

(19)日本国特許庁(JP)

(12)特許公報(B2)

(11)特許番号
特許第7550403号
(P7550403)

(45)発行日 令和6年9月13日(2024.9.13)

(24)登録日 令和6年9月5日(2024.9.5)

(51)国際特許分類		F I			
G 0 1 R	27/02	(2006.01)	G 0 1 R	27/02	R
G 0 1 R	27/26	(2006.01)	G 0 1 R	27/26	T

請求項の数 7 (全17頁)

(21)出願番号	特願2020-169744(P2020-169744)	(73)特許権者	000000044 A G C 株式会社 東京都千代田区丸の内一丁目5番1号
(22)出願日	令和2年10月7日(2020.10.7)	(73)特許権者	304021417 国立大学法人東京工業大学 東京都目黒区大岡山二丁目12番1号
(65)公開番号	特開2022-61671(P2022-61671A)	(74)代理人	100103894 弁理士 家入 健
(43)公開日	令和4年4月19日(2022.4.19)	(72)発明者	戸村 崇 東京都目黒区大岡山2丁目12番1号 国立大学法人東京工業大学内
審査請求日	令和5年9月4日(2023.9.4)	(72)発明者	廣川 二郎 東京都目黒区大岡山2丁目12番1号 国立大学法人東京工業大学内
		(72)発明者	加賀谷 修

最終頁に続く

(54)【発明の名称】 共振器特性測定方法

(57)【特許請求の範囲】

【請求項1】

共振器寸法に対する感度係数および不確かさを評価し、前記感度係数が小さくなるような共振器寸法を決定する第1のステップと、

前記第1のステップで決定された前記共振器寸法を有する共振器の通過特性を測定し、前記共振器の共振周波数と無負荷Q値を算出する第2のステップと、

前記第2のステップで算出された前記共振周波数と前記共振器寸法の実測値とを用いて、前記共振器の比誘電率を算出する第3のステップと、

前記第2のステップで算出された前記無負荷Q値と、前記第3のステップで算出された前記比誘電率と、前記共振器寸法の実測値と、を用いて、前記共振器の広壁面の導電率、狭壁面の導電率、及び誘電正接を算出する第4のステップと、を備える、

共振器特性測定方法。

【請求項2】

前記共振器は直方体状の共振器であり、前記共振器の幅方向の寸法をa、厚さ方向の寸法をb、長手方向の寸法をdとした場合、

前記第1のステップにおいて、比誘電率と寸法aの感度係数式、比誘電率と共振周波数の感度係数式、寸法dと寸法aの感度係数式、及び寸法dと共振周波数の感度係数式を作成し、

前記無負荷Q値の標準不確かさ、前記寸法a、b、dの標準不確かさ、前記共振周波数の標準不確かさ、及び前記比誘電率の標準不確かさを仮定し、

10

20

前記寸法 a、b、d を変化させたときの感度係数を算出する、
請求項 1 に記載の共振器特性測定方法。

【請求項 3】

前記第 1 のステップにおいて、前記無負荷 Q 値の誤差が所定の値以下になるように隣接共振周波数の間隔を設定した後、前記感度係数が小さくなるような共振器寸法を決定する、請求項 1 または 2 に記載の共振器特性測定方法。

【請求項 4】

前記隣接共振周波数の間隔の設定は、

二共振器以上の共振器並列回路を仮定し、

共振周波数と無負荷 Q 値 Q_u を与えて通過特性を計算し、

前記通過特性から無負荷 Q 値 Q_{um} を計算し、

前記 Q_u と前記 Q_{um} の差が所定の値以下になるように隣接共振周波数の間隔を設定することを実施される、

請求項 3 に記載の共振器特性測定方法。

【請求項 5】

前記第 2 のステップにおいて、互いに対向するように配置された第 1 及び第 2 の導体基板と、前記第 1 の導体基板と前記第 2 の導体基板との間に配置された金属ビアと、を備え、前記第 1 の導体基板と前記第 2 の導体基板と前記複数の金属ビアとで囲まれた空間が導波路として機能する共振器の通過特性を測定する、請求項 1 ~ 4 のいずれか一項に記載の共振器特性測定方法。

【請求項 6】

前記第 3 のステップにおいて、

比誘電率 ϵ_r を未知数とし、共振器寸法 a、b、d、共振周波数 f_{mnl} 、共振モード次数 m、l、比透磁率 μ_r を既知数とし、

前記共振器寸法の実測値と下記の一次方程式とを用いて前記共振器の比誘電率を算出する、

請求項 1 ~ 5 のいずれか一項に記載の共振器特性測定方法。

【数 1】

$$m^2 x_1 + n^2 x_2 + l^2 x_3 - \left(\frac{2f_{mnl}}{c} \right)^2 \mu_r x_4 = 0$$

ただし、前記共振器は直方体状の共振器であり、a は前記共振器の幅方向の寸法、b は厚さ方向の寸法、d は長手方向の寸法であり、 $n = 0$ であり、 x_1 、 x_2 、 x_3 、 x_4 を下記のように定義する。

【数 2】

$$x_1 = 1/a^2, x_2 = 1/b^2, x_3 = 1/d^2, x_4 = \epsilon_r$$

【請求項 7】

前記第 4 のステップにおいて、

前記共振器の広壁面の導電率 σ_f 、狭壁面の導電率 σ_r, t 、及び誘電正接 $\tan \delta$ を未知数とし、共振器寸法 a、b、d、透磁率 μ 、波数 k、自由空間のインピーダンス、角周波数 ω 、無負荷 Q 値 Q_u 、及び共振モード次数 l を既知数とし、

下記の一次方程式を用いて、前記共振器の広壁面の導電率、狭壁面の導電率、及び誘電正接を算出する、

請求項 1 ~ 6 のいずれか一項に記載の共振器特性測定方法。

【数 3】

10

20

30

40

50

$$\frac{1}{Q_u} = a_1 x_5 + a_2 x_6 + x_7$$

ただし、前記共振器は直方体状の共振器であり、 a は前記共振器の幅方向の寸法、 b は厚さ方向の寸法、 d は長手方向の寸法であり、 $a_1 = \frac{(1^2 a^3 d + a d^3) \times [2^2 / \{(k a d)^3 - b\}]}{\mu / 2}$ 、 $a_2 = \frac{(2 1^2 a^3 b + 2 b d^3) \times [2^2 / \{(k a d)^3 - b\}]}{\mu / 2}$ であり、 x_5 、 x_6 、 x_7 を下記のように定義する。

【数 4】

$$\frac{1}{\sqrt{\sigma_f}} = x_5, \frac{1}{\sqrt{\sigma_{r,t}}} = x_6, \tan \delta = x_7$$

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は共振器特性測定方法に関する。

【背景技術】

【0002】

ミリ波帯などの高周波帯で用いられる共振器の一つとして導波管励振共振器がある。導波管励振共振器は、例えば、高周波帯におけるアンテナや導波路として使用できる。特許文献 1 には、積層型導波管線路に関する技術が開示されている。また、特許文献 2 には、被測定導体板の導電率を容易に測定できる高周波導電率測定装置に関する技術が開示されている。

【先行技術文献】

【特許文献】

【0003】

【文献】特開 2010 - 34826 号公報

【文献】特開 2015 - 227850 号公報

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0004】

所定のデバイスに適用可能な共振器を設計する際は、高周波帯における共振器の導電率や誘電正接を求める必要がある。例えば、直方体状の共振器の場合は、広壁面の導電率、狭壁面の導電率、及び誘電正接を求める必要がある。しかしながら、特許文献 2 に開示されている技術では、これらの値を一度に求めることができないため、共振器の特性を求める際に煩雑になるという問題がある。

【0005】

上記課題に鑑み本発明の目的は、共振器の特性を容易に求められる共振器特性測定方法を提供することである。

【課題を解決するための手段】

【0006】

本発明の一態様にかかる共振器特性測定方法は、
共振器寸法に対する感度係数および不確かさを評価し、前記感度係数が小さくなるような共振器寸法を決定する第 1 のステップと、
前記第 1 のステップで決定された前記共振器寸法を有する共振器の通過特性を測定し、前記共振器の共振周波数と無負荷 Q 値を算出する第 2 のステップと、
前記第 2 のステップで算出された前記共振周波数と前記共振器寸法の実測値とを用いて、前記共振器の比誘電率を算出する第 3 のステップと、

10

20

30

40

50

前記第 2 のステップで算出された前記無負荷 Q 値と、前記第 3 のステップで算出された前記比誘電率と、前記共振器寸法の実測値と、を用いて、前記共振器の広壁面の導電率、狭壁面の導電率、及び誘電正接を算出する第 4 のステップと、を備える。

【 0 0 0 7 】

上述の共振器特性測定方法において、

前記共振器は直方体状の共振器でもよく、前記共振器の幅方向の寸法を a、厚さ方向の寸法を b、長手方向の寸法を d とした場合、

前記第 1 のステップにおいて、比誘電率と寸法 a の感度係数式、比誘電率と共振周波数の感度係数式、寸法 d と寸法 a の感度係数式、及び寸法 d と共振周波数の感度係数式を作成し、

前記無負荷 Q 値の標準不確かさ、前記寸法 a、b、d の標準不確かさ、前記共振周波数の標準不確かさ、及び前記比誘電率の標準不確かさを仮定し、

前記寸法 a、b、d を変化させたときの感度係数を算出してもよい。

【 0 0 0 8 】

前記第 1 のステップにおいて、前記無負荷 Q 値の誤差が所定の値以下になるように隣接共振周波数の間隔を設定した後、前記感度係数が小さくなるような共振器寸法を決定してもよい。

【 0 0 0 9 】

前記隣接共振周波数の間隔の設定は、

二共振器以上の共振器並列回路を仮定し、

共振周波数と無負荷 Q 値 Q_u を与えて通過特性を計算し、

前記通過特性から無負荷 Q 値 Q_{um} を計算し、

前記 Q_u と前記 Q_{um} の差が所定の値以下になるように隣接共振周波数の間隔を設定することで実施されてもよい。

【 0 0 1 0 】

前記第 2 のステップにおいて、互いに対向するように配置された第 1 及び第 2 の導体基板と、前記第 1 の導体基板と前記第 2 の導体基板との間に配置された金属ビアと、を備え、前記第 1 の導体基板と前記第 2 の導体基板と前記複数の金属ビアとで囲まれた空間が導波路として機能する共振器の通過特性を測定してもよい。

【 0 0 1 1 】

前記第 3 のステップにおいて、

比誘電率 ϵ_r を未知数とし、共振器寸法 a、b、d、共振周波数 f_{mnl} 、共振モード次数 m、l、比透磁率 μ_r を既知数とし、

前記共振器寸法の実測値と下記の一次方程式とを用いて前記共振器の比誘電率を算出してもよい(ただし、前記共振器は直方体状の共振器であり、a は前記共振器の幅方向の寸法、b は厚さ方向の寸法、d は長手方向の寸法であり、 $n = 0$ であり、 x_1 、 x_2 、 x_3 、 x_4 を下記のように定義する)。

【数 1】

$$m^2 x_1 + n^2 x_2 + l^2 x_3 - \left(\frac{2f_{mnl}}{c} \right)^2 \mu_r x_4 = 0$$

【数 2】

$$x_1 = 1/a^2, x_2 = 1/b^2, x_3 = 1/d^2, x_4 = \epsilon_r$$

【 0 0 1 2 】

前記第 4 のステップにおいて、

前記共振器の広壁面の導電率 σ_f 、狭壁面の導電率 σ_r 、t、及び誘電正接 $\tan \delta$ を未

10

20

30

40

50

知数とし、共振器寸法 a 、 b 、 d 、透磁率 μ 、波数 k 、自由空間のインピーダンス、角周波数、無負荷 Q 値 Q_u 、及び共振モード次数 l を既知数とし、

下記の一次方程式を用いて、前記共振器の広壁面の導電率、狭壁面の導電率、及び誘電正接を算出してもよい（ただし、前記共振器は直方体状の共振器であり、 a は前記共振器の幅方向の寸法、 b は厚さ方向の寸法、 d は長手方向の寸法であり、 $a_1 = (l^2 a^3 d + a d^3) \times [2 \sqrt{\{(k a d)^3 - b\}}] \times (\mu / 2)^{1/2}$ 、 $a_2 = (2 l^2 a^3 b + 2 b d^3) \times [2 \sqrt{\{(k a d)^3 - b\}}] \times (\mu / 2)^{1/2}$ であり、 x_5 、 x_6 、 x_7 を下記のように定義する）。

【数 3】

$$\frac{1}{Q_u} = a_1 x_5 + a_2 x_6 + x_7$$

10

【数 4】

$$\frac{1}{\sqrt{\sigma_f}} = x_5, \frac{1}{\sqrt{\sigma_{r,t}}} = x_6, \tan \delta = x_7$$

【発明の効果】

【0013】

本発明により、共振器の特性を容易に求められる共振器特性測定方法を提供できる。

20

【図面の簡単な説明】

【0014】

【図 1】実施の形態にかかる共振器の一例を示す斜視図である。

【図 2】実施の形態にかかる共振器の構成例を示す斜視図である。

【図 3】実施の形態にかかる共振器の構成例を示す上面図である。

【図 4】実施の形態にかかる共振器特性測定方法を説明するためのフローチャートである。

【図 5】図 4 のステップ S 1 の動作の詳細を説明するためのフローチャートである。

【図 6】図 4 のステップ S 2 における通過特性の測定結果の一例を示すグラフである。

【図 7】図 4 のステップ S 2 における Q 値の算出方法を説明するためのグラフである。

30

【発明を実施するための形態】

【0015】

以下、図面を参照して本発明の実施の形態について説明する。

まず、本実施の形態にかかる共振器特性測定方法を適用する共振器について説明する。

図 1 は、本実施の形態にかかる共振器の一例を示す斜視図である。図 1 に示すように、共振器 1 は直方体状の共振器であり、 x 軸方向の長さが a 、 y 軸方向の長さが b 、 z 軸方向の長さが d の構造体である。

【0016】

共振器 1 の xz 面には結合スロット 11、12 が形成されている。具体的には、結合スロット 11 は、共振器 1 の z 軸方向マイナス側に設けられており、結合スロット 12 は、共振器 1 の z 軸方向プラス側に設けられている。結合スロット 11、12 のサイズは、 x 軸方向の長さが l 、 z 軸方向の長さが w である。例えば、共振器 1 の内部は空洞であり、結合スロット 11 から導入された高周波は、共振器 1 の内部を伝搬した後、結合スロット 12 から導出される。

40

【0017】

図 2、図 3 は、本実施の形態にかかる共振器の構成例を示す斜視図および上面図である。図 2、図 3 に示す共振器 2 は、導波管励振 SIW (Substrate Integrated Waveguide) 共振器であり、2 枚の導体基板 31、32 と複数の金属ビア (貫通導体) 33 とを用いて構成されている。導体基板 31 は上側 (y 軸方向プラス側) に配置されており、導体基板 32 は下側 (y 軸方向マイナス側) に配置されている。導体基板 31 と導体基板 32 と

50

の間には、複数の金属ビア 3 3 が導波路を形成するように配置されている。つまり、図 2、図 3 に示す共振器 2 は、導体基板 3 1 と導体基板 3 2 と複数の金属ビア 3 3 とで囲まれた空間が導波路として機能する。なお、2 枚の導体基板 3 1、3 2 で挟まれる空間は空洞であってもよく、また誘電体材料が配置されていてもよい。

【0018】

共振器 2 の導体基板 3 2 側の面には結合スロット 2 1、2 2 が形成されている。具体的には、結合スロット 2 1 は、共振器 2 の z 軸方向マイナス側に設けられており、結合スロット 2 2 は、共振器 2 の z 軸方向プラス側に設けられている。結合スロット 2 1 には導波管 3 5 が接続されており、結合スロット 2 2 には導波管 3 6 が接続されている。導波管 3 5、3 6 の y 軸方向マイナス側は、ネットワークアナライザ（不図示）と接続されている。例えば、ネットワークアナライザで生成された高周波は、導波管 3 5 および結合スロット 2 1 を介して共振器 2 に導入される。共振器 2 に導入された高周波は、共振器 2 を通過した後、結合スロット 2 2 および導波管 3 6 を介してネットワークアナライザへと伝達される。以下で説明する図 4 のステップ S 2 では、このような構成を備える共振器 2 を用いて、共振器の通過特性を測定する。

10

【0019】

次に、本実施の形態にかかる共振器特性測定方法について説明する。図 4 は、本実施の形態にかかる共振器特性測定方法を説明するためのフローチャートである。本実施の形態にかかる共振器特性測定方法は、下記の第 1 のステップから第 4 のステップを備える。

【0020】

第 1 のステップは、共振器寸法に対する感度係数および不確かさを評価し、感度係数が小さくなるような共振器寸法を決定するステップである（図 4 のステップ S 1）。

20

第 2 のステップは、第 1 のステップで決定された共振器寸法を有する共振器の通過特性を測定し、共振器の共振周波数と無負荷 Q 値を算出するステップである（図 4 のステップ S 2）。

第 3 のステップは、第 2 のステップで算出された共振周波数と共振器寸法の実測値とを用いて、共振器の比誘電率を算出するステップである（図 4 のステップ S 3）。

第 4 のステップは、第 2 のステップで算出された無負荷 Q 値と、第 3 のステップで算出された比誘電率と、共振器寸法の実測値と、用いて、共振器の広壁面の導電率、狭壁面の導電率、及び誘電正接を算出するステップである（図 4 のステップ S 4）。

30

【0021】

以下、本実施の形態にかかる共振器特性測定方法について、図 4 に示すフローチャートを用いて詳細に説明する。なお、以下では、図 1 に示した構造を備える共振器 1 の特性を測定する方法について説明する。

【0022】

図 4 のステップ S 1 では、共振器寸法に対する感度係数および不確かさを評価し（ステップ S 1 - 1）、感度係数が小さくなるような共振器寸法を決定する（ステップ S 1 - 2）。具体的には、仮定条件を定めて、図 1 に示した構造を備える共振器 1 に対する感度係数および不確かさを評価する。

【0023】

図 5 は、図 4 のステップ S 1 の動作の詳細を説明するためのフローチャートである。図 5 に示すように、ステップ S 1 では、まず、感度係数式を作成する（ステップ S 1 1）。

40

【0024】

下記の式は合成不確かさの一般式であり、 u_{f_i} は、 f_i の合成不確かさであり、 u_{x_j} は、 x_j の不確かさである。 f_i / x_j は感度係数である。また、 a 、 b 、 d は図 1 に示した共振器 1 の寸法であり、 r は比誘電率であり、 ϵ_f は広壁面の導電率、 ϵ_r 、 t は狭壁面の導電率であり、 $\tan \delta$ は誘電正接であり、 Q_u は無負荷 Q 値である。

【0025】

【数 5】

50

$$u_{f_i}^2 = \sum_j \left(\frac{\partial f_i}{\partial x_j} u_{x_j} \right)^2$$

$$f_i = \{d, \varepsilon_r\}, x_j = \{a, b, f_k\}$$

$$f_i = \{\sigma_f, \sigma_{r,t}, \tan \delta\}, x_j = \{a, b, d, \varepsilon_r, f_r, Q_u\}$$

10

【 0 0 2 6 】

また、下記の式は感度係数の一般式である。

【 0 0 2 7 】

【数 6】

$$Ax=b$$

$$A = \begin{pmatrix} l_1^2 & -(2f_{1,0,l_1}/c)^2 \mu_r \\ l_2^2 & -(2f_{1,0,l_2}/c)^2 \mu_r \\ \vdots & \vdots \\ l_N^2 & -(2f_{1,0,l_N}/c)^2 \mu_r \end{pmatrix}$$

20

$$x = (x_3, x_4)^T$$

$$b = -\frac{1}{a^2} (1, 1, \dots, 1)^T$$

30

$$x_3 = 1/d^2, x_4 = \varepsilon_r$$

$$x = \min_x \|Ax - b\|_2^2 = A_s^{-1} b = \begin{cases} A^{-1} b \\ (A^T A)^{-1} A^T b \end{cases}$$

40

【 0 0 2 8 】

ステップ S 1 1 では、上述の合成不確かさの一般式と感度係数の一般式とを用いて、各パラメータの感度係数式を作成する。

【 0 0 2 9 】

具体的には、比誘電率 ε_r と寸法 a の感度係数式は下記の通りである。

【数 7】

50

比誘電率 ε_r と寸法 a

$$\frac{\partial \varepsilon_r}{\partial a} = \frac{\partial \varepsilon_r}{\partial x_4} \sum_i \frac{\partial x_4}{\partial b_i} \frac{\partial b_i}{\partial a}$$

$$\frac{\partial \varepsilon_r}{\partial x_4} = 1$$

$$\frac{\partial x_4}{\partial b_i} = \begin{cases} (A^{-1})_{2,i} \\ ((A^T A)^{-1} A^T)_{2,i} \end{cases}$$

$$\frac{\partial b_i}{\partial a} = \frac{2}{a^3}$$

【 0 0 3 0 】

また、比誘電率 ε_r と共振周波数 f の感度係数式は下記の通りである。

【数 8】

比誘電率 ε_r と共振周波数 f

$$\frac{\partial \varepsilon_r}{\partial f_{1,0,l}} = \frac{\partial \varepsilon_r}{\partial x_4} \sum_j \frac{\partial x_4}{\partial (A_s)_{2,j}} \frac{\partial (A_s)_{2,j}}{\partial f_{1,0,l}}$$

$$\frac{\partial \varepsilon_r}{\partial x_4} = 1$$

$$A_s = \begin{cases} A^{-1} \\ (A^T A)^{-1} A^T \end{cases}$$

$$\frac{\partial x_4}{\partial (A_s)_{2,j}} = b_i$$

【 0 0 3 1 】

また、寸法 d と寸法 a の感度係数式は下記の通りである。

【数 9】

10

20

30

40

50

寸法dと寸法a

$$\frac{\partial d}{\partial a} = \frac{\partial d}{\partial x_3} \sum_i \frac{\partial x_3}{\partial b_i} \frac{\partial b_i}{\partial a}$$

$$\frac{\partial d}{\partial x_3} = -\frac{1}{2} x_3^{-3/2} = -\frac{1}{2} d^3$$

10

$$\frac{\partial x_3}{\partial b_i} = (A_s)_{1,i} = \begin{cases} (A^{-1})_{1,i} \\ ((A^T A)^{-1} A^T)_{1,i} \end{cases}$$

$$\frac{\partial b_i}{\partial a} = \frac{2}{a^3}$$

【 0 0 3 2 】

20

また、寸法 d と共振周波数 f の感度係数式は下記の通りである。

【 数 1 0 】

寸法dと共振周波数f

$$\frac{\partial d}{\partial f_{10l_i}} = \frac{\partial d}{\partial x_3} \sum_j \frac{\partial x_3}{\partial (A_s)_{1,j}} \frac{\partial (A_s)_{1,j}}{\partial f_{10l_i}}$$

$$\frac{\partial d}{\partial x_3} = -\frac{1}{2} x_3^{-3/2} = -\frac{1}{2} d^3$$

30

$$\frac{\partial x_3}{\partial (A_s)_{1,i}} = b_i$$

【 0 0 3 3 】

次に、不確かさを求めるために測定による値の標準不確かさを仮定する（ステップ S 1 2）。一例を挙げると、無負荷 Q 値 Q_u の標準不確かさを 0.3%、寸法 a、b、d の標準不確かさを 0.01%、共振周波数 f の標準不確かさを 0.01%、比誘電率の標準不確かさを 0.3% と仮定する。

40

【 0 0 3 4 】

そして、各パラメータを変化させたときの感度係数を算出する（ステップ S 1 3）。一例を挙げると、解析条件として、周波数を 5.7 ~ 9.5 GHz、比誘電率を 2.18、誘電正接を 0.001、広壁面の導電率を 1.82×10^7 S/m、狭壁面の導電率を 1.12×10^7 S/m と設定して感度係数を算出する。

【 0 0 3 5 】

その後、感度係数が小さくなるような共振器寸法を決定する（図 4 のステップ S 1 - 2）。例えば、共振器寸法 a は小さく設定する。共振器寸法 b は、比誘電率 ϵ_r および寸法 d には影響しないが、大きくすると狭壁面の導電率と誘電正接の不確かさが減少し、広壁

50

面の導電率の不確かさが増加する。共振器寸法 d は、大きくすると全てのパラメータで不確かさが減少する。しかし、共振器寸法 d を大きくした場合はモード数が増加するので、共振周波数の差が小さくなり、隣の周波数の影響を受けて Q 値が変化する。

【0036】

以下、感度係数が小さくなるような共振器寸法を決定する場合について、図5のステップ $S14 \sim S19$ を用いて説明する。ステップ $S14 \sim S19$ では、隣接共振周波数の間隔の無負荷 Q 値への影響を評価する。すなわち、共振器長 d を大きくすると共振周波数の差が小さくなり、隣の共振周波数の影響を受けて Q 値が変化してしまうため、隣接共振周波数の間隔の無負荷 Q 値への影響を評価する。

【0037】

まず、二共振器並列回路を仮定する(ステップ $S14$)。次に、共振周波数と無負荷 Q 値 Q_u を与え、通過特性を計算する(ステップ $S15$)。そして、通過特性から無負荷 Q 値 Q_{um} を計算する(ステップ $S16$)。その後、2つ以上の共振周波数の間隔 f による、 Q_u と Q_{um} の差を評価する(ステップ $S17$)。そして、所定の誤差範囲を満たすように共振周波数間隔 f を設定する(ステップ $S18$)。例えば、無負荷 Q 値 Q_u 、 Q_{um} の誤差が 0.1% 以下になるように、共振周波数間隔 f を設定する。上記条件では、無負荷 Q 値の誤差を 0.1% 以下にするには、共振周波数の間隔 f が $f > 0.02$ を満たすようにする。本実施の形態では、 Q_u と Q_{um} の誤差が所定の誤差範囲を満たすように、ステップ $S15 \sim S18$ の処理を繰り返す。その後、感度係数が小さくなるような共振器寸法を決定する(ステップ $S19$)。なお、本実施の形態では、隣接共振周波数を評価するために、少なくとも二共振器並列回路を用いればよく、例えば二共振器よりも多い並列数、つまり二共振器以上の共振器並列回路としてもよい。

【0038】

次に、ステップ $S1$ で決定された共振器寸法を有する共振器の通過特性を測定し、共振器の共振周波数と無負荷 Q 値を算出する(図4のステップ $S2$)。例えば、図2、図3に示した構成を備える共振器2を準備する。このとき、ステップ $S1$ で決定された共振器寸法 a 、 b 、 d を有するように共振器2を構成する。そして、共振器2の通過特性を測定する(ステップ $S2-1$)。

【0039】

具体的には、共振器2が備える結合スロット21に導波管35を接続し、結合スロット22に導波管36を接続する。また、導波管35、36の y 軸方向マイナス側にネットワークアナライザ(不図示)を接続する。そして、ネットワークアナライザで高周波を生成し、この高周波を導波管35および結合スロット21を介して共振器2に導入する。共振器2に導入された高周波は、共振器2を通過した後、結合スロット22および導波管36を介してネットワークアナライザへと伝達される。このような構成を備える共振器2を用いて、共振器の通過特性を測定する。

【0040】

次に、測定した共振器の通過特性を用いて、共振器の共振周波数と無負荷 Q 値を算出する(ステップ $S2-2$)。図6は、ステップ $S2$ における通過特性の測定結果の一例を示すグラフである。図6に示すように、共振周波数は通過量 $S21$ がピークになる周波数である。

【0041】

図7は、ステップ $S2$ における Q 値の算出方法を説明するためのグラフである。図7に示すように、共振周波数 f_0 のピーク値から $3dB$ 小さい値における、低周波側の周波数を f_1 、高周波側の周波数を f_2 とすると、負荷 Q 値 Q_1 は下記の式を用いて求められる。換言すると、 $3dB$ 帯域幅の通過特性を用いて負荷 Q 値 Q_1 を求める。

【数11】

$$\text{負荷}Q\text{値 } Q_1 = \frac{f_0}{f_2 - f_1}$$

10

20

30

40

50

【 0 0 4 2 】

また、結合スロット 2 1、2 2 と導波管 3 5、3 6 の挿入損失 IL_0 は下記の式を用いて求められる。

【数 1 2】

$$\text{挿入損失 } IL_0 = -20 \log |S_{21}(f_0)|$$

【 0 0 4 3 】

そして、無負荷 Q 値 $Q_{u,m}$ は、負荷 Q 値 Q_l と挿入損失 IL_0 を用いて、下記の式のように表せる。

【数 1 3】

$$\text{無負荷 Q 値 } Q_{u,m} = Q_l \frac{1}{1 - 10^{-IL_0/20}}$$

【 0 0 4 4 】

無負荷 Q 値 $Q_{u,m}$ は、共振の鋭さを示す値であり、 $Q_{u,m}$ が大きいほど損失が少ない。

【 0 0 4 5 】

次に、ステップ S 2 で算出された共振周波数と共振器寸法の実測値とを用いて、共振器の比誘電率を算出する（図 4 のステップ S 3）。具体的には、以下の方法を用いて共振器の比誘電率を算出する。

【 0 0 4 6 】

前提条件として、共振器寸法 a 、 b 、 d 、及び比誘電率 ϵ_r を未知数とする。また、共振周波数 f_{mnl} 、共振モード次数 m 、 n 、 l 、透磁率 μ_r を既知数とする。

【 0 0 4 7 】

図 1 に示した構成の共振器 1 において、共振周波数 f_{mnl} は、下記の式で表される。なお、 c は光速である。

【数 1 4】

$$f_{mnl} = \frac{c}{2\pi\sqrt{\epsilon_r\mu_r}} \sqrt{\left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2 + \left(\frac{l\pi}{d}\right)^2}$$

【 0 0 4 8 】

上記式を下記の式のように変形する。

【数 1 5】

$$\left(\frac{2f_{mnl}}{c}\right)^2 \epsilon_r \mu_r = \left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2 + \left(\frac{l}{d}\right)^2$$

【 0 0 4 9 】

そして、 x_1 、 x_2 、 x_3 、 x_4 を次のように定義する。

【数 1 6】

$$x_1 = 1/a^2, x_2 = 1/b^2, x_3 = 1/d^2, x_4 = \epsilon_r$$

【 0 0 5 0 】

すると、上記式は、 x_1 、 x_2 、 x_3 、 x_4 を用いて次のように表される。

【数 1 7】

10

20

30

40

50

$$m^2 x_1 + n^2 x_2 + l^2 x_3 - \left(\frac{2f_{mnl}}{c} \right)^2 \mu_r x_4 = 0$$

【 0 0 5 1 】

ここで、 $n = 0$ であるので上記式は下記のように表される。

【 数 1 8 】

$$m^2 x_1 + l^2 x_3 - \left(\frac{2f_{mnl}}{c} \right)^2 \mu_r x_4 = 0 \Leftrightarrow Ax = 0$$

10

【 0 0 5 2 】

ここで、共振器寸法 a 、 b 、 d は、ステップ S 2 で用いた共振器の寸法を機械的に測定することで求められる。よって、 x_1 、 x_3 は既知の値となる。したがって、上記式は連立一次方程式に帰着するので、 $N = 2$ で厳密解を、 $N > 2$ で最小二乗解を算出することができる。このようにステップ S 3 では、共振器寸法の実測値と上述の一次方程式とを用いて共振器の比誘電率 ϵ_r を算出できる。

【 0 0 5 3 】

次に、ステップ S 2 で算出された無負荷 Q 値と、ステップ S 3 で算出された比誘電率と、共振器寸法の実測値と、用いて、共振器の広壁面の導電率、狭壁面の導電率、及び誘電正接を算出する（図 4 のステップ S 4）。具体的には、以下の方法を用いて共振器の広壁面の導電率、狭壁面の導電率、及び誘電正接を算出する。

20

【 0 0 5 4 】

前提条件として、共振器の広壁面の導電率 σ_f 、狭壁面の導電率 σ_r 、 σ_t 、及び誘電正接 $\tan \delta$ を未知数とする。また、共振器寸法 a 、 b 、 d 、透磁率 μ 、波数 k 、角周波数、無負荷 Q 値 Q_u 、共振モード次数（ z 軸方向） l を既知数とする。

【 0 0 5 5 】

図 1 に示した構成の共振器 1 において、無負荷 Q 値 Q_u 、 a は、下記の式で表される。下記の式より、共振器の壁面を流れる電流に応じて無負荷 Q 値が決定されるといえる。なお、 k は波数、 Z_0 は自由空間のインピーダンスであり、 $R_{i,j}$ 、 $\sigma_{i,j}$ は、 i 面内における j 方向に流れる電流に対する表皮抵抗および導電率である。

30

【 数 1 9 】

$$Q_{u,a} = \frac{(kad)^3 b \eta}{2\pi \left(2l^2 a^3 b R_{xy,y} + 2bd^3 R_{yz,y} + l^2 a^3 d R_{xz,z} + ad^3 R_{xz,x} \right)}$$

$$R_{i,j} = \sqrt{\frac{\omega \mu}{2\sigma_{i,j}}} \quad \text{表皮抵抗}$$

40

$$\sigma_{i,j} \quad \text{導電率}$$

【 0 0 5 6 】

また、無負荷 Q 値 Q_u は、次の関係を有する。

【 数 2 0 】

50

$$\frac{1}{Q_u} = \frac{1}{Q_c} + \frac{1}{Q_d}$$

【0057】

また、 $1/Q_c$ は、次のように表される。

【数21】

$$\frac{1}{Q_c} = \left\{ (l^2 a^3 d + a d^3) \frac{1}{\sqrt{\sigma_f}} + (2l^2 a^3 b + 2b d^3) \frac{1}{\sqrt{\sigma_{r,t}}} \right\} \sqrt{\frac{\omega \mu}{2}} \frac{2\pi^2}{(kad)^3 b \eta}$$

$$= a_1 x_5 + a_2 x_6$$

【0058】

このとき、下記のように x_5 、 x_6 を定義し、 $(l^2 a^3 d + a d^3) \times [2 / \{ (kad)^3 b \}] \times (\mu / 2)^{1/2}$ を a_1 とし、 $(2l^2 a^3 b + 2b d^3) \times [2 / \{ (kad)^3 b \}] \times (\mu / 2)^{1/2}$ を a_2 としたので、結果として、 $1/Q_c = a_1 x_5 + a_2 x_6$ となる。

【0059】

また、 $1/Q_d$ は、次のように表される。

【数23】

$$\frac{1}{Q_d} = \tan \delta = x_7$$

【0060】

したがって、 $1/Q_u$ は結果的に次のような一次方程式で表される。

【数24】

$$\frac{1}{Q_u} = a_1 x_5 + a_2 x_6 + x_7 \Leftrightarrow Ax = b$$

【0061】

N個の共振モードを測定すると、N個の一次方程式が得られる。したがってこの場合は、未知数が x_5 、 x_6 、 x_7 の3つなので、 $N = 3$ で厳密解を、 $N > 3$ で最小二乗解が得られる。また、共振モードを4以上測定して誤差を吸収できる。なお、 x_5 は広壁面の導電率 σ_f の逆数の平方根、 x_6 は狭壁面の導電率 $\sigma_{r,t}$ の逆数の平方根、 x_7 は誘電正接 $\tan \delta$ である。

【0062】

以上で説明した本実施の形態にかかる共振器特性測定方法では、単一の共振器で、広壁面の導電率、狭壁面の導電率、及び誘電正接を一度に求められるため、共振器の特性を容易に求められる。すなわち、本実施の形態にかかる共振器特性測定方法では、複数の共振器を測定することなく、一度に広壁面の導電率、狭壁面の導電率、及び誘電正接を求められるので、共振器の特性を容易に求められる。また、本実施の形態にかかる共振器特性測定方法では、ステップS2において、図2、図3に示した構成の共振器を用いて共振器の通過特性を測定しているので、実用形態に近い形で電気物性を評価できる。

【0063】

以上、本発明を上記実施の形態に即して説明したが、本発明は上記実施の形態の構成に

10

20

30

40

50

のみ限定されるものではなく、本願特許請求の範囲の請求項の発明の範囲内で当業者であればなし得る各種変形、修正、組み合わせを含むことは勿論である。

【符号の説明】

【 0 0 6 4 】

1、2 共振器

1 1、1 2 結合スロット

2 1、2 2 結合スロット

3 1、3 2 導体基板

3 3 金属ビア（貫通導体）

3 5、3 6 導波管

10

20

30

40

50

【図面】

【図 1】

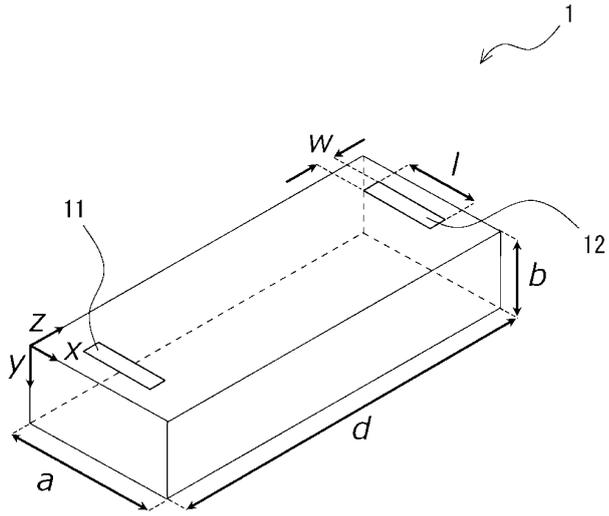


Fig. 1

【図 2】

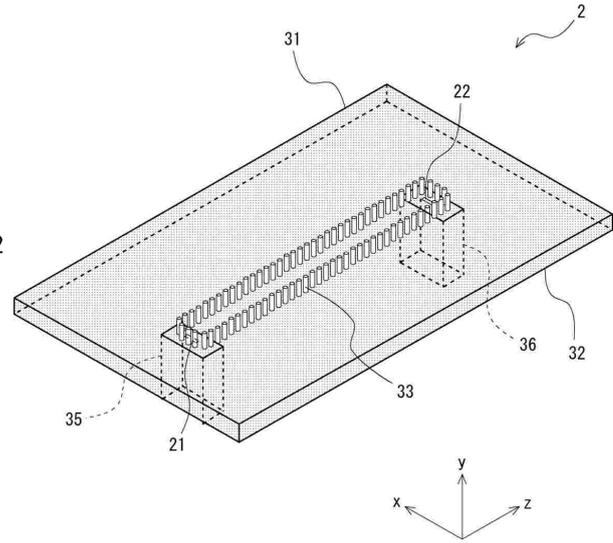


Fig. 2

【図 3】

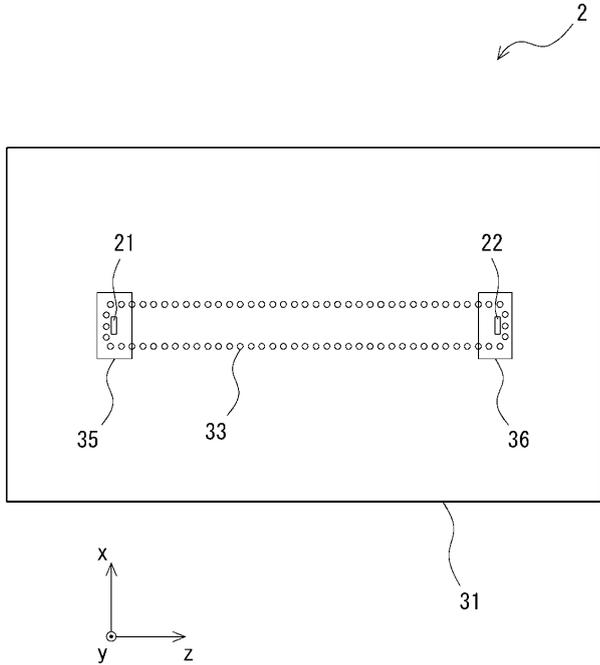


Fig. 3

【図 4】

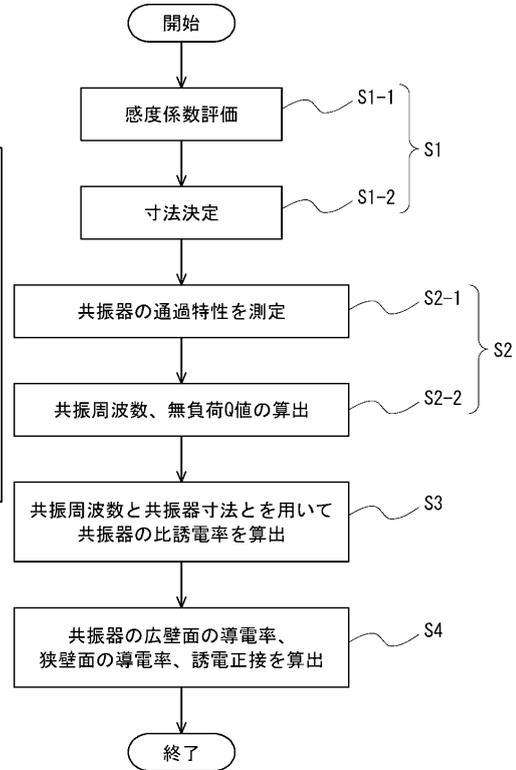


Fig. 4

10

20

30

40

50

【 図 5 】

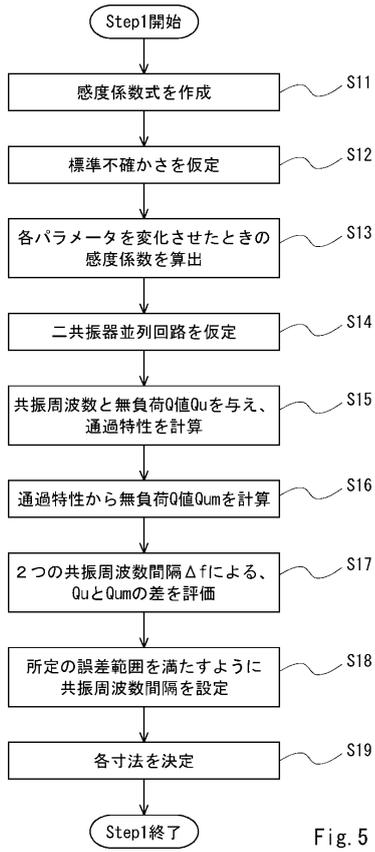


Fig. 5

【 図 6 】

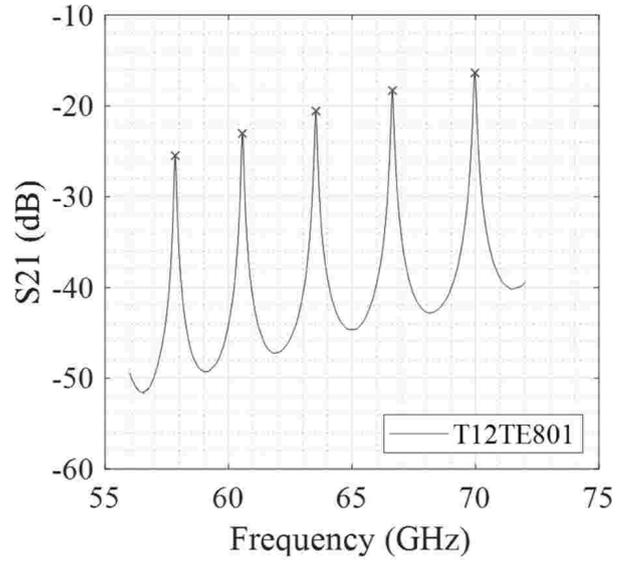


Fig. 6

【 図 7 】

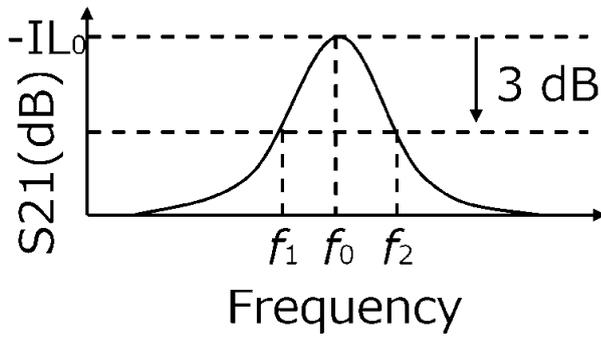


Fig. 7

10

20

30

40

50

フロントページの続き

- 東京都千代田区丸の内一丁目5番1号 A G C 株式会社内
(72)発明者 木寺 信隆
東京都千代田区丸の内一丁目5番1号 A G C 株式会社内
(72)発明者 山中 大輔
東京都千代田区丸の内一丁目5番1号 A G C 株式会社内
審査官 小川 浩史
(56)参考文献 米国特許出願公開第2009/0243762 (U S , A 1)
TOMURA, Takashi; HIROKAWA, Jiro , “ Anisotropic Conductivity Measurements by Two Kin
ds of Multimode Rectangular Plate-Laminated Cavities ” , IEEE TRANSACTIONS ON MICRO
WAVE THEORY AND TECHNIQUES , 2020年09月10日 , pp. 170-178 , DOI: 10.1109/TMT
T.2020.3019401
米田諭 ; 白木康博 ; 佐々木雄一 ; 岡尚人 ; 大橋英征 , “ 2.4 G H z 帯向け F Q - S I W 共振器
装荷非接触型電磁波シールド構造 ” , 電子情報通信学会論文誌 B 早期公開論文 2 0 1 7 W
F P 0 0 0 2 [o n l i n e] , 電子情報通信学会 , 2018年04月04日 , pp. 1-9 , DOI:1
0.14923/transcomj.2017WFP0002
(58)調査した分野 (Int.Cl. , D B 名)
G 0 1 R 2 7 / 0 0 - 2 7 / 3 2