

エネルギー閉じ込めフェライトフィルタ

堤 誠*

Energy Trapping Ferrite Filters

Makoto Tsutsumi

Abstract

Energy trapping microwave ferrite filter was studied both theoretically and experimentally. The principle of filter is based on the energy trapping behavior of microwave in the nonuniformly magnetized ferrite slab. Resonance mode diagram of TE type was derived from Maxwell's equation under the boundary conditions of nonuniform bias magnetic field profile and poynting theorem. Experiments were carried out using polycrystalline YIG ferrite slab having dimensions of 5mm × 10mm in thickness of 2mm, and they were compared with the theory. The exact microwave resonance behavior in the nonuniformly magnetized ferrite slab was derived through an analysis on Finite Difference Time Domain method.

I まえがき

波動のエネルギーを何らかの形で閉じ込め、デバイスの良さ(Q値)を高める手法は過去において知られており、広く超音波、マイクロ波に応用され、高Q水晶振動子やフィルタとして実用化されている^①。これらのエネルギー閉じ込めデバイスは主に圧電性材料や誘電体材料を対象としているが、筆者らは磁性体材料(フェライト)においても印加するバイアス磁界を不均一に分布させれば、エネルギー閉じ込めが可能であり、新しいタイプの高Qマイクロ波フィルタが実現出来ることをすでに明らかにした^②。その後、このフィルタの実験的な検討も行われたが、フェライトに現れる特別なモードである静磁波(MSW)モードに限られていた^③。

本稿ではこのエネルギー閉じ込めフェライトフィルタの問題を、より一般的な電磁波(TE)モードにたいして拡張し、その理論ならびに実験結果について報告する。

II 理論

図1に問題の構成を示す。同図は厚さdのフェライトスラブが導体で被われ、導波路を構成している。また、バイアス磁界 H_i はz方向に加っているものとする。

* 宇宙通信工学科

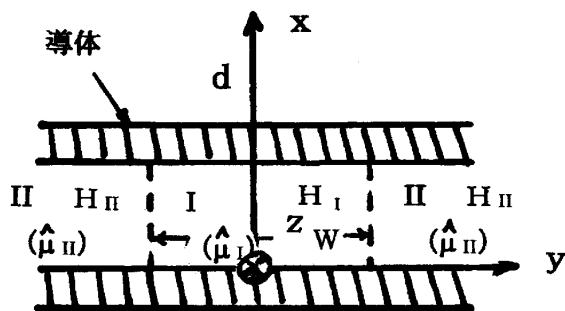


図1 問題の構成

フェライト媒質におけるマクスウエルの方程式は

$$\nabla \times \mathbf{H} = j\omega \varepsilon \mathbf{E} \quad (1)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -j\omega \mu_0 \hat{\mu} \cdot \mathbf{H}$$

$$\hat{\mu} = \begin{bmatrix} \mu & j\kappa & 0 \\ -j\kappa & \mu & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\mu = 1 + \frac{\omega_M \omega_n}{\omega_n^2 - \omega^2}, \quad \kappa = \frac{\omega \omega_M}{\omega_n^2 - \omega^2}, \quad \omega_n = \gamma \mu_0 H_i, \quad \omega_M = \gamma \mu_0 M$$

で与えられる。ここに γ は磁気回転比、 M は飽和磁化である。

(1),(2)式における電磁界が図1に示す座標系で z 方向に依存しないものとする、(1)、(2)式から TE モードの界として

$$H_x = \frac{-1}{j\omega\mu_0(\mu^2 - \kappa^2)} \left\{ \mu \frac{\partial E_z}{\partial y} + j\kappa \frac{\partial E_z}{\partial x} \right\} \quad (3)$$

$$H_y = \frac{1}{j\omega\mu_0(\mu^2 - \kappa^2)} \left\{ \mu \frac{\partial E_z}{\partial x} - j\kappa \frac{\partial E_z}{\partial y} \right\} \quad (4)$$

$$\frac{\partial^2 E_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 E_z}{\partial y^2} + \omega^2 \varepsilon \mu_0 \mu_{\text{ef}} E_z = 0 \quad (5)$$

$$\mu_{\text{ef}} = \frac{\mu^2 - \kappa^2}{\mu}$$

の関係をj得る。なお同時に現れる TM モードの界は、(2)式の $\hat{\mu}$ テンソルに無関係なのでここでは考慮しない。

(5)式の E_z の解を x 方向に存在する導体壁による境界条件を考慮して

$$E_z = A \sin \frac{n\pi}{d} x e^{j\beta y} \quad (6)$$

と置く。(6)式と(5)式から、伝播定数 β を求める分散関係式として

$$\beta = \sqrt{\omega^2 \varepsilon \mu_0 \mu_{\text{ef}} - \left(\frac{n\pi}{d} \right)^2} \quad (7)$$

を得る。ここに n は整数である。

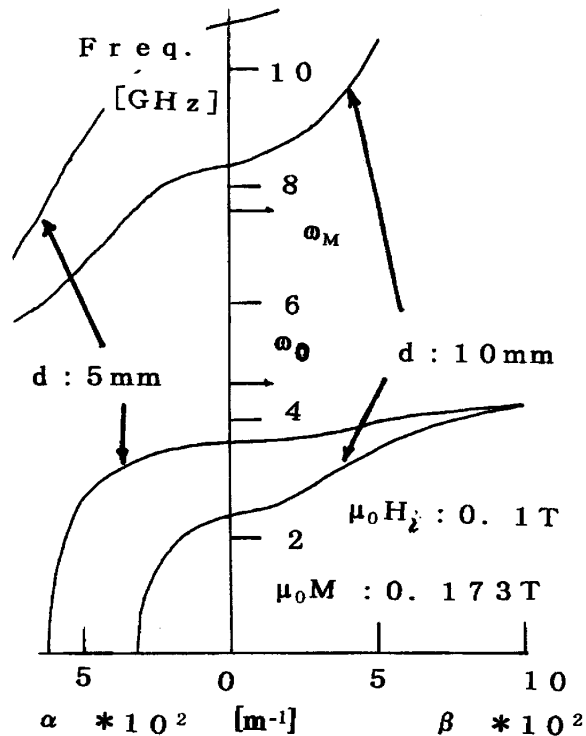


図2 フェライト導波路の分散曲線

図2は(7)式の分散関係式を磁界 $\mu_0 H_i = 0.1 \text{ T}$ 、 $\mu_0 M = 0.173 \text{ T}$ 、 $n = 1$ として、フェライトスラブの厚み d を 5 mm 、 10 mm の2種類にたいして数値的に評価したものである。同図は 11 GHz までのマイクロ波帯で、(7)式の伝播定数 β が実数の場合と虚数の場合 $\beta = j\alpha$ の曲線を描いている。同図から周波数帯域によつて2つのモードの曲線が現れる事がわかる。1つは $\omega = \omega_M = \gamma \mu_0 (H_i + M) = 7.64 \text{ GHz}$ 付近に現れる曲線で、これは良く知られた TE_{10} モードの導波管モードの曲線に類似し、 d がある程度、厚くないと現れないモードである。一方、 $\omega_0 = \gamma \mu_0 \sqrt{H_i(H_i + M)} = 4.62 \text{ GHz}$ で現れる曲線は、フェライト特有の曲線で μ_{ef} が無限に大きくなるために生じるモードである。またこのモードは β が実数となる範囲が狭く、さらにこの曲線は直流磁界が少し増すと、高い周波数に移動し、 β は虚数 α となる。このことはフェライト媒質内に弱い不均一磁界を構成すれば、マイクロ波のエネルギーを弱い磁界の部分に閉じ込め、エネルギー閉じ込め型フェライトフィルタが実現出来ることを意味する。この原理は静磁波(MSW)に対して既に提案されているものの、直流磁界の方向がフェライトスラブに垂直に加える必要があることと、MSWモードに限っているため、フェライトの損失の影響を受けやすく^{(2),(3)}、損失が極めて少ないフェライト単結晶を媒質に選ぶ必要があつた。

この不均一磁界におけるマイクロ波のエネルギーの閉じ込めの効果をより理論的に明らかにするために、ここではまず図1における問題の構成において y 方向にバイアス磁界がステップ状に変化するものと仮定し、TEモードの共振ダイアグラムを求める。今、フェライトの中央部における磁界 H_I が、側面に加わる磁界 H_{II} より弱いと仮定する (H_{II}

$H_1 = H_2$ と、中央部における(6)式の電界は y 方向に $\cos \beta y$ と導波モードの形で置き、更に側面においては指数関数的に $e^{-\alpha y}$ の形を仮定できる。 H_1 と H_2 との境界 $y = \pm W/2$ において、 H_1 、 H_2 の領域における電界および y 方向のポインティング電力が等しい条件から、共振モードの分散関係式として

$$\tan\left(\frac{\beta}{2}W\right) = \frac{\mu_{ef}\alpha}{\mu'_{ef}\beta}$$

$$\alpha = \sqrt{\left(\frac{n}{d}\pi\right)^2 - \omega^2 \varepsilon \mu_0 \mu'_{ef}}, \quad \mu'_{ef} = \frac{\omega_M'^2 - \omega^2}{\omega_0'^2 - \omega^2} \quad (8)$$

$$\omega_M' = \gamma \mu_0 (H_2 + M), \quad \omega_0'^2 = \gamma^2 \mu_0^2 (H_2 + M)$$

を得る。

(8)式を d を 2mm または 4mm に選び、不均一磁界のステップ差、 $H_2 - H_1$ を 200Oe ($H_1 = 800$ Oe) として、スラブの中央部の不均一磁界の幅 W を変えて数値的に評価した結果を図3に示す。この場合 d を 2mm に選ぶと、共振器として存在可能な帯域は 4GHz 付近で 50MHz ときわめて狭くなる。一方、 d が 4mm になると、帯域は 600MHz まで広がるが、高次モードの存在が顕著になる。したがってこの共振モードダイアグラムから、 d は 4mm 以下、 W は 4 mm 以下、そして不均一磁界のステップの差を数 100Oe 位に選ぶと、良好な形でマイクロ波フィルタが実現出来ることになる。

一方、図4は釣鐘状に不均一に磁化されたフェライトスラブにおける電磁界をマクスウェルの方程式(1),(2)式に境界条件を考慮してFDTD(Finite Difference Time Domain)法により厳密に解き、このTEモードのエネルギー閉じ込めの効果を示したものである。同図で横

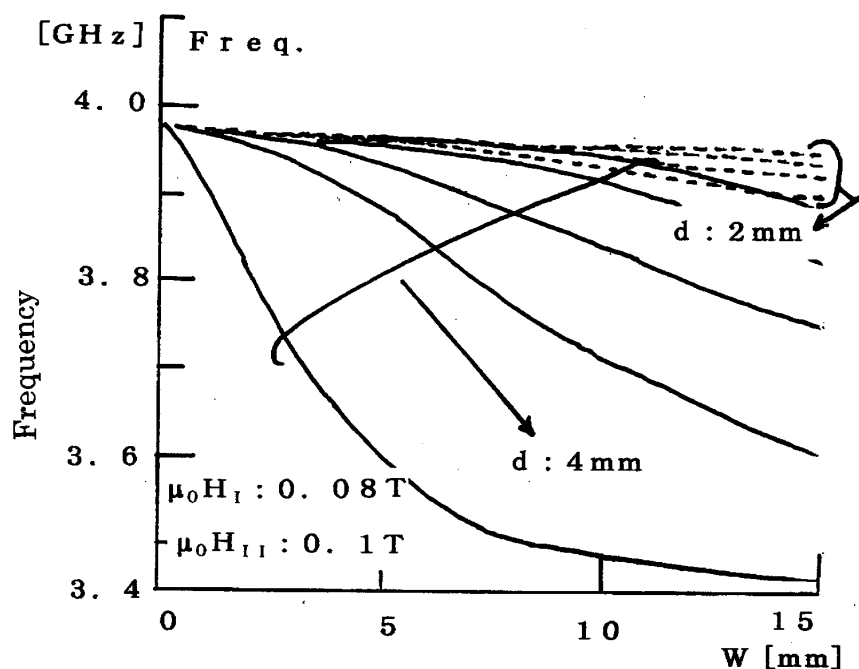


図3 共振モードダイアグラム

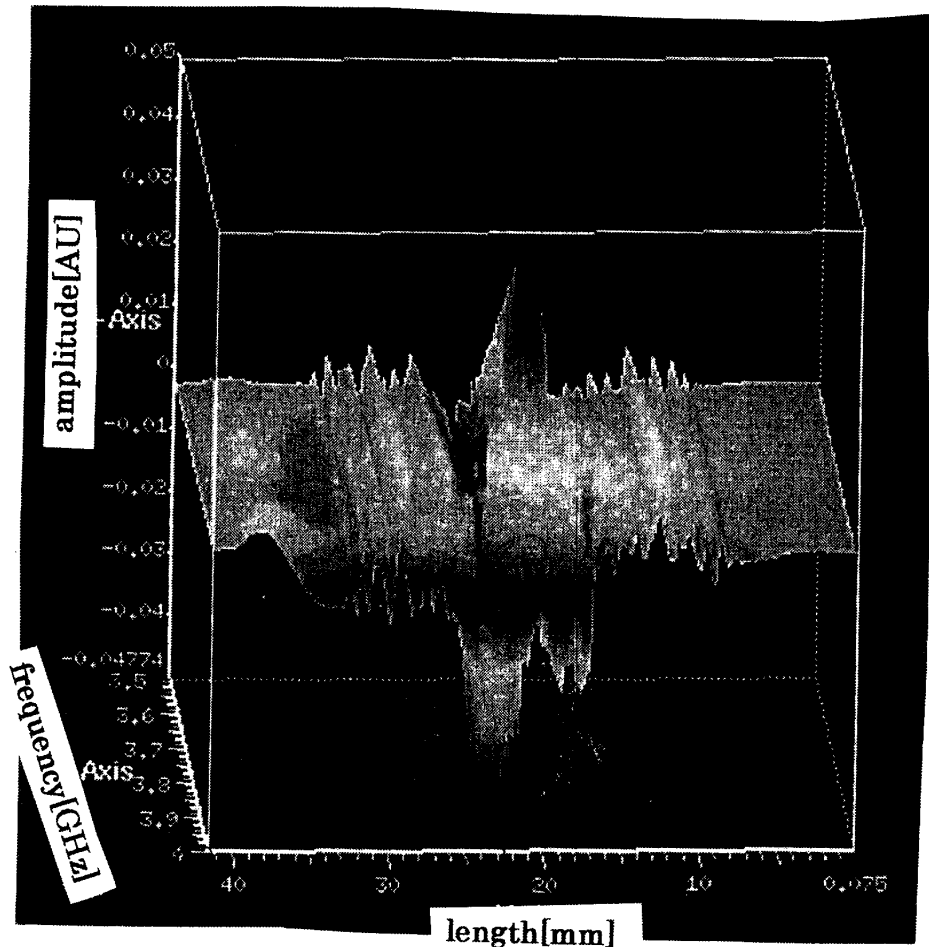


図4 フィルタのエネルギー分布

軸は図1に示すy軸を、f軸は周波数、そして縦軸は共振特性のエネルギー分布を示す。なお、この場合 $d=4\text{mm}$ 、 $H_0 - H_1 = \Delta H = 100\text{ Oe}$ 、($H_1 = H_2 = 1000\text{ Oe}$)、 $W = 8\text{ mm}$ に選んでいる。

この図から磁界が弱いフェライトスラブの中央部にTEモードのエネルギーが閉じ込められ、共振器として動作していることが分かる。さらにこの結果は図3に示す共振モードダイアグラムに関連して論じることができる。

III 実験結果

実験は厚さ1mm、長さ20mm、幅5mmの多結晶YIGスラブを2枚用い、 $100\text{ }\mu\text{m}$ 径の線状アンテナを2mm離して2枚のスラブの空隙部に装荷し、サンドウィッチ構造にしてエネルギー閉じ込めフィルタを構成した。図5はこの共振器の S_{21} 特性を0.13 GHzから19.9GHzの間で測定したもので、磁界を0.12 T から0.3 Tまで変えている。Qの最大値は45、最小挿入損-18 dBの特性が求つている。なおこの場合、バイアス磁極の形を凹型に変形するなどで⁽³⁾、スラブを人工的に不均一に磁化することを試みたが、現在のところそ

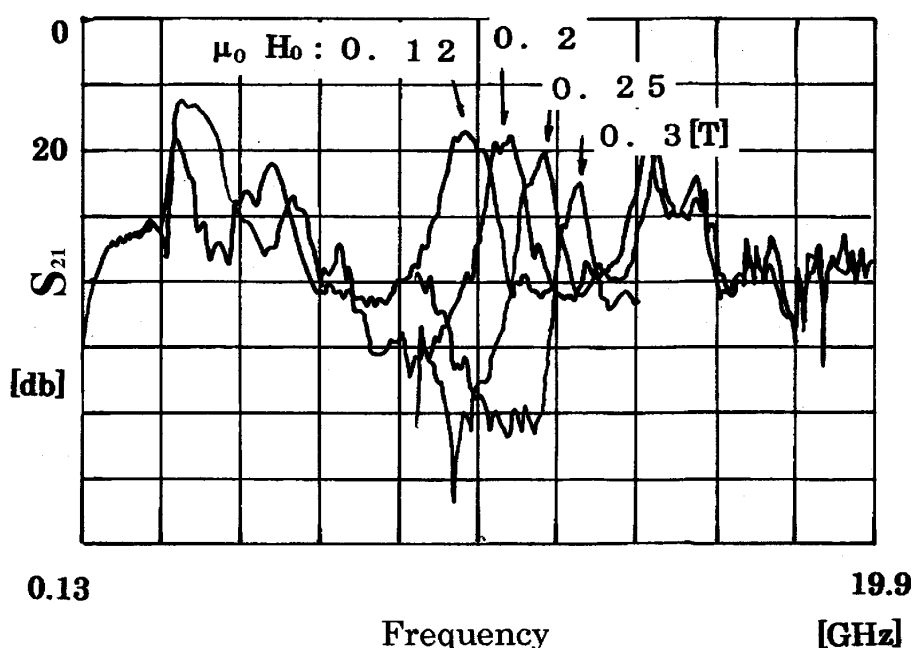


図5 共振特性の実験値

の有効性は明確でない。その理由は、有限な大きさのフェライトスラブでは、減磁効果により内部直流磁界 H_i は

$$H_i = H_0 - 4\pi MN_{zz}(x, y) \quad (9)$$

の関係から、外部直流磁界 H_0 が均一であつても、減磁効果 N_{zz} によつてフェライト内部での磁界 H_i は不均一に分布する⁽⁴⁾。 $d=2\text{mm}$ 、長さ 20mm 、幅 5mm の YIG スラブでは、 H_0 が 1000 Oe と仮定すると、(9)式から、スラブの中央部では $H_i=602\text{ Oe}$ 、端では 792 Oe と計算され、この値は二章で仮定した理論値 200 Oe (ただし、この場合ステップ近似) に近い値である。

実験値から求まる Q 値と共振周波数との関係を(8)式で求めた理論値と比較したところ、高い周波数ではほぼ一致するものの、低い周波数では一致しない。この理由として i) 不均一磁界の分布がステップ状でなく、実際ではレイストコサイン状に分布している。ii) 理論では z 方向に無限としているが、 z 方向に依存する共振モードが現れる。などが考えられる。

V むすび

エネルギー閉じ込め型超音波振動子の原理に礎ずき、不均一に磁化されたフェライトスラブを用いたマイクロ波フィルタを提案し、その原理及び理論、そして実験結果について報告した。しかしながら、現在のところ、 Q 値が低く、更に実験値を理論値でもつて十分説明できない。これは、不均一磁界中のフェライト媒質における電磁界問題の複雑に関連

するが、今後FDTD法によるより厳密な解析法の発展が望まれる。

ここに提案したフェライトフィルタは従来のフィルタに比べて多結晶体を用いても構成出来るなどの特色があり、新機能を有するマイクロ波回路素子としての期待は大きい。

謝辞

実験などで常日頃お世話になっている大阪工業大学の小寺敏郎講師に深謝する。

参考文献

- 1) B.A.Auld ; "Acoustic fields and waves in solids",I,II,Wiley-Inter.Science,1973.
- 2) M.Tsutsumi,T.Bhattacharyya and N.Kumagai ;
"On the realization on energy trapping filters",Proc.IEEE.Letts.,pp.363-364 (Mar.1976).
- 3) 堤 誠、薮田恵三、熊谷信昭 ;
"不均一に磁化されたYIG薄膜における静磁波の共振特性"、電子通信学会論文誌、J65 - B,9,pp.1192-1193 (1982年9月)。
- 4) R.I.Joseph and E.Schlomann ;

(平成13年10月21日受理)