高周波電気音響変換子用フェライト膜の 作製とその特性

千葉大学
東京工業大学
東京工業大学
東京工業大学

山口 正 恆
直 江 正 彦
安 田 力
山 中 俊 一

1. ま え が き

弾性波を利用して信号の遅延、光の偏向を行なう素子において、弾性波の伝搬減衰の少ない媒体に電気機械結合係数 k^* の大きな変換子を付着した方式のものが良い結果を与える。変換子としてはもっぱら CdS, ZnO, ZnS が用いられている。これらの圧電体の代わりに磁気ひずみ物質を用いれば、圧電体にはない機能をもつ素子が実現できる⁽¹⁾⁽²⁾。

さきに筆者らは、真空アーク蒸着法により k が 20% 程度の変換子用フェライト膜が作製できることを報告した⁽³⁾。本研究では、この蒸着法と直流二極スパッタリング法によって得られる厚さ 30~40 μ のフェライト膜が、それぞれどのような特長を持つか、また実際に変換子として使用できるか否かを調べることを目的とした。

まず、それらの組成、構造や一般的磁性を調べた。その結果、組成、飽和磁化、密度、ヤング率は満足できる値であったが、粒子が細かく、基板から受ける応力が非常に大きいため初磁化率や磁気ひずみが同組成のバルクに比べて小さくなった。その傾向はスパッタ膜のほうにはっきり現われ、 k は 4% にしかならな

かった。蒸着膜は引張力を受けていて粒界の凹みが大きく、磁化ベクトルが膜面に垂直方向に整列しており、一方、スパッタ膜は圧縮力を受けており、表面は平滑で磁化ベクトルは膜面内方向に整列していることがわかった。したがって、蒸着膜は横波用変換子として、スパッタ膜は弾性表面波（以下、表面波と記す）用変換子として適当なことがわかった。サファイア角棒の一方の端面に膜を直接蒸着し、他の端面に水晶変換子を In で圧着した 50MHz 横波遅延線を作製した。フェライト膜は 50MHz の横波を励起・検出し、水晶変換子よりも得られる帯域幅や再現性にすぐれていた。また、アルミナ板上のスパッタ膜の表面に一對の折り返し導線を形成して表面波遅延線を作製した。10.8MHz の表面波の励起・検出が可能で k^2 は水晶の 2 倍にも達した。したがって、蒸着膜もスパッタ膜もそれぞれ特長を持ち、高周波超音波用変換子として実用上かなりの可能性をもつものと思われた。

2. フェライト膜の作製

HF~VHF 帯用の電気音響変換子として適当な膜厚は 10~100 μ であるから、第 1 表に掲げたような条件の真空アーク蒸着法または直流二極スパッタリング法によって、焼結アルミナ基板およびサファイア板上に 30~40 μ のフェライト膜を形成した。望みの膜組成としては、菊池氏らによって実用磁気ひずみ振動子とし

Preparation and Characteristics of Ferrite Films for VHF Electromechanical Transducers. By M. YAMAGUCHI, Non-member (Faculty of Engineering, Chiba University), M. NAOE, Member, T. YASUDA, Member & S. YAMANAKA, Member (Faculty of Engineering, Tokyo Institute of Technology)

山口正恆：千葉大学工学部電気工学科助手

直江正彦：正員，東京工業大学工学部電気工学科助手

安田 力：正員，東京工業大学工学部電子物理工学科教授

山中俊一：正員，東京工業大学工学部電気工学科教授

*：変換子の電気機械変換の能力を表わす量で、変換器に与えた電気入力 U_i のうち、機械的出力に変換される量を U_m とすると、 $k = \sqrt{U_m/U_i}$ で定義される。磁気ひずみ遅延線などのその入損失は k^2 に比例する。

て開発された $\text{Ni}_{0.837}\text{Cu}_{0.148}\text{Co}_{0.015}\text{Fe}_{2.000}\text{O}_4$ を一応の目標にした⁽⁴⁾。なお、膜と構造や性質などの比較用に以下で Kikuchi-II バルクあるいは単にバルクと記述した試料はこの組成をもち、空气中 1,350°C、4 時間焼成、冷却速度 300°C/h のフェライト焼結体である。

蒸着法では蒸発源と得られる膜ではある程度組成ずれが生ずるが、金属濃度比の調整が十分可能であり、蒸発源を第 2 表に示すような混合比に選べばほぼ Kikuchi-II バルクに近い金属濃度比をもつ膜が得られる。他方、スパッタリング法ではあまり組成ずれがないといわれてきたので Kikuchi-II バルクをターゲットとして用いたところ、Fe 濃度が 5% 減少し、他金属の濃度がやや増加した膜が得られた。しかし、この程度の組成ずれは Ni-Cu-Co 系フェライトの電気機械結合係数 k を決定的に減少させるほどのものではないから、組成制御のための特別な工夫は行なわなかった。

蒸着の場合、アークプラズマからの熱放射により、スパッタの場合多数の高速電子の衝突により、基板がそれぞれ 350°C と 500°C に加熱されるので、いずれの膜の X 線回折ダイアグラムもバルクと同様なスピネル形構造で、しかも単相のピークを示した。しかし、蒸着膜は第 1 図(b)のメスバウア吸収スペクトルが示すように、X 線回折ダイアグラム上では現れない微結晶の非磁性相が大半を含み、金属全量と酸素の比 Me/O が 1.05 にも達していた。なお、典型的なスピネル形フェライトにおける Me/O の化学量論値は 0.75 であるから、蒸着したままの膜はかなり還元されているわけである。また、スパッタ膜は第 1 図(c)のよう

第 1 表 膜と作製条件

Table 1. Film preparation.

	アーク蒸着	スパッタリング
真空槽内圧力 (Torr)	5×10^{-4} (4.8×10^{-3})	7×10^{-2} (1.5×10^{-2})
電極間電圧 (V)	20~25	3.5×10^3
電流 (A)	14	40×10^{-3}
基板温度 (°C)	350	500
膜付着速度 (μ/h)	25	0.35

第 2 表 出発材料と膜の組成

Table 2. The compositions of the starting bulk and the deposited films.

	アーク蒸着	スパッタリング
出発材料	$(\text{NiO})_{0.881}(\text{CuO})_{0.10}(\text{CoO})_{0.02} \text{ o } \text{Fe}_2\text{O}_3)_{0.89}$	$\text{Ni}_{0.887}\text{Cu}_{0.148}\text{Co}_{0.022}\text{Fe}_2\text{O}_4$
付着したままの膜	$\text{Ni}_{0.818}\text{Cu}_{0.125}\text{Co}_{0.024}\text{Fe}_{2.026}\text{O}_{2.86}$	$\text{Ni}_{0.912}\text{Cu}_{0.165}\text{Co}_{0.023}\text{Fe}_{1.960}\text{O}_{3.688}$
熱処理膜	$\text{Ni}_{0.818}\text{Cu}_{0.125}\text{Co}_{0.024}\text{Fe}_{2.026}\text{O}_{4.20}$	$\text{Ni}_{0.912}\text{Cu}_{0.165}\text{Co}_{0.023}\text{Fe}_{1.960}\text{O}_{4.060}$

(a) Kikuchi-II バルク

(b) 蒸着膜

速度 v (cm/s)

(c) スパッタ膜

第 1 図 Kikuchi-II バルクと未処理膜のメスバウア吸収スペクトル

Fig. 1. Mössbauer absorption spectra of the sintered bulk and as-deposited films; Kikuchi-II bulk (a), the evaporated film (b) and the sputtered film (c).

にメスバウア吸収スペクトルもはっきりした磁気分裂ピークのみを示すが、結晶粒子が 100 Å 程度の大きさしかなく、 Me/O も 0.78 とやや還元していた。そのためいずれの膜も付着したままでは磁性がよくないので、大気中いろいろな温度で熱処理を行なって特性向上を試みた。その結果、1,250°C、4 時間の処理が最適条件で膜を損傷することなく Me/O をほぼ化学量論値にし、結晶粒子を 700~1,200 Å に増大し、非磁性相をほとんどなくすることがわかった。

第2図 熱処理による膜の湾曲

Fig. 2. The bent film samples by heat treatment; the evaporated film (a) and the sputtered film (b).

蒸着膜はかなりの気孔を含んだ状態で付着されるので、熱処理により焼結が進むと収縮し、柔らかいアルミナ基板もともと第2図(a)に示すように膜面を内側に湾曲してしまう。一方、スパッタ膜は付着したままでも緻密であり、熱処理によってさらに酸素が入り込むと膨張するため、第2図(b)に示すように膜面を外側に湾曲する。剛いサファイア板上ではクラックを生じたり、はくりしたりすることもある。このようなことが起こらないように、熱処理の際の加熱および冷却速度を $30^{\circ}\text{C}/\text{h}$ 以下に抑えた。しかし、いくらその速度を低くして見かけ上平滑な膜にしても蒸着膜は引張られ、スパッタ膜は圧縮されており、それらの応力は非常に大きなものと思われる。

以下の試料はすべて上述の条件で作製し熱処理を行ったものである。

3. 膜の構造

磁気ひずみ振動特性は微細構造と密接な関係をもつので、体積と重量から見かけの密度 ρ_a を求め、X線密度 ρ_x と比較して気孔率 $p(=1-\rho_a/\rho_x)$ を計算した。さらに膜と基板の屈曲振動について測定した値からヤング率 E 、BET 法により測定した比表面積から凝集粒子の平均寸法⁽⁵⁾および表面粗さ計に現われる波形から粒界の最大凹み D を求めた。第3表に得られた結果を Kikuchi-II バルクのものとともに示す。スパッタ膜は圧縮力により緻密になっている (p が小さい) ので E がバルクのそれよりも大きい。このことは電気機械結合係数 k の増大に有利で、しかも弾性波の伝搬損失を少なくする。さらにスパッタ膜は表面が平滑でホトエッチング法によって完全な折り返し導線を形成できるほどであった。一方、蒸着膜は引張力のため粒界の一部がかなり凹み膜面がやや粗くなってしまった。さらに、このことは p を大きくし、 E を小さくするので k の低下と伝搬損失の増大をまねく。

X線回折による結晶構造解析とメスバウア吸収スペ

第3表 膜の見かけの構造

Table 3. The apparent structure of the films.

	蒸着膜	スパッタ膜	Kikuchi-II バルク
見かけの密度 ρ_a (g/cm^3)	4.95	5.29	5.24
X線密度 ρ_x (g/cm^3)	5.382	5.368	5.377
気孔率 p (%)	7.6	1.2	2.6
ヤング率 $E \times 10^{-12}$ (dyn/cm^2)	1.36	1.96	1.61
二次粒子寸法 d (μ)	2.5	1.1	13~16
最大粒界凹み D (μ)	9.3	1.1	0.4*

*: ダイヤモンドペーストで研摩

クトルの観測の結果、膜はスピネル形で単相の粒子からなっていることが確かめられたが、回折ピークの半値幅から算定した結晶粒子の寸法は蒸着膜では $1,200 \text{ \AA}$ 、スパッタ膜ではわずか $700 \text{ \AA}$ であった。なお、バルクのそれは 1μ 以上である。格子定数はバルクに比べて蒸着膜では1%程度大きく、スパッタ膜では0.4%程度小さくなったが、前述の膜中に潜在する大応力のためと考えられる。その証拠に、これらの膜を基板からはがして測定すると両方ともその差が付着状態の場合の1/4程度に減少した。また、蒸着膜は明らかに結晶粒子の(100)面が膜面と平行になる傾向があったが、スパッタ膜では何の結晶配向も認められなかった。

4. 磁化ベクトルの配向性

Kikuchi-II バルクのような負の磁気ひずみを示すNi系フェライトに外部から測定方向と一致した一軸性の応力を加えると、第3図に示すように磁化ベクトルは、引張力に対してはそれと直角に、圧縮力に対してはそれと平行に配向し、大きな応力のもとではいずれの場合にも特定の方向にほぼ整列状態に拘束される⁽⁶⁾。膜は第2図で示したように相当大きな応力を受けているので、応力を受けていない場合に比べて磁化ベクトルがかなり整列した状態にあると思われた。この状態を ^{57}Co の γ 線に対する膜中の ^{57}Fe のメスバウア吸収スペクトルを観測して調べた。

膜面に垂直に γ 線を照射したときに観測される吸収線 $F_1 \sim F_6$ の相対強度比と磁化ベクトルの配向性の間には第4図に示すような関係がある⁽⁷⁾。すなわち、磁化ベクトルの向きが γ 線に対して無秩序な場合 $F_1 : F_2 : F_3 : F_4 : F_5 : F_6 = 3 : 2 : 1 : (1 : 1 : 2 : 3)$ となる[第4図(a)]。また磁化ベクトルが膜面に平行 (γ 線に垂直) に整列していれば $F_1 : F_2 : F_3 = 3 : 4 : 1$ となり[第4図(b)]、膜面に垂直 (γ 線に平行) に整列していれば $F_1 : F_2 : F_3 = 3 : 0 : 1$ となる[第4図(c)]。

第1図(a)および(c)で見られるように、バルクお

第3図 負の磁気ひずみをもつ物質に一軸性応力を加えた場合の磁化ベクトルの配向(文献6より)

Fig. 3. Orientation of the magnetization vector in a material with negative magnetostriction; subjected to a uniaxial tensile stress (a) and a uniaxial compressive stress (b) (Reference 6).

第4図 メスbauer吸収スペクトルと磁化ベクトルの配向性の関係(文献7より)

Fig. 4. Orientation of the magnetization vector and its Mössbauer absorption spectrum (Reference 7).

よびスパッタしたままの膜のスペクトルにおける吸収ピークの面積比は第4図(a)の吸収比にほぼ一致し、磁化ベクトルが無秩序で特別な配向性を持たないことを示している。しかし、熱処理したスパッタ膜のスペクトルは第5図(a)のようになり、吸収比は $F_1:F_2:F_3=3:3.3:1.0$ となり、第4図(b)の吸収比に近い。すなわち、 F_2 と F_5 の吸収ピークが大きくなる。

第5図 1,250°Cで熱処理をした膜のメスbauer吸収スペクトル

Fig. 5. Mössbauer absorption spectra of the films heated at 1,250°C; the sputtered film (a) and the evaporated film (b).

なっていることから、磁化ベクトルは膜面と平行に配向していることがわかる。他方、蒸着膜は第5図(b)に示すように $F_1:F_2:F_3=3:1.6:1.0$ となり、第4図(c)の吸収比に近い。すなわち、 F_2 と F_5 の吸収ピークが小さくなっていることから、磁化ベクトルが膜面と垂直に配向していることがわかる。 F_2 および F_5 の変化量がスパッタ膜の65%に比べて蒸着膜では20%と少ないのは、膜の形状異方性効果に加えて結晶粒子の配向が磁化ベクトルを膜面と垂直方向に整列にくくしたためである。すなわち、蒸着膜中の結晶粒子の(100)面が膜面と平行になっているため、それらの結晶上の磁化容易軸である $\langle 111 \rangle$ が膜面に対して約 35° をなす斜め方向になるからである。また粒界が凹んで広がり、粒子にかかる引張力を緩和していることも原因として考えられる。

また、膜中の粒子が小さいため粒界の占める割合はバルクに比べて多いので、非磁性相の存在が k に悪い影響を与えるのではないかと心配されたが、いずれの熱処理膜でも吸収スペクトル上では蒸着したままの膜

に見られるような $\nu=0$ 付近での非磁性相ピークは認められなかった。

5. 磁気的性質

第4表に膜と Kikuchi-II バルクの一般的磁性の測定値と、それより求めた電気機械結合係数 k の計算値を示す。ここで、 σ_s は 12,000 Oe の静磁界を印加し磁気天秤によって測定した 1g あたりの飽和磁化、 H_c は 10kHz の B - H カーブトレサ上のヒステリシスループから読みとった保磁力、 χ_0 は 455kHz における初磁化率、そして λ_{3000} はストレインゲージの精度保証限界に相当する 3,000 Oe の静磁界を印加したときのひずみ $\Delta l/l$ である。これらは特に断わらない限り膜面内方向に測定された値である。

膜の σ_s はバルクのそれとほぼ一致している。バルクはもちろん膜でも非磁性相はほとんどなく、たとえあったとしても σ_s の測定誤差程度しか含まれていないから、 σ_s のわずかの違いは組成ずれによるものであろう。というのは、スピネル形構造の A, B 両位置に対する膜中の金属イオンの分布状態がバルクと同様であると見なし、第2表の組成に基づいて σ_s を計算すれば実測値と一致するからである。しかし、 H_c は膜のほうがバルクより1けた大きく、 χ_0 は蒸着膜ではバルクの約 1/2、スパッタ膜では 1/5~1/6 と小さな値であった。これは膜中の粒子が小さいことが主因であるが、内部応力による磁化ベクトルの拘束もかなり影響を及ぼしていると思われる。

次に静磁気ひずみ $\Delta l/l$ の静磁界 H_{DC} 依存性を調べた。その結果を第6図に示す。蒸着膜では 3,000 Oe 程度の磁界ではまだ飽和しておらず、もっと大きな磁界が印加されれば、バルクと同程度の飽和磁気ひずみ λ を示すものと思われる。一方、スパッタ膜ではバルクよりも小さな磁界で飽和してしまうが、 -10×10^{-6} の λ しか示さない。磁気ひずみの機構が磁化ベクトルの回転に帰因するものであることを考えると、この結果も膜中に潜在する応力によって一応説明できる。

静磁気ひずみ特性、 M - H 特性、可逆磁化率 χ_r お

第4表 磁性および磁気ひずみ特性

Table 4. Magnetic properties and magnetostrictive characteristics.

	蒸着膜	スパッタ膜	Kikuchi-II バルク
飽和磁化 σ_s (G $\cdot$ cm ³ /g)	49.8	48.4	49.2
保磁力 H_c (Oe)	22	25	2.1
初磁化率 χ_0	1.45	0.52	2.88
静磁気ひずみ $-\lambda_{3000} \times 10^6$	22	10	26
電気機械結合係数 k (%)	20	4	27

第6図 静磁気ひずみ特性

Fig. 6. The static magnetostriction characteristics.

よびヤング率 E の実測値と $k = \sqrt{\chi_r/E} \cdot \partial(\Delta l/l)/\partial M$ の式に従い k を推定したところ、100kHz~1MHz の周波数領域に対して蒸着膜ではバルクの 27% に匹敵する 20% となり、スパッタ膜では 4% となった。

磁気ひずみ振動の最適バイアス磁界を求めるため、第7図に示すように χ_r のバイアス磁界 H_B 依存性を調べた。 H_B は膜面垂直方向（このときの H_B を $H_{B\perp}$ とする）と膜面内の χ_r 測定方向（このときの H_B を $H_{B\parallel}$ とする）のうちのいずれかに印加されている。蒸着膜の場合 $H_{B\parallel}$ 印加では、 k 最大のための磁界 $H_{Bk\parallel}$ に相当する 80 Oe 付近で χ_r は $H_B=0$ のその 65% となっている。さらに $H_{B\perp}$ 印加のもとでの k に対しても、 χ_r が $H_B=0$ のその 65% になる $H_{B\perp}$ を最適値と考えれば、第7図からそのときの磁界 $H_{Bk\perp}$ はおよそ 1kOe と推定される。同様にスパッタ膜については $H_{Bk\parallel}=180$ Oe、 $H_{Bk\perp}=1.3$ kOe となる。一方、バルクでは $H_{Bk\parallel}=15$ Oe であった。膜の場合 $H_{Bk\parallel}$ が大きくなるのは、膜中の潜在応力、微粒子性および結晶粒子配向などによる磁化ベクトルの拘束力が大きいためであろう。

なお、これらの磁気的性質は基板としてサファイアを用いた場合にもあまり大きな差はなかった。これはアルミナとサファイアの機械的性質が似ており、膜が受ける応力にあまり差がなかったためと思われる。

6. 蒸着膜による 50 MHz 横波弾性波の励起・検出

<6・1> 横波遅延線の作製 遅延媒体として弾性波の伝搬損失が少なく、膜を付着した後、高温の熱処理を行っても変質しないサファイアを選んだ。サフ

第 7 図 バイアス磁界による可逆磁化率の変化

Fig. 7. The change in the reversible susceptibility as a function of the bias field.

ファイバークから端面が $1 \times 1 \text{ cm}^2$ 、長さ 5.5 cm の角棒を切り出し、一方の端面におよそ 30μ の厚さの膜を付着してから大気中 $1,250^\circ\text{C}$ で 4 時間熱処理を行った。普通、バルク振動子を焼結する場合に、少しでも電気機械結合係数を大きくするために急冷しているが、膜の場合は急冷するとクラックを生じたり、一部はくりしたりするので、できるだけたみが少なく付着力の強い膜を得るために、加熱速度を 72°C/h 、冷却速度を 30°C/h 以下に抑え、温度昇降や維持の際には急変動がないように細心の注意をはらった。

このようにして得られた膜がバルクと同じ程度のポアソン比 $\sigma = 0.2 \sim 0.21$ と見なし、第 3 表で示した E 、 ρ_a の値を用いて計算したところ、厚さ 30μ の膜の共振周波数はおよそ 50 MHz であろうと推定された。そこでサファイア角棒の他の端面を光学研磨して、検出用の 50 MHz 横波水晶変換子を In で圧着⁽⁸⁾して遅延線を作製した。

〈6・2〉 50 MHz 横波弾性波の励起・検出 膜面に垂直の Z 方向 (横波伝搬方向) にバイアス磁界 H_B を、それと直角の関係にある膜内面に交番磁界 H_{AC} を印加して横波の励起を試みた。実験は第 8 図に構成線図で示すような遅延線と、横波駆動・検出回路により行なった。ここで H_{AC} の印加には高透磁率フェライトヨークを用いて閉磁路を形成し、できるだけ磁束漏れを少なくした。 H_B の印加は大きな電磁石の両極間に遅延線を置いて最適のバイアス磁界強度で行なうこともできるが、実用的ではないので、ここでは Ba フェライト磁石小片による方法を用いた。しかし、膜面上での実測磁界は 700 Oe にしかならなかった。第 5 章で述べたように、電気機械結合係数 k を最大にする膜面垂直方向バイアス磁界 $H_{B\perp}$ はおよそ 1 kOe であるから、この方法による $H_{B\perp}$ はかなり不足していた。

まず膜を 50 MHz、100 V_{p-p} の AC パルスで駆動し、励起された横波を水晶変換子で検出し、約 20 dB 増幅後検波してオシロスコープで観測した。次に送波

第 8 図 横波遅延線と駆動・検出回路の構成線図

Fig. 8. The system for generating and detecting shear waves.

(a) 蒸着膜で励起 (b) 蒸着膜で検出

第 9 図 50 MHz 横波遅延パルス群

Fig. 9. Delayed pulse train of 50 MHz shear waves; generated by the evaporated film (a) and detected by the evaporated film (b).

器と受波器を入れ換えて水晶変換子を駆動し、膜の出力を観測した。第 9 図は観測した遅延パルス群を示す。第 9 図で入力パルスから第 1 出力パルスは $8.5 \mu\text{s}$ 、2 回反射の第 2 出力パルスは $25.5 \mu\text{s}$ 、4 回反射の第 3 出力パルスは $42.5 \mu\text{s}$ 遅れて観測されている。伝搬距離と遅延時間から算出されるサファイア内の横波速度は $6.45 \times 10^5 \text{ cm/s}$ であり、これは水晶変換子によるパルス反射法による実測値と一致している。

次に Ba フェライトを取り去って外部からの H_B を零にすると、オシロスコープ上では遅延パルス群は観測できなかった。これは蒸着膜の場合、第 4 章で述べたように潜在引張力による磁化ベクトルの膜面垂直配

向が不十分で、バイアス磁界の助けなしでは観測可能なほど強い横波を励起することができなかったものと思われる。

さらに、スパッタ膜によって上述の実験を行なったが、その出力は蒸着膜の場合より 20 dB 程度小さかった。これはスパッタ膜の電気機械結合係数が蒸着膜の 1/5 しかなく、その磁化ベクトルが膜面内方向に強く拘束されているためであろう。

7. スパッタ膜による 10.8 MHz 表面波の励起・検出

〈7・1〉 表面波遅延線の作製 アルミナ板とサファイア板上で第 10 図に示すような形状で厚さが 40μ のフェライト膜を作製した。第 10 図(a)では変換子部分と表面波伝搬路に膜を一様に付着し (Type-A)、第 10 図(b)では変換子部分のみに膜を付着 (Type-B) している。薄膜変換子として Type-B のものはあまり見られないが、膜厚が表面波の波長に比べて十分薄ければ、膜と表面波伝搬路との間の不連続性はあまり問題にならないから、実用上は Type-B の構造が優れていると思われる。表面波はそのエネルギーが表面付近に集中しているので、変換子の膜厚は波長よりずっと少なくてもよく、1/10 あたりで見かけの電気機械結合係数が極大となる⁽⁹⁾。したがって、この厚さ 40μ 膜には波長 400μ の表面波の励起・検出を行なわせるのが適当である。膜表面の変換子部分にできるだけ直流抵抗を少なくするために、 $5\sim 10\mu$ の厚さになるまで多量の Cu を蒸着し、ホットエッチング法によって 1 周期 (表面波の波長) 400μ 、周期数 8、導線幅と間隔の比が 1:1 の折り返し導線を一对形成し、励起および検出用の電極とした⁽¹⁰⁾。スパッタ膜上で形成された折り返し導線は全直流抵抗が 10Ω 程度でほぼ完全なものであったが、蒸着膜のほうは粒界の凹みが大きすぎるためホットエッチングの工程で断線してしまい、この実験は行なえなかった。

第 10 図 本研究における表面波遅延線
Fig. 10. The elastic surface wave delay lines used in this work.

〈7・2〉 10.8 MHz 表面波の励起・検出 第 11 図は実験の構成線図である。表面波の伝搬方向と平行 (第 11 図の x 方向) にバイアス磁界 H_B を印加する場合、電気機械結合係数 k を最大にする磁界 $H_{B_{k=1}}$ は第 5 章で 180 Oe 程度と推定されたが、広い範囲での変換特性の H_B 依存性を知るために大形電磁石で H_B を最大 3 kOe まで印加した。駆動・検出の方法は通常行なわれている AC パルス法によった。

第 12 図(a)は Type-A 試料に $H_B=200$ Oe と、一方の導線に 10.8 MHz の AC パルスを印加し、表面波を励起した場合の他方の導線によって検出されたパルス群を示す。主出力パルス以外のパルスは両端から反射された表面波によるものであり、これらは両端に音波吸収体を塗布することによって第 12 図(b)のように吸収される。また、両導線間のフェライト膜上にアルコールを滴下すれば、遅延パルス群はオシロスコープ上で見えなくなり、アルコールが蒸発するにつれて再び現われるから、それらが表面波によるものであることは確実である。中心周波数 $f_0=10.8$ MHz と $\lambda=400\mu$ から算出される表面波の伝搬速度は $v_s \approx 4.3 \times 10^5$ cm/s となり、これと伝搬距離から算出される遅延時間は実測値とほぼ一致する。

受電端開放伝達インピーダンスは

$$|Z_r| = 2f_0 L_0 k_s^2 \tan^2 \theta / 4 \times \sin^2 N \theta / 2$$

の関係式で表わされる。ただし、 f_0 : 中心周波数、 L_0 : 折り返し導線 1 周期のインダクタンス、 k_s : 表面波に対する電気機械結合係数、 N : 折り返し導線の周期数、 $\theta=2\pi f/f_0$ である⁽¹¹⁾。この式を用いれば変換能率のだいたいの目安を得ることができる。ここで、それぞれの実測値を代入して得られる $|Z_r|$ は約 0.25Ω であった。比較のため同様の折り返し導線を Kikuchi-II パルク上に形成した場合 $f_0=8$ MHz での $|Z_r|$

第 11 図 表面波遅延線と駆動・検出回路の構成線図

Fig. 11. The system for generating and detecting elastic surface waves.

第 12 図 10.8MHz 表面波遅延パルス群

Fig. 12. Delayed pulse train of 10.8MHz elastic surface waves; main output and reflected wave ones (a) and only main output (sound absorber at both ends) (b).

は $0.1 \sim 0.2 \Omega$ であった。伝搬損失を考慮すると $|Z_T| = 0.25 \sim 0.3 \Omega$ である。また $k^2 = 0.33 \sim 0.36\%$ と算定され、 YX 水晶のその 2 倍であった⁽¹²⁾。

なお、Type-B 試料についても上述の実験を行なったが、まだ表面波の励起・検出はできていない。この原因は不明であるが、膜のサファイア板への附着性、膜と表面波伝搬路との不連続性が障害となっているかもしれないので、目下、その方面から検討している。

〈7・3〉 バイアス磁界依存性 第 13 図は主出力パルス電圧 V_0 の H_B 依存性を示す。 $V_0(\propto k^2)$ が最大になる $H_{Bk11} = 200 \text{ Oe}$ は第 5 章で推定された値 180 Oe とほぼ一致している。また $H_B = 0$ としても H_{Bk11} を印加したときの 90% の出力が得られるが、これはスパッタ膜中の磁化ベクトルが膜面に整列しているためと思われる。このことは素子の簡単化に有利であるが、一方では k が小さくなるという不利な点もある。すなわち、組成が Kikuchi-II バルクに近い材料は結晶磁気異方性が小さいので、内部応力が異方性エネルギーの支配的要因となるから⁽¹³⁾、この場合かなりの k 減少は避けられない。

8. あとがき

本研究において、まず真空アーク蒸着法と直流二極スパッタリング法によって厚さ $30 \sim 40 \mu$ のフェライト膜を作製し、組成、構造および性質を調べた。

次にサファイア角棒を遅延媒体とし、その一方の端面に直接フェライト膜を形成し、対向端面に 50MHz の水晶変換子を In 圧着した遅延線を作製し、フェライト膜によって横波弾性波を励起・検出できることを確認した。蒸着膜のほうが磁化ベクトルが膜面垂直に配向し、 k が大きいのでスパッタ膜より 20dB 程度大きい出力を与えた。またアルミナ板へフェライト膜を付着し、さらにその上へ一對の折り返し導線を形成した。この遅延線において 10.8MHz の表面波の励起・

第 13 図 バイアス磁界による出力電圧の変化

Fig. 13. The change in output voltage as a function of the bias field.

検出はスパッタ膜の場合のみ可能であった。これはスパッタ膜の表面が十分滑らかなのに対して蒸着膜は粒界の凹みが大きすぎ、導線が切断したためであった。磁化ベクトルが強く膜面内方向に整列しているため、バイアス磁界がなくても最大値の 90% の出力が得られ、実用材料である水晶の 2 倍にも達する変換効率が得られた。しかし、この大圧縮力がなければもっと大きな出力が得られるはずである。

以上のようにフェライト膜は、将来、高周波の電気音響変換子として有望であることがわかったので、今後、大きな内部応力を除去するための作製上のくふうや、より高い周波数帯での実験を行なう。

終わりに、実験の一部を担当された高山 了君（現在、富士写真フィルム株式会社）に謝意を表する。（昭和 48 年 12 月 11 日受付、同 49 年 3 月 8 日再受付）

文 献

- (1) 堤：第 9 回東北大通研シンポジウム論文集 II-6 (昭 47-5)
- (2) 清水・中鉢：同上 I-3 (昭 47-5)
- (3) 直江・山口・安田・山中：電学誌 91, 139 (昭 46-1)
- (4) 菊池：音響学誌 13, 328 (昭 32-4)
- (5) 久保，他：粉体の理論と応用 315 (昭 39) 丸善
- (6) J. Smit & H. P. J. Wijn: Ferrites, Philips Tech. Library 262 (1959)
- (7) 近角編：強磁性体の進歩 184 (昭 39) アグネ
- (8) 菊池：信学誌 48, 1793 (昭 40-11)
- (9) 箕輪・山之内・柴山：信学論 54A, 315 (昭 46-6)
- (10) F. W. Voltmer, et al.: Appl. Phys. Letters 15, 153 (1969)
- (11) 稲村・山口・安田：音響学会講演論文集 143 (昭 47-5)
- (12) 浅川：信学誌 55, 67 (昭 47-1)
- (13) 七條・佐藤：フェライト 28 (昭 34) 日刊工業新聞社