

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 11 日現在

機関番号：12401

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23760302

研究課題名(和文)周波数選択性多機能膜の開発とミリ波フィルタへの応用に関する研究

研究課題名(英文)Development of Frequency Selective Multifunction Surface and Its Application to Millimeter-wave Filters

研究代表者

大平 昌敬(OHIRA, Masataka)

埼玉大学・理工学研究科・助教

研究者番号：60463709

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円、(間接経費) 960,000円

研究成果の概要(和文)：本研究開発では、次世代のミリ波帯高速無線通信に不可欠な高性能・超小型の遮断導波管フィルタを開発することを目的に、新しい遮断導波管用平面型共振器(周波数選択性多機能膜)を提案した。提案した周波数選択性多機能膜を帯域通過フィルタへ応用し、その有用性を検証した。その結果、比帯域2%の3段チェビシェフ特性を有する通過域と、12GHz以上の広帯域な阻止域特性を実現した。フィルタ体積は従来のフィルタの30%程度であり、立体回路として大幅な小型化を達成した。提案共振器によって立体回路の低損失性と平面回路の高い設計自由度を併せ持つ小型かつ高性能フィルタを実現可能にした。

研究成果の概要(英文)：A new planar resonator called frequency-selective multifunction surfaces has been proposed for the development of cutoff-waveguide bandpass filters indispensable for a next-generation millimeter-wave wireless communication. To verify its effectiveness, the proposed resonators were applied to the design of a bandpass filter. As a result, the designed bandpass filter realizes a third-order Chebyshev passband response with 2% bandwidth as well as a wide stopband with 12GHz bandwidth. The size of the designed filter can be reduced to 30% of conventional three-dimensional filter circuits. The proposed resonators and the design techniques enable one to achieve both compact filter size and low-loss characteristics.

研究分野：電気電子工学

科研費の分科・細目：電子デバイス・電子機器

キーワード：マイクロ波・ミリ波 帯域通過フィルタ 導波管フィルタ 有極フィルタ

1. 研究開始当初の背景

60 GHz 帯は低マイクロ波帯の無線 LAN と同じく免許不要の周波数に割り当てられ、その広帯域を利用した超高速無線通信の研究開発が活発化している。この背景の下、無線モジュールの重要な構成要素であるミリ波フィルタには小型化と高性能化（低損失、高選択性）が要求されているが、ミリ波帯では伝搬損失が非常に大きい点が設計課題であった。そこで近年、低損失な「導波管」が注目されている。特に誘電体基板に貫通ビアで擬似導波管を形成した導波路構造は製作が簡易であることから、それを用いたフィルタ設計も盛んに行われている。

しかしながら、いずれのミリ波導波管フィルタも阻止域における遮断特性（スカート特性の急峻性）は必ずしも優れているとは言えない。飛び越し結合を利用した減衰極の形成で減衰量とスカート特性を改善した例もあるが、フィルタの面積が拡大するため、小型化の要求と相反する。設置面積が非常に小さい平面型共振器は小型化に適するが、阻止域の改善は共振器の多段化に頼らざるを得ず、共振器数の増加は通過域の挿入損の劣化を招いてきた。

このように、ミリ波帯においてフィルタ面積を増大させることなく減衰極が生成できる小型共振器は無く、そのような共振器を用いたフィルタ設計法も確立されていない。そのため、これまで共振器の多段化で実現されてきた急峻なスカート特性を、より少ない共振器段数で達成できるミリ波フィルタの実現が望まれていた。

2. 研究の目的

研究代表者らは、上記のような問題点を解決するために、新しい導波管共振器を提案してきた。その中でも、一つの共振器で共振（反射零点）と反共振（伝送零点）の両方の機能を持たせた導波管用平面型共振器（周波数選択性多機能膜）は従来の空洞共振器では実現し得なかった特性を有する。しかし、この共振器は、導波管の基本モードが伝搬可能な遮断周波数以上の周波数で設計が行われてきた。そのため、導波管の遮断周波数領域（遮断導波管）で有極特性を持つ平面型共振器を実現できれば、高減衰特性が得られ、かつフィルタの小型化にもつながる。

そこで、本研究では次世代のミリ波帯無線通信に応用することを目的に、高性能・超小型の遮断導波管フィルタを研究開発する。特に、フィルタ面積を増大させることなく減衰極を生成できる新しい遮断導波管用平面型共振器（周波数選択性多機能膜）を提案・開発する。それをフィルタに応用し、実装性に優れたフィルタの設計、試作を行い、超小型高性能フィルタを実現する。

3. 研究の方法

前述の研究の現状を踏まえ、本研究では以

下の方法で研究を遂行した。

(1) 遮断領域で動作する新しい有極平面型共振器（周波数選択性多機能膜）の開発

従来の平面型共振器をそのまま管幅の狭い遮断導波管に適用すると、不要共振が発生し、逆にフィルタ特性の劣化につながる。そこで、減衰極を生成できるという周波数選択性多機能膜の特長を損なうことなく、遮断導波管に実装できる新たな小型平面共振器の開発を行う。また、共振器の開発には電磁界解析を駆使して共振器の振舞いや物理現象の解明も行い、その結果をフィルタ設計法の確立に活かす。

(2) ハイブリッド構成の新しいフィルタの高効率な設計法の確立

フィルタの設計を高効率に行うため、立体導波管・平面共振器のハイブリッド構成のフィルタ設計法を新たに確立する。そのため、まず導波路である遮断導波管をモデル化する。導波管の基本モードが伝搬不可能な遮断領域において、導波管は誘導性の集中定数回路素子を用いて型回路として表される。この型回路をインバータ回路として用いたときに、所望の伝達関数を実現するのに要求される回路定数や遮断導波管長を決定する手順を確立する。

(3) 高性能・超小型フィルタの設計、試作

上記の設計法の有効性を検証するため、X帯でマイクロ波フィルタの設計、試作を行う。開発した有極形平面共振器（周波数選択性多機能膜）の共振特性を解析し、設計チャートを作成する。そして、設計チャートとCADによって設計仕様を満足する有極形平面共振器の形状パラメータと遮断導波管長を決定する。そしてフィルタを設計した後、試作・実験を行い、実現性や実装性を検討する。

4. 研究成果

(1) 遮断領域で動作する新しい有極平面型共振器（周波数選択性多機能膜）の開発

提案した遮断導波管フィルタの構造を図1に示す。本フィルタは、遮断導波管（断面積 $a \times b$ の中に複数枚の平面共振器が間隔 l ($i=0, 1, 2, 3$) で挿入された構造からなる。ただし、入出力導波管には標準導波管（断面積 $a \times b$ ）を用いる。共振器間には、遮断周波数がフィルタの通過域周波数よりも十分に高い遮断導波管を用いる。これによって阻止域で高い減衰量を実現できる。

次に、提案した有極平面共振器を図2に示す。この平面共振器は、導体線路に間隙を設けたオープンループ共振器である。また、この共振器の導体薄膜は誘電体基板によって支持されている。オープンループ共振器は導体線路の実効長がおよそ1管内波長のとき共振し、入力波は完全反射される。従って、遮断導波管中のオープンループ平面共振器は減衰極を生成できる。一方、この平面共振器

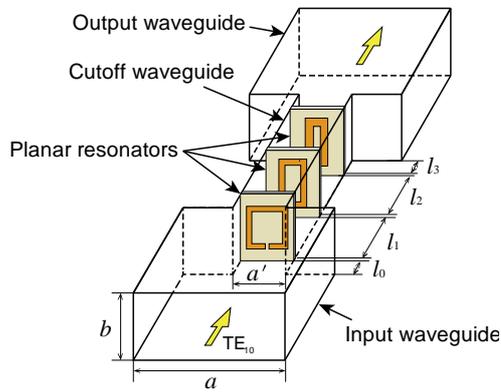


図1 有極平面型共振器を装荷した遮断導波管フィルタの提案構造

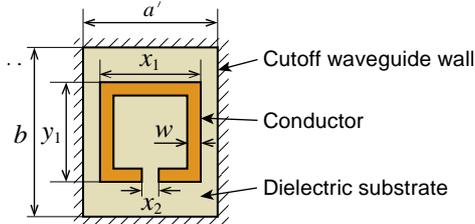


図2 提案した有極平面型共振器の形状

は減衰極周波数以下では容量性素子として動作するので、遮断導波管の誘導性成分とLC並列共振回路を構成し、共振周波数で通過特性が得られる。このように、提案した平面共振器は遮断導波管の誘導性成分を共振回路の一部として利用したハイブリッド共振回路である。

(2) ハイブリッド構成の新しい導波管フィルタの高効率設計法の確立

前述の共振器を用いた遮断導波管フィルタの高効率で簡易な設計法を確立したので、以下にその手順を述べる。

本フィルタでは、入力側と出力側の外部Q値 Q_{e1} 、 Q_{e2} 及び共振器間の結合係数 $k_{i,i+1}$ ($i=1, 2, \dots, n-1$) はそれぞれ遮断導波管長 l_i ($i=1, 2, \dots, n$) と1対1で対応しているため、該当する遮断導波管長を変化させることで外部Q値と結合係数を調整できる。従って、本フィルタの設計には共振器直結形帯域通過フィルタの設計理論を適用できる。

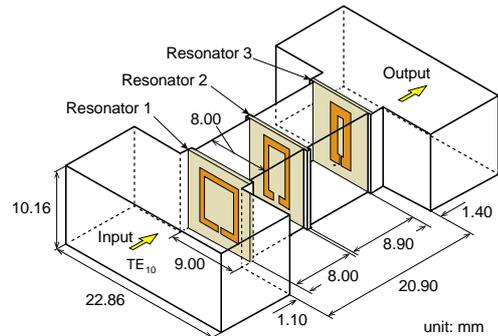
有極平面共振器の形状設計

まず減衰極が所望の周波数 f_a で得られるようオープンループ共振器の形状パラメータ x_1 を決定する。次に形状パラメータ y_1 を調整して、共振周波数が通過域の中心周波数 f_0 と一致するように設計する。

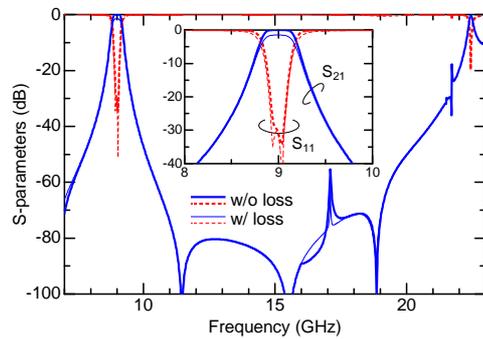
遮断導波管長の設計

共振周波数 f_0 と所望の減衰極周波数 f_a を持つ共振器が得られれば、次に外部Q値 Q_{e1} 、 Q_{e2} 及び結合係数 $k_{i,i+1}$ の評価を行う。与えられた設計仕様を満たすために必要な外部Q値と結合係数の値が得られるように遮断導波

管長 l_i を決定する。このようにして遮断導波管長 l_i が決定すれば、設計したオープンループ平面共振器を遮断導波管長 l_i の間隔で配置することでフィルタ構造が決定される。最後に構造最適化を行い、設計仕様を満足する周波数特性が得られれば設計完了である。



(a)



(b)

図3 (a) 設計した小型遮断導波管フィルタの構造、(b) その周波数特性

(3) 高性能・超小型フィルタの設計、試作

以上の設計法を用いて遮断導波管フィルタの設計を行った。X帯における設計例として、通過域特性の中心周波数9GHz、比帯域2%、3段0.01dBチェビシェフリップル特性の仕様を与えた。阻止域では11GHz、15GHz、19GHzの3つの減衰極周波数を与えた。

設計した遮断導波管フィルタ構造と周波数特性を図3に示す。図(a)が3段遮断導波管フィルタの構造、図(b)がその周波数特性の電磁界シミュレーション結果である。フィルタ全長は20.90mm、幅は8.00mmであり、従来の平面共振器装荷導波管フィルタと比較してフィルタ部はおよそ30%の体積にまで小型化できた。

最後にフィルタの試作・測定により提案フィルタの有効性を検証する。試作した遮断導波管フィルタの写真を図4に示す。また、通過域付近の測定結果を図5(a)に示し、広帯域特性の測定結果を同図(b)に示す。図(a)における測定結果と電磁界シミュレーション結果の比較からわかるように、実験では中心周波数が仕様より高周波数側にシフトしているが、挿入損失の測定値は電磁界シミュレーション値とよく一致した。阻止域では、



図4 試作した遮断導波管フィルタ

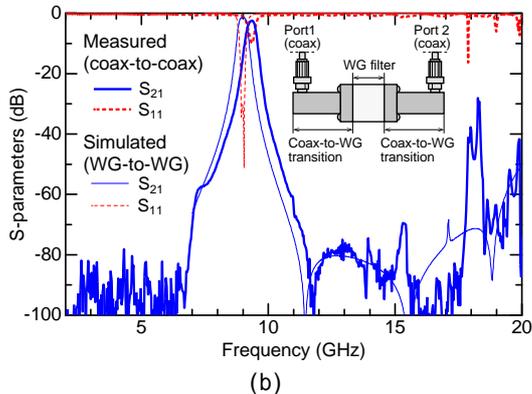
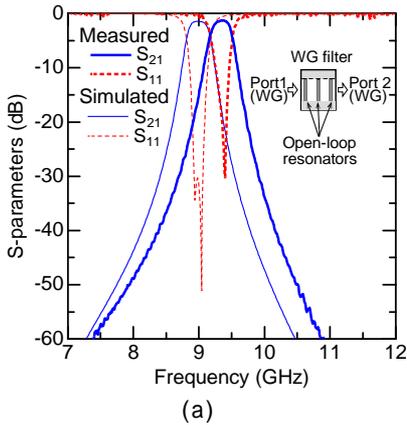


図5 試作した遮断導波管フィルタの測定結果
(a) 通過域近傍、(b) 広帯域特性

80dB という高い減衰量を確保しつつ、20 GHz まで 20dB 以下にスプリアス共振が抑制されていることが実験でも確認できた。

本フィルタは平面型共振器を所定の間隔で遮断導波管内に設置するだけで、高性能な帯域通過フィルタを得ることができる。

(4) 多モード帯域通過フィルタの新しい設計法の開発

共振器並列結合形フィルタ回路における等価回路パラメータ抽出手法

以上の研究成果のみならず、共振器を入出力線路に対して並列に配置した共振器並列結合形フィルタ回路における等価回路パラメータの抽出技術も新たに開発した。これによって、従来評価が困難であった入出力直接結合の抽出にも初めて成功した。

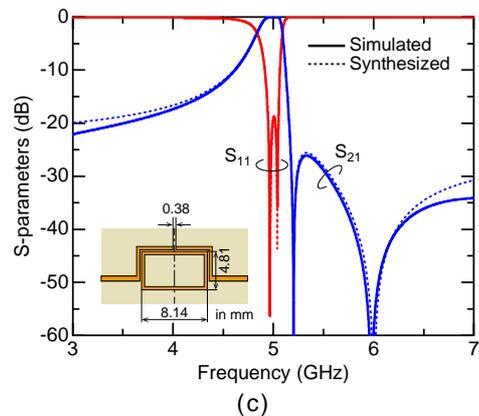
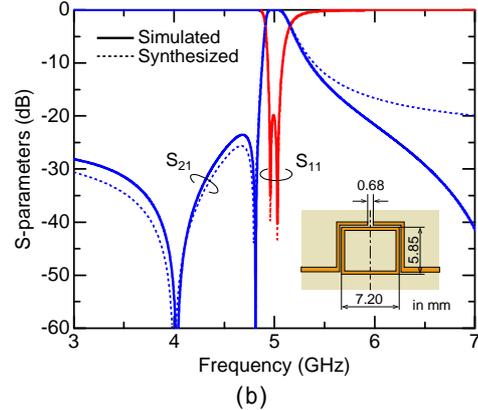
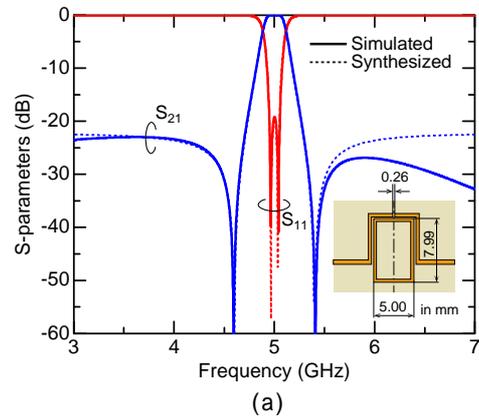


図6 共振器並列結合形フィルタ回路を用いた提案設計法で設計したデュアルモードフィルタ

(a) 減衰極を通過域の両側に配置、(b) 減衰極を低域の阻止域に配置、(c) 減衰極を高域の阻止域に配置

共振器並列結合形フィルタ回路の合成理論に基づく多モードフィルタの設計法

そのパラメータ抽出法を用いて多モードフィルタの周波数特性から抽出できる入出力直接結合量の結果をフィルタ設計に初めて応用し、共振器並列結合形フィルタ回路の合成理論に基づく有極形多モードフィルタの設計法も提案した。

多モード帯域通過フィルタの設計

提案した設計法の有効性を検証するために、減衰極周波数を中心周波数に対して対称および非対称に配置したデュアルモードループ共振器フィルタをそれぞれ設計した。設計結果を図6に示す。設計したフィルタ

については試作・測定も行い、提案した設計法で得られたデュアルモード帯域通過フィルタが実現可能であることも実証した。

このように本研究では新しいハイブリッド導波管フィルタの構造を提案するとともに、共振器並列結合形フィルタ回路を用いた新しい設計手法も示した。これらの成果は、今後のマイクロ波・ミリ波フィルタの進展に大きく寄与するものである。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計12件)

松本孝章、太平昌敬、馬哲旺、遮断導波管と平面共振器によるハイブリッド共振及び反共振を用いた小型導波管フィルタの阻止域特性の改善、電子情報通信学会論文誌 C、査読有、vol.J96-C、no.12、pp.524-532、2013

URL : http://search.ieice.org/bin/summary.php?id=j96-c_12_524&category=C&lang=J&year=2013&abst=

青山裕之、太平昌敬、馬哲旺、共振器並列形回路の合成理論とパラメータ抽出法を併用した有極形多モードフィルタの設計法、電子情報通信学会論文誌 C、査読有、vol.J96-C、no.12、pp.471-47、2013

URL : http://search.ieice.org/bin/summary.php?id=j96-c_12_471&category=C&lang=J&year=2013&abst=

M. Ohira and Z. Ma, Authors' Reply, IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques、査読有、vol.61、no.12、pp.4284-4285、2013

DOI : 10.1109/TMTT.2013.2286965

M. Ohira, T. Matsumoto, and Z. Ma, A cutoff-waveguide bandpass filter using antiresonant elements for sharp passband skirt and wide stopband characteristics, Proceedings of Asia-Pacific Microwave Conference、査読有、pp.447-449、2013

DOI : 10.1109/APMC.2013.6694826

M. Ohira, H. Aoyama, and Z. Ma, Deterministic extraction of direct source/load coupling and its application to multi-mode filter designs based on transversal array network theory, IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest、査読有、2013

DOI : 10.1109/MWSYM.2013.6697465

M. Ohira and Z. Ma, Circuit modeling and physical understanding of dissipation effects for coupled resonator filters transformed into transversal array configuration, Proceedings of 2013 International Symposium

on Electromagnetic Theory、査読有、pp.53-56、2013

URL : http://ieeexplore.ieee.org/xpl/freeabs_all.jsp?arnumber=6565672

M. Ohira and Z. Ma, A parameter-extraction method for microwave transversal resonator array bandpass filters with direct source/load coupling, IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques、査読有、vol.61、no.5、pp.1801-1811、2013

DOI : 10.1109/TMTT.2013.2252187

M. Ohira and Z. Ma, Compact bandpass filter with a sharp roll-off response using multi-path coupling scheme of H-shaped resonator, Proceedings of Asia-Pacific Microwave Conference、査読有、pp.1130-1132、2012

DOI : 10.1109/APMC.2012.6421847

M. Ohira and Z. Ma, Resonant-mode characteristics of a new three-mode hybrid microstrip/slotline resonator and novel realization of compact bandpass filter with four transmission zeros, IEICE Transactions on Electronics、査読有、vol.E95-C、no.7、pp.1203-1210、2012

DOI : 10.1587/transele.E95.C.1203

M. Ohira and Z. Ma, Novel multi-mode ring resonator transversal array bandpass filter with very high skirt selectivity using multiple transmission zeros, 2012 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest、査読有、2012

DOI : 10.1109/MWSYM.2012.6259362

M. Ohira, T. Matsumoto, Z. Ma, H. Deguchi, and M. Tsuji, A new type of compact evanescent-mode waveguide bandpass filter using planar dual-behavior resonators, Proceedings of Asia-Pacific Microwave Conference、査読有、pp.1023-1026、2011

URL : http://ieeexplore.ieee.org/xpl/freeabs_all.jsp?arnumber=6173928

M. Ohira, Z. Ma, H. Deguchi, and M. Tsuji, A novel feeding structure to generate multiple transmission zeros for miniature waveguide bandpass filters composed of frequency-selective surfaces, IEICE Transactions on Electronics、査読有、vol.E94-C、no.10、pp.1586-1593、2011

DOI : 10.1587/transele.E94.C.1586

[学会発表](計19件)

- [1] 青山裕之、太平昌敬、馬哲旺、入出力直接結合の周波数依存性を利用したデュアルモードフィルタの有極化、電子情報通信学会総合大会、C-2-89、p.119、

- 2014年3月21日、新潟大学
- [2] 青山裕之、大平昌敬、馬 哲旺、有極形デュアルモードループ共振器フィルタにおける入出力直接結合の周波数依存性のフィルタ設計への応用、電子情報通信学会マイクロ波研究会、vol.113, no.365, MW2013-152, pp.7-12, 2013年12月19日、埼玉大学
- [3] 大平昌敬、青山裕之、馬 哲旺、共振器並列結合形マイクロ波フィルタのパラメータ抽出法と多モードフィルタ設計への応用、Microwave Workshops & Exhibition (MWE2013)、ワークショップ11-3, 2013年11月29日、パシフィコ横浜
- [4] 大平昌敬、馬 哲旺、損失を考慮した共振器並列形帯域通過フィルタの等価回路パラメータ抽出法、電子情報通信学会マイクロ波研究会、vol.113, no.259, MW2013-121, pp.125-130, 2013年10月25日、東北大学
- [5] 大平昌敬、馬 哲旺、共振器並列形帯域通過フィルタにおける無負荷Q値の抽出法、電子情報通信学会ソサイエティ大会、C-2-57, p.82, 2013年9月18日、福岡工業大学
- [6] 大平昌敬、馬 哲旺、共振器並列形帯域通過フィルタの挿入損の計算式とその理論面及び応用面の検証、電子情報通信学会マイクロ波研究会、vol.113, no.141, MW2013-85, pp.235-240, 2013年7月19日、稚内総合文化センター
- [7] 松本孝章、大平昌敬、馬 哲旺、遮断導波管と平面共振器のハイブリッド共振による小型有極導波管フィルタの阻止域特性改善、電子情報通信学会マイクロ波研究会、vol.113, no.70, MW2013-21, pp.65-70, 2013年5月31日、龍谷大学
- [8] 青山裕之、大平昌敬、馬 哲旺、共振器並列形回路の合成理論とパラメータ抽出法を用いた有極形フィルタ設計、電子情報通信学会総合大会、C-2-101, p.132, 2013年3月22日、岐阜大学
- [9] 大平昌敬、馬 哲旺、共振器並列形帯域通過フィルタにおける無負荷Q値による挿入損の見積り式、電子情報通信学会総合大会、C-2-102, p.133, 2013年3月22日、岐阜大学
- [10] 青山裕之、大平昌敬、馬 哲旺、共振器並列形回路の合成理論に基づいた有極形帯域通過フィルタの高精度設計、電子情報通信学会マイクロ波研究会、vol.312, no.355, MW2012-135, pp.49-54, 2012年12月14日、山梨大学
- [11] 大平昌敬、馬 哲旺、複数共振器の外部Q値と共振周波数を用いた共振器並列形マイクロ波フィルタの設計方法、電子情報通信学会ソサイエティ大会、CS-2-3, p.S-23, 2012年9月13日、富山大学
- [12] 大平昌敬、馬 哲旺、共振器並列型フィル

- タ合成による多モードフィルタ設計のための外部Q値の計算方法、電子情報通信学会マイクロ波研究会、vol.112, no.155, MW2012-47, pp.131-136, 2012年7月27日、北海道大学
- [13] 大平昌敬、馬 哲旺、メアンダループ共振器の並列配置構成を用いた多モード有極形帯域通過フィルタの設計について、電子情報通信学会マイクロ波研究、vol.112, no.56, MW2012-16, pp.33-38, 2012年5月25日、京都大学
- [14] 大平昌敬、馬 哲旺、メアンダループ共振器の並列配置構成による有極帯域通過フィルタの実現、電子情報通信学会総合大会、C-2-40, p.81, 2012年3月21日、岡山大学
- [15] 松本孝章、大平昌敬、馬 哲旺、出口博之、辻 幹男、有極平面共振器を用いた小型遮断導波管フィルタの実験的検討、電子情報通信学会総合大会、C-2-39, p.80, 2012年3月21日、岡山大学
- [16] 松本孝章、大平昌敬、馬 哲旺、出口博之、辻 幹男、有極形平面共振器を用いた遮断導波管フィルタの小型化、電子情報通信学会マイクロ波研究会、vol.111, no.250, MW2011-105, pp.107-112, 2011年10月21日、電気通信大学
- [17] 松本孝章、大平昌敬、馬 哲旺、出口博之、辻 幹男、有極特性を持つ平面共振器を用いた小型遮断導波管フィルタ、電子情報通信学会ソサイエティ大会、C-2-42, p.66, 2011年9月13日、北海道大学
- [18] 大平昌敬、馬 哲旺、高周波数選択特性を持つ3モードH形マイクロストリップ線路帯域通過フィルタ、電子情報通信学会ソサイエティ大会、C-2-45, p.69, 2011年9月13日、北海道大学
- [19] 大平昌敬、馬 哲旺、新しい3モードH形マイクロストリップ共振器の共振特性解析と小形帯域通過フィルタ設計、電子情報通信学会マイクロ波研究会、vol.111, no.201, MW2011-82, pp.21-26, 2011年9月9日、大阪大学

〔その他〕
研究室ホームページ
<http://sirius.reso.ees.saitama-u.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

大平 昌敬 (OHIRA, Masataka)
埼玉大学・大学院理工学研究科・助教
研究者番号：60463709