

MSW(静磁波)応用デバイス

Magnetostatic Wave Devices

強磁性体の微小球に、MSW(Magnetostatic Wave: 静磁波)(磁気スピン歳差共鳴の波)を共振させた共振子やフィルタは、バイアス磁界を変えるとマイクロ波帯の使用周波数を広帯域に可変でき、計測器や軍用レーダに広く用いられている。しかし、微小球の製法に多くの加工工程を要すること、さらに用途を拡大するために、集積回路化が研究されていた。

写真食刻法で実現できるプレーナ構造の静磁波デバイスとしては、欧米では遅延線やトランスバーサルフィルタが軍用に研究された。近年、民需用は日本を中心に共振子や発振器の開発が進んでいる。

完全にプレーナ構造の静磁波共振子と、これを用いた電圧制御発振器の5GHz帯集積回路を試作し、実用化の主要課題である強磁性薄膜の温度特性を補償し、微小球デバイスと同等の性能を得た。

木下康昭* *Yasuaki Kinoshita*
 伊藤康平** *Kôhei Itô*
 窪田定美*** *Sadami Kubota*

1 緒言

1.1 歴史

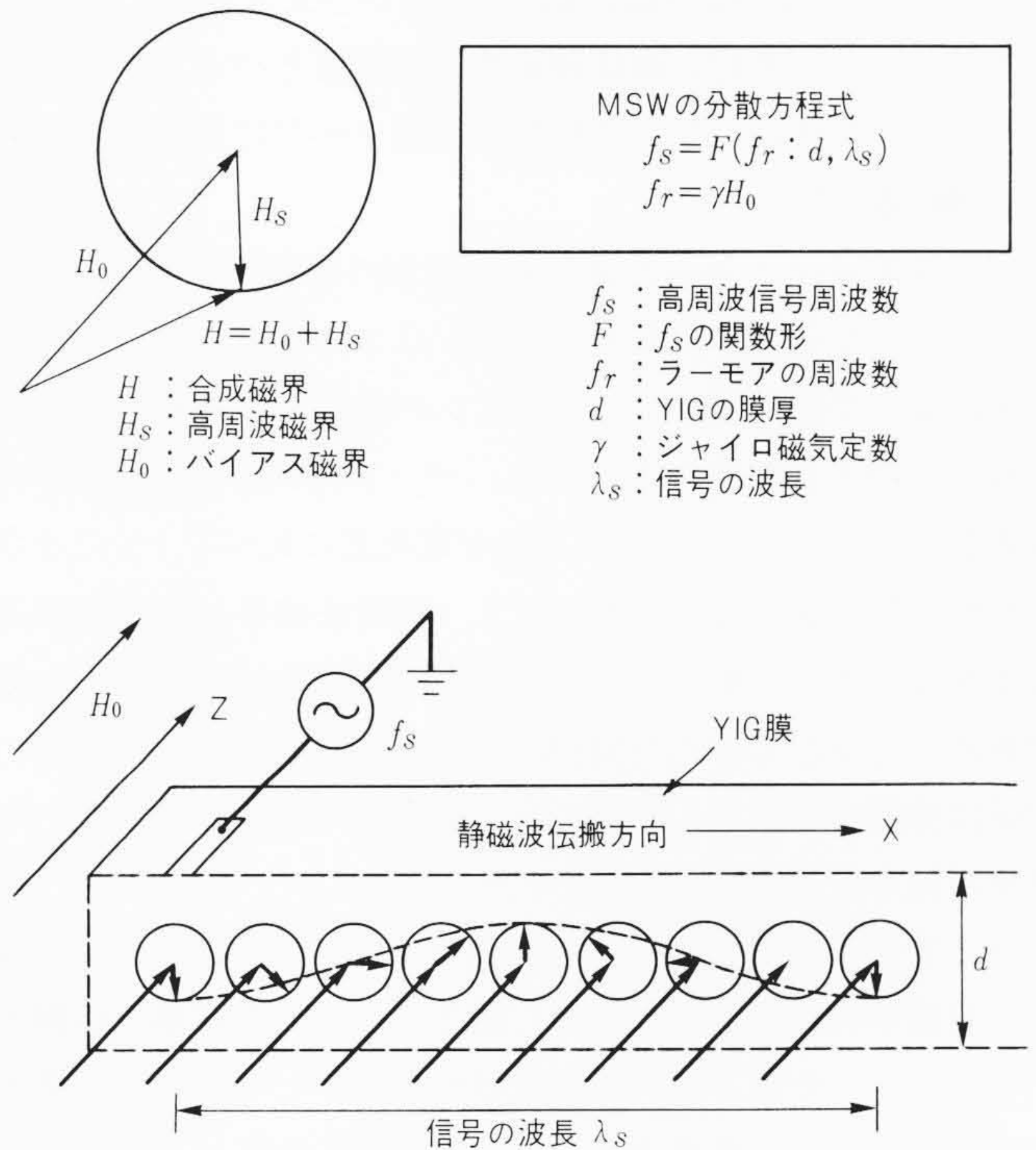
MSW(Magnetostatic Wave: 静磁波)、すなわち強磁性体材料の磁気スピンが印加された高周波磁界に共鳴して伝搬する波、スピン波は、1950年代に基礎研究が開始された¹⁾。その応用デバイスである共振子はYIG(Yttrium Iron Garnet)単結晶の微小球(直径0.4~1mm)内にスピン波を共振させ、バイアス磁界を変えて、2~3オクターブの広帯域にわたりマイクロ波帯の周波数を可変できる。1960年代に開始された応用研究によって発振器やフィルタとして製品化され、マイクロ波計測器や軍用のレーダなどに広く実用されている。

しかし、多くの加工工程を要する微小球の製法と固定法を改めるために、またさらに用途を拡大するために、写真食刻法で実現可能なプレーナ構造の研究が、SAW(Surface Acoustic Wave)デバイスの研究と同時代の1970年代に進展した²⁾。強磁性材料としては、バブルメモリ用に開発されたGGG(Gadolinium Gallium Garnet)単結晶を基板として、その上に液相成長させたYIG薄膜を利用した。欧米では、軍用のマイクロ波装置に遅延線などとして実用化したとみられる。民需用は近年日本を中心に研究開発が進んでいる。

1.2 電子スピンの歳差運動³⁾

強磁性体内の電子スピン運動は、高周波磁界 H_s を一定強度のバイアス磁界 H_0 に重畳して印加すると、歳差運動が加わる(図1)³⁾。歳差運動とは高周波磁界ベクトル H_s がバイアス磁界

スピン歳差運動と高周波磁界 H_s の共鳴



注: 略語説明 MSW (Magnetostatic Wave: 静磁波)

図1 MSWの伝搬 高周波磁界 H_s の周波数 f_s に共鳴したスピン歳差運動が、磁性体表面の影響による位相遅れのために静磁波となって伝搬する。

* 日立製作所 中央研究所 工学博士 ** 日立金属株式会社 磁性材料研究所 *** 日立フェライト株式会社 鳥取工場

ベクトル H_0 の周囲を回転運動することであり、その回転周期は H_s の周波数 ω に共鳴する。また、この歳差運動は磁性体の損失に応じて電力を吸収する。すなわち、強磁性体内の磁界ベクトル $H = H_0 + H_s$ と磁化ベクトル M は次のギルバートの運動方程式を満足する³⁾。

$$\frac{dM}{dt} = -|\gamma|(M \times H) + \frac{\alpha}{|M|} \left(M \times \frac{dM}{dt} \right) \dots \dots \dots (1)$$

ここで γ : ジャイロ磁気定数 ($|\gamma| = 222.8 \text{ AT/m} \cdot \text{MHz}$)

α : ギルバートの制動定数

この式の第1項目は、高周波磁化 M_m がラーモアの周波数 $f_r = |\gamma| H_0$ でバイアス磁界 H_0 の周りを歳差運動することを示す。第2項目は減衰運動を示し、 α はスピン波共鳴の吸収半値幅 ΔH を測定し、材料損失($\alpha = \gamma \cdot \Delta H / 2\omega$)として求める。

高周波磁界 H_s と高周波磁化 M_m の関係式 $M_m = \mu_0 \kappa H_s$ にはジャイロ性があるため、比導磁率 $\mu = 1 + \kappa$ はZ軸方向にバイアス磁界を印加したとき次のテンソル

$$\mu = \begin{vmatrix} \mu_{11} & -j\mu_{12} & 0 \\ j\mu_{12} & \mu_{11} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \dots \dots \dots (2)$$

で表される³⁾。このように、 μ に方向性が与えられることから、後述のように、スピン波は強磁性膜の膜面とバイアス磁界 H_0 の方向との関係により、3種類の伝搬モードに分類される。

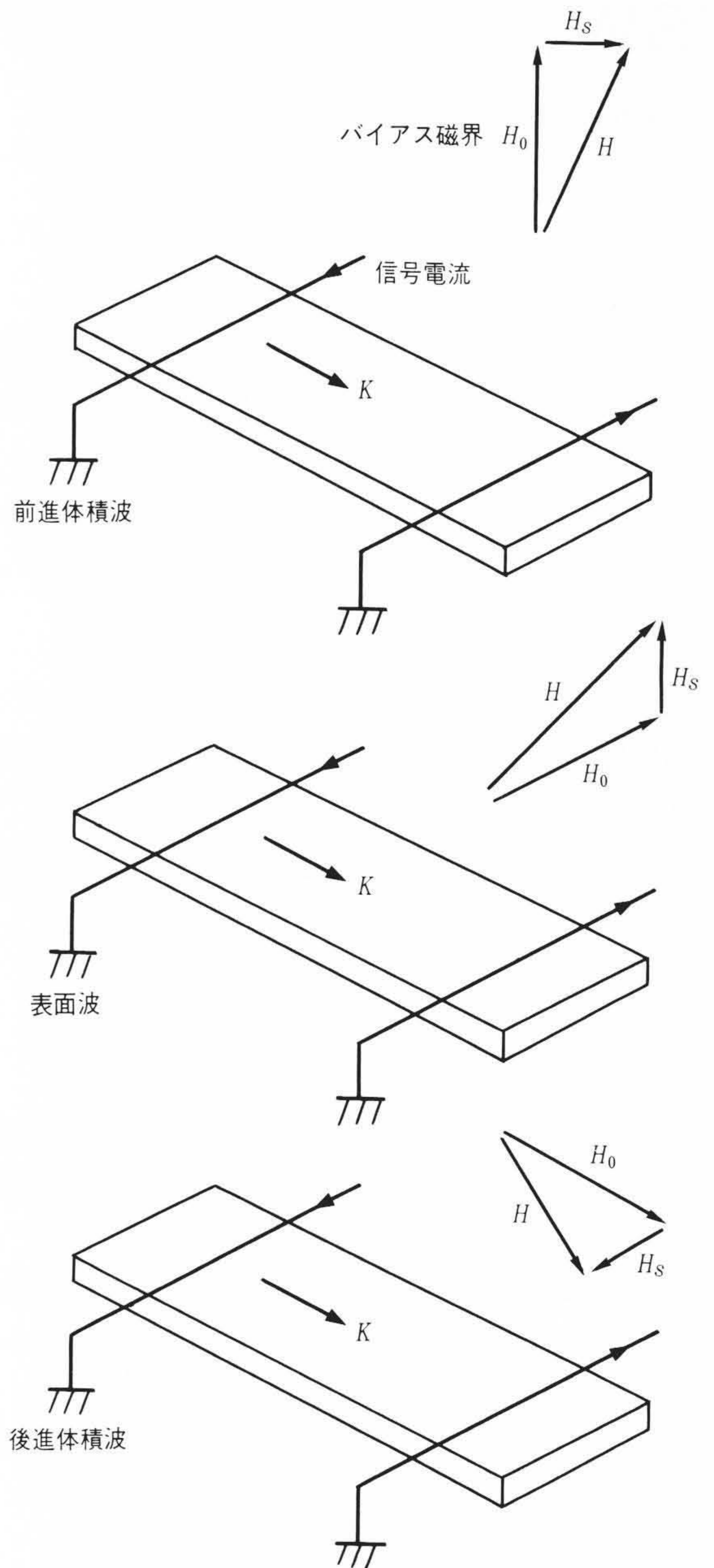
1.3 静磁波

高周波磁界 H_s が強磁性体材料の表面の影響により、一様な振幅でなくなると、隣り合うスピンはエネルギーの交換相互作用によって位相差が生じ、スピンの共鳴が波となって伝搬する。このスピン波の波長 λ_s は、マックスウェルの電磁界方程式と(2)式の μ から求まる。波長が電磁波に比べて十分に小さいために H_s の偏位電流が無視でき、高周波磁界 H_s は準静磁近似できる。スピン波のこの静磁近似がMSWと命名された由来である。こうして求めたMSWの波長 λ_s と周波数 $f_s = \omega / 2\pi$ の関係は分散方程式 $f_s = F(f_r : \lambda_s, d)$ で表される。強磁性の形状が単純な板(板厚 d)の場合を先の図1に示した。

バイアス磁界 H_0 と膜面の方向によって、スピン波の位相遅れの状態が異なる。すなわち、図2のように3種類の伝搬モードがあり、分散方程式の関数形が異なる²⁾。MSWが伝搬可能な周波数帯は、薄膜内部のバイアス磁界強度 H_0 と強磁性体の飽和磁化 $4\pi M_s$ だけで与えられ、低域と高域にそれぞれ遮断周波数が存在する。

1.4 強磁性体材料

強磁性体材料には、GGG単結晶の基板に、GaやLaなどをドーブしたYIGを液相成長させ、薄膜を形成したウェーハを用いる⁴⁾。マイクロ波帯のMSWは、群速度 $= 10 \sim 10^3 \text{ km/s}$ 、波長 $\lambda_s = 0.1 \text{ mm} \sim 10 \text{ cm}$ となる²⁾。ドーブ材によってYIGの格子



注: 略語説明 K (波数ベクトル)

図2 MSW伝搬モード 膜の表面とバイアス磁界 H_0 の方向によって、MSWは3種類の伝搬モードに分類できる。波数ベクトル K はMSWの進行方向を示し、その大きさは $|K| = 2\pi / \lambda_s$ である。

間隔をGGG単結晶基板によく整合させたウェーハは、マイクロ波帯の ΔH が0.5 Oe以下となり、SAWよりも低損失となる²⁾。最もよく使われるYIGは飽和磁化 $4\pi M_s = 0.176 \text{ T}$ であり、Ga:YIGは $4\pi M_s = 0.01 \sim 0.176 \text{ T}$ を実現できる⁵⁾。

2 平面回路化と実現機能

MSWデバイスは、その平面性すなわちプレーナ性を生かすことにより、微小球デバイスに比べて、多彩な機能が利用できる(表1)、無線システムへの用途が拡大する。

従来の微小球で実現していたデバイスが、プレーナ化できることはもちろんである。すなわち、共振子⁶⁾やこの共振子を

表1 MSWの機能と応用デバイス 強磁性体の形状を球からプレーナ(平面)化すると、MSWの用途が拡大する。

構造	機能	応用デバイス	備考
球	可変周波数	共振子, フィルタ, 発振器, 通倍器	可変幅: オクターブ
プレーナ	可変遅延, 周波数分散	遅延線, 発振器, トランスバーサルフィルタ, 方向性結合器	—
	非線形	信号エンハンサ, コンボルバ	—

トランジスタと結合させた電圧制御発振器⁷⁾, 共振子を複数個結合させたフィルタ⁸⁾は, 微小球を平面化することによって集積化のメリットが得られる。マイクロ波信号をステップリカバリダイオードで通倍し, その高調波成分からYIG微小球のバンドパスフィルタで必要な調波を選別する通倍器もプレーナ化が可能である。

平面化によって, 初めて実現する機能の第一は, マイクロ波帯の遅延線である²⁾。バイアス磁界を変化させて可変する遅延線は, レーダやエコーキャンセラに応用可能である。

実現する機能の第二は, トランスバーサル形のフィルタや方向性結合器であり, 周波数の可変性以外に, 周波数分散性を生かした用途が考えられる⁴⁾。遅延線と増幅器による発振器は, 数オクターブもの広帯域な周波数可変が実現する⁵⁾。

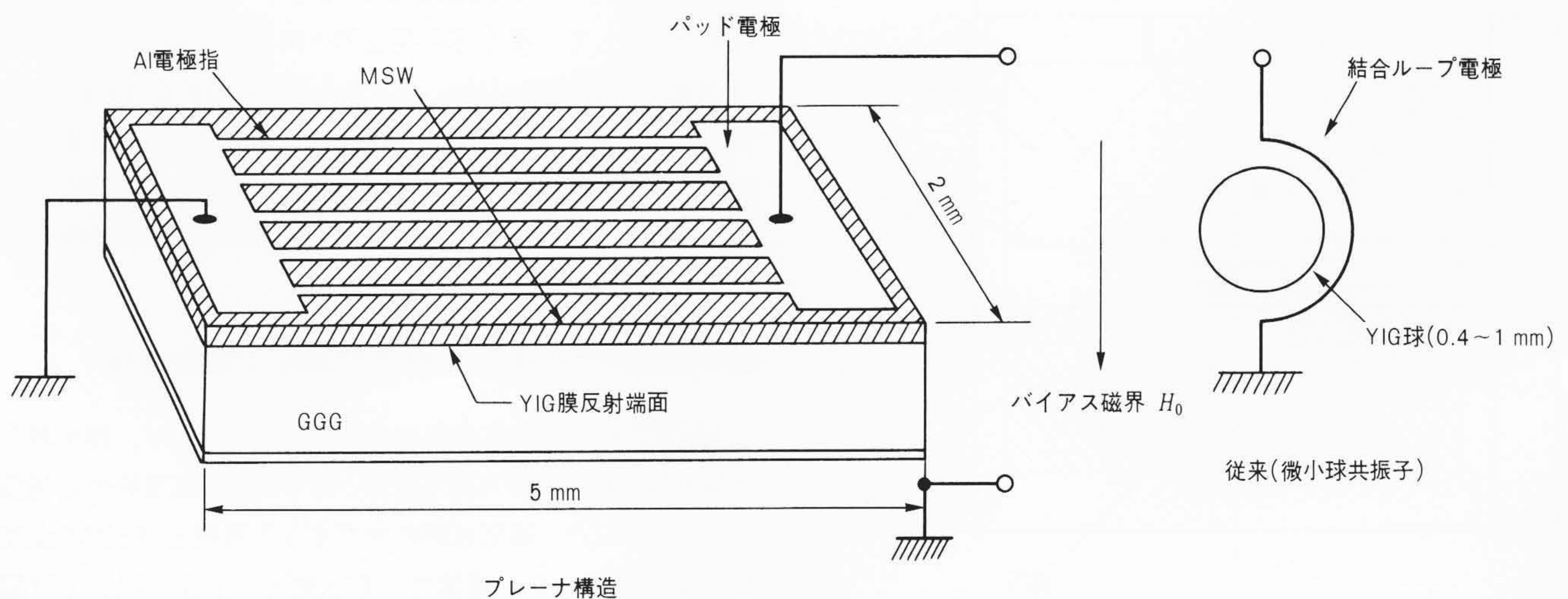
実現する機能の第三は, MSWの非線形性を利用したデバイスである。高周波磁界が強くなると, 隣接するスピン歳差運動の相互作用が無視できなくなり, スピン波に飽和現象が表

れる。すなわち, (2)式に示したテンソル μ の非線形効果を利用したデバイスとして信号対雑音エンハンサとコンボルバがあり⁵⁾, 無線通信機への用途がある。

3 MSWデバイスの実現事例: 電圧制御発振器

3.1 プレーナ共振子⁶⁾

写真食刻法を用いて完全にプレーナ化した共振子の事例を図3に示す⁶⁾。長方形のYIG/GGGチップ上に, 5本の電極指と2個のパッド電極を形成し, パッド電極と外部の集積回路はボンド線で結線する。アース端を出力端とした2開口共振子は, 5 GHz帯でバンド除去フィルタの応答特性を示す〔図4(a)〕。MSWがチップ端面で反射して発生する長手方向の寄生共振〔同図(b)〕は, YIG膜面上の複数電極指で抑圧されている⁶⁾。チップ端面はスクライバで切断した粗面であるにもかかわらず, 主共振の無負荷Qは, 微小球共振子と同等の実測値2,000~3,000である⁶⁾。



注: 略語説明 GGG (Gadolinium Gallium Garnet)
YIG (Yttrium Iron Garnet)

図3 プレーナ共振子の構造 微小球共振子を写真食刻法で実現できる完全なプレーナ構造になっている。

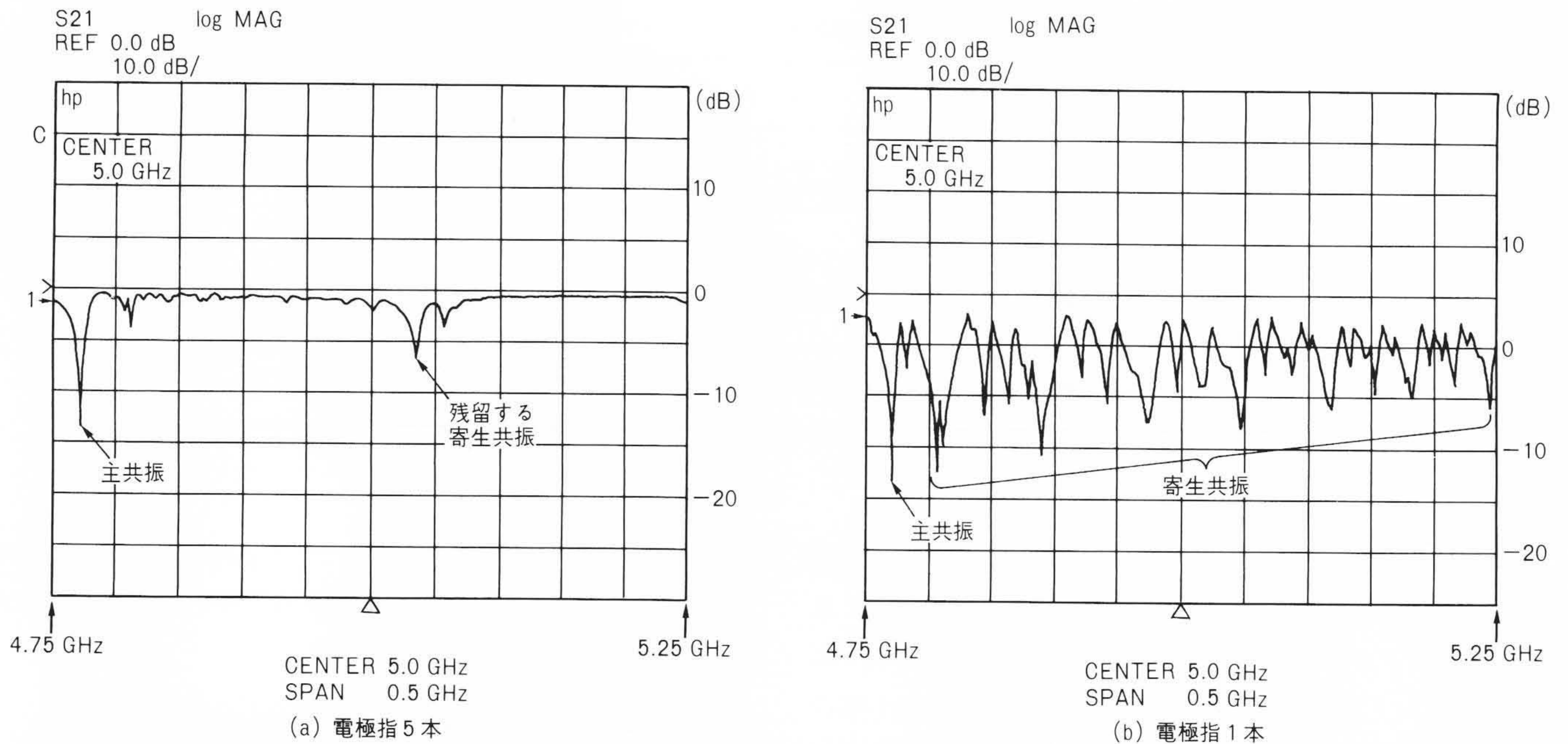


図4 プレーナ共振子の周波数応答 複数の電極指は、寄生する高次共振を抑圧している。残留する寄生共振は電極指のピッチに同期したものであり、発振回路側で抑圧する。

3.2 集積化発振器

すべての加工工程に単純な集積回路技術を適用し、プレーナ共振子をトランジスタと結合させた可変周波数発振器⁷⁾の事例を図5に示す。マイクロストリップ基板上に共振子と発振回路をマイクロ波集積化して、平面化したマイクロ波集積回路を永久磁石と駆動コイルを組み立てたバイアス磁気回路に装着する⁷⁾。その構成要素を図6に示す。これに小形の電圧電

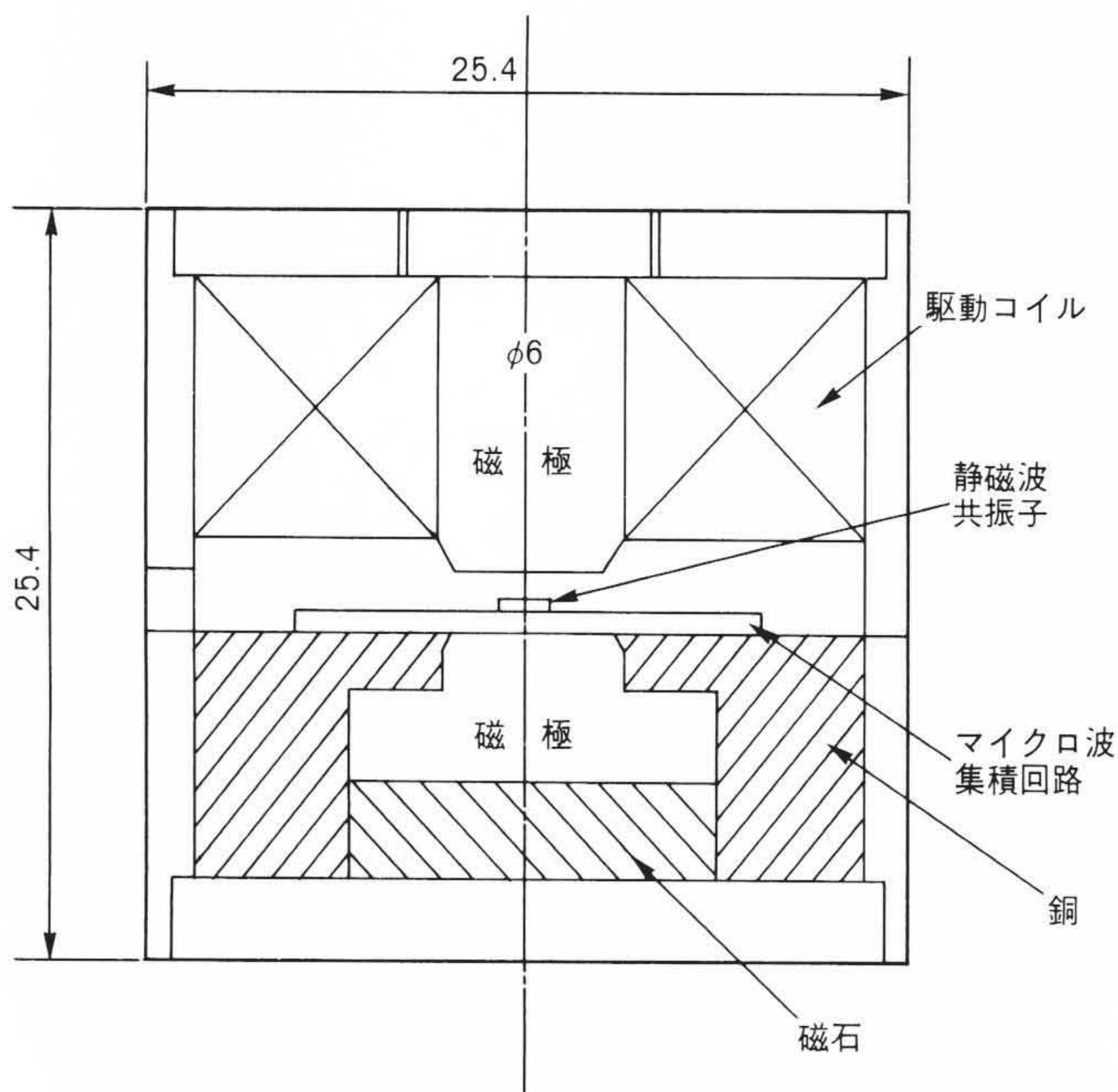


図5 MSW共振子を用いた可変周波数発振器 プレーナ構造の共振子とマイクロ波集積化した発振回路を磁気回路に装着する。磁気回路には、後述の温度補償を行っている。

流変換器を付加して、発振周波数を電圧制御する。YIG/GGG基板(直径50 mm)上に、写真食刻した共振子パターンおよびチップ共振子をスクライバで切断した部分が同図に見えている。チップ共振子の固定法も微小球デバイスに比べて簡易であり、本質的に耐震性に優れていることも明らかである。

3.3 バイアス磁界の平坦化

集積化した発振回路の特徴を生かすためには、磁気回路に後述の温度補償⁹⁾をするとともに小形化設計が重要な課題である¹⁰⁾。それには、共振子のYIG膜面上でバイアス磁界が平坦でなければならない。平坦度と小形化はトレードオフの関係にある。発振器の電気性能を一定値に設計した磁気回路の例を図7に示す¹⁰⁾。周波数5 GHz帯での共振子の高い無負荷Q値を生かして、微小球の発振器と同等の発振スペクトル純度(CN比=-115 dBc/Hz, オフセット100 Hz)を1 GHzの範囲で可変できる。周波数の可変範囲はデバイスの消費電力に依存する。電圧制御発振器では、磁気回路のコイル電流を電圧電流変換回路を用いて可変し、図6の試作例は全消費電力が約1 Wである。

4 MSWデバイス実用化の課題：温度補償

MSWデバイスの実用化にあたり重要な課題は、微小球デバイスではこれまで打ち消されていた $4\pi M_s$ の温度特性を補償することである⁹⁾。磁気回路のマグネット材料とMSWの温度係数が逆極性になり、補償できる伝搬モードは、現状では図2の前進体積波である⁹⁾。前章に述べた磁気回路は、プレーナ共振子の温度係数 $0.112\%/^{\circ}\text{C}$ をNdFeB磁石の逆特性で補償している。磁気回路の容積もYIG微小球の発振器と同等の 2.5 cm^3

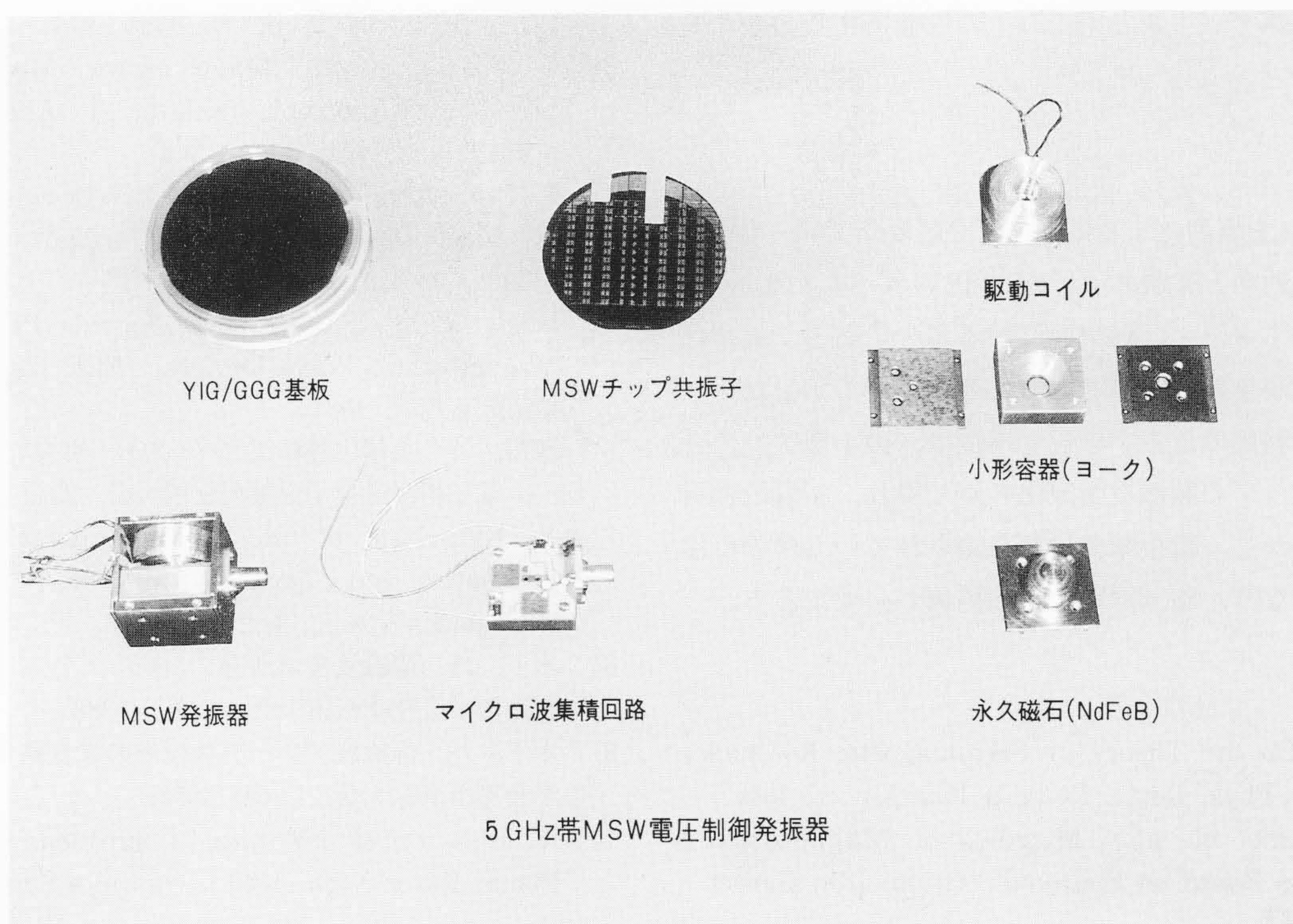


図6 試作した電圧制御発振器の構成要素 すべての加工工程に単純な集積回路技術を適用し、マイクロ波帯の発振器を集積化している(YIG/GGG基板の直径は50 mmである)。

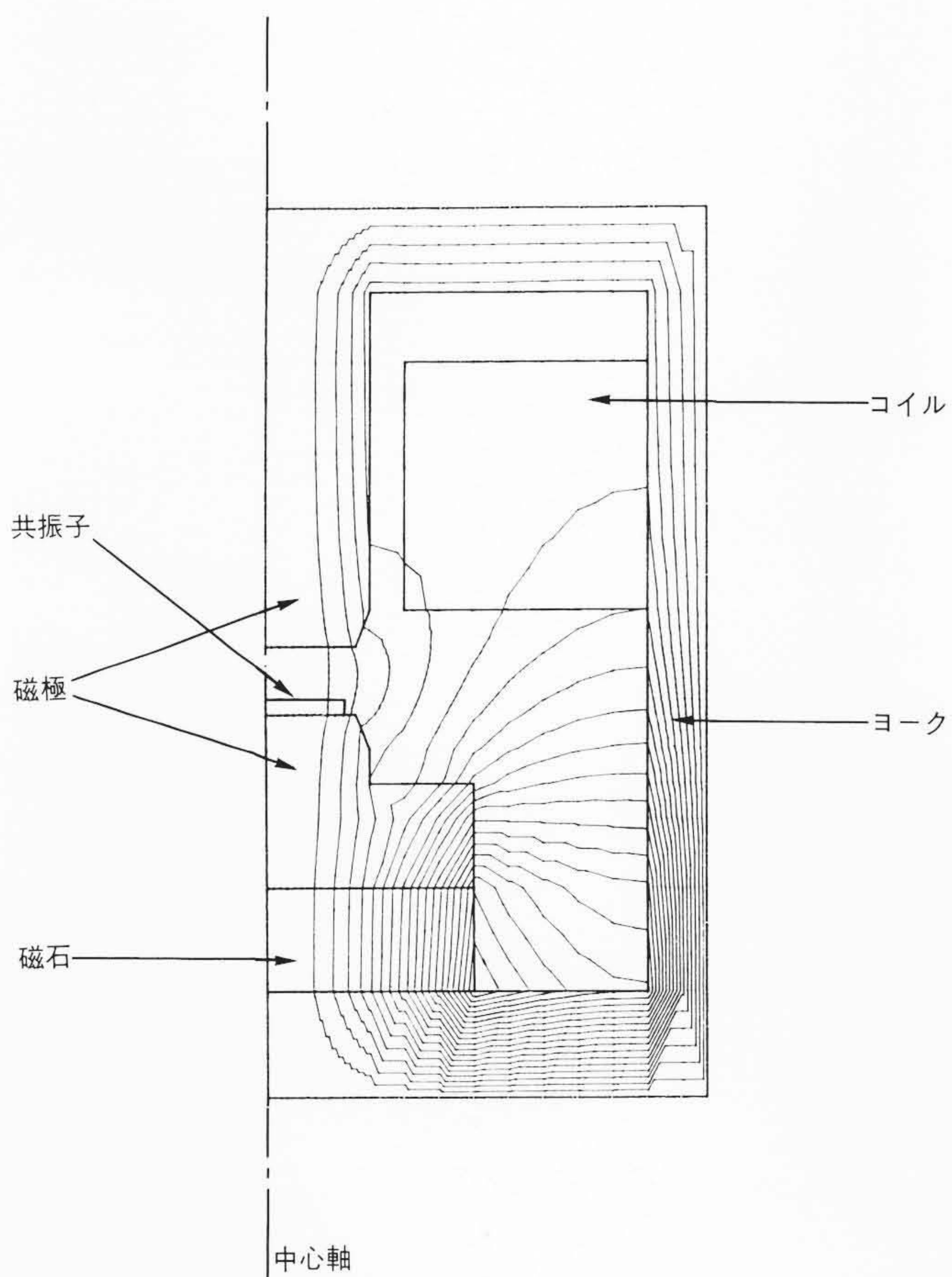


図7 温度補償した磁気回路の磁界分布 共振子を装着する個所のバイアス磁界を一様に設計し、かつ磁石の温度特性で共振子の温度特性を補償している。

になっている。温度特性をYIG微小球の発振器と同等に実現している(図8)¹⁰⁾。

MSWデバイスの実用化に重要な次の課題は、平面化する複雑な電極パターンのマスク設計(CAD)に必要なMSWトランスジューサ電極指のモデリングである⁷⁾。また、耐震性や磁気遮

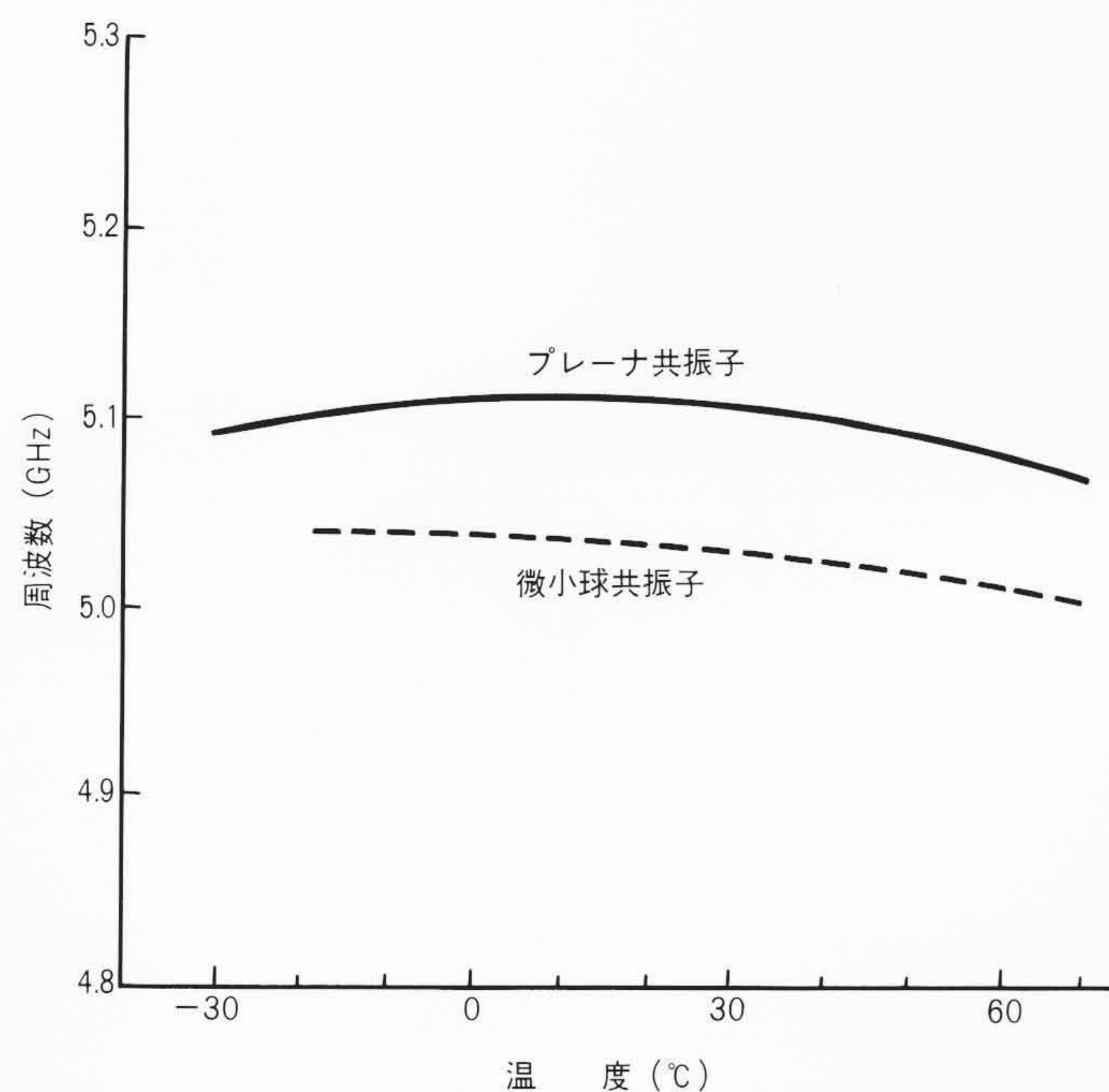


図8 MSW電圧制御発振器の温度特性 YIG微小球共振子を用いたものと同等の温度特性を実現している。

蔽(へい)も微小球デバイスと同等以上の性能にする必要がある。

5 結 言

MSWデバイスを実用化するにあたって重要なプレーナ性の観点から、研究動向と課題を示した。MSWデバイスは、バイアス磁界を印加するために磁気回路が不可欠である。集積化と小形・軽量化が重要な課題であることを事例で示した。

写真食刻法の利用できるプレーナ構造は、微小球デバイス技術に比べてチップの製法や固定法の点で優れ、本質的に耐震性が高い。しかし、微小球では打ち消されていた薄膜の温度特性が問題となり、磁気回路による補償が必要である。

参考文献

- 1) C. Kittel : On the Theory of Ferromagnetic Resonance Absorption, Phys. Rev., 73(2), p.155, Jan. 15 1948
- 2) J. D. Adame, et al. : Microwave Magnetostatic Delay devices Based on Epitaxial Yttrium Iron Garnet, Proc. IEEE, 64(5), p.794, May 1976
- 3) C. Vittria, et al. : Magnetostatic Wave Propagation Loss in an Anisotropic Insulator, J. Appl. Phys., 45(1), p.414, Jan. 1974
- 4) J. P. Castera : State of the Art in Design and Technology of MSW Devices(invited), J. Appl. Phys., 55(6), p.2506, 15 March 1984
- 5) Ishak W. S. : Microwave Signal Processing Using Magnetostatic Wave Devices, IEEE Ultrasonics Symposium, p.152, 1984
- 6) 窪田, 外 : 集積化静磁波デバイス(1)—可変周波数チップ共振子—, 電子情報通信学会部門全国大会, 234, p.2~20(1987)
- 7) Y. Kinoshita, et al. : Magnetostatic Wave Chip Resonator and Tunable Integrated Oscillator, IEEE Ultrasonics Symp., p.213, 1987
- 8) 木下, 外 : 静磁波帯域通過フィルタのプレーナ構造化, 電子情報通信学会秋季全国大会, C-375(1988)
- 9) 木下, 外 : 静磁波プレーナ共振子の温度特性, 電子情報通信学会春季全国大会, C-687(1988)
- 10) K. Itho, et al. : Voltage Controlled Oscillators with Planar Resonators, 1989 Ultrasonics Symp. p.323