温度による共鳴周波数の変動が極めて小さな 静磁波素子用 YIG 薄膜

正員 丹野雅行 (信越化学工業㈱)
非会員 流王俊彦 (信越化学工業㈱)
正員 中澤光男 (信州大学)

YIG Film for a Magnetostatic Wave (MSW) Device with
a Ultra-small Frequency Drift
Masayuki Tanno, Member (Shin-Etsu Chemical Co., Ltd.)
Toshihiko Ryuo, Non-member (Shin-Etsu Chemical Co., Ltd.)
Mitsuo Nakazawa, Member (Shinshu University)

A planar-type magnetostatic wave (MSW) device made from a YIG film having a weak frequency-temperature characteristics has a large possibility to be a counterpart of a YIG sphere device such as a microwave tunable oscillator. This paper aims at realizing such a temperature compensated YIG film. We searched film compositions both theoretically and experimentally. It was found that a $\text{Bi}_{0.15}\text{Y}_{2.85}\text{Fe}_{4.34}\text{Ga}_{0.66}\text{O}_{12}$ film grown on a (111) GGG substrate with growth induced anisotropy constant (K_u^*) of $1.4 \times 10^3 \text{ J/m}^3$, $4\pi \text{ Ms}$ of $0.73 \times 79.6 \text{ kA/m}$, and ΔH of $1.5 \times 79.6 \text{ A/m}$ at 9.2 GHz shows an extremely small change of vertical resonance field versus temperature. That is within $3 \times 79.6 \text{ A/m}$ between -33°C and 72°C at a constant frequency of 9.2 GHz. An MSW resonator made from the Bi, Ga substituted YIG film also shows a high Q of 2,000 at 3 GHz and a weak frequency change within 10 MHz between 7°C and 74°C . The frequency drift versus temperature of the MSW resonator is less than that of a YIG sphere oscillator. Consequently, it is predicted that an MSW device made from the present material will replace the YIG sphere device.

キーワード: YIG 薄膜, 静磁波素子, 温度特性, YIG 球, 成長誘導磁気異方性

1. まえがき

YIG 球を用いた発振器は、スペクトラムアナライザの局部発振器等に広く用いられている。共鳴周波数の温度変化を YIG 球より小さくする事により YIG 薄膜を用いたプレーナ型の静磁波素子 (MSW デバイス)^[1] は、YIG 球デバイスの代わりに用いられる可能性がある。本論文では、そのような共鳴周波数の温度変化が小さい YIG 薄膜を実現することを目的とする。

過去に、YIG 薄膜の温度特性を改善する検討が行われている^[2-5]。H. L. Glass らは (111) 方位の GGG 基板上に作製した $\text{La}_{0.66}\text{Y}_{2.94}\text{Fe}_{4.13}\text{Ga}_{0.87}\text{O}_{12}$ ($4\pi \text{ Ms} = 410 \times 79.6 \text{ (A/m)}$) エピタキシャル薄膜に垂直方向から磁場を印可する場合の磁気共鳴 (以下、垂直共鳴と記す) スペクトルを測定した結果、共鳴磁界の温度変化が室温付近で小さくなることを述べた^[2]。これは、エピタキシャル薄膜の結晶の一次の異方性磁界及び、エピタキシャル薄膜と基板結晶

との格子定数不整合による応力のために発生する異方性磁界 (以下、応力誘起異方性磁界と記す) と飽和磁化の温度変化が互いに相殺して起こるとしている。

一方、P. Röshmann らは文献[2]の材料では基板とエピタキシャル薄膜の格子定数の差があり、これが共鳴特性を劣化させることを指摘した。そして、基板として Al 置換 GGG (格子定数 $12.363 \text{ \AA}$) を用い格子定数の不整合が無い $\text{Y}_3\text{Fe}_{4.07}\text{Ga}_{0.93}\text{O}_{12}$ ($4\pi \text{ Ms} = 380 \times 79.6 \text{ (A/m)}$) を作製した^[3]。しかし、これらの材料は温度が $-20^\circ \text{C} \sim 80^\circ \text{C}$ と変動すると約 50 MHz 程度共鳴周波数が変動するため、市販の YIG 球発振器の発振周波数の温度による変動 (約 $20 \sim 40 \text{ MHz}$)^[6, 7] と比較して大きい。また、筆者ら (流王、丹野) は、前記材料と同様な温度補償効果を示す Y 置換 GGG 基板上に作製した LaGa 置換 YIG 薄膜の $4\pi \text{ Ms}$ が、 $500 \times 79.6 \text{ (A/m)}$ 以下となると、磁気共鳴半値幅 (ΔH) が急激に劣化する事を報告した^[5]。以上から、従来の材料は温度補償の程度が不十分であり、 ΔH が大き

という問題を有している。

本論文では ΔH を劣化させずにYIG球と同程度に共鳴周波数の温度による変動が小さいYIG薄膜材料を実現する事を目的とし成長誘導異方性磁界、結晶の異方性磁界、飽和磁化の温度依存性が相殺するようなエピタキシャル薄膜の組成、基板方位について理論的・実験的に検討した。

その結果、適当な成長誘導異方性磁界を有する(111)方位のGGGもしくは、CaMgZr置換GGG基板上に作製したBiGa置換YIG薄膜が、従来の材料より ΔH が小さく、かつ、共鳴周波数を一定に保った場合の垂直共鳴の共鳴磁界の温度変化が極めて小さくなることを初めて見出した。

また、本材料を用いた静磁前進体積波(Magnetostatic Forward Volume Wave: MSFVW)を利用した共振子は、共鳴特性が良く、市販のYIG球発振器よりも共鳴周波数の温度による変動が小さいことから、本材料を用いたプレーナ型の静磁波素子が、YIG球デバイスと置き換えられる可能性があることを示す。

2. 材料設計

まず始めに、従来の材料より共鳴周波数の温度変化が小さいYIG薄膜組成が存在するかを理論的に検討する。

(111)基板を用いた場合の垂直共鳴の式は、エピタキシャル薄膜と基板結晶の格子定数の不整合に起因する応力誘起異方性磁界を無視すれば次式で表せる^[8, 2, 3]。

$$f = \gamma \cdot (H_{res} - N_z' \cdot 4\pi M_s - \frac{4K_1}{3M_s} + \frac{2Ku^a}{M_s}) \quad (1)$$

ここで、 f は共鳴周波数(単位: MHz)、 γ は回転磁気比(2.8×0.01256 MHz·m/A)、 N_z' は実効的な反磁界係数(単位無し)、 $4\pi M_s$ は飽和磁化(単位: A/m)、 K_1 は1次の立方晶結晶の異方性磁界定数(単位: J/m³)、そして Ku^a は成長誘導磁気異方性定数(単位: J/m³)である。式(1)に基づき、成長誘導異方性磁界を有するGa置換YIG薄膜に対して共鳴周波数を一定に保った場合の垂直共鳴の共鳴磁界 H_{res} の温度係数を計算するため、まず、 N_z' 及び Ku^a を実験的に求める。ここで、 $4\pi M_s$ は、文献[9]の分子磁場理論を使って計算し、 K_1 は文献[10]の実験値を用いる。

(111)方位GGG基板上にエピタキシャル成長させた1mm角形状の種々の膜厚を持つYIG薄膜について、共鳴周波数を9.2GHzと一定値に保った場合、垂直共鳴の共鳴磁界の変化から、実効的な反磁界係数 N_z' (但し $N_z' = (N_z - N_x)/2$, $N_x = N_y$, $N_x + N_y + N_z = 1$)を実験的に求めた。図1に試料のアスペクト比と、反磁界係数 N_z' の関係を示す。図1より $N_z' = 1 - 1.757 \cdot h/l$ (h は膜厚、 l は試料幅(1mm))という関係が得られた。参考のためJosephらの一次の理論^[11]により計算した反磁界係数も図1に付記した。この反磁界係数は試料内の位置の関数であるため、試料中央の値と試料全体の平均値を図1に示した。実験値は、前記2つの理論値の中間的な値を示した。

次にBi, Ga置換YIG薄膜の成長誘導異方性磁界の温度

図1 反磁界係数(N_z')とアスペクト比の関係
(アスペクト比: h/l , h :試料膜厚, l :試料幅(1mm), 試料形状: 1mm角)

Fig.1. An effective demagnetizing factor(N_z') vs. aspect ratio (h/l) of YIG square chips.

変化を(1)式を用いて求め、図2に示した。試料の膜組成は $Bi_{0.15}Y_{2.85}Fe_{4.34}Ga_{0.66}O_{12}$ 及び $Bi_{1.4}Y_{1.6}Fe_5O_{12}$ である。

図2 成長誘導磁気異方性定数(Ku^a)の温度依存性

Fig.2. Temperature dependencies of growth induced anisotropy constants (Ku^a).

次に、(1)式を変形し一定の周波数における垂直共鳴磁界の温度変化(δH_{res})を(2)式の様に定義する。

$$\begin{aligned} \delta H_{res}(T) &= N_z' \cdot 4\pi M_s + \frac{4K_1}{3M_s} - \frac{2Ku^a}{M_s} - H_{resc} \\ &= \alpha \cdot (T-25) + \beta/2 \cdot (T-25)^2 \quad \dots (2) \end{aligned}$$

ここで、 T は温度(°C)、 α 、 β は25°Cを基準とした場合の一定周波数における垂直共鳴の共鳴磁界の一次、及び二次の温度係数(単位: A/m/°C, A/m/°C²)、 H_{resc} は温度に依存しない値である。

図3及び図4に種々の成長誘導異方性磁界をもつ(111)方位のGa置換YIG薄膜の一定周波数における垂直共鳴の共鳴磁界の温度係数 α 、 β を飽和磁化をパラメータに取り(2)式を用いて計算した結果を示す。ここで、試料形状は1mm角、試料膜厚は、50 μ mとした。

図3 共鳴磁界の温度変化(δH_{res})における一次の温度係数(α)の計算値

Fig. 3. First order temperature constants (α) of resonance magnetic field changes (δH_{res}).

図4 共鳴磁界の温度変化(δH_{res})における二次の温度係数(β)の計算値

Fig. 4. 2nd order temperature constants (β) of resonance magnetic field changes (δH_{res}).

図3において、基板方位が(111)であり、 Ku^0 が0の場合は、飽和磁化 430×79.6 (A/m)付近で α が0となる。これは従来の材料である。成長誘導異方性があると、 $\alpha = 0$ を与える飽和磁化が上昇し、さらに図4に示す β は、従来の材料に比べ極端に小さくなる計算より判った。また、(111)方位以外の主たる方位、例として(100)方位では温度補償は起こらない事も判った。

以前にGa置換YIG薄膜の $4\pi Ms$ と ΔH の関係を調べたところ図5の様な関係が得られていることから^[5]、成長誘導磁気異方性の付加による効果は、従来の材料の ΔH を小さくする方向で温度特性の改善が出来る事を示唆して

いる。

図5 Ga置換YIG薄膜の $4\pi Ms$ と ΔH の関係
Fig. 5. A relation between $4\pi Ms$ and ΔH for the Ga substituted YIG films.

以上から、新しい温度補償材料としては、基板とYIG薄膜の格子定数の整合性を考慮すると、(111)GGG基板(格子定数12.383Å)を用い $1 \sim 2 \times 10^3$ (J/m³)の成長誘導異方性定数を付与したBiGa置換YIG膜($4\pi Ms = 700 \times 79.6$ (A/m)程度)、あるいは、(111)CaMgZr置換GGG基板(格子定数12.496Å)を用いた 8×10^3 (J/m³)程度の成長誘導異方性定数を付与したBiGa置換YIG膜($4\pi Ms = 1700 \times 79.6$ (A/m)程度)が、従来の材料よりも ΔH 特性が良く、かつ、共振周波数の温度による変動が小さいことが予想される。

3. 実験

<3.1> 試料の作製 2.での予測を確かめるため、(111)方位のGGG基板、Y置換GGG基板(格子定数12.367Å)、及びCaMgZr置換GGG基板上に、膜厚50 μ m程度のBiGa置換YIG薄膜を液相エピタキシャル法により作製した。原料のY₂O₃、Bi₂O₃、Ga₂O₃、Fe₂O₃、PbO、B₂O₃等の酸化物を白金ルツボに混合し環状炉を用いて1100°Cで溶融した後、900°C程度の一定温度に保ち、原料を溶融した融液内に基板挿入し、基板回転数50rpm、反転周期2sec.でエピタキシャル膜を作製した。

<3.2> BiGa置換YIG薄膜の垂直共鳴の共鳴磁界の温度変化2.での予測に基づき、9.2GHzにおいて共鳴磁界の温度特性が良好となるエピタキシャル薄膜を実験的に調べた。そして、エピタキシャル薄膜の膜組成、膜厚、 $4\pi Ms$ 、格子定数の不整合(Δa)、9.2GHzでの ΔH 、 Ku^0 、 K_1 、温度に対して2次曲線状に変化する共鳴磁界の値が頂点となる温度(以下、頂点温度と記す)、頂点温度付近で共鳴磁界の温度による変化が 3×79.6 (A/m) (3Gauss)以下となる温度の幅、共鳴磁界の温度変化に対する一次及び二次の温度係数を調べ表1にまとめた。ここで、エピタキシャル膜組成は蛍光X線及びICP発光分析法を用いて調べ、膜厚は分光光度計、 $4\pi Ms$ は試料振動子法及びファラデー回転角

表1 垂直共鳴を利用した静磁波素子用温度補償YIG薄膜

Table 1. Temperature compensated YIG films for MSW devices using perpendicular resonance

No.	エビ膜組成 $\text{Bi}_{1-x}\text{Y}_x\text{Fe}_{1.5}\text{Ga}_{0.5}\text{O}_{12}$		膜厚 (μm)	$4\pi\text{Ms}$ $\times 79.6$ (A/m)	Δa ($\text{\AA}$)	基板	ΔH at 9.2GHz $\times 79.6$ (A/m)	Ku^a $\times 10^3$ (J/m ³)	K_1 $\times 10^3$ (J/m ³)	頂点温度 ($^{\circ}\text{C}$)	$3.0 \times 79.6 \text{ A/m}$ (3 Gauss) 温度幅 ($^{\circ}\text{C}$)	α $\times 79.6$ (A/m/ $^{\circ}\text{C}$)	β $\times 0.796$ (A/m/ $^{\circ}\text{C}^2$)
	x	y											
1	0.15	0.66	53	0.73	+0.001	GGG	1.5	1.4	-0.3	20	105	-0.011	-0.210
2	0.15	0.66	54	0.73	+0.001	GGG	1.3	1.1	-0.3	30	80	-0.002	-0.308
3	0.15	0.67	53	0.70	+0.001	GGG	1.5	1.2	-0.3	60	80	+0.107	-0.277
4	0.14	0.66	49	0.71	+0.001	GGG	1.8	1.0	-0.3	0	100	-0.069	-0.294
5	0.12	0.74	47	0.62	+0.019	Y:GGG	2.5	0.6	-0.3	10	80	-0.032	-0.412
6	0.06	0.92	50	0.38	+0.002	Y:GGG	4.3	0.0	-0.2	30	45	+0.022	-1.270
7	1.40	0.15	7	1.51	+0.002	CaMgZr:GGG	1.3	8.0	-0.5	40	110	-0.025	+0.208

の磁場強度依存性から求め、格子定数不整合はX線2結晶法、 ΔH 、垂直共鳴の共鳴磁界の温度依存性は強磁性共鳴装置(FMR)により求め、 K_1 は測定したGa置換量に対応する文献値を用い、 Ku^a は(1)式より算出した。表1のFMR測定では1mm角の試料を用いた。

図6及び図7に実験で得られた共鳴磁界の温度変化に対する一次及び二次の温度係数を飽和磁化を横軸に取り示した。 Ku^a 値が0.6~1.4(J/m³)、 $4\pi\text{Ms}$ が0.62~0.73 $\times 79.6$ (kA/m)である試料No.1~No.5では、(111)方位Y:GGG基板を用いて作製したBiを殆ど含まない従来の材料(No.6、組成 $\text{Bi}_{0.06}\text{Y}_{2.94}\text{Fe}_{4.08}\text{Ga}_{0.92}\text{O}_{12}$ 、 $4\pi\text{Ms}=0.38 \times 79.6$ (kA/m))と比較して、 $\alpha=0$ を与える $4\pi\text{Ms}$ が増加し、 β が小さな値(従来の材料の約1/5)となっている。また、試料No.7の(111)方位CaMgZr置換GGG基板上に作製した $\text{Bi}_{1.4}\text{Y}_{0.6}\text{Fe}_{4.85}\text{Ga}_{0.15}\text{O}_{12}$ では Ku^a が 8.0×10^3 (J/m³)と大きいことより $4\pi\text{Ms}$ が 1.51×79.6 (kA/m)と大きな値で α がほぼ零となり、 β も従来の材料の約1/6と小さい。図6と図7にはそれぞれ、2.で求めた α と β の計算値を付記した。実験値は、計算値と良く対応している。

今回得られた試料No.1(組成 $\text{Bi}_{0.15}\text{Y}_{2.85}\text{Fe}_{4.34}\text{Ga}_{0.65}\text{O}_{12}$)、No.7及び従来の材料であるNo.6の共鳴周波数を9.2GHzと一定に保った場の垂直共鳴の共鳴磁界の温度による変化を図8に示す。No.1の試料では、-33 $^{\circ}\text{C}$ ~72 $^{\circ}\text{C}$ の広い温度幅で、またNo.7の試料では-20 $^{\circ}\text{C}$ ~90 $^{\circ}\text{C}$ の温度幅で共鳴磁界の温度変化は 3×79.6 (A/m)以下と従来の材料に比べ遙かに小さい。図9及び図10に、No.2とNo.7の試料のFMRスペクトラムを示す。通常のYIG薄膜と同程度に小さな $\Delta H=1.3$ Oe(at 9.2GHz)が得られている。ただし、試料No.7では、 Ku^a が大きいためか、図10に示すように低磁界損失によると思われるスプリアス応答が観測されている。この試料を用いて、MSFVWの励振を試みたが、

図6 垂直共鳴の共鳴磁界の温度による変化

(delta H_res)の一次の温度係数(alpha)の実験値

Fig. 6. An experimental relation between α and δH_{res} .

図7 垂直共鳴の共鳴磁界の温度による変化

(delta H_res)の二次の温度係数(beta)の実験値

Fig. 7. An experimental relation between β and δH_{res} .

図8 試料の共鳴周波数を9.2GHz一定に保った場合の垂直共鳴の共鳴磁界の温度による変動

** $\Delta H_{res} = H_{res}(\text{頂点温度}) - H_{res}(\text{各温度})$

Fig. 8. Temperature dependence for ΔH_{res} .

図9 試料 No. 2 の垂直共鳴の共鳴波形

Fig. 9. Perpendicular resonance spectrum for the sample No. 2.

図10 試料 No. 7 の垂直共鳴の共鳴波形

Fig. 10. Perpendicular resonance spectrum for the sample No. 7.

MSFVWを効率よく励振・検出することは出来なかった。

次に、温度特性向上の効果が成長誘導異方性磁界によるものであることを確認するため試料 No. 1とほぼ同等な(11

1)GGG基板上に作製した組成 $\text{Bi}_{0.15}\text{Y}_{2.85}\text{Fe}_{4.34}\text{Ga}_{0.66}\text{O}_{12}$ ($4\pi M_s = 0.73 \times 79.6 (\text{kA/m})$, $K_u = 1.3 \times 10^3 (\text{J/m}^3)$, 1mm角)の9.2GHzの一定周波数における垂直共鳴の共鳴磁界の温度係数、頂点温度の K_u 依存性を調べ図11に示した。 K_u は950°C、大気中で試料をアニールすることにより減少させた。図11の様に K_u の減少によって α 、 β が大きくなることから温度特性向上に K_u が効いていることが確認できた。なお、この試料の K_u を完全に除去するのに約500時間のアニールを要した。また、アニールにより頂点温度が制御可能であることも判った。

図11 $\text{Bi}_{0.15}\text{Y}_{2.85}\text{Fe}_{4.34}\text{Ga}_{0.66}\text{O}_{12}$ ($4\pi M_s = 0.73 \times 79.6 (\text{kA/m})$, 1mm角, 膜厚53μm)の垂直共鳴の共鳴磁界の温度係数(α , β)と頂点温度の K_u との関係

Fig. 11. Temperature coefficients (α , β) and the turnover temperature of ΔH_{res} for a $\text{Bi}_{0.15}\text{Y}_{2.85}\text{Fe}_{4.34}\text{Ga}_{0.66}\text{O}_{12}$ film as a function of K_u .

4. MSFVWプレーナ共振子の共振周波数の温度変動

本材料を用いた静磁波共振子の共鳴特性と共振周波数の温度による変化を確認するため図12に示す構造のMSFVWを用いたプレーナ共振子^[5, 12]を構成した。素子には表1, No. 2の試料を用いた。チップサイズは1.7×3.4mmである。有限要素法により設計した5mmφの範囲で均一な磁場を発生できる電磁石のギャップ内に、プレーナ共振子を試料面に対して垂直に磁場が印可されるよう配置した。

図13はこの共振子の等価回路と測定系を示す。配線のインダクタンスや直流抵抗分、さらに電極とYIG薄膜の結合度を表す変換器は省略して記した。図13の共振子の|S21|を測定すると共振周波数で挿入損失が極大となるディップが観測される。またQ値は、ディップから3dB位置の周波数幅を Δf として $Q = f / \Delta f$ で定義できる^[12]。

図14は試作したプレーナ共振子の|S21|の周波数応答を示す。エピタキシャル薄膜の ΔH が1.30eと小さいことより、共振周波数が3.13GHzにおけるQ値は、約2000と

通常のYIG薄膜を用いた共振子と同程度の大きな値が得られている^[12]。

図12 MSFVWを用いたプレーナ共振子
Fig. 12 Schematic of an MSFVW planar resonator.

図13 MSFVWプレーナ共振子の等価回路
Fig. 13 An Equivalent circuit of an MSFVW planar resonator.

図14 試料No. 2を用いたMSFVWプレーナ共振子の $|S_{21}|$ 特性例
Fig. 14 $|S_{21}|$ characteristics of an MSFVW planar resonator using the sample No. 2.

図15は、試作したプレーナ共振子の一定磁場における共振周波数の温度による変動を示している。図15の共振周波数の温度変化は、 $4^{\circ}\text{C} \sim 74^{\circ}\text{C}$ で周波数変動が10 MHz以下と小さい。また、図15の波線の Δf は、表1で求めた温度係数 α 、 β から(1)式により計算される周波数変化であり実験値と良い一致が得られている。さらに、図15にはアバンテック社製のYIG球発振器(型番AV-78618)の発振周波数の温度による変動のカタログ値^[7]を付

記したが、試作した共振子の共振周波数の温度による変動はYIG球発振器のものよりやや小さい。なお、YIG球は、印可磁場に特定の結晶方位を合わせるにより共振周波数の温度による変化を無くすることが可能であるが、図15に代表されるYIG球発振器の周波数の温度変動は、球形状の不完全さや結晶軸合わせのズレ、磁気回路による磁場の温度による変動等により生じていると考えられる。

図15 試料No. 2を用いたMSFVWプレーナ共振子の共振周波数の温度による変動

Fig. 15 Frequency-temperature characteristics of an MSFVW planar resonator using the sample No. 2.

5. まとめ

YIG球よりも共振周波数の温度による変動が小さく、かつ低損失な静磁波素子用YIG薄膜が実現できるかを理論的・実験的に調べた。

その結果、(111)GGG基板上にエピタキシャル成長させた膜組成が $\text{Bi}_{0.15}\text{Y}_{2.85}\text{Fe}_{4.34}\text{Ga}_{0.66}\text{O}_{12}$ 、成長誘導磁気異方性定数(K_u^0)が $1.4 \times 10^3 (\text{J}/\text{cm}^3)$ 、 $4\pi M_s$ が $0.73 \times 79.6 (\text{kA}/\text{m})$ である材料は、9.2GHzでの ΔH が $1.5 \times 79.6 (\text{A}/\text{m})$ (1.50e)と小さく、9.2GHzの一定周波数において $-3.3^{\circ}\text{C} \sim 7.2^{\circ}\text{C}$ で $3 \times 79.6 (\text{A}/\text{m})$ (3Gauss)以下と極めて小さな共振磁界の温度変化を示した。また、(111)CaMgZr置換GGG基板上にエピタキシャル成長させた膜組成 $\text{Bi}_{1.4}\text{Y}_{1.6}\text{Fe}_{4.85}\text{Ga}_{0.15}\text{O}_{12}$ ($K_u^0=8.0 \times 10^3 \text{J}/\text{m}^3$ 、 $4\pi M_s=1.51 \times 79.6 (\text{kA}/\text{m})$ 、 $\Delta H=1.3 \times 79.6 (\text{A}/\text{m})$)の垂直共振磁界は9.2GHzの一定周波数において、 $-20^{\circ}\text{C} \sim 90^{\circ}\text{C}$ で、 $3 \times 79.6 (\text{A}/\text{m})$ 以下の小さな共振磁界の温度変化を示した。

以上の材料は、従来の材料より ΔH が小さく、かつ、一定周波数における垂直共振の共振磁界の温度特性が良い。

また、組成が $\text{Bi}_{0.15}\text{Y}_{2.85}\text{Fe}_{4.34}\text{Ga}_{0.66}\text{O}_{12}$ であり、 $4\pi M_s$ が、 $0.73 \times 79.6 (\text{kA}/\text{m})$ 、 K_u^0 が $1.1 \times 10^3 (\text{J}/\text{cm}^3)$ 、膜厚が54 μm 、 ΔH が $1.3 \times 79.6 (\text{A}/\text{m})$ であるエピタキシャル薄膜を用いたMSFVWプレーナ共振子は3.13GHzにおいて約2000

と大きなQ値を示し、また、一定の磁場において、4℃～74℃で共鳴周波数の温度による変動が10MHz以下と小さい。この温度による周波数の変動は、市販のYIG球発振器の発振周波数の温度変動よりも小さな値である。

以上より、本研究により得られた適当な成長誘導異方性磁界を有する低損失なBiGa置換YIG薄膜を用いることにより、プレーナ型の静磁波素子はYIG球デバイスを置き換える可能性があることが判った。

(平成6年5月25日受付、同年11月1日再受付)

文献

- [1] J. P. Castera, 'State of the Art in Design and Technology of MSW Devices (invited)', J. A. P., 55 (6), 15, 2506, (1984)
- [2] H. L. Glass, J. H. W. Liaw and M. T. Elliott, 'Temperature Stabilization of Ferrimagnetic Resonance Field in Epitaxial YIG by Ga, La substitution', Mat. res. Bull., Vol. 12, 735, (1977)
- [3] P. Röshmann and T. Tolksdorf, 'Epitaxial Growth and Annealing Control of Thick Homogeneous Ga substituted Yttrium Iron Garnet Films', Mat. Res. Bull., Vol. 18, 449, (1983)
- [4] H. Le Gall, J. P. Castera, P. Hartmann and D. Mahasoro, 'Influence of Ga-substitution on the Magnetostatic Waves Properties in Garnet Films', IEEE Trans. on Magn., Vol. MAG-22, No. 5, 990, (1986)
- [5] T. Ryuo and M. Tanno, 'High Quality YIG Film for MSW Devices', Proc. of IEEE Ultrasonics Symp., 237, (1988)
- [6] K. Ito, Y. Murakami, S. Takeda, Y. Kinoshita, M. Tanaka, 'Voltage Contralled Oscillators with Planar resonators', Proc., of IEEE Ultrasonics Symp., 323, (1989)
- [7] AVANTEK, 'Signal Sources and Filters Databook', 104, (1986).
- [8] C. Kittel, 'On the thory of Ferromagnetic Resonance Absorption', Phys. Rev. 71, 270, (1947)
- [9] P. Hansen, P. Röshmann and T. Tolksdorf, 'Saturation magnetization of Gallium-substituted Yttrium Iron Garnet', J. A. P., Vol. 45, No. 6, 2728, (1974)
- [10] P. Hansen, 'Anisotropy and Magnetostriction on Gallium-substituted Yttrium Iron garnet', J. A. P., Vol. 45, No. 8, 3638, (1974)
- [11] R. I. Joseph and E. Sclomann, 'Demagnetizing Field in Nonellipsoidal Bodies', J. A. P., Vol. 36, No. 5, 1579, (1965)
- [12] Y. Kinoshita, S. Kubota, S. Takeda, A. Nakagoshi, 'Planar Resonator and Integrated Oscillator using Magneto-static Waves', IEEE Trans. on U. F. F. C, Vol. 37, No. 5, 457, (1990)

丹野雅行

(正員) 1962年1月16日生。1986年3月千葉大学大学院工学研究科修士課程修了。同年、信越化学工業(株)入社。ガーネット磁性薄膜に関する研究に従事。電気学会優秀論文発表賞受賞('92年)。在職のまま信州大学大学院工学系研究科博士後期課程在学中。

流王俊彦

(非会員) 1951年6月16日生。'76年3月東京大学大学院工学研究科修士課程修了。同年信越化学工業(株)入社。GGG, LT, BGO等の酸化物単結晶及びガーネット磁性薄膜に関する研究に従事。現在、同社精密機能材料研究所開発室室長。

中澤光男

(正員) 1938年12月13日生。1966年3月東京工業大学大学院博士課程修了。工学博士。翌年4月信州大学工学部助教授、現在に至る。この間、水晶振動子の研究に従事。1980～1981年、プリンストン大学客員研究員。GTカット水晶振動子の理論化に成功(1976～1981年)。IEEE Senior Member。