

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 6 月 19 日現在

機関番号：12201

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2016

課題番号：25820136

研究課題名(和文) 極低損失ミリ波帯狭帯域超伝導フィルタの研究開発

研究課題名(英文) Research of ultra low loss millimeter wave narrow band superconducting filter

研究代表者

清水 隆志 (SHIMIZU, TAKASHI)

宇都宮大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：80500397

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、極低損失ミリ波帯狭帯域超伝導フィルタの研究開発を行った。共振器法に基づいた各種材料評価手法により、30-110GHz帯における低損失誘電体・導体の導電率に関するミリ波材料定数データベースの構築・拡充を行った。さらに、30GHz帯、比帯域幅1%、CPW構造円形スロット共振器構造2段BPFの設計・試作を行い、常温にて、中心周波数29.7GHz、3dB比帯域幅0.9%、挿入損失2.4dBを有する低損失ミリ波フィルタを実現した。また、高Q値、スプリアス特性に優れたHスロット共振器の設計法を提案し、この共振器を用いた急峻な遮断特性を有するミリ波フィルタを実現可能性を数値計算により示した。

研究成果の概要(英文)：In this research, we studied on low loss millimeter wave narrow band filters. The database of material constants in 30-110GHz band, which are used for the filter design, was constructed and expanded by using the cutoff circular waveguide method, the empty cavity resonator method and the dielectric resonator based method. We realized 2-pole narrow bandpass filter with center frequency of 29.7GHz, relative bandwidth of 0.9%, and insertion loss of 2.4dB using CPW type circular slot resonator at room temperature. Moreover, design procedure of H slot resonator with high Q and good spurious characteristic are proposed. We designed 30GHz band 2-pole bandpass filter using H slot resonator. We have been shown the possibility of a millimeter wave band filter with sharp skirt response using the H slot resonator by 3D FEM simulation.

研究分野：ミリ波工学

キーワード：帯域通過フィルタ 超伝導 ミリ波 材料評価 共平面回路

1. 研究開始当初の背景

スマートフォンやタブレットPC等に代表され高性能・多機能な携帯無線通信機器が普及し、データ通信による急激なトラフィック増加が既存の無線通信システムの周波数帯域ひっ迫の大きな要因となっている。このため、ギガビット超高速ミリ波帯(30-40GHz帯)無線ネットワークの研究開発が盛んに行われている。この時、周波数有効利用の観点から、急峻な遮断特性を有する低損失ミリ波フィルタが将来必要不可欠となる。

2. 研究の目的

本研究の主目的は以下の2つである。

第1目的は、平成21-22年度研究開発により見出した無負荷Q値15,000@30GHzが得られるCCSR構造を用いた高性能ミリ波狭帯域通過フィルタを検討し、試作・実測により、その有効性を実証することである。

第2目的は、第1目的で実証したCCSRを用いたミリ波狭帯域超伝導BPFを設計・試作し、その有効性を実証することである。フィルタ設計に際し、これまでの研究により課題として明らかとなった多段化によるフィルタ特性の急峻化および帯域外特性の改善手法を検討し、より高性能なミリ波超伝導BPFの提案および実証を行う。

3. 研究の方法

(1) ミリ波帯材料定数データベースの拡充

遮断円筒導波管法、円筒空洞共振法を用いて行い、低損失回路基板や薄型回路基板用各種誘電体材料のミリ波複素誘電率の周波数依存性および温度依存性を行い、その特性を明らかにする。また、各種導体の表面および界面の表面抵抗特性をマイクロ波帯からミリ波帯において誘電体共振器をベースとした測定法により明らかにする。これら測定結果をもとに、これまで構築してきたミリ波材料定数データベースを拡充する。

(2) ミリ波フィルタ特性の高性能化に関する検討

CCSRの有効性を計算のみならず、実測を通して確認する。その後、CCSRを複数配置(多段化)し、フィルタ遮断特性の急峻化を検討する。多段化によるフィルタ特性向上が困難な場合は、飛び越し結合を用いた有極化による特性向上や多段化可能な共振器構造を検討する。さらに、帯域外特性の改善手法を検討する。

4. 研究成果

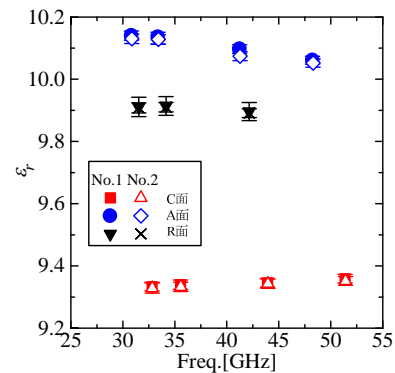
(1) ミリ波帯材料定数データベースの拡充

(a) ミリ波誘電体材料定数データベース

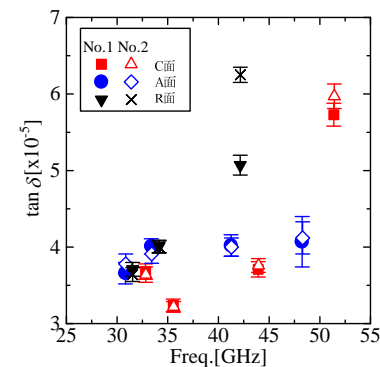
超伝導およびミリ波複素誘電率の周波数依存性測定を行い、結晶軸に応じた複素誘電率の周波数依存性を明らかにし、CCSR構造をr面サファイア基板上に設計するための基礎データの拡充を行った。

良好な超伝導体が製膜可能であるc面、a面、r面各サファイア基板およびMgO基板、さらには各種結晶性材料のミリ波複素誘電率の周波数依存性測定および温度依存性測定を行い、結

晶軸に応じた複素誘電率の周波数依存性を明らかにした。その測定結果の一例を図1、図2に示す。

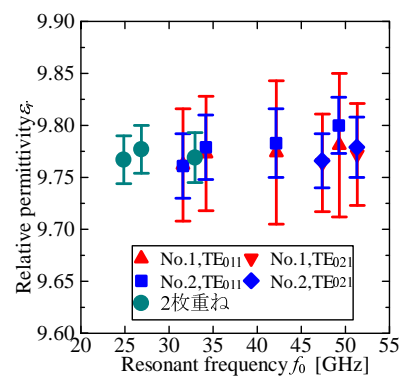


(a) 比誘電率  $\epsilon_r$

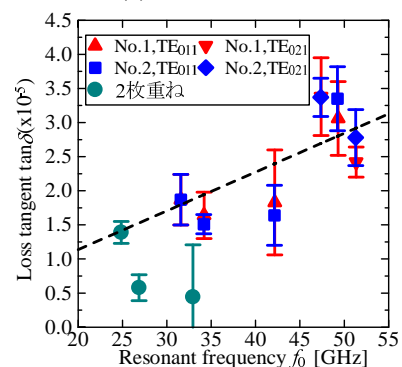


(b) 誘電正接  $\tan \delta$

図1 c面、a面、r面サファイア平板の複素誘電率周波数依存性の測定結果



(a) 比誘電率  $\epsilon_r$



(b) 誘電正接  $\tan \delta$

図2 MgO基板の複素誘電率周波数依存性の測定結果

以上の測定結果をこれまでに構築してきたデータベースに加えることで、30-110GHz 帯における材料定数データベースの拡充を行った。

(b) ミリ波帯導体材料定数データベース

銅張誘電体基板における導体界面の表面抵抗評価手法の開発を行い、図 3 に示すように、その有効性を実証した。

2 誘電体共振器法や開発法を用いることで、各種導体の表面および界面の表面抵抗・比導電率を評価し、その特性を明らかにした。その測定結果の一例を図 4 に示す。

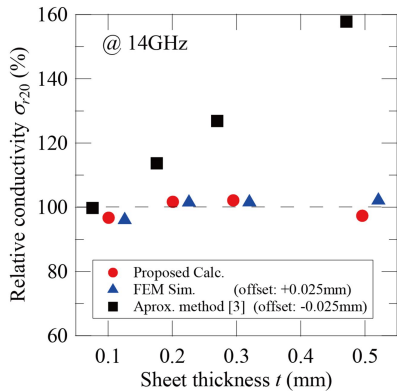


図 3 銅導体の表面抵抗の周波数特性

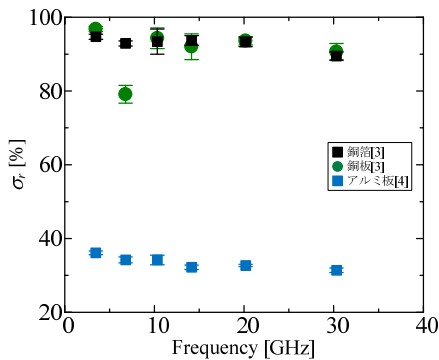


図 4 各種導体における比導電率の周波数依存性の測定結果

これにより、CCSR 構造を常導体基板や超電導体基板に設計するためのミリ波帯導体材料定数データベースの拡充が行えた。

(2) ミリ波フィルタ特性の高性能化に関する検討

これまでデータ拡充を行ってきたミリ波材料データベースより判明した低損失材料であるアルミナ基板・銅導体を用いて、30GHz 帯、比帯域幅 1%、CCSR 構造 2 段 BPF の設計・試作を行った。試作した BPF のレイアウト写真を図 5 に示す。常温における周波数特性の測定結果を図 6 に示す。中心周波数 29.7GHz、3dB 比帯域幅 0.90%、挿入損失 2.4dB を有する低損失ミリ波帯域通過フィルタを実現し、CCSR 構造の有効性を実証した。

また、試作した 4 個のフィルタは、図 7 に示すように、ほぼ同じ特性を示しており、製作精度の

影響を受けにくいレイアウトパターン設計が行えたことを確認した。

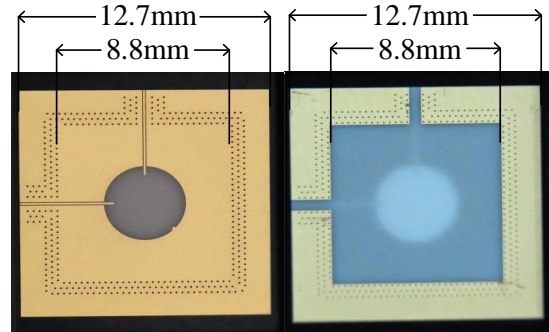
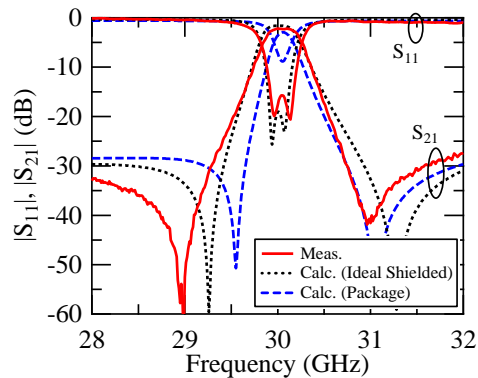
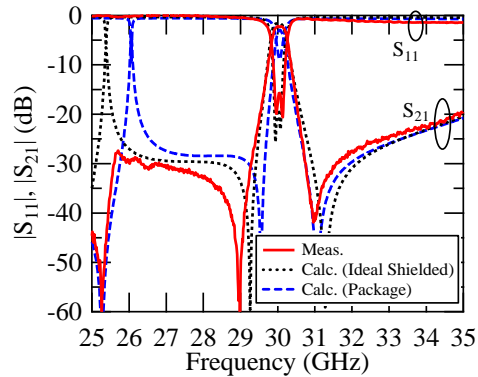


図 5 試作した 30GHz 帯 2 段 BPF



(a) 狭帯域特性



(b) 広帯域特性

図 6 CCSR を用いた 30GHz 帯 2 段 BPF の周波数特性

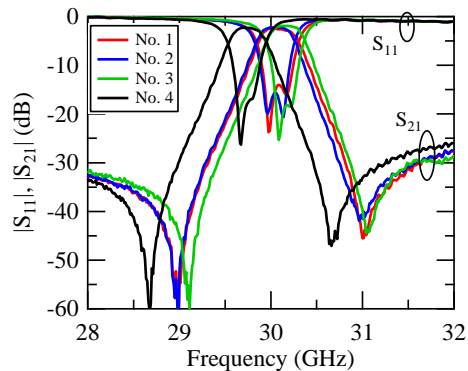


図 7 複数試作した 2 段 BPF の測定結果

さらに、通常複数回の試作が必要なところ、本研究では、ミリ波材料データベースの充実により、1回の試作により設計仕様を満足したフィルタを実現した。

常温における CCSR 共振器の配置方法および帯域外特性の高性能化に関する検討を行った。その結果、製作精度の影響を受けにくい CCSR 共振器の遮蔽導体寸法および基板厚さの見直しを行い、新たに設計した共振器を用いた多段高性能フィルタ設計のための設計基礎資料を得た。

その一方で、研究目標であったフィルタ特性の高性能化を目指した検討の際に、当初想定していた共振器の直列配置による多段化では、不要な共新モードや結合が制御できず、所望の高性能特性を得られないことが明らかになった。そこで、共振器配置の方法の再検討や遮蔽導体構造の検討などを3次元電磁界シミュレーションに基づいて行った。しかしながら、試作までを考慮すると、実現の困難さが大きいことが判明した。

そこで、新たな構造として、図8に示すHスロット共振器を用いたミリ波フィルタも検討した。また、図9に示す高Q特性とスプリアス特性に優れたHスロット共振器の設計チャートを作成した。以上の結果、CCSR共振器よりもHスロット共振器を用いることで、同程度の高Q値、遮断特性が得られることを明らかにした。さらに、Hスロット共振器は、帯域外特性にも優れることを3次元電磁界シミュレーションにより明らかにした。

そこで、Hスロット共振器を用いた中心周波数 $f_0=30\text{GHz}$ 、3dB比帯域幅 $\Delta f_{3\text{dB}}/f_0=1\%$ を有する最平坦特性2段BPFの設計を行った。設計したBPFのレイアウト構造を図10に示す。3次元電磁界シミュレータによる周波数特性の計算結果を図11に示す。

中心周波数30.0GHz、3dB比帯域幅0.96%、挿入損失2.1dB、スプリアス特性14GHz離れの低損失ミリ波帯域通過フィルタが実現できることを数値計算により示した。

これより急峻な遮断特性を有するHスロット共振器を用いたミリ波狭帯域フィルタ実現の可能性を示した。また、試作・評価による実証は今後の課題である。

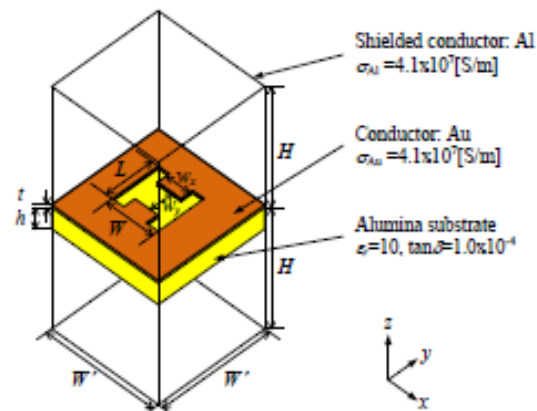
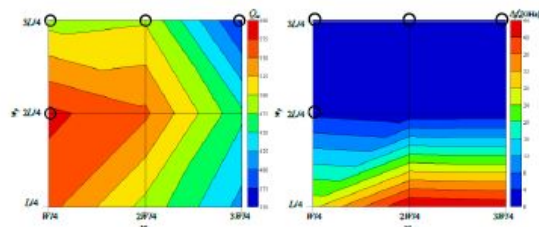


図8 Hスロット共振器の構造



(a) 無負荷  $Q_{it}$  (b) スプリアス周波数  $f_s$

図9  $f_0=30\text{GHz}$ ,  $W=1500\mu\text{m}$  Hスロット共振器の高Q&高スプリアス特性の設計チャート

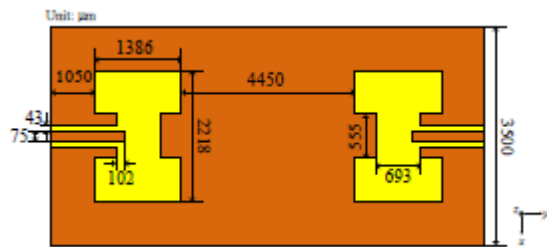
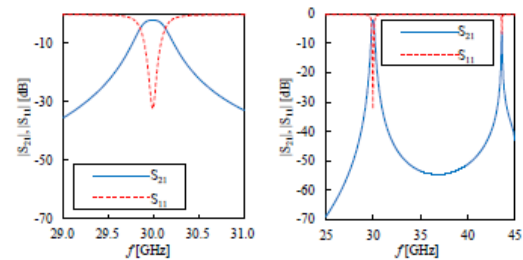


図10 Hスロット共振器を用いた30GHz帯2段BPFのレイアウト構造



(a) 狭帯域特性 (b) 広帯域特性

図11 Hスロット共振器を用いた30GHz帯2段BPFの周波数特性

## 5. 主な発表論文等

(雑誌論文) (計4件)

清水隆志, 小又大祐, 古神義則, "遮断円筒導波管法による石英ガラスの複素誘電率の周波数依存性および温度依存性評価," 電子情報通信学会論文誌 C, vol.J96-C, no.12, pp.533-540, Dec. 2013. , 査読有

T. Shimizu, Y. Kogami, "Evaluation technique for complex permittivity of mid-loss underfill materials by a cut-off circular waveguide method in millimeter wave bands," IEICE Transaction on Electronics, vol.E97-C, no. 10, pp.972-975, Oct. 2014. , 査読有

清水隆志, 霜田雄佑, 菊池幸市, 古神義則, "銅張誘電体基板のマイクロ波帯における実効導電率と粗さパラメータの相関に関する実験的検討," 電子情報通信学会論文誌 C, vol. J97-C, no. 12, pp.519-527, Dec. 2014. , 査読有

T. Shimizu, S. Kojima, Y. Kogami, "Accurate Evaluation Technique of Complex Permittivity for Low Permittivity Dielectric Films Using a Cavity Resonator

Method in 60 GHz Band," *IEEE Trans. on Microw. Theory and Tech.*, vol.63, no.1, pp.279-286, Jan. 2015. ,査読有

[学会発表] (計 26 件)

江幡秋人, 清水隆志, 古神義則, "C 面, A 面, R 面サファイア基板のミリ波帯における複素誘電率測定," 信学技報, vol. 113, no. 141, MW2013-87, pp. 247-252, 2013/07/18-19 稚内文化センター(北海道・稚内市)

T. Shimizu, Y. Kogami, "Mid-loss underfill material measurements by a cut-off circular waveguide method in millimeter wave region," *Proceeding of Thailand-Japan Microwave 2013 TJMW2013*, WE4-2, 2013/12/2-4, Bangkok(Thailand)

二階堂誠也, 清水隆志, 古神義則, "銅張り誘電体基板の実効導電率評価に関する検討," 信学技報, MW2013-162, pp. 65-70, 2013/12/19-20, 埼玉大学(埼玉県・さくら市)

岡本仁成, 清水隆志, 古神義則, "CPW 構造円形スロット共振器を用いた 30GHz 帯 BPF の設計," 信学技報, vol. 113, no. 460, MW2013-216, pp. 113-116, 2014/3/4-5, 愛媛大学(愛媛県・松山市)

江幡秋人, 清水隆志, 古神義則, "誘電体平板のミリ波複素誘電率測定の高精度化に関する一検討," 2014 電子情報通信学会総合大会, C-2-55, p.85, 2014/3/18-21, 新潟大学(新潟県・新潟市)

二階堂誠也, 清水隆志, 古神義則, "銅張り誘電体基板の実効導電率の測定精度に関する検討," 2014 電子情報通信学会総合大会, C-2-59, p.88, 2014/3/18-21, 新潟大学(新潟県・新潟市)

清水隆志, 岡本仁成, 古神義則, "CPW 構造円形スロット共振器を用いた 30GHz 帯 BPF の試作・評価," 2014 電子情報通信学会ソサイエティ大会, C-2-63, p.86, 2014/9/23-26, 徳島大学(徳島県・徳島市)

A. Ebata, T. Shimizu, Y. Kogami, "Frequency dependence measurement of complex permittivity for C-, A- and R-plane sapphire substrates from 30 to 50GHz band," *2014 Asia Pacific Microwave Conference Proceedings*, TH2C-2, pp.516-518, 2014/11/4-7, 仙台国際センター会議場(宮城県・仙台市)

S. Nikaido, T. Shimizu, Y. Kogami, "Study on evaluation techniques of effective conductivity for copper-clad dielectric substrates," *2014 Asia Pacific Microwave Conference Proceedings*, TH3Ga-13, pp.919-921, 2014/11/4-7, 仙台国際センター会議場(宮城県・仙台市)

T. Shimizu, "[Invited] Low Loss 30GHz Dual Mode Filter Using a Coplanar Waveguide Type Circular Slot Resonator,"

*Proceeding of Vietnam Japan Microwave 2014 VJMW2014*, 2014/11/24-25, Hanoi(Vietnam)

T. Shimizu, Y. Kogami, "Low loss 30GHz dual mode filter using a coplanar type circular slot resonator," *Proceeding of Thailand-Japan Microwave 2014 TJMW2014*, FR3, 2014/11/26-28, Bangkok(Thailand)

T. Shimizu, Y. Kogami, "Development of Low Loss Ka-Band Narrowband Bandpass Filter using a Dual Mode Coplanar Type Circular Slot Resonator," *2015 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest*, THPD-3, 2015/5/17-22, Phoenix(USA)

磯部陽貴, 清水隆志, 古神義則, "イットリア安定化ジルコニア平板の 20GHz 帯における複素誘電率測定と結晶構造測定," 電気学会研究発表会資料, EDD-15-060, pp.15-18, 2015/6/5, 宇都宮大学(栃木県・宇都宮市)

磯部陽貴, 清水隆志, 古神義則, "遮断円筒導波管法による高誘電率 YSZ 結晶性材料の複素誘電率測定," 信学技報, vol.115, no.115, MW2015-44, pp.35-40, 2015/6/25, 川崎市産業振興財団(神奈川県・川崎市)

清水隆志, 二階堂誠也, 古神義則, "銅張り誘電体基板に挟まれた誘電体円柱共振器の共振特性解析," 信学技報, vol.115, no.141, MW2015-86, pp.233-238, 2015/7/16-17, 釧路市生涯学習センター(北海道・釧路市)

T. Shimizu, "Realization of millimeter wave narrowband BPF using high Q resonator," *The 4th Smart City Workshop in Malaysia*, 2015/9/2-3, Putrajaya (Malaysia)

清水隆志, 二階堂誠也, 古神義則, "銅張り誘電体基板に挟まれた誘電体円柱のモード整合法による共振特性解析," 2015 電子情報通信学会ソサイエティ大会, C-2-29, p.49, 2015/9/8-11, 東北大学(宮城県・仙台市)

磯部陽貴, 清水隆志, 古神義則, "ミリ波帯における MgO 基板の複素誘電率の周波数依存性測定の検討," 信学技報, vol.115, no.476, MW2016-177, pp.21-26, 2016/3/2-4, 広島大学(広島県・東広島市)

磯部陽貴, 清水隆志, 古神義則, "MgO 基板の複素誘電率の 30-50GHz における周波数依存性測定," 2016 電子情報通信学会総合大会, C-2-69, p.98, 2016/3/15-18, 九州大学(福岡県・福岡市)

清水隆志, 古神義則, "ミリ波高 Q 共振器を用いた低損失狭帯域フィルタ," 平成 28 年電気学会全国大会, 3-S14-4, pp.S14(10)-(11), 2016/3/16-18, 東北大学(宮城県・仙台市)

② T. Shimizu, Y. Kogami, "Accurate interface conductivity measurement technique for a copper-clad dielectric substrate using a

substrate sandwiched dielectric rod resonator," *87th ARFTG Microwave Measurement Conf. Digest*, pp.88-91, 2016/5/23-27, San Francisco (USA)

古神 義則 (KOGAMI, Yoshinori)

- ② Y. Hirano, T. Shimizu, Y. Kogami, "Experimental Study on a Resonance Characteristics of a Stacked Dielectric Resonator for the Two Dielectric Resonator Method," *Proceedings of Thailand-Japan Microwave 2016 TJMW2016*, TH1-07, 2016/6/6-11, Bangkok (Thailand)
- ③ Y. Mogami, N. Yamada, T. Shimizu, Y. Kogami, "Experimental Study on the Appropriate Load Force on the Dielectric Plate in a Circular Cavity Resonator for the Complex Permittivity Measurement," *Proceedings of Thailand-Japan Microwave 2016 TJMW2016*, FR2-08, 2016/6/6-11, Bangkok (Thailand)
- ④ 清水隆志, 小島駿佑, 古神義則, "[特別講演]60GHz帯における空洞共振器法を用いた低誘電率フィルムの複素誘電率の高精度評価技術," 信学技報, vol.116, no.486, MW2016-200, pp.67-72, 2017/3/2/-3, 岡山県立大学(岡山県・総社市)
- ⑤ K. Goto, T. Shimizu, Y. Kogami, "Study on a high-Q H-slot resonator for Ka-band narrowband BPF," *The 5th International Smart City Workshop in Malaysia*, 2015/7/16-17, Putrajaya (Malaysia)
- ⑥ 後藤洸介, 清水隆志, 古神義則, "共平面構造Hスロット共振器を用いた30GHz帯狭帯域2段BPFの設計," 電気学会研究発表会資料, EDD-17-037, CMN-17-025, pp.13-16, 2017/3/17, 宇都宮大学(栃木県・宇都宮市)

[図書] (計0件)

[産業財産権]

出願状況 (計0件)

取得状況 (計0件)

[その他]

ホームページ等

<http://mmw.ee.utsunomiya-u.ac.jp/~shimizu/>

<http://mmw.ee.utsunomiya-u.ac.jp/>

[http://www.eng.utsunomiya-u.ac.jp/koukou/kenkyu/densi\\_kyouzyu/shimizu/index.html](http://www.eng.utsunomiya-u.ac.jp/koukou/kenkyu/densi_kyouzyu/shimizu/index.html)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

清水 隆志 (SHIMIZU, Takashi)

宇都宮大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号: 80500397

(2) 研究分担者

(3) 連携研究者

(4) 研究協力者