

機関番号：11301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2012～2013

課題番号：24656250

研究課題名(和文)熱膨張差誘起応力を利用した磁歪薄膜の異方性制御法の確立と高感度歪センサへの応用

研究課題名(英文) Establishment of anisotropy control method of the magnetostrictive thin film using stress induced by difference in thermal expansion and their application for highly sensitive strain sensor.

研究代表者

梶 修一郎 (Hashi, Shuichiro)

東北大学・電気通信研究所・准教授

研究者番号：90324285

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円、(間接経費) 930,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、熱膨張係数の異なる非磁性薄膜(Mo)と軟磁性アモルファス磁歪薄膜(FeSiB)を組合せた積層構造膜において、熱処理時の熱膨張差により層間に生じる応力と、磁歪薄膜特有の逆磁歪効果を利用した磁性薄膜の一軸磁気異方性誘導の制御方法とその高感度歪センサ実現の可能性について検討を行った。いずれの構造においても、下地に用いた短冊形状のMo膜のアスペクト比が大きいほど、またMo膜の膜厚が厚くなるほどFeSiB膜の誘導される磁気異方性は大きくなることが明らかとなった。またリング形状の積層構造の場合、リング中心から放射状に磁気異方性が誘導されることが観察された。

研究成果の概要(英文)：In this study, for a soft magnetostrictive thin film (FeSiB), uniaxial anisotropy control method using a difference of thermal expansion coefficients of layered structure composed of other nonmagnetic film (Mo) was studied for realizing high sensitive strain sensor. When the film is subjected to annealing to release a residual stress, the differences of the thermal expansion coefficient of the magnetic film and nonmagnetic film produce an inner stress to each other. The inner stress can induce anisotropy of the magnetic film to arbitrary direction due to the inverse magnetostriction effect. It is found that the uniaxial anisotropy is induced to width direction of the rectangular Mo layer. In addition, it was observed that as the major axis of the rectangular Mo under layer was lengthened, the in-plane uniaxial anisotropy of the FeSiB film was gradually strengthened. Furthermore, the anisotropy of FeSiB induced radially of a ring shape sample using this method was observed.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・計測工学

キーワード：アモルファス磁歪薄膜 磁気異方性 逆磁歪効果 歪センサ

1. 研究開始当初の背景

磁界センサや磁気記録用ヘッド・記録媒体など、磁性薄膜を用いた磁気デバイスを開発する場合、磁化し易さ (or 難さ) の目安となる磁気異方性の制御が必須となる。特に、磁歪 (磁界印加で生じる形状歪) が零に近いアモルファス軟磁性膜は、結晶磁気異方性を持たないため、磁界中成膜や成膜後の磁界中熱処理により、ある程度自在に (誘導磁気) 異方性を制御でき、様々な磁気デバイスへの応用が試みられている。

これに対し、比較的大きな磁歪を持つアモルファス軟磁性膜の逆磁歪効果 (応力を印加された磁性材の磁化状態が変化する現象) を用いたセンサデバイス実現に向けた研究を行っている。磁性体の逆磁歪効果は古くから知られているが、特に薄膜ではデバイス作製時の異方性制御が難しく工業的に広く使われている例は少ない。これは磁性膜が大きな磁歪を持ったため、センサデバイス作製に際して、センサの高性能化に重要な磁気異方性の制御が、零磁歪アモルファス材に比べて非常に困難であることが主因である。

このような中、磁歪膜 (FeSiB: $6.5 \times 10^{-6}/\text{K}$) より僅かに熱膨張係数の小さな非磁性材 (Mo: $5.4 \times 10^{-6}/\text{K}$) との積層構造において、熱処理時の熱膨張差により層間に働く応力を利用して一方向に異方性が誘導されることを見出した。しかしながら、その誘導のメカニズムの解明には至っておらず、歪センサの実用化や更なる高感度化を目指す上で重要な設計指針が確立されていない。

2. 研究の目的

熱膨張係数の異なる非磁性薄膜と軟磁性アモルファス磁歪薄膜 (FeSiB) を組合せた積層構造膜において、熱処理時の熱膨張差により層間に生じる応力と、磁歪薄膜特有の逆磁歪効果を利用した磁性薄膜の一軸磁気異方性誘導の制御技術を確認し、この技術を用いた磁気デバイスの一例として、逆磁歪効果型高感度歪センサ素子の試作を検討する。本研究で提案する磁気異方性制御のメカニズムが明確になり制御指針が確立されれば、様々な磁性薄膜の物性評価の一助になると同時に、既存の方法では困難であった磁性薄膜の局所的な磁気異方性を、自在に制御することが可能となり、新規概念の磁気デバイスの開発に貢献できるものと考えられる。

3. 研究の方法

図1に示したアモルファス磁性 (FeSiB) / 非磁性 (Mo, Ti) の2層膜において、アスペクト比及び膜厚比を様々に変化させた積層構造を作製し、各構造の磁化特性 (印加磁界に対する磁性膜内部の磁化量の変化)、磁気トルク特性 (印加磁界に対する磁性体内部磁化の回転力)、磁気 Kerr 効果顕微鏡による磁性膜表面の磁区構造観察を行い、各測定・観察結果を定量的に整理することによって異

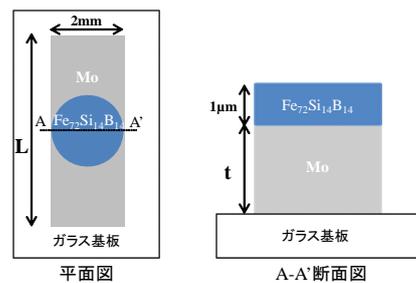


図1 誘導磁気異方性の評価用積層構造

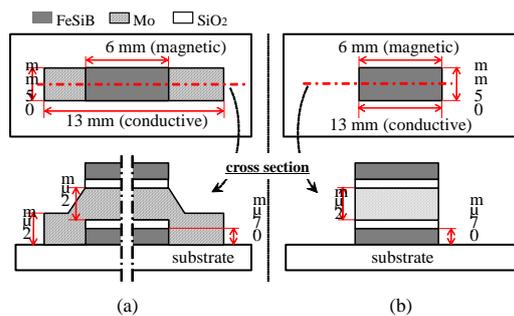


図2 高感度歪センサ素子の構造

方性誘導のメカニズムを明確にする。積層膜素子の作製には、フォトリソグラフィ (リフトオフ法) を用いた。成膜後の熱処理には回転磁界中熱処理装置を用いた。磁化特性の測定には振動試料型磁力計 (VSM)、磁気異方性の評価には磁気トルク計を用いた。

また本研究で試作した歪センサ素子の構造と動作原理について述べる。高周波キャリア電流を通電するための導体層 (Mo) に対して、磁歪薄膜 (FeSiB) を上下に配置して挟み込んだ積層構造となっており、磁歪薄膜の逆磁歪効果を利用して、歪印加による磁歪膜内部の磁化の変化を、導体層の高周波インピーダンスの変化として計測するものである。構造は1ターンのミアンダ構造とした。通常、導体層としては電気抵抗率の低い銅 (Cu) 薄膜を用いることが望ましいが、FeSiB 膜との熱膨張率の差が大き過ぎるため、磁気異方性の付与が困難であった。よって Mo 薄膜を使用した。150 μm 厚の薄いガラス基板を用い、前述と同様にリフトオフ法によるパターンニングと、RF スパッタリング法による製膜を行った。導体層の膜厚は 3 μm、磁性膜と導体膜間は 0.25 μm 厚の SiO₂ 膜で絶縁した。磁性層の長さは 4 mm 一定とし、幅を 1, 0.75, 0.5 mm、厚さを 0.7, 1, 2 μm とした。センサ素子作製後、磁歪薄膜のキュリー温度付近 (360°C) において回転磁界中熱処理のみを施した。

図2に示すような構造の歪センサ素子の特性測定のため、センサ素子に素子を含む基板を片持ち梁構造となるよう加工した。片持ち梁の自由端をマイクロメータロッドにより上下に荷重を加えながら素子長手方向に一軸歪ε (圧縮歪または引っ張り歪) を与えた。インピーダンス測定にはネットワークアナ

Subst. : Slide glass ($10 \times 10^{-6} / \text{K}$)

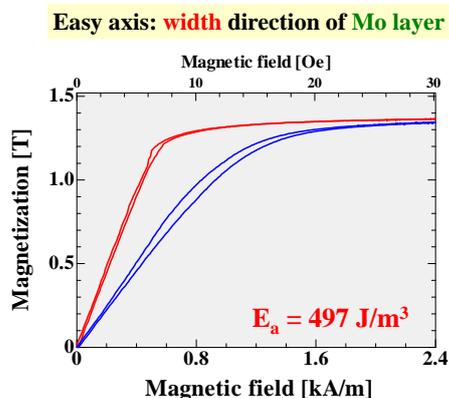
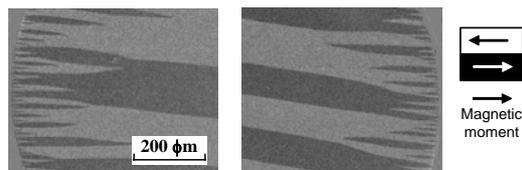


図3 表面磁区構造の観察結果および磁化特性の測定結果 (Mo 下部層:膜厚:3μm, 幅 2mm×8mm)

ライザを使用し、1~100 MHz までの周波数領域で測定を行った。

4. 研究成果

アモルファス磁性 (FeSiB) /非磁性 (Mo, Ti) 積層構造膜の膜厚比や素子のアスペクト比を変化させ、磁化特性測定および磁区構造観察を行い、磁気異方性誘導の状態について基礎的な検討を行った。結果の一例を図3に示す。

具体的には、下部層の Mo 薄膜の形状を短冊状 (膜厚: 3μm, 幅 2mm×Lmm, L: 変数) に、またその上に成膜する FeSiB 薄膜は面内における形状の影響を無くすために円盤状 (膜厚: 1μm, 直径 2mm) にして検討を行った。FeSiB 層の形状は固定し、Mo 層の短冊長手方向の長さを徐々に延長させた。成膜後には磁性膜中の磁化が面内で等方的になるよう回転磁界中熱処理 (250, 300, 350°C) のみを施すと同時に、成膜時に印加された歪を取り除いた。Mo 層の形状が正方形 (2mm×2mm) の場合、上層の FeSiB 層は等方的な磁気特性を示したが、Mo 層のアスペクト比が大きくなるに従って、Mo 層の短冊幅方向に FeSiB 層の磁化容易軸が揃うことが、磁化曲線の測定結果および表面磁区観察結果からも確認された。また熱処理温度の変化に対する Mo 層のアスペクト比の影響を調べたところ、350°C の場合 Mo 層の長さが 4mm 以上で、誘導される磁気異方性の度合いは同じであったが、熱処理温度が低くなるに従い、大きな磁気異方性を得るためにはアスペクト比を大きくする必要があることが確認された。以上の結果より、Mo 層のアスペクト比と熱処理温度の組み合わせで FeSiB 層の誘導磁気異方性を細かく制御可能であ

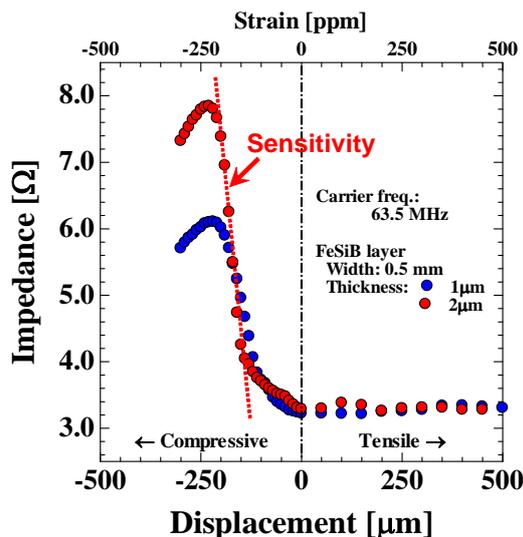


図4 片持ち梁構造の歪センサ素子の歪-インピーダンス変化の測定結果

ることが明らかとなり、熱膨張の差により生じる応力の効果について、定量的な解明の指針を得ることができた。

歪センサの特性評価を行うにあたり、マイクロメータロッドにより印加される変位量 d による歪は以下の式で表される [I. Taher, et al., Sens. Actuators A 45, 35, (1994)].

$$\varepsilon = \frac{3dh(L-x)}{2L^3}$$

ここで ε は素子長手方向の一軸歪、 $h=150\mu\text{m}$ は基板 (カバーガラス) の厚さ、 $L=15\text{mm}$ 、 $x=3\text{mm}$ はそれぞれ固定端から荷重印加点までの距離と測定点までの距離である。測定結果より、いずれの素子においても応力に対する明確な応答であるインピーダンス変化が得られた。中でも幅 0.5mm、厚さ 2μm のアモルファス FeSiB 膜を有するセンサ素子において、63.5MHz において最大の 140% のインピーダンス変化率 (感度換算で 18,000) が得られた。インピーダンス変化の傾きは、160ppm の歪印加付近において最大値をとった。この印加歪量において磁歪膜の持つ異方性エネルギーと同等の磁気弾性エネルギーが印加されたと考えられる。この状態における磁歪膜の持つ磁気弾性エネルギーを見積もったところ、約 $200\text{J}/\text{m}^3$ となった。

素子作製後の磁気 Kerr 効果顕微鏡による磁性膜表面磁区構造の観察結果より、作製したいずれのセンサ素子においても、短冊幅方向に一軸磁気異方性を誘導できていることが確認された。特に極端なアスペクト比の短冊幅方向に、エッジ部分の還流磁区をほとんど形成することなく磁気異方性が誘導されていることは、磁性材特有の反磁界 (形状や寸法によって決まる係数) の影響を考慮すると、導体層から大きな応力を受けていることが予測される。

以上の結果より、歪センサ素子としては非

常に高感度な特性が得られた。一方、磁気異方性の誘導機構については、素子のサイズが変わると誘導される異方性の強弱が変化するなどの結果も得られており、詳細な解明には至っていないが、本研究で試作したセンサ素子および膜構造の範囲においては、定量的な機構が明らかにできたものと考えられる。今後は、素子のサイズに対する磁歪膜の異方性誘導の機構を解明することで、任意方向への異方性付与やその強弱の定量的制御手法について、引き続き検討を行っていく予定である。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 2件)

- ① J. W. Shin, Y. Miwa, S. H. Kim, S. Hashi, K. Ishiyama, Analysis of Thin-Film MI sensor using the Variations in Impedance and the Magnetic Domain Structure, Journal of Applied Physics, 査読有、115巻、2014年、17E507-1-3
DOI:10.1063/1.4863163
- ② J. W. Shin, S. H. Kim, S. Hashi, K. Ishiyama, Dependence of the magnetic anisotropy on the ratio of the thicknesses of the magnetic and conductive layers, Journal of the Korean Physical Society, 査読有、63巻、2013年、676-680
DOI:10.3938/jkps.63.676

[学会発表] (計 6件)

- ① J. W. Shin, Y. Miwa, S. H. Kim, S. Hashi, K. Ishiyama, Analysis of Thin-Film MI sensor using the Variations in Impedance and the Magnetic Domain Structure, 58th Conference on Magnetism and Magnetic Materials, 2013年11月5日、デンバー (アメリカ)
- ② 三輪泰之、北澤巖己、申在原、栢修一郎、石山和志、熱膨張係数差を利用した磁歪膜の磁気異方性誘導に関する検討、第37回日本磁気学会学術講演会、2013年9月3日、札幌
- ③ S. Hashi, Y. Miwa, G. Kitazawa, J. W. Shin, S. Agatsuma, K. Ishiyama, Arbitrary Anisotropy Control of Magnetostrictive Film Using Non Magnetic Laminated Layer, Soft Magnetic Materials 21 Conference, 2013年9月3日、ブタペスト (ハンガリー)
- ④ 申在原、金性勳、栢修一郎、石山和志、サンドイッチ構造薄膜の電気特性、平成25年電気学会全国大会、2013年3月20日、名古屋
- ⑤ S. Hashi, G. Kitazawa, J. W. Shin, K. Ishiyama, Anisotropy control method for

magnetostrictive film considering thermal expansion coefficient and inverse magnetostriction effect, Joint European Magnetic Symposia 2012, 2012年9月10日、パルマ (イタリア)

- ⑥ J. W. Shin, G. Kitazawa, S. H. Kim, S. Hashi, K. Ishiyama, A Basic Study of Magnetic Anisotropy Strength Control Using FeSiB Magnetostrictive Thin Film, 19th International Conference on Magnetism, 2012年7月13日、プサン (韓国)

[図書] (計 0件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0件)

○取得状況 (計 0件)

[その他]

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

栢修一郎 (HASHI, SHUICHIRO)
東北大学・電気通信研究所・准教授
研究者番号：90324285

(2) 研究分担者

石山和志 (ISHIYAMA, KAZUSHI)
東北大学・電気通信研究所・教授
研究者番号：20203036