アモルファス Fe-Co-B スパッタ薄膜の 表面磁気弾性波伝搬特性

Properties of Magnetic Surface-Acoustic Waves in Sputtered Amorphous Fe-Co-B films

上仲浩之・蒔田昭彦・井上光輝*・見山友裕・藤井壽崇

豊橋技術科学大学, 豊橋市天伯町字雲雀ヶ丘 1-1 (〒440)

*大阪府立工業高等専門学校, 寝屋川市幸町 26-12 (〒572)

H. Uenaka, A. Makita, M. Inoue*, T. Miyama, and T. Fujii

Toyohashi Univ. of Technology

1-1, Hibarigaoka, Tempaku-cho, Toyohashi, 440

*Osaka Prefectural Technical College,

26-12, Saiwai-cho, Neyagawa, 572.

The propagation of magnetic surface-acoustic-waves (MSAW) are presented on rf-sputtered amorphous Fe-Co-B films deposited on glass substrates. Piezoelectric transducers employing IDT and Al-doped ZnO films were used for excitation and detection of MSAW. Three dominant waves appear in this configuration—two Lamb type waves of (P+SV)-extensional mode and (P+SV)-flexural mode as well as Love (SH) type waves, among which the SH-type waves were the most intensively excited. MSAW were subjected to change by magnetic annealing in a field applied parallel to the sample width. The controllable change in the sound velocity with field reaches as high as 7.7% at 30 MHz operation in SH-type waves. This value is several hundred times larger than those reported so far. SH-type waves undergo a marked attenuation depending on field. This is interpreted as follows: The MSAW energy is dissipated mostly in the form of micro-eddy current loss in metallic films. The dissipation takes place more distinctly in SH-type waves, because these waves propagate concentratedly in the magnetic conductive overlay.

1. はじめに

表面弾性波 (SAW) は、今日電子固体素子の重要な部分を占め、今後いっそう発展が期待されている分野である。弾性波媒体に磁性体を用いた磁気弾性波の電子素子への適用は、高磁歪アモルファス合金で巨大 ΔE 効果が見いだされて以来大きな関心を呼んだ¹⁾。これは磁界印加で音速を大幅かつ連続的に制御できることを意味し、他の材料では容易に真似のできない魅力ある点といえる。しかし超急冷薄帯の磁気弾性波遅延特性は周波数特性が悪く、電子素子応用に重要な数 MHz 以上のビデオ周波数帯域ではこの材料のもつ優位な特性を失う程悪くなる欠点があった。我々は高周波磁気弾性波固体素子の実現を目的として、高周波スパッタによる高磁歪アモルファス合金の薄膜化を試み、表面磁気弾性波 (MSAW) の基礎的性質を調べてきた。ガラス基板上にスパッタで形成した Fe-Co-B 薄膜で、周波数 30 MHz で駆動した

時の音速可変量が 7.7% という優れた遅延特性をもつ試料が得られた。この値は従来報告されている MSAW 素子のものに比べ 100 倍以上も大きく、薄膜化が高周波磁気弾性波素子の高性能化に有効であることを示している。

2. 素子構成および実験方法

実験に用いた素子構成を Fig. 1 に示す。下地基板には 1.2 mm 厚のスライドガラスを用い、弾性波の励振・検出には、対極数 10 個のくし型電極 (IDT) と反応性スパッタで形成した ZnO 薄膜とを組合せた圧電方式を採った。中心周波数を 10~30 MHz に設計した数種類の IDT を用いた。ZnO 薄膜は横波弾性波の電気機械結合を向上させるため、アルミニウムを添加したものを²⁾。これにより ZnO 上部電導層がなくても十分強い弾性波励振が可能となった (実際、可聴周波のビートは直接耳で聴ける強さである)。両 IDT 間に高周

Fig. 1 Structure of MSAW element.

Fig. 2 Hysteresis curves of Fe-Co-B film.

波スパッタにより磁性層を $15\mu\text{m}$ 厚につけた。磁性層の組成は高磁歪特性³⁾と磁気焼鈍により面内異方性の制御を容易にするため $\text{Fe}_{80-x}\text{Co}_x\text{B}_{20}$ ($x=7\sim 10$) の三元系合金に選んだ。このような層状構造媒体中を伝搬する磁気弾性波は、表面波（もしくは擬似表面波）モードの波であると考えられる。MSAW の伝搬特性は、高周波トーン・バースト波の入出力信号を Fig. 3 に示すように二現象オシロスコープ上で観測することにより、Transit-time と振幅特性を測定した。試料面内にヘルムホルツ・コイルにより 160 Oe までの一様磁界が印加できるようにした。

3. 実験結果と検討

3.1 磁性層の磁気特性

MSAW 特性は、面内異方性の大きさとその容易軸の方位に大きく影響される¹⁾。したがって優れた特性をもつ素子を作製するためには面内異方性の制御が重要となる。Fig. 2 の試料作製時に同時に作った 1 辺 8mm 角の正方形基板の Fe-Co-B 薄膜のヒステリシス曲線 (60 Hz) の一例である。一般に弾性波伝搬方向 $\vec{k}$ とほぼ直角（試料の幅方向）に容易軸をもつ一軸異方性を生じることが分かった。As-deposited の膜では抗磁力 $H_0 \approx 2.0\text{ Oe}$ (図 (a)) であるが、試料幅方向に 1 kOe の磁界中で一時間焼鈍を行うことにより、 300°C で 1.2 Oe、 375°C で 0.9 Oe (図 (b)) まで減少し磁氣的に軟かくなった。この時、容易軸および困難軸方向の両ヒステリシス曲線の差から求めた異方性磁界 H_K は約 10 Oe である。一方試料は $6\text{ mm} \times 40\text{ mm}$ の長方形であるので、形状効果による面内異方性磁界の大きさを楕円体近似で求めると約 35 Oe となる。したがって試料の実効面内異方性磁界は、長手方向を容易軸とする $H_K^{\text{eff}} \approx 25\text{ Oe}$ であると考えられる。

3.2 層状媒体中の MSAW

Fig. 3 は周波数 20 MHz で駆動したときの入出力波

形の観測例であり、図 (a) は磁性層をつける前のもの、一方図 (b) は磁性層をつけた後のものである。前者の出力信号はガラス基板を伝搬する位相速度 3.2 km/s の弾性波であり、理論的な検討から SH 波 (Love 波) の SAW、また後者中の主信号はこの SH 波に対応する MSAW と考えられる^{4), 5)}。磁気飽和時の音速は 2.6 km/s と前者のものより遅くなり、かつ振幅も約 10 分の 1 に減少する。これが MSAW であることは、磁界印加により振幅が大きく変化を受けることから分かる。さらに図 (b) 中には音速が 3.9 km/s と 2.2 km/s の二つの弱い波が観測される。これらは駆動周波数と下地基板厚の対比から、基板を無限の厚さで見做することができないので、有限厚の板状媒体中を伝搬する音波、(P+SV) 波 (Lamb 波) の Extensional mode と Flexural mode の二つの波に対応する MSAW と考えられる^{1), 5)}。

3.3 MSAW の遅延特性

磁界印加による音速の変化は、As-deposited の多くの試料では非常に小さい。ところが前述の熱処理を行うことにより transit-time で音速変化を測定できるようになる。この時、前節の三つの MSAW 中、常に音速変化が観測される波は (P+SV)-Flexural mode の波である。Fig. 4 は 30 MHz で測定した (P+SV)-Flexural mode の波の音速 C のバイアス磁界 H 依存性を示す。図 (a) および (b) はそれぞれ磁界を波の伝搬方向に平行 ($\vec{H} \parallel \vec{k}$) および垂直 ($\vec{H} \perp \vec{k}$) に印加した場合である。

Fig. 3 Input and Output signals of MSAW for before (a) and after (b) deposition of Fe-Co-B film.

Fig. 4 Velocity vs. bias field for Lamb-type waves of (P+SV)-flexural mode.

Fig. 5 Velocity vs. bias field for SH-type waves.

図中点線は隣接して現れる SH 波の強い信号中に吸収されて測定が困難となった部分である。音速可変量 $\Delta C/C_0 = C_s/C_0 - 1$ (ただし C_s : 磁気飽和時の音速, C_0 : $H=0$ における音速) は焼鈍温度 $T_a=150^\circ\text{C}$ では磁界方向に無関係に約 4%, $T_a=200^\circ\text{C}$ では約 5% である。音速変化が顕著に観測できるのは 30 Oe 以上の磁界を印加した時であり, これはこの試料の実効異方性磁界 $H_K^{\text{eff}} \approx 25$ Oe を越えている。(P+SV)-Flexural mode の波の $\Delta C/C_0$ は, 10 MHz で 1.9%, 15 MHz で 2.3%, 20 MHz で 2.8%, 30 MHz で 5% と駆動周波数の上昇とともに増大する。これは井上らの解析結果に符合している⁹⁾。

一方主信号である SH 波の MSAW は 10~20 MHz では顕著な音速変化を観測できなかった。ところが 30 MHz で 200°C で焼鈍した試料で $\vec{H}/\vec{k}$ の場合に対してのみ Fig. 5 に示す大きな音速変化が観測された。この試料の $\Delta C/C_0$ は 7.7% という大きな値であり, かつ音速変化の生じる磁界も 2 Oe 以下と非常に小さい。理論解析⁹⁾によると, SH 波で大きな音速変化を得るための条件は, 波の伝搬方向に磁化容易軸をもち, かつ異方性磁界が小さい (すなわち大きな回転抗磁力をもつ) ことが必要である。この試料には, これらの条件を満たす軟磁気特性が実現されていると推察される。さらに高温で焼鈍することによりいっそうの特性改善が期待されたが, IDT の故障により実験の中断を余儀なくされた。

従来 MSAW の研究はすべて, LiNbO_3 等圧電単結晶板上に磁性層をつけたものを用いて行われた¹⁾。本実験と同じ駆動周波数に対する音速可変量はすべて 0.1% 以下で非常に小さい。音速可変量約 8% という我々の結果は実に 200 倍と非常に大きなものである。MSAW

特性は磁気特性——特に面内異方性——に敏感であり, これを制御して高磁歪と軟磁気特性を両立させることが, 優れた特性をもつ MSAW 素子を作製する必要条件であるといえる。

3.4 MSAW の減衰特性

金属磁性層中を弾性波が伝搬すると micro-eddy current loss のような電磁損失を伴う。これは高周波電子素子として応用する際問題となる。Fig. 6 は 20 MHz の試料で得た SH 波の単位長当たりの振幅減衰特性のバイアス磁界依存性であり, 図 (a) には $\vec{H}/\vec{k}$, 図 (b) には $\vec{H} \perp \vec{k}$ の二つの場合について示した。図から明らかなように磁気焼鈍によって曲線は急峻になる。これは試料が軟磁化されて MSAW の励振がよくなり, したがってそれに付随して電磁損失も増大すると解釈される。事実, SH 波は SAW モードで他のモードのものより磁性層への波の集中度が高く図示のような強い減衰の磁界依存性が表れる。図 (a) および (b) の最大損失を与える磁界は, それぞれ抗磁力 H_c と異方性磁界 H_K に対応しており, 減衰特性が磁性層の磁化過程を反映していることが分かる。これらの一連の損失曲線は Levy ら¹¹⁾ の薄い Ni 膜の MSAW 損失曲線と類似しており, 各バイアス磁界における微分帯磁率と密接な関係があると考えられる。磁気飽和状態ではすべての場合, 約 13 dB/cm の一定の減衰量をとる。ここでは磁化運動は阻止され SH 波の飽和音速 2.8 km/s になる。すなわちこの減衰量は IDT の変換効率を含めた MSAW 素子の挿入損失といえる。このような強い減衰の磁界依存性は, 可変遅延素子のような応用に対しては好ましい特性でないが, 逆に可変減衰器として積極的に利用す

Fig. 6 Field dependence of attenuation constant for SH-type waves.

る可能性を有している。

4. ま と め

層状構造媒体中を伝搬する基本的波動として、SH 波、(P+SV)-Extensional mode および Flexural mode の三種の波が存在するが、磁性表面層中の弾性波——MSAW——でもこれに対応する3種の波が存在することを実験的に確認した。我々が今回用いた素子では SH 波が効率よく励振され、これに比較して他の二つのモードの波の振幅は小さい。従来 MSAW の研究はすべて高価な圧電単結晶基板を用いて行われてきたが、低廉なガラス下地基板を用いても良好な MSAW 特性を実現できることを示した。また磁気焼鈍により磁性層の面内磁気特性を制御して有効磁気弾性結合を大きくすることにより、音速可変量が約8%という大きな値をもつ素子を作製できることを示した。今後最適の特性を得るための組成の選定と熱処理条件の確立および MSAW 特性の下地基板厚への効果などを明確にしてゆく予定である。

文 献

- 1) 概説として T. Fujii *et al.*: Magnetoelastic and Magneto-acoustic Wave Properties in Highly Magnetostrictive Amorphous Materials, Recent Magnetism for Electronics, Chap. 3.1, JARECT Vol. 13 ed. by J. Nishizawa, Ohmsha-North Holland (1984).
- 2) T. Hada, *et al.*: *Thin Solid Films*, **7**, 135 (1971).
- 3) R. C. O' Handley: *Solid State Comm.*, **21**, 1119 (1977).
- 4) M. Inoue, *et al.*: *IEEE Trans. Magn.*, **MAG-20** No. 5, 1406 (1984).
- 5) 井上光輝 他: 大阪府立高専研究紀要, **18**, 47 (昭和 59 年 10 月)
- 6) 井上光輝 他: 日本応用磁気学会誌, 本論文特集号.
- 7) M. Levy, *et al.*: *J. Magn. Magn. Mat.*, **35**, 134 (1983).

1984年 12 月 17 日受理, 1985 年 1 月 16 日採録