

総説 1

最近のマイクロ波高誘電率セラミックスを用いた
デバイスの現状と将来

小西良弘*

Present and Future of Microwave Devices with High Dielectric Ceramics

Yoshihiro KONISHI

Recently, low loss high dielectric ceramics with 20 through 100 of the dielectric constants, have been developed. They are used mainly for the movable communication such as portable telephones and others. In this paper, ceramic dielectric resonators, filters, multiplexers and duplexers are reviewed with the performances and the principles based on the equivalent networks. The multilayer ceramic integrated circuits made by the low temperature sintering method are also described.

概論

最近では比誘電率が 20~100 で低損失なセラミックスが開発され、移動体通信などに広く用いられている。本稿ではこれらを用いた共振器やフィルタの動向と、更に筆者らが開発したフィルタ、マルチプレクサ及び分波器などの等価回路の考え方及び特性を述べる。

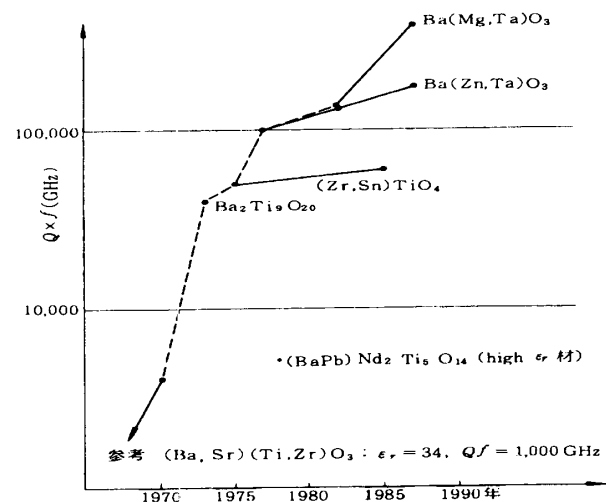
また低温焼成技術による多層集積回路の現状と将来を述べる。

1 はしがき

低損失高誘電率材料は1970年頃から急速に進歩し、とくに衛星放送の受信機に温度依存性の少ない局部発振器の共振器に用いられるようになった。最近では移動体通信機の携帯電話に小形TEMモードフィルタとして広く用いられている。以下材料の開発の進歩と種々のデバイスに関して現状と将来を説明する。

2 高誘電率材料の進歩

1970年の初期には図1のように、1GHzで約4000のQ値を持つセラミックスが開発されていた。そ



1973年	$Ba_2Ti_9O_{20}$	$\epsilon_r = 39$	$Q \times f = 40,000 \text{ GHz}$
1975年	$(Zr,Sn)TiO_4$	$\epsilon_r = 38$	$Q \times f = 50,000 \text{ GHz} \rightarrow 1985$ 年に 60,000 まで向上
1977年	$Ba(Zn,Ta)O_3$	$\epsilon_r = 30$	$Q \times f = 100,000 \text{ GHz} \rightarrow 1987$ 年に 160,000 まで向上
1982年	$Ba(Mg,Ta)O_3$	$\epsilon_r = 25$	$Q \times f = 130,000 \text{ GHz} \rightarrow 1987$ 年に 400,000 まで向上
1978年	$(BaPb)Nd_2Ti_5O_{14}$	$\epsilon_r = 90$	$Q \times f = 5,000 \text{ GHz}$

図1 各種高誘電率セラミックスの Q 値の改善を示す図

の後、高い Q 値を持ちしかも温度安定度のよい高誘電率セラミックスが改良開発されてきた。

一般に同じ材料では Q と f との積は一定であるため、この Qf 値 (f は GHz) が年代とともにどのように改良されて来たかを示すと、図1のようになる。現在開発されている種々の材料の比誘電率、Q 値及び温度特性を表1に示し、また比誘電率と $f = 10 \text{ GHz}$ に於ける Q 値の関係を図2に示し

*本学工学部電子工学科教授
1998年10月13日受理

た。

Qf値が一定である為、ミリ波など周波数の高い所ではQ値が低くなるため、最近は更にQf値の大きなものの開発が行われている。また後述のように、多層セラミック集積回路用として、セラミックス中に埋め込む金属の溶点よりも低い温度で焼成する低温焼成セラミックスでQ値の高い材料の開発も行われている。

表1 最近開発された低損失高誘電率誘電体セラミックス

材料	ϵ_r	Q_{em}	τ_f (ppm/°C)	f_m (GHz)	Ref
MgTiO ₃ -CaTiO ₃	21	8000	0	7	(1)
Ba(Mg, Ta)O ₃	25	16000	3	10	(2)
Ba(Mg, Ta)O ₃	25	35000	4	10	(3)
Ba(Sn, Mg, Ta)O ₃	25	20000	0	10	(4)
Ba(Mg, Ta)O ₃ -Ba(Zn, Ta)O ₃	27	15000	0	10	(5)
Ba(Zn, Nb)O ₃ -Ba(Zn, Ta)O ₃	30	14000	0	12	(6)
Ba(Zr, Zn, Ta)O ₃	30	10000	0	10	(7)
(Ca, Sr, Ba)ZrO ₃	30	4000	5	11	(8)
BaO-TiO ₂ -WO ₃	37	8800	2	6	(9)
(Zr, Sn)TiO ₄	38	7000	0	7	(10)
Ba ₂ Ti ₉ O ₂₀	40	8000	2	4	(11)
Sr(Zn, Nb)O ₃ -SrTiO ₃	43	5000	-5~+5	5	(5)
BaO-Sm ₂ O ₃ -5TiO ₂	77	4000	15	2	(12)
BaO-PbO-Nb ₂ O ₃ -TiO ₂	90	5000	0	1	(10)

$Q_{em} = \frac{1}{\tan \delta}$: 誘電体セラミックスのQ値の測定値

f_0 : Q値の測定周波数

ϵ_r : 誘電体セラミックスの比誘電率

これらの材料は表1から分かるように、非常に温度特性もよい。表1より更に高い誘電率の材料を表2に示す。これらはやや温度特性は悪いが、用途によっては多く用いられる。

表2 その他の高誘電率セラミックス

材料	ϵ_r	$Q_{em} f_m$	τ_f
TiO ₂	104	40000	+460
CaTiO ₃	180	7000	+910
SrTiO ₃	304	3300	+1700

さて、一般にこれらのマイクロ波誘電体セラミックスの複素誘電率 $\hat{\epsilon}(\omega)$ は次式で示される。

$$\hat{\epsilon}(\omega) - \epsilon(\infty) = \frac{4\pi\rho}{\omega_T^2 - \omega^2 + j\gamma\omega} \quad (1)$$

ただし、 $4\pi\rho$: 格子振動の強度
 ω_T : 格子振動の共鳴周波数
 γ : 格子振動の減衰定数

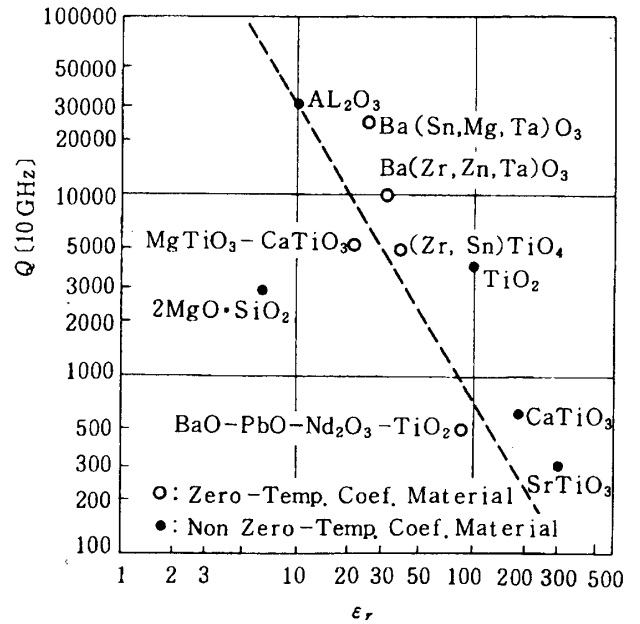


図2 各種誘電体セラミックスの比誘電率とQ値との関係

(1)式は、2種類のイオンからなるイオン結晶の一次元格子モデルから導かれ、文献(13)に示されている。

さて、 $\omega_T/2\pi$ は一般に3000~30000GHz帯にあるため、マイクロ波帯においては $\omega_T \gg \omega$ となり、これを(1)式に代入することにより、(2)式の関係が得られる。

$$\left. \begin{aligned} \epsilon''(\omega) &= \frac{4\pi\rho}{\omega_T^2} \\ \frac{1}{Q} = \tan \delta &= \frac{\epsilon''(\omega)}{\epsilon'(\omega)} = \frac{\gamma}{\omega_T^2} \omega \\ \hat{\epsilon} &= \epsilon'(\omega) - j\epsilon''(\omega) \end{aligned} \right\} (2)$$

このように比誘電率は周波数に無関係となり、また、 $\tan \delta$ は周波数に比例することになる。したがって、図2の波線で示すように、ある材料について考えると、Qf積は一定となり、これは材料のQ値を評価する基準として用いることができる。

次に、材料のQf積は誘電率が大きくなるほど一般には小さくなる。そこで、Qf積の値と比誘電率 ϵ_r との関係を表1および表2の材料について示すと、図2のようになる。将来は、 ϵ_r が大でQ値が高く、そして温度特性の良い材料の開発が重要な課題である。

3 高誘電率材料がデバイスに用いられる性質

- (1) $\frac{1}{\sqrt{\epsilon_r}}$ に小型化できる。(ε_rは誘電体の非誘電率)
- (2) 磁気的な壁が得やすい。これはモードのトラップに寄与する。一般に高誘電率誘電体と空気との境界面に平行な電界を有するモードは誘電体中にエネルギーが大部分トラップされ、また垂直な電界を有する場合には、空气中に大部分のエネルギーを持つからである。この性質の応用として次のような例がある。

(イ) 誘電体共振器

(ロ) イメージによる小形化

(例 $\frac{\lambda}{4}$ 誘電体同軸共振器は $\frac{\lambda}{2}$ 誘電体同軸共振器のイメージである。

(ハ) 誘電体 TE₀ 導波管の端面を開放面にし、その面上に形成された金属パターンによるアンテナで導波管を励振する [16]。

(ニ) 誘電体導波管の断面に平行な外周に沿って金属部を取り除く事により導波管を切り離す事ができる。また切り離される導波管の間隔によって両導波管の結合を調整できる [16]。

- (3) 異なる誘電率を持つ2つ以上の誘電体媒質を含んだ均一誘電体導波路は次のような性質を持つ。

(イ) 異なるモードに対する位相定数を変えうる。

例えば、セラミックスの2ヶの平行導体の中央にある対称面付近に空気層をもうけると、偶モードでは実効誘電率は変化しないが、奇モードでは実効誘電率は小となる。一方、単位長当りのインダクタンスは空気層を設けても変化しないために、結局奇モードの位相定数は小さくなり、従って奇モードの共振周波数は高くなる。従って2ヶの共振器は結合する。

(ロ) 異なる誘電率を持つ媒質の境界面上に発生する。円偏波が発生する。

応用例として同軸線路の中に断面の半分だけ誘電体を充てんして出来る均一導波路を考えると、誘電体と空気層との境界面に円偏波成分が発生す

る。従って例えば、境界面にフェライトをおき、そのフェライトに外部直流磁界を同軸の軸方向に加えるならばアイソレータなどの非可逆素子ができる。

4 種々の小形共振器とフィルタ

4.1 同軸共振器とフィルタ

図3の図中に示したように真中に穴のあいた円筒形セラミックスの外側の表面と穴の中に導体を厚膜技術などにより塗布してTEM同軸共振器をつくる。そして片面短絡にした $\frac{\lambda}{4}$ 共振が最も多く用いられている。断面は正方形のものも多く、移動体通信機に多く用いられている。そのQ値を計算すると図3のようになる。周波数が1GHz帯ではQ値は厚膜金属により左右され、セラミックスのQ値は殆ど無視できる。

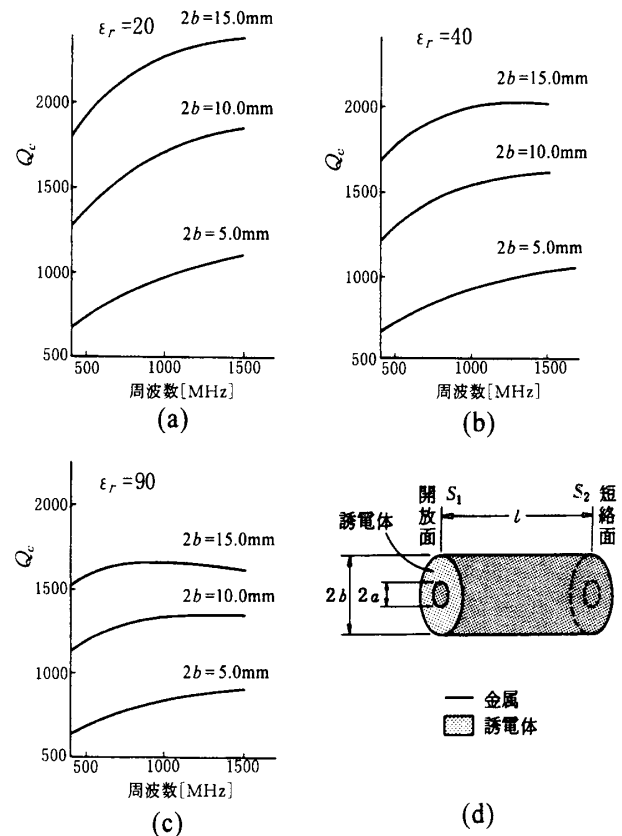


図3 誘電体同軸共振器の構造と導体損によるQ値

図3のTEM共振器をいくつも並べて結合すると、帯域通過フィルタができるが最近では図4(a)のように1つのブロックのセラミックスの中にいくつもの平行な穴をもうけそれに金属導体を塗布し

た結合線路によりフィルタがつくられる。また図4(b)のようセラミックス基板上に平行マイクロストリップ線路を配置したものもある。さて同図の如く、高誘電率材料中に空気層など他の誘電率を持つ断面構造(不均一媒質と呼ぶ)につくられた均一結合2線路には異なる位相定数の伝播モードが存在する性質を用いることができる。とくに図4(a)や(b)のような対称断面構造を持つ不均一媒質中の結合2線路を考えると、両線路を同じ位相で伝播するモード(これは偶モードと呼ばれる)と逆位相で伝播するモード(これは奇モードと呼ばれる)とがある。図4(a)の偶モードの電界は図4(d)の如くなり、また奇モードの電界は図4(c)の如くなる。従って偶モードの場合には真中の空気層には電界がないため、位相速度は空気孔がない時と同じであるが、奇モードの場合には最も電界が強い所に空気孔があるため、線路のキャパシティが小さくなる。従って位相速度は速くなる。

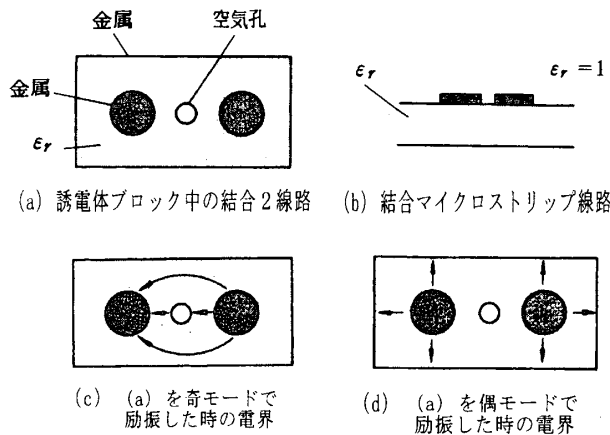


図4 不均一媒質中平行結合2線路の励振時の電界分布

いま線路長が偶モードのとき両端短絡 $\frac{\lambda_g}{2}$ または片面短絡 $\frac{\lambda_g}{4}$ 共振器を作ると、奇モードではもはや共振周波数は偶モードの共振周波数からずれ、高くなる。そこでこれらの共振周波数のずれは後述のフィルタの構成の所で述べるように、偶モードの共振器と奇モードの共振器とが結合係数

$$k = \frac{v_{po} - v_{pe}}{\tilde{v}_p} \tag{3}$$

v_{po} : 奇モードの位相速度

v_{pe} : 偶モードの位相速度

$$\tilde{v}_p = \frac{v_{po} + v_{pe}}{2}$$

を持つ2重同調フィルタができる。

4.2 導波管共振器とフィルタ

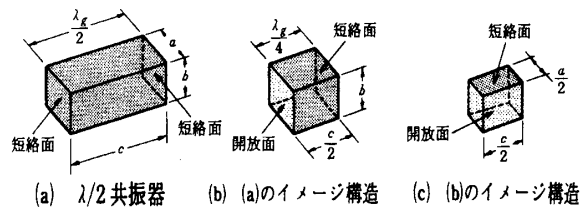


図5 TE₁₀₁誘電体共振器

例えば図5(a)のような TE₁₀₁ 共振器は $1/\sqrt{\epsilon_r}$ に小形化され、更に高誘電率セラミックスと空気の間磁氣的壁が作成できることを考慮すると、偶モードイメージを用いることにより図5(b)の如く小形化できる。更に2ヶのイメージを用いて図5(c)の如く小形化できる。この場合開放面からの輻射損による Q 値を Q_r とすると図5(a)、(b)及び(c)に対する Q 値、 $Q^{(1)}$ 、 $Q^{(2)}$ 及び $Q^{(3)}$ は(4)式の如く求まる [15]。

$$\left. \begin{aligned} \frac{1}{Q^{(1)}} &= \frac{1}{Q_\epsilon} + \frac{1}{Q_c}, \quad Q = \frac{1}{\delta} \frac{a^2 + c^2}{\frac{1}{b}(a^2 + c^2) + \frac{2}{ac}(a^3 + c^3)} \\ \frac{1}{Q^{(2)}} &= \frac{1}{Q_\epsilon} + \frac{1}{Q_c} + \frac{1}{Q_r}, \quad Q_r = \frac{3\pi^2 c \lambda_0 \epsilon_r}{32 ab} \\ \frac{1}{Q^{(3)}} &= \frac{1}{Q_\epsilon} + \frac{1}{Q_c} + \frac{1}{Q_r} \left(1 + \frac{c^2}{2a^2} \right) \end{aligned} \right\} \tag{4}$$

ここで、 Q_r は開放面からの輻射損に基づくものでありまた Q_c 及び Q_ϵ は夫々導体損及び誘電体損である。

また磁氣的壁の性質を用いると、 $\frac{\lambda}{4}$ 同軸共振器と TE₁₀₁ 共振器を組み合わせると、図6(a)の構造のフィルタが実現でき、その周波数特性は図6(b)の如くなる。 [16] [17]。

また従来の $\frac{\lambda}{2}$ 共振器を縦続接続したフィルタも図7(a)及び(b)の如く誘電体により $1/\sqrt{\epsilon_r}$ になったうえ更に半分に縮小することができる [18]。

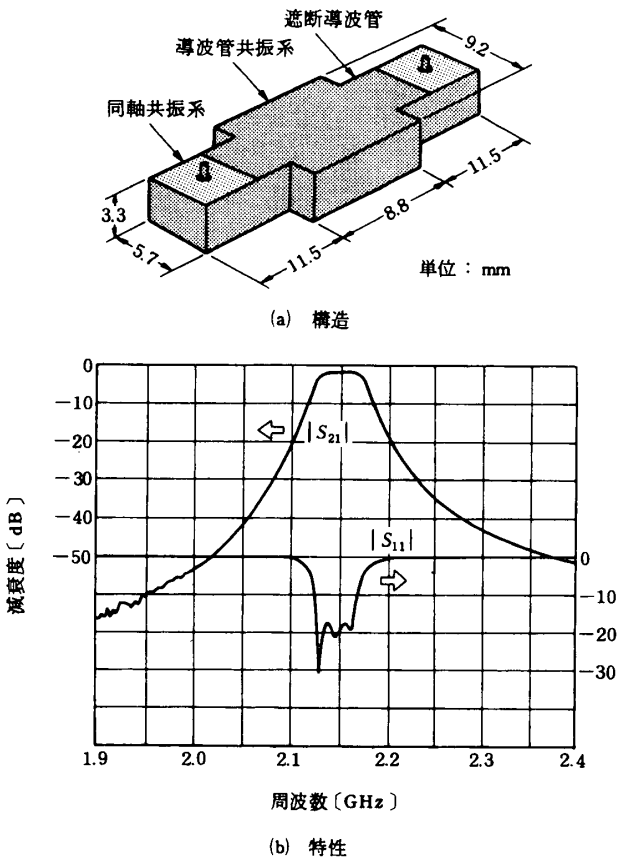


図6 同軸・導波管共振器を組み合わせた帯域通過ろ波器の一例

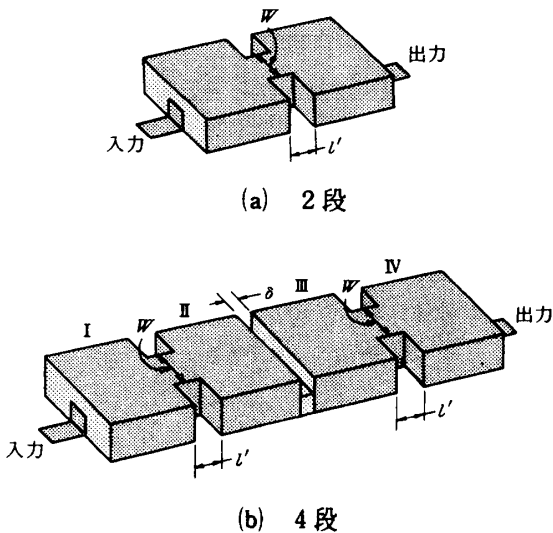


図7 $\lambda/4$ 共振系を縦続接続してできた多段B.P.F.

4.3 誘電体共振器

金属導体壁をもたない誘電体は形状や寸法に応じて共振器ができる。そしてこの共振器としてよ

く用いられる形状と、電磁界分布を示すと図8のようになる。図8において同図(b)及び(c)は誘電体外部の空気と遮へい金属箱との間にも電磁界が伝播するモードで誘電体だけで共振するものではない。従って空気中の部分のリアクティブエネルギーも共振周波数に大きく寄与している。

この他の図8(a)(d)(e)(f)(g)(h)のモードは、ほぼ誘電体のみで共振周波数がきまり、外部の金属壁は誘電体共振器からの輻射電波を遮へいする事により、誘電体共振器のQ値を高くするものである。この遮へい金属壁は空气中に漏れる高周波磁界を押しつけるため、摂動理論から共振周波数は上記の誘電体共振器単独の共振周波数よりも高くなる。これは集中定数共振回路モデルで述べると、コイルに金属を外から近づけるとコイルのインダクタンスが小さくなり共振周波数がわずかに高くなることに相当している。

さて図8(a)の TE_{016}^0 モードの共振器(同図で外側の遮へいを取り去ったもの)を遮断導波管内やマイクロストリップ基板上に配置したフィルタの例を図9に示す。

また HE_{11}^0 モード及び TM_{11}^0 モードは直交した縮退モードがあるのでこれらを用いて小形化した楕円形フィルタが報告されており[19] [20] [21] [22] [23]、また文献[21] [22]の構造を一体化改良したのも報告されている[24]。

5 デュープレクサとマルチプレクサ

5.1 TEM線路を用いたデュープレクサとマルチプレクサ

移動体通信機におけるアンテナ共用回路の送受分離回路にデュープレクサが用いられ、また多チャンネル分波回路にマルチプレクサが用いられる。これらは1つの給電点から2周波にわけたものがデュープレクサで多周波にわけたものがマルチプレクサである。従来は集中定数回路を通して各チャンネルのフィルタに分波していたが、部品のばらつきによる影響を防ぐため、我々は分布定数結合による方法を提案した[25] [26]。その構造及び等価回路を図10及び図11に示す。

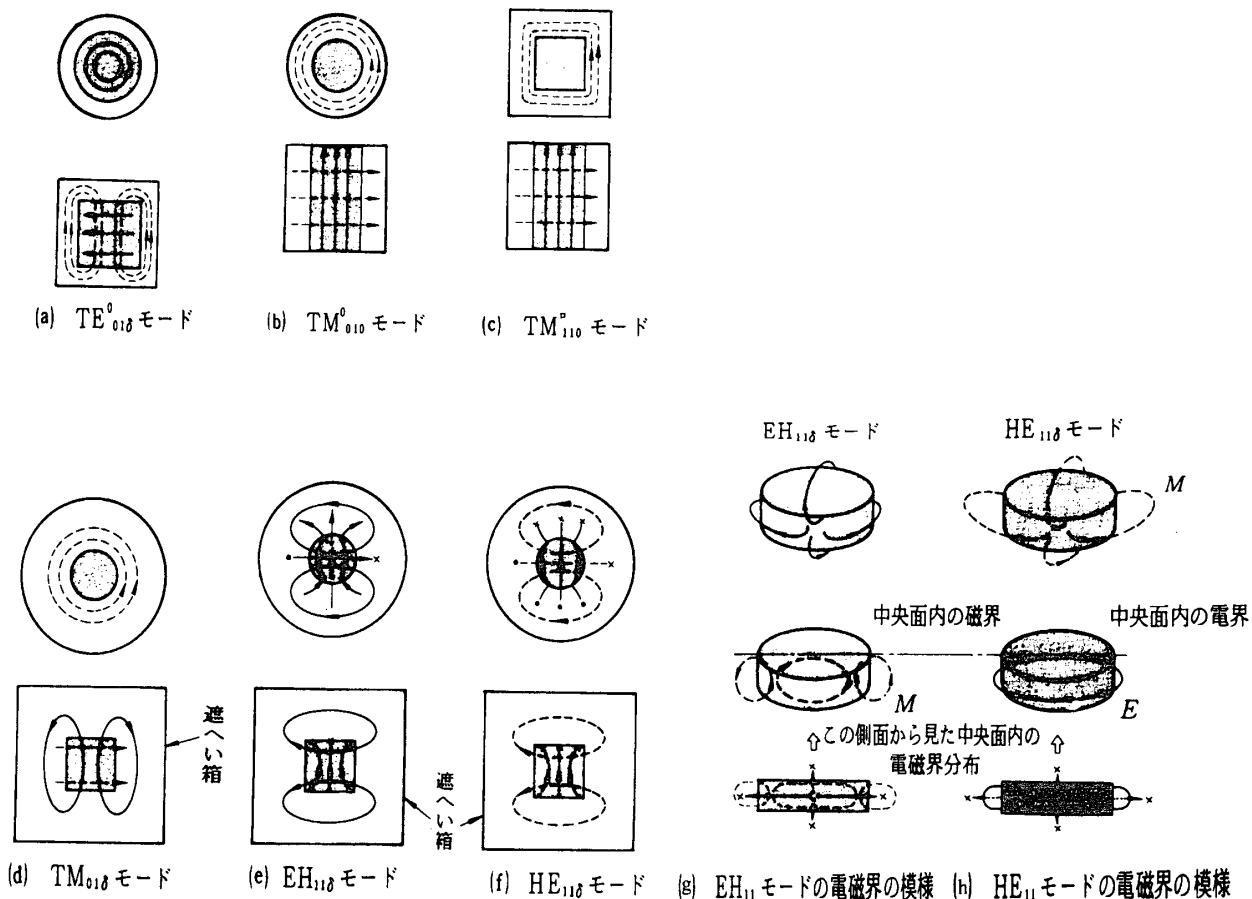


図8 主な誘電体共振器の電磁界

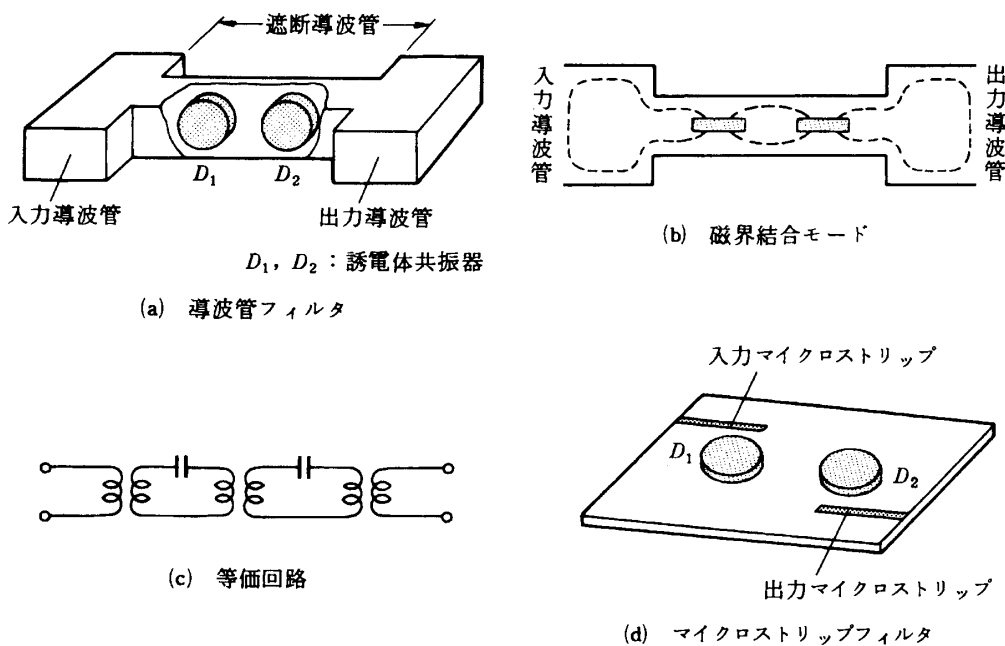


図9 帯域通路ろ波器の構成と原理図

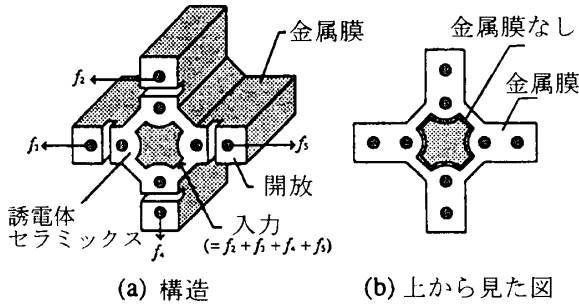
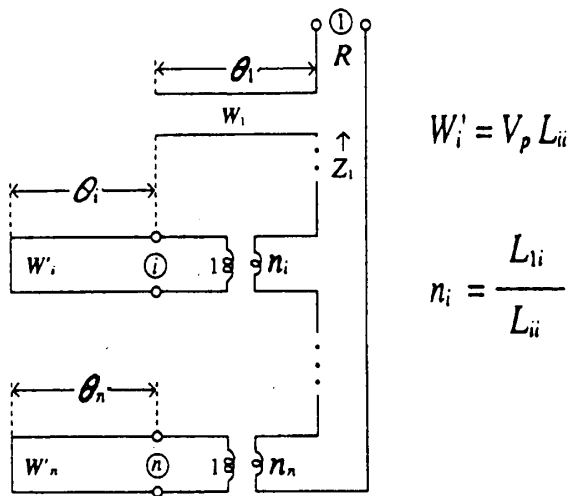


図10 マルチプレクサの構造

用いた分波器も開発されよう。

6 2バンドフィルタと分波器

移動体電話は現在1GHz帯と2GHz帯とが用いられており、将来これらの周波数帯を1つの機器で兼用できるための研究が行われている。そのため我々は2バンド帯域通過フィルタ (B.P.F.) と2バンド分波器の研究を行った。2バンドB.P.F.としては、同軸線路のTEMモードで低い周波数帯のB.P.F.の役目をもたせ、同軸線路の最低高次モードであるTE₁₁モードで高い周波数帯のB.P.F.の役目をもたせた。構造と特性を図12に示す。



V_p はTEM線路の位相速度
 L_{ii} は線路*i*と*i*との相互インダクタンス
 L_{ii} は線路*i*の自己インダクタンス

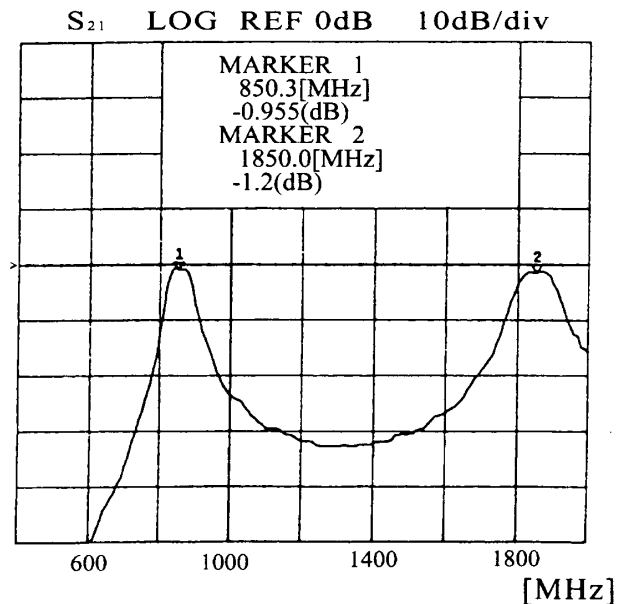
図11 図10の等価回路

この原理的な考えは、真中の中心線路と周囲の線路とをお互いにインターディジタル結合させた所にある。そしてそれぞれの分波用フィルタ回路が、遮断導波管になるようにした点である。また等価回路は1対のインターディジタル分布結合線路は図11のような等価回路である[28]ことから想像でき、また解析は多線路結合のZ行列を計算することにより得られる[26]。

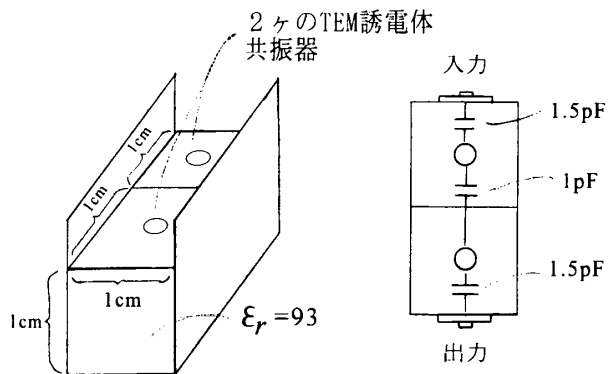
5.2 導波管形デュプレクサ

導波管分岐器にTE₀₁₈共振器を用いたデュプレクサが筆者などにより提案され[29]現用されている。

今後、セラミック導波管フィルタ[16][17][18]を



(a) 特性



(b) 構造

図12 TEM誘電体共振器のTEMモードと高次モードを用いた2バンド B.P.F.

これは1つのフィルタで2バンドを通過させるものである。次に1つに開孔に2バンドの信号が加えられた時、2つの開孔から各々のバンドが別々に取り出される2バンド分波器は次の種々の方法がある。まず主線路からフィルタに結合する方法としては、①インターディジタルによる結合と、②リアクタンス素子による結合、③主線路とフィルタの $\frac{\lambda}{4}$ 線路との間に空気孔などを挿入して不均一媒質をつくる方法がある。そこでこれらの組み合わせで次の方法が考えられる。

(i) 主線路の長さを f_1 の $\frac{\lambda_g}{4}$ に選ぶ方法

図13に示したように4通りの結合方法が考えられる。ここでインターディジタルでない並行導体はコムラインとなるので結合しないため、外部に図13(a)及び(b)に示したようにリアクタンス結合を行わなければならない。このリアクタンス結合には容量結合や誘導結合があり、何れも図13で $\sim\sim$ 印で示した開放面で結合させようとする線路間に溝を切り前者の場合は溝中に金属膜をつくり、また後者の場合には金属膜をつけなければよい。

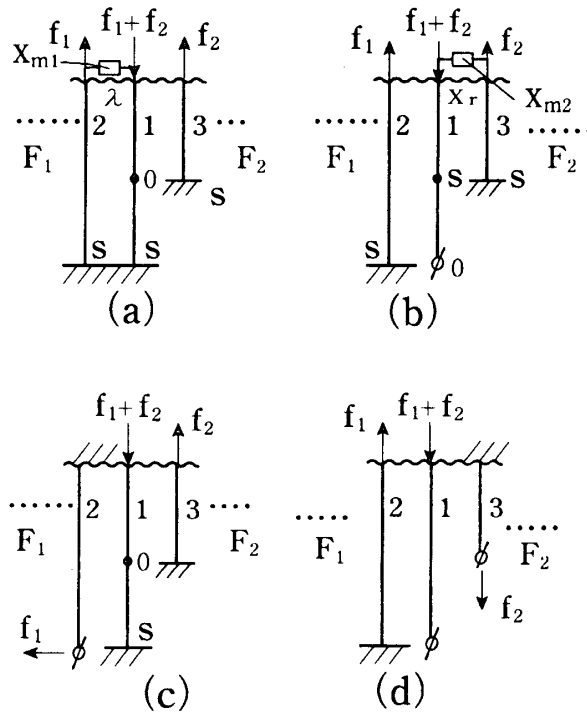


図13 主線路と f_1 帯のB.P.F. F_1 及び $f_2 (=2f_1)$ 帯のB.P.F. F_2 との結合法 (主線路長が f_1 の $\frac{\lambda_g}{4}$)

さて実際に製作する場合には図13(a)以外は全て外部導体の底面に開放面(ϕ 印の所)及び短絡面が入り組むために作り難い。そこで図13(a)の構造が好ましい。

(ii) 主線路の長さを $f_2 (=2f_1)$ の $\frac{\lambda_g}{4}$ に選ぶ方法

図14のような5通りの方法が考えられる。図14(a)では F_1 の線路と主線路とは容量結合をし F_2 の線路とはインターディジタル結合をする。そして主線路は先端開放である。(b)は底面は全て短絡で作り易いが F_1 と主線路の結合が小さい。これは F_1 の方は静電エネルギーの最大領域であるのに対して主線路は f_1 で磁気エネルギーが最大であるからである。また同図(c)も(d)も同じ理由で F_1 と主線路の結合は小さい。また(e)は F_1 と磁気結合をし F_2 とはインターディジタル結合をする。

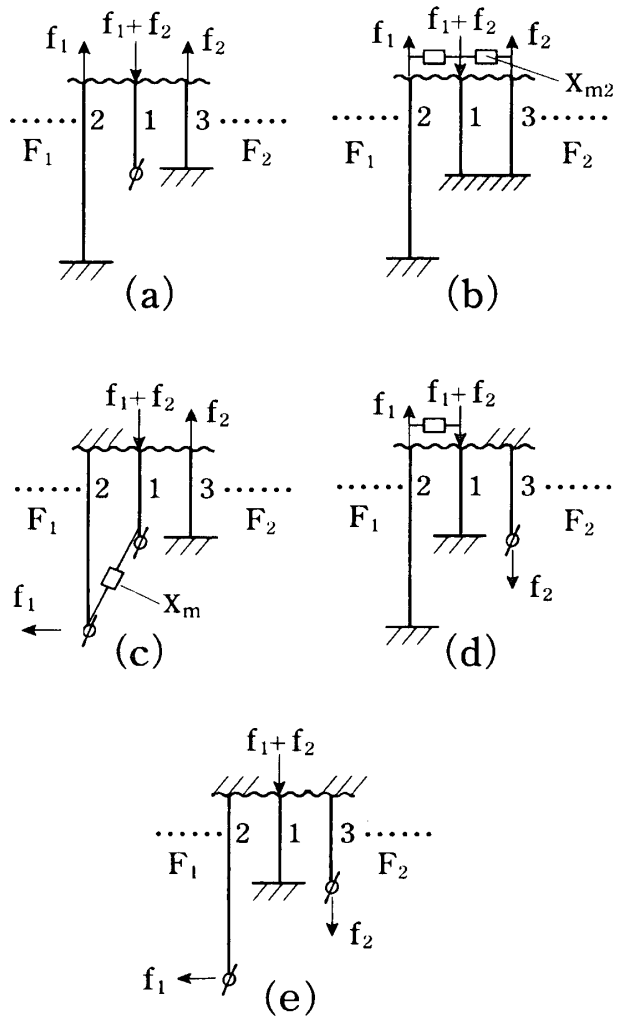


図14 主線路と F_1 及び F_2 との結合法 (主線路長が $f_2 (=2f_1)$ の $\frac{\lambda_g}{4}$)

表3 図13,14の結合法

図13		種 類	図14	
導体1-2の結合	導体1-3の結合		導体1-2の結合	導体1-3の結合
X	ID	(a)	DC	ID
ID	X	(b)	X	X
ID	ID	(c)	X	ID
ID	ID	(d)	X	ID
		(e)	DM	ID

X: 外付けリアクタンス素子又はスリット
 ID: インターデジタル結合
 DC: 分布容量結合
 DM: 分布誘導結合

以上のような意味で図13(a)の等価回路を画くと図15のようになる。図15でわかるように F_1 は主線路と X_{m1} のリアクタンスを介して並列接続し、また F_2 はインターデジタル結合なる故、理想変成器を介して直列接続されることがわかる[28]。また主線路に直列に接続された長さ ℓ の分布定数線路のインピーダンスは f_1 では ∞ 、 f_2 では短絡となる。実際の構造と特性を図16に示す[30]。また図13,14の結合法を表3にまとめた。

尚、多チャンネルフィルタや分波器は図10の構造で一部の長さを変えることにより可能である。

7 積層セラミック回路と実際例

積層セラミック回路を作るには厚さ約 $100 \mu\text{m}$ の積層セラミックスを何枚もつくり、その上に金属パターンを形成し、それらを重ねたのち焼成するため、セラミックスの焼成温度は金属の融点よりも低いことが必要である。一般に損失の少いセラミックスの焼成温度は 1300°C 以上で、これでは金属パターンが融けてしまう。そこで $900^\circ\text{C} \sim 1000^\circ\text{C}$ 以下の低温で焼成して Q 値の高いセラミックスの製造技術の開発が必要である。この低温焼成多層基板の概念は1970年代の初頭にIBMから提案されて以来、各国で開発された。現在日本で開発されている材料をまとめて見ると表4のようになる[31]~[35]。

この方法で構成した超小形 B.P.F. の例を図17に示す。この大きさは $2 \sim 3 \text{mm}$ 角で高さも 1mm 程度であり、これは移動体通信などに多く使用さ

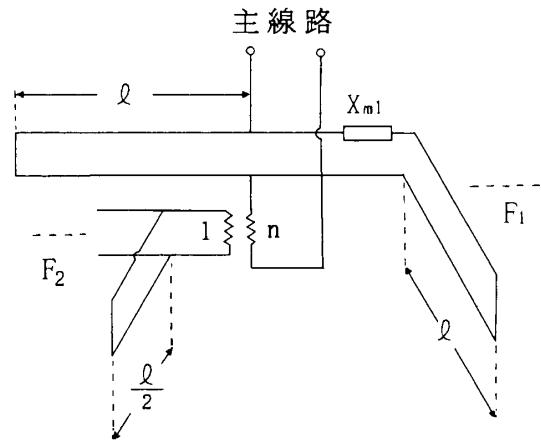


図15 図13(a)の等価回路

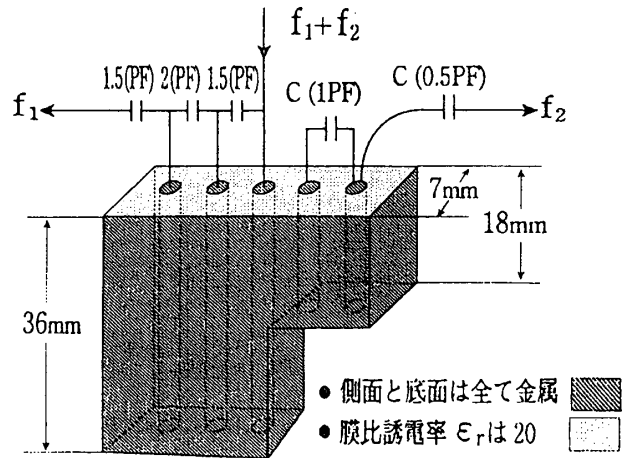


図16 (a) 2バンドフィルタの構造

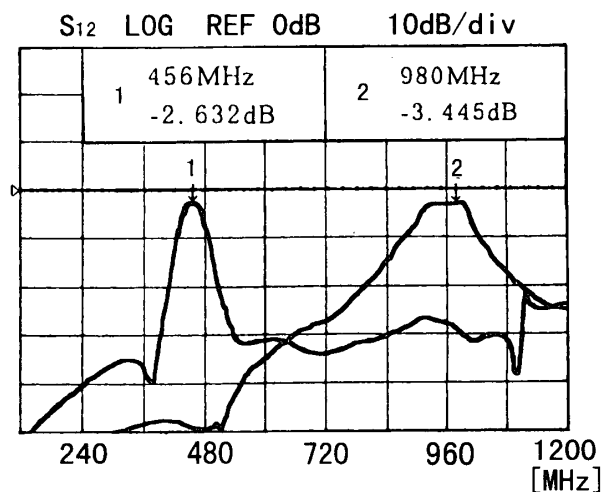


図16 (b) 2バンドフィルタの特性

れている。
 最近では以上の低温焼成技術とは逆に高温焼成後にセラミックス中に作られている定められたパターン用孔あとで金属を流し込む技術も開発されて

いる[36]。この方法によると低損失なセラミック
デバイスができよう。

表4 各種低焼成温度高誘電率材料

項目	村田製作所	住金セラミックス	日本セメント	TDK
材料系	CaZrO ₃ -ガラス系	BaO-TiO ₂ -Nd ₂ O ₃ 系 +ガラス系	Al ₂ O ₃ - ガラス系	Al ₂ O ₃ -TiO ₂ -ガラス系
誘電率	25	75	7.8	10.7
Q	*1000	**2500	1250	**2200
T _{cc} (ppm/°C)	±10		+200	
τ _f (ppm/°C)		±15		±0.5
焼成温度 (°C)	980	900	850	1000
導材料系	Cu	Ag	Ag	Ag
導体抵抗 (mΩ/□)	1.8	2.5	3~5	1.5

*: at 1MHz **: at 1GHz

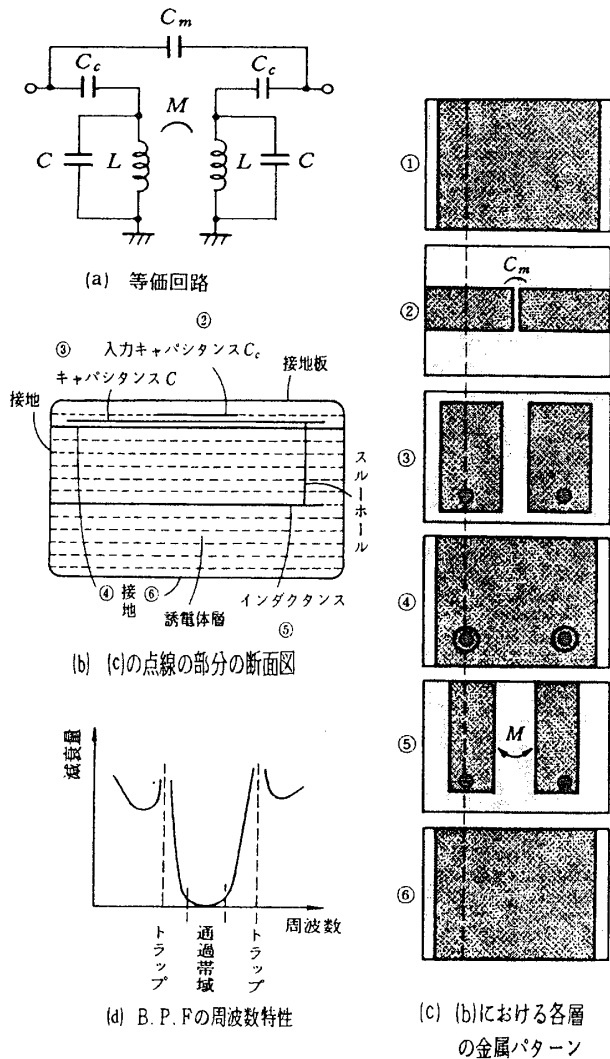


図17 積層LCマルチパスB.P.F.の等価回路と
その構造例

以上はフィルタの例であるがその他、超小形
3dB方向性結合器など従来プリント基板や多層プ
リント基板でつくられていた技術がそのまま薄形
セラミックス技術に移行されて小形マイクロ波部
品が多く開発されている。

8 あとがき

以上種々の高誘電率セラミックスについて述べ
たが将来の材料開発の目標と回路素子などについ
て述べる。

材料に関しては当面 $\epsilon_r = 200 \sim 300$ の低損失で、
温度特性の良いものが開発されると VHF帯での用
途もひろがる。また回路素子に関しては3次元セ
ラミックス集積技術の開発の他、高温焼成セラミ
ックスを用いて回路に必要な金属パターンを3次
元集積してできる回路、更にはフェライトなどを
用いた非可逆回路との融合回路の開発、また部分
的に ϵ_r を変えることの出来る材料製造技術と回路
開発が必要である。

文献

- (1) K. Wakino et al. , "Dielectric Materials for Dielectric Resonator," 1976 Joint Convention Record of Four Institutes of Electrical Engineers, Japan, No.235, 1976
- (2) S. Nomura et al. ,Japan J. Appl. Phys., 21, LG 24, 1982
- (3) T. Hiuga, K. Matsumoto and H. Ichimura, "Dielectric Properties of BMT Series Ceramics at Microwave Frequencies," IECE Tech. Rep. Japan, CPM 86-31, p.41, 1986
- (4) H. Tamura et al. , "High-Q Dielectric Resonator Material for Millimeter-Wave Frequencies," Proc. of the 3rd U.S. ;Japan Seminar on Dielectric and Piezoelectric Ceramics.
- (5) A. Takasugi, R. Kitoh ,National Convention Record of IECE Japan, SC-9-6, 1988
- (6) S. Kawashima et al. , "Ba(Zn, Ta) O₃ Ceramics with Low Dielectric Loss at Microwave Frequencies," J. Am. Ceram. Soc., 66, p. 421, 1983
- (7) H. Tamura et al. , "Improved High-Q Dielectric Resonator with Complex Perovskite Structure," J. Am. Ceram. Soc., 67, C-59, 1984
- (8) T. Yamaguchi et al. , "(Ca, Sr, Ba) Zirconate

- Ceramics for Microwave Dielectric Resonator, "Annual Rep. of Study Group on Applied Ferroelectr. in Japan, 29, XXIX-159-1017, 1980
- (9) S. Nishigaki et al. "Dielectric Properties of Bao-TiO₂-WO₃ System at Microwave Frequency," Abstract of the 3rd U.S. Japan Seminar on Dielectric and Piezoelectric Ceramics, p.55, 1986
- (10) K. Wakino et al. "Microwave Characteristics of (Zr, Sn) TiO₄ and BaO-PbO-Nd₂O₃-TiO₂ Dielectric Resonators," Am. Ceram. Soc., 67, p.421, 1983
- (11) H. M. O'Bryan, Jr., et al., "A New Bao-TiO₂ Compound with Temperature-Stable High Permittivity and Low Microwave Loss," J. Am. Ceram. Soc., 57, p.450, 1974
- (12) S. Kawashima et al., "Microwave Dielectric Materials and Their Applications," "1980 Annual Rep. of Study Group on Applied Ferroelectr. in Japan, 30, XXX-164-1036, 1980
- (13) W. Cochran, "The Dynamics of Atoms in Crystals," Edward Arnold Ltd., London, 1973
- (14) Y. Konishi et al. "Novel Dielectric-Waveguide Components," IEEE Trans, on Broadcasting, Vol.34, pp.2-8, March,1988
- (15) 小西、「マイクロ波回路の基礎と応用」5、pp.350~353.
- (16) Y. Konishi, "Novel Dielectric Waveguide Components -Microwave Applications of New Ceramic Materials," Proceeding of the IEEE Vol.79, June 1991
- (17) Y. Konishi, US PAT.4837535
- (18) Y. KONISHI, US PAT. 5410285
- (19) S. J. Fiedziuszko, "Dual-Mode Dielectric Resonator Loaded cavity Filters," IEEE Trans. MTT, MTT-30, No.9, 1311~1316
- (20) S. J. Fiedziuszko, D. Doust, S. Holme, "Satellite L-Band Output Multiplexer Utilizing single and Dual Mode Dielectric Resonators," 1989 IEEE MTT-S Digest, pp683~686
- (21) Richard J. Cameron, Wai-Cheung Tang, and Chandra M.Kusia, "Advances in Dielectric Loaded Filters and Multiplexers for Communications Satellites," AIAA90. 0880-CP. pp 823~828
- (22) 小林、古川、"TM₁₁₀二重モード角柱誘電体共振器を用いた4段帯域通過フィルタ", 昭和59年 電子通信学会光・電波部門全国大会 202
- (23) 小林、古川、"TM₁₁₀誘電体共振器を用いる3.7~4.2GHz帯用楕円関数形フィルタ", 昭和61年度電子通信学会全国大会742
- (24) 西川、石川、服部、小林、"直交結合TM₁₁₀モード誘電体共振器を用いた4GHz帯域フィルタ", 電子情報通信学会論文誌C-1 Vol J73-C-1 pp 54~60 1990年2月
- (25) Y. KONISHI, US PAT 5216394
- (26) Y. Baba, H. Fujiwara, T. Kusakabe and Y. Konishi, "Theoretical Concept of Proposod Multiplexer with Coupled Quarter Wave Distributed Lines in High Dielectric Material," IEEE Trans, on Broadcasting, Vol.34, pp.2~8, March,1988
- (27) Y. Baba, Y. Okuma, and Y. Konishi, "A Multiplexer with Coupled Quarter Wave Distributed Lines in High Dielectric Ceramics," IEEE Trans, on, Broadcasting, Vol.40, pp.223~227, Dec.1994.
- (28) 小西、「高周波・マイクロ波回路の構成法」、総合電子出版社、pp.126
- (29) 小西、松村、"マイクロ波分光器", 昭和51年度電子通信学会光・電波部門全国大会192
- (30) 小西、中島、坂本、"高誘電率セラミックスを用いた2バンド分波器", 電子通信学会マイクロ波研究会1998年11月
- (31) 高谷、『電子技術』、12、1992(別冊) pp.36-41, 1992年
- (32) 萬代他、日本セラミック協会、第11回電子材料部会セミナー予稿集、pp.45-49,1993年
- (33) 大川他、日本セラミック協会、第10回電子材料部会セミナー予稿集、A13, pp.25-26, 1990年
- (34) 上赤他、FC report, Vol.8, No.7, pp.227-279, 1990年
- (35) 川村他、日本セラミック協会、1992年年会予稿集、p.346, 1992年
- (36) T. Miura, Y. Konishi, "Lumped Element Circulator by Ceramic Integrated Circuit Technology," E Trans. on Broadcasting, Vol.41 Sep, 1995 pp.101~106