N = 10,20 では単層 (N = 1)の磁気特性に比べ,容易方向の保磁力著しく減少 しており,困難方向のヒステリシスも低減されていること が分かる.これは,多層膜下層部の下地効果⁶⁾により上 層磁性層の磁気特性が改善されたことが原因と考えられる. N=50の多層膜では,容易方向と困難方向の磁化曲線が類 似しており膜面内での磁気特性が等方化している.また, 零磁界状態における残留磁化が極めて小さいことが特徴で あり,積層数の増大により薄膜の平坦性が劣化し各磁性層 間に界面凹凸に起因する静磁気結合⁷⁾が作用し,対面磁 性層が反平行状態に安定化することが原因と考えられる.

6.まとめ

磁性多層膜装荷 LC 共振器の共振周波数変化を利用した 磁化率変調効果の高感度検出とその磁界センサへの応用に ついて理論解析と実験による検討を行った.単磁区モデル に基づく解析結果から,バイアス磁界による磁気異方性の 補償により高い磁化率変調効果が実現可能であることを明 らかにした.NiFe/Cu 多層膜を装荷した LC 共振器を作成 し実験によりその効果を実証した.コイル巻き数,NiFe 層厚,積層数等について最適化を行なった結果,[NiFe (100 nm)/Cu(10 nm)]₂₀多層膜装荷 LC 共振器において, 出力電圧変化率 55 %/Oe の高い磁界検出感度を実現した.

参考文献

- 1) 毛利佳年雄,磁気センサ理工学,コロナ社,1998.
- D. I. Gordon and R. E. Brown, "Recent advances in fluxgate magnetometry", IEEE Trans. Magn, 8(1), pp. 76-82, (1972).
- 3) 毛利佳年雄,"磁気インピーダンス MI 効果マイクロ磁気センサ",日本応用磁気学会誌,19, pp. 847-856, 1995.
- 4) S. Chikazumi, J. Phys. Soc. Japan, 5, p333, 1950.
- F. G West, "Uniaxial Anisotropy due to Magnetoelastid Energy in Constrained Polycrystalline Films", J. Appl. Phys., 35, pp. 1827-1840, 1964.
- 6)福沢英明、上口裕三、鴻井克彦、岩崎仁志、佐橋政司 "ス ピンバルブ構造をもつ極薄 CoFe フリー層の磁歪", 日本応 用磁気学会誌, 26, pp. 301-306, 2002.
- P. Vargas and D. Albert, "Dipolar Effects in Multilayers with Interface Roughness", Phys. Rev. B, 62, pp. 6337-6342, 2000.