

## 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

九州大学大学院システム情報科学府電子デバイス工学専攻 : 博士後期課程

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  $\mu$ H and a capacitance of 100 pF construct the LC resonant circuit. The reversible susceptibility  $\chi$  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)]<sub>20</sub>, 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  $\chi$ . The value of  $H_b$ , which minimizes  $f_r$ , is comparable to the anisotropy field. Thus, the observed drastic increase of  $\chi$  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 ( $\sim 10^{-10}$  Oe), 地磁気 ( $\sim 10^{-1}$  Oe), 磁気記録磁界 ( $10^2$  Oe), 磁石磁界 ( $10^4$  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センサ, 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<sup>1)</sup>。このうち、フラックスゲートセンサ<sup>2)</sup>, MI センサ<sup>3)</sup> 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氣的に検出している。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  $\chi_{\perp}$  が次式のように導かれる。

$$\begin{aligned}\chi_{\perp} &= M_s \sin \phi / H \\ &= M_s \cos \phi / (H_k \cos \phi + H_b)\end{aligned}\quad (1)$$

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  $H_b$  を容易軸と直交方向に印加した場合の差分磁化率  $\chi_{\parallel}$  は次式のように定式化される。

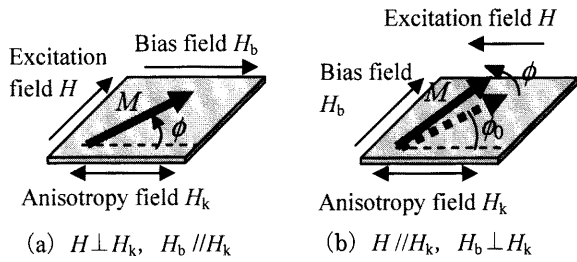
$$\chi_{\parallel} = \frac{M_s \{\cos(\phi_0 + \phi) - \cos \phi_0\}}{H}\quad (2)$$

ここで、 $\phi_0$  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



**Fig. 1** Susceptibility modulation with bias magnetic field.

$$\begin{aligned} \phi_0 &= \sin^{-1}(H_b/H_k) \dots (H_b \leq H_k) \\ &= \pi/2 \dots (H_b > H_k) \end{aligned} \quad (3)$$

(2) 式の  $\phi$  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.

$$H = \frac{-H_k \sin(\phi_0 + \phi) \cos(\phi_0 + \phi) + H_b \cos(\phi_0 + \phi)}{\sin(\phi_0 + \phi)} \quad (4)$$

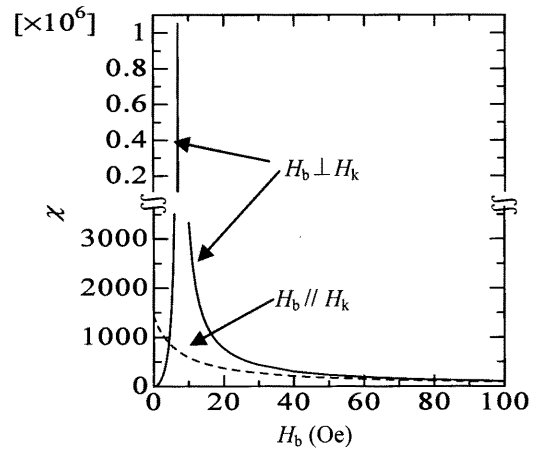
上記の磁界配置を直交バイアス配置と称す.

(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  $H = 0.5 \text{ mOe}$ ,  $H_k = 7 \text{ Oe}$ ,  $4\pi M_s = 10 \text{ kGauss}$  と仮定した. 図から分かるように,  $\chi_{\perp}$  は  $H_b = H_k$  で最大値  $1.0 \times 10^6$  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  $\chi_{\perp} = 0$  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.

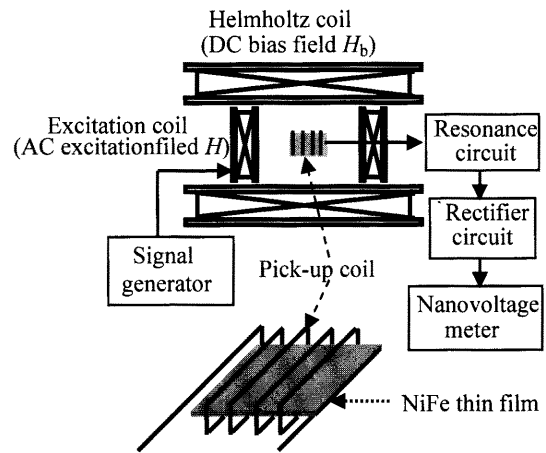
$\chi_{\perp}$  は,  $H_b = 0$  のときに最大値 1400 をとり,  $H_b$  の増加に伴い単調に減少する.  $\chi_{\perp}$  の最大値は  $M_s / H_k$  に相当し, 容易軸方向の  $H_b$  は等価的に  $H_k$  と同じ作用をするため, その増大により  $\chi_{\perp}$  が減少する.

### 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  $1 \times 1 \text{ cm}^2$  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  $0.80 \mu\text{H}$  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 ( $\chi$ ) 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  $\text{Ni}_{78}\text{Fe}_{22}$  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  $5 \times 10^{-7} \text{ Torr}$  以下とし, スパッタ Ar 圧は 6 mTorr, ターゲット投入電力は  $80 \text{ W}/(3\text{inch } \phi)$  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  $H_b$  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 ( $H_b \perp$  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  $f_0$  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.  $\Delta f/f_0$  の  $H_b$  依存性は, 単磁区モデルにより導出された磁化率  $\chi$  の  $H_b$  依存性 (Fig. 2 参照) と対応していることから, 観測された LC 共振周波数変化は, 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 7 Oe であるが, この値は NiFe 薄膜の困難軸方向飽和磁界 ( $\approx$  異方性等価磁界) の値にはほぼ等しく, 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  $10^\circ$  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  $\Delta f/f_0$  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,  $H \perp$  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,  $H_b$  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  $[\text{NiFe}(100 \text{ nm})/\text{Cu}(10 \text{ nm})]_n$  多層膜を用い, 検出コイル巻き数 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. 巻き数 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. 巻き数 18 以上の  $\Delta f/f_0$  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

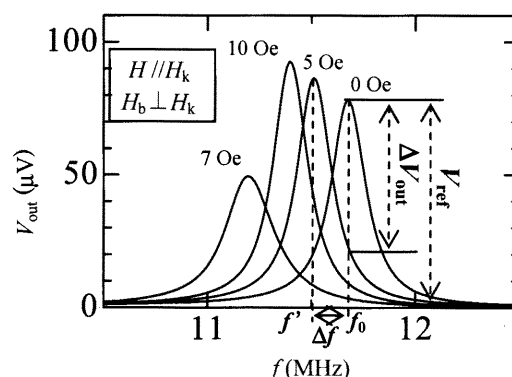


Fig. 4 Bias field dependence of resonant properties in a LC resonator with magnetic thin film.

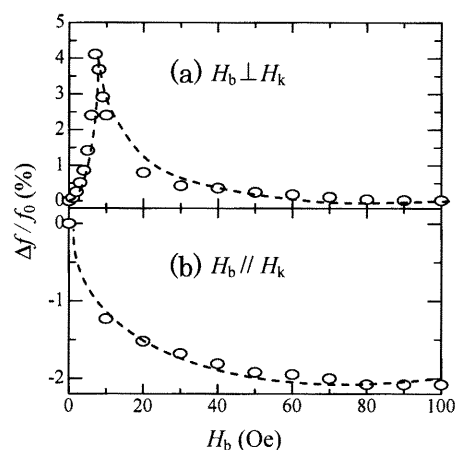


Fig. 5 Normalized resonance frequency change ( $\Delta f/f_0$ ) vs. bias ( $H_b$ ).

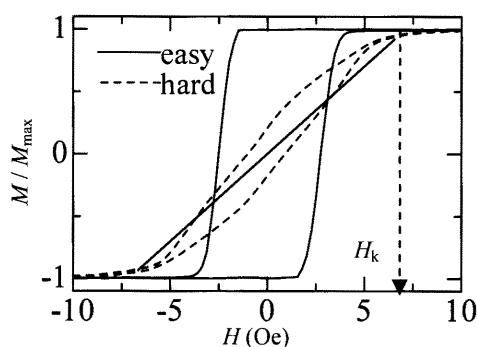
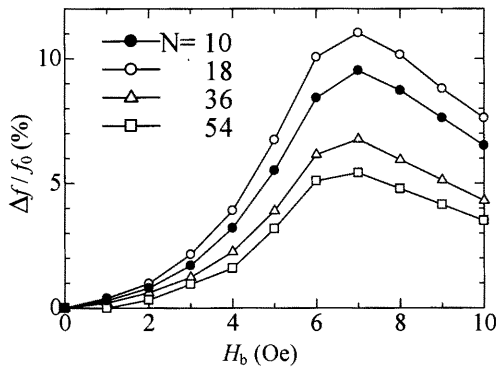


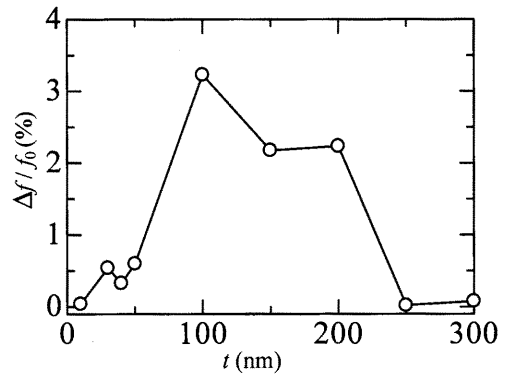
Fig. 6 Magnetization curves of NiFe thin film ( $t = 100 \text{ nm}$ ) measured along easy and hard axis of magnetic anisotropy.

ものと考えられる. また, 巻き数 10 での  $\Delta f/f_0$  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な方法とし



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

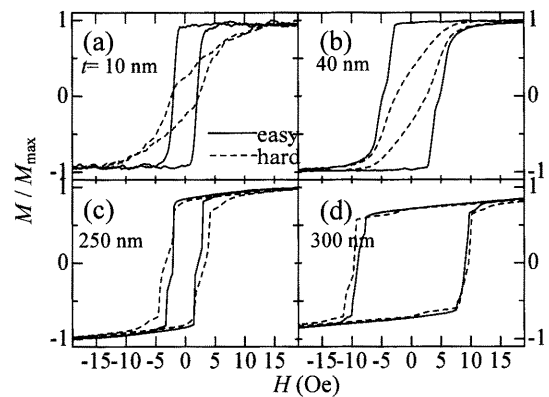


**Fig. 8** Dependence of resonance frequency change on NiFe thickness ( $t$ ).

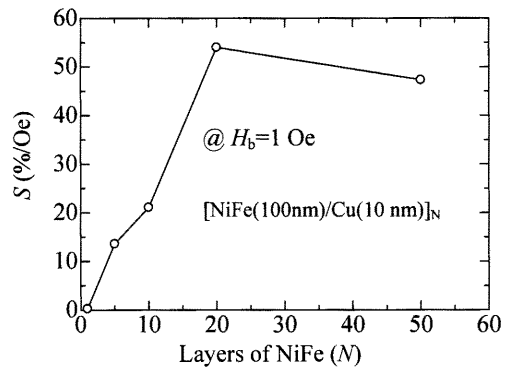
て、磁性体膜厚の増加によりコイル内容積に対する磁性体占有体積を増大させることが考えられる。Fig. 8 は、10 ~ 300 nm の種々の膜厚 ( $t$ ) の NiFe 薄膜を装荷した LC 共振器について  $\Delta f/f_0$  の最大値を比較した結果である。  $t = 100$  nm の膜厚までは体積効果により、  $\Delta f/f_0$  は概ね増加傾向を示している。しかしながら、150 nm 以上の膜厚では  $t$  の増加に伴い  $\Delta f/f_0$  が減少する。特に膜厚 250 nm 以上ではこの傾向が顕著であり、磁化率変調効果がほぼ消失していることが分かる。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<sup>4)</sup>の形成が不十分となることがあげられる。  $t = 100$  nm での  $\Delta f/f_0$  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  $\Delta f/f_0$  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<sup>5)</sup>の影響が支配的となったためと考えられる。

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。

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

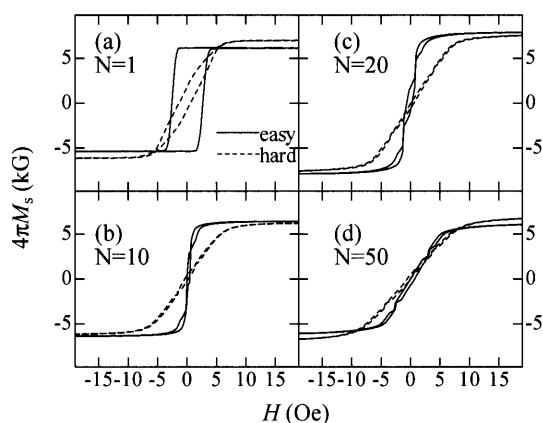


**Fig. 9** Magnetization curves measured for NiFe films with various thicknesses.



**Fig. 10** Dependence of field sensitivity ( $S$ ) change on layers of NiFe ( $N$ )

上式で、  $V_{ref}$  は零バイアス状態での出力電圧、  $\Delta V_{out}$  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 層間の磁氣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  $N = 1, 10, 20, 50$



**Fig. 11** Magnetization curves measured for  $[\text{NiFe}(100 \text{ nm})/\text{Cu}(10 \text{ nm})]_N$  multilayer films with various of  $N$ .

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<sup>6)</sup>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<sup>7)</sup>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、 $[\text{NiFe}(100 \text{ nm})/\text{Cu}(10 \text{ nm})]_{20}$  多層膜装荷 LC 共振器において、出力電圧変化率  $55 \text{ \%}/\text{Oe}$  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.
- 2) 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.
- 5) 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 "スピナル構造をもつ極薄 CoFe フリー層の磁歪", 日本応用磁気学会誌, 26, pp. 301-306, 2002.
- 7) P. Vargas and D. Albert, "Dipolar Effects in Multilayers with Interface Roughness", Phys. Rev. B, 62, pp. 6337-6342, 2000.