

機関番号：12201

研究種目：基盤研究 (C)

研究期間：2008～2010

課題番号：20560289

研究課題名 (和文)

ミリ波回路用基板材料の評価法に関する研究

研究課題名 (英文)

Study on an evaluation technique for millimeter-wave circuit substrate materials

研究代表者

古神 義則 (KOGAMI YOSHINORI)

宇都宮大学・工学研究科・准教授

研究者番号：10260473

研究成果の概要 (和文)：

ミリ波回路を設計する際、回路に用いられる基板材料を評価する必要があり、本研究ではその評価法に関する諸検討を行った。基板材料の絶縁層部分の誘電特性の評価には、ウイスパリングギャラリーモード共振器法を適用し、回路用絶縁層の構造に起因する誘電率異方性を評価することに成功した。誘電率の評価結果の一部は、他の誘電率評価法によっても確認した。また、回路の導体薄膜部の表面抵抗測定の基礎的検討も行った。ウイスパリングギャラリーモード共振器法ならびに両端短絡型誘電体共振器法を用いた検討により、銅張り積層板のミリ波表面抵抗の測定技術確立の基礎資料を得た。

研究成果の概要 (英文) : In design of millimeter-wave planar circuits, it is necessary to evaluate the copper-clad substrates. The relative permittivity of the insulator and the surface resistance of the copper should be measured at the millimeter-wave frequency band. Most of the insulator for the circuit substrate consist of the laminated glass-cloth sheets which are contained the low-loss plastic resin. Therefore, its relative permittivity has anisotropy generally for their dielectric properties. The circuit substrate suppliers, however, hardly show us data of the anisotropic permittivity in their catalog. The circuit designers frequently are troubled with the disagreement between the measured and pre-estimated results for the test-manufactured circuits or devices.

On the other hand, for the conductor properties, the influence of the boundary situation between the insulator and the copper film on its effective conductivity should be evaluated to estimate the conductor loss of the designed circuits.

In this study, we investigate a measurement method to evaluate the anisotropy of the relative permittivity of the dielectric laminate substrates using Whispering-Gallery mode dielectric resonator method, at first. Some dielectric substrate materials are measured in the 50 to 75 GHz band and the anisotropic relative permittivities are evaluated. The measured results of the relative permittivity in planar direction are compared with the measured results by the cut-off cylindrical wave guide method. Secondary, we investigate the measurement techniques to evaluate the millimeter-wave surface resistance of the conductor materials.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,600,000	480,000	2,080,000
2009年度	1,500,000	450,000	1,950,000
2010年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			

総計	3,600,000	1,080,000	4,680,000
----	-----------	-----------	-----------

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・電子・電気材料工学

キーワード：作成・評価技術，マイクロ波・ミリ波，誘電体基板材料

1. 研究開始当初の背景

銅貼り誘電体基板の電気特性は、単純には誘電体部分の複素誘電率，および銅貼り部分の導電率のみで表現されるが，誘電体の不均質性，異方性，銅貼り工程における面粗しなどの影響など実際には複雑な要素が大きく，回路を構成したときの諸特性に大きな影響を与えることがある．基板は，マイクロストリップ線路，コプレーナ線路，平面パッチアンテナ，導波管スロット線路・スロットアンテナなど各種の高周波回路の構成に用いられているが，このようにそのアプリケーションが異なれば，回路内の高周波電磁界の様子，偏波方向，電界や電流集中の箇所とその程度が異なる．回路基板を提供する側は，各要素についての詳細を把握し，回路設計を行う側に提供することが求められる．この種の回路基板がもっとも良く用いられている周波数帯は，その上限をマイクロ波帯としている．数GHzの高速パルス信号を扱う回路でも，20～30GHz帯までの基板特性を把握できていれば良く，その周波数帯ならば種々の測定法が整備されており信頼性の高い基板評価が可能となっている．しかし，従来の方法をさらに高い周波数に適用しようとする時，波長の短縮により測定治具工作精度の影響，測定試料の極小化等により測定精度は急激に劣化する．本研究当初は50GHz以上の周波数帯では，高精度かつ使い勝手の良い測定法を見つけるのが大変難しいという状況にあった．

以上のような背景に基づき，本研究では，銅貼り誘電体基板の高精度評価技術を確立すべく，50GHzから100GHzにわたる周波数帯に対応でき，要求される測定精度で，実効的誘電率およびその異方性，銅薄膜各面の実効表面抵抗値を取得できる測定手法の開発を目指した．

2. 研究の目的

本研究の具体的目的は，ミリ波回路基板材料の評価法として，研究代表者が開発したミリ波帯誘電率測定のためのWGモード誘電体共振器法が応用可能であることを実証し，実際にミリ波で動作する通信用回路用銅貼り誘電体基板の実効的電機特性の高精度測定法を開発することとした．特に，誘電体部分は必ずしも一様媒質ではなく，機械的強度あるいは温度安定性向上のために，ガラス織

維材あるいはその他の添加物が混入される場合が多い．そのため，誘電体部分の電気的特性を把握するためには，その誘電率異方性の測定が必要である．本研究では，この点を最重要課題とし，2つの偏波方向のモードをもつWGモードを使用することで，誘電率異方性を評価することを第一の目的とした．さらに，銅張り部分の実効的導電率の評価に関しても，その実際の技術について検討を加える．

3. 研究の方法

まず，銅貼り誘電体基板の評価手法として，ミリ波誘電率測定法として開発されたWGモード共振器法を応用する．WGモード共振器法は，図1に示す様に，被測定誘電体材料で直径が波長の数十倍，厚みが半波長程度の円板状の試料を作成し，誘電体線路によりこの円板中にWGモードを励振し，検出する．

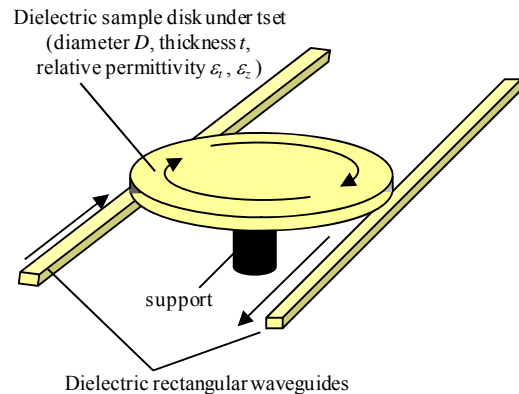


図1 WGモード共振器

WGモードは，偏波方向が円板面に水平方向を向くWGEモードと垂直方向を向くWGHモードに分類される．円板試料の誘電率が異方性を持つ場合のこの2つのモードに対して，平行平板モデルモードマッチング解析を行い固有値方程式

$$\det H(f_{0,n}; \epsilon_t, \epsilon_z, n, L, h, D) = 0 \quad (1)$$

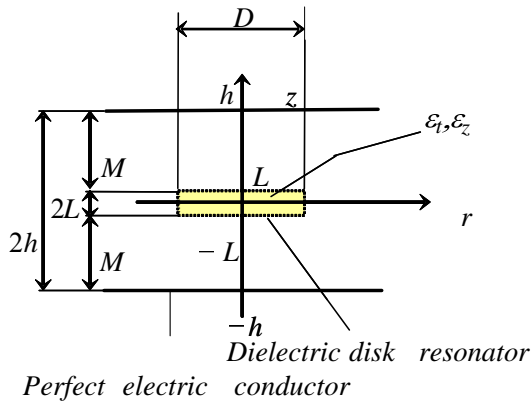


図2 解析図

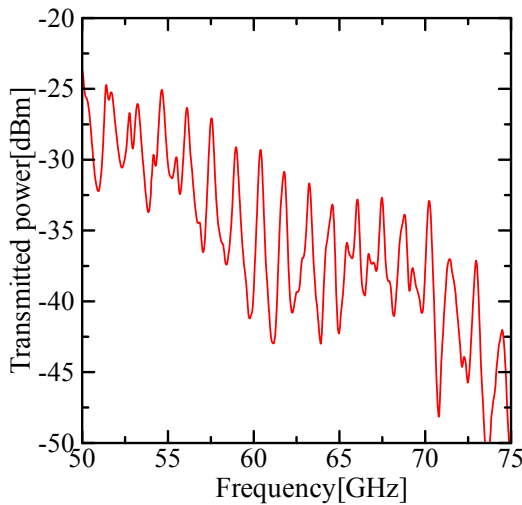


図3 WGモードの共振応答

を導出した。解析モデル図を図2に示す。

以下に誘電率異方性を測定するために開発した具体的な手順を示す。

(1) まず、誘電体励振線に垂直方向偏波の伝送モードを励振し、これにより円板内にWGHモードを励振しその周波数特性を得る。

(2) 図3の様に、WGモードの共振特性は周期的に複数現れるので、共振ピーク毎に次式で定義される隣接モードとの共振周波数間隔 F_n を算定する。

$$F_n = \frac{f_{0,n+1} - f_{0,n-1}}{2} \quad (2)$$

(3) 式(1)の固有値方程式より、適当な誘電率に対して、 F_n を計算し、上で求めた測定値と比較し、測定値とよく合う結果をもたらす比誘電率値を見出す。WGEモードの場合

その共振周波数は、水平方向の誘電率にのみ依存するので、ここで得られた比誘電率は、基板の垂直方向の比誘電率に相当する。(図4参照)

(4) WGHモードについても同様の作業を行う。WGHモードの場合その共振周波数は、水平方向の誘電率だけでなく、垂直方向の誘電率にも依存する。しかし、上の手順で水平方向の誘電率は基地であるので、ここでは、基板の垂直方向の比誘電率のみ求めればよい(図5参照)。

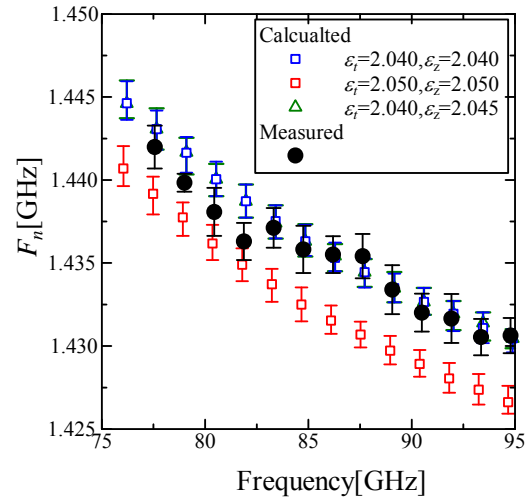


図4 WGEモードによる水平方向誘電率推定

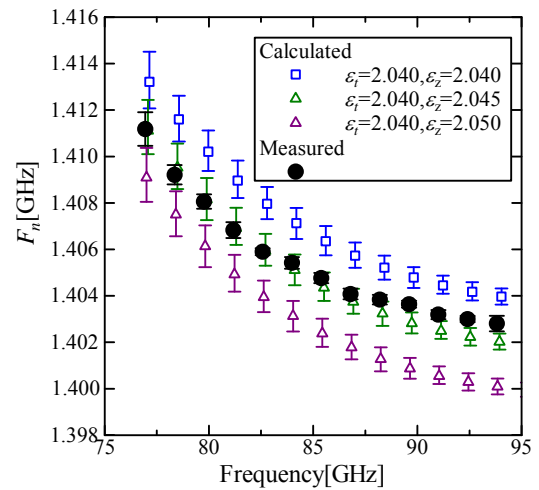
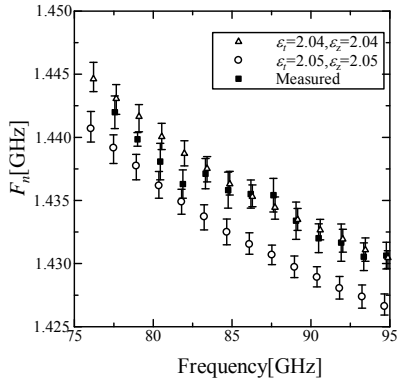


図5 WGHモードによる垂直方向誘電率推定

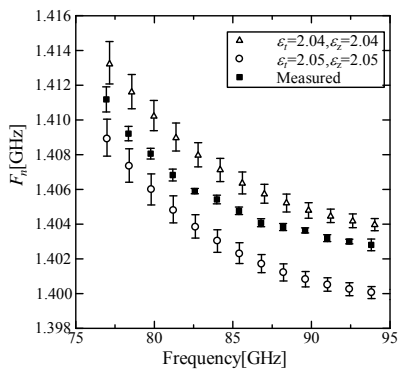
4. 研究の成果

以上に記述した測定原理を用いて、実際にミリ波周波数帯で基板材料評価を実行するための、測定システム、評価結果算定プログラムを開発した。測定システム・装置を図6

に示す。また、この測定システムを用いて、いくつかの基板用材料に対する測定を行った。結果の一例を図7から9、および表1、表2に示す。

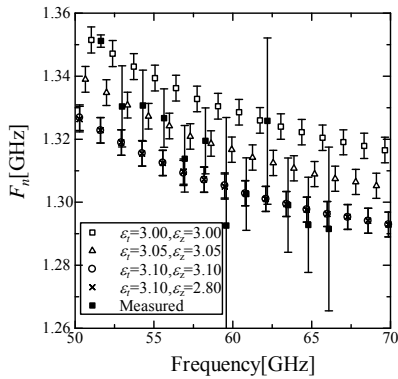


(a) Measure ϵ_t values with the WGE modes

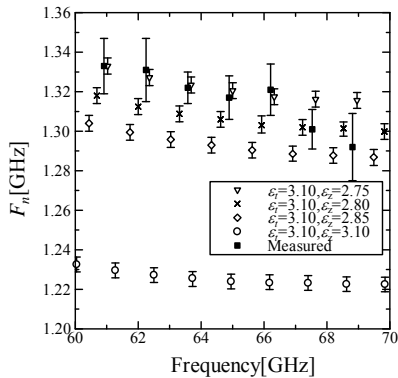


(b) Measure ϵ_z values with the WGH modes

図7 PTFE 基板に対する測定結果

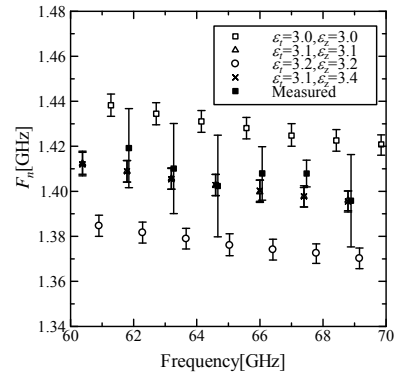


(a) Measure ϵ_t values with the WGE modes

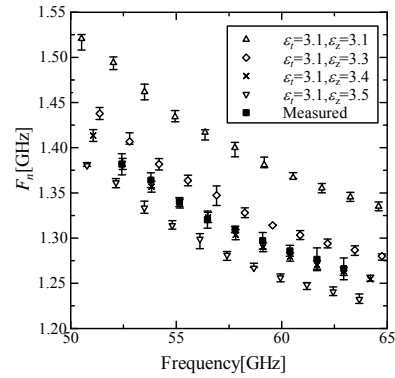


(b) Measure ϵ_z values with the WGH modes

図8 LCP 基板に対する測定結果



(a) Measure ϵ_t values with the WGE modes



(b) Measure ϵ_z values with the WGH modes

図9 PS 基板に対する測定結果

表1 測定例として示す試料の名称・寸法

sample name	diameter D (mm)	thickness t (mm)
PTFE	47.72±0.03	2.635±0.041
LCP	42.68±0.03	2.045±0.007
PS	39.80±0.13	1.736±0.011

表2 比誘電率測定結果

sample name	ϵ_t	ϵ_z
PTFE	2.04±0.01	2.04±0.01
LCP	3.35±0.10	3.00±0.10
PS	3.1±0.1	3.4±0.1

本測定結果の一部を検証するため、遮断円筒導波管法 (T. Shimizu, Y. Kobayashi, "Cut-off circular waveguide method for

dielectric substrate measurements in millimeter wave range,” IEICE Trans. Electron., vol.E87-C, no. 5, pp.672-680, May 2004.) による同一材料の測定を行い、両者を比較した。結果を表 2 に示す。遮断円筒導波管法では、水平面に沿う電界成分を持つ TE_{011} モードを用いるので、測定できる比誘電率は水平方向のものである。提案法による水平方向の比誘電率測定値は、遮断円筒導波管法による測定結果とほぼ一致し、本測定結果の確認ができた。

次に、銅張り積層板のミリ波表面抵抗の評価に関して行った研究について述べる。

表面抵抗の測定法としては、前述の WG 法他に超電導体の表面測定法として知られる 2 サファイア共振器法の適用を試みた。

図 10 に WG 法による導電率測定の実験装置を示す。将来銅張り積層板の評価に応用できる様被測定導体基板の上に円板共振器をおいた構造とした。本構造に対するモードマッチング解析を行い測定公式を導出した。

しかしながら、図 10 の装置では、WG モードの適切な励振が難しいことが分り、現在励振方法に関する検討を継続して行っている。

その一方で、図 11 に示す 2 サファイア共振器法によるミリ波帯表面抵抗測定に関する検討を行った。測定例に示すように現在 30GHz 帯で銅板の測定を行うことに成功している。今後さらに測定周波数帯の向上を目指す予定である。

また、実際に銅張り積層板の実効的表面低意向の評価に応用し、先に述べた誘電率異方性の評価法と共にミリ波回路基板材料評価手法として確立させる予定である。

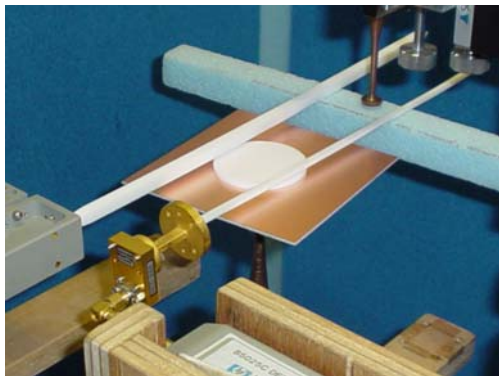


図 10 WG モード共振器法によるミリ波表面抵抗測定

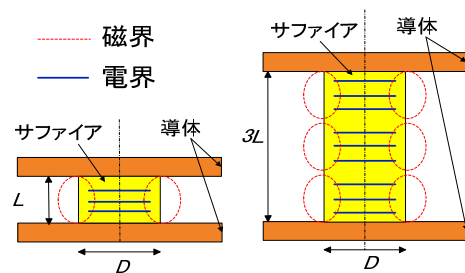


図 11 2 サファイア共振器法

(吉川, 橋本, 小林 ‘ミリ波帯における YBCO 薄膜の表面抵抗測定’, 信学技報, MW2000-80, pp. 35-37, Aug. 2000.)

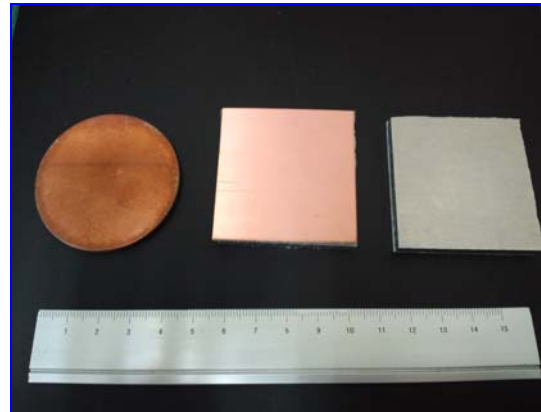


図 12 測定試料 (左から無酸素銅板, 銅張り積層基板, アルミ板)

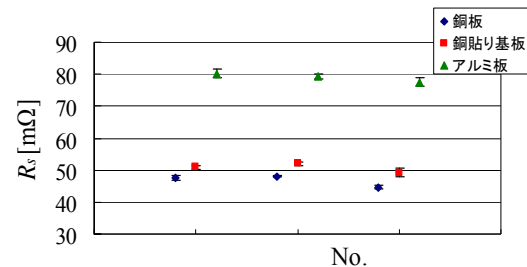


図 13 各種導体板の 30GHz 帯における表面抵抗測定結果

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 6 件)

- ① T. Shimizu, Y. Kawahara, S. Akasaka, Y. Kobayashi, Y. Kogami, “Complex Permittivity Measurements of a PTFE Substrate in W Band by the Cut-off Circular Waveguide Method”, 2011 China-Japan Joint Meeting on Microwaves (CJMW '2011), Conference Proceedings, FC-1-1, pp.501-504, April. 2011.
- ② Y. Kogami, T. Shimizu, and W. Watanabe, “Evaluation of millimeter wave anisotropic permittivities of

the dielectric laminate substrates using WG resonator method”, FC-1-6, pp.497-500, April. 2011.

- ③ T. Shimizu, S. Akasaka, Y. Kawahara, Y. Kogami, “A 100GHz Grooved Circular Empty Cavity for Low Loss Dielectric Substrate Measurements in W Band,” 2010 Asia Pacific Microwave Conference Proceedings, FR2E-3, pp.1701-1704, Dec. 2010.
- ④ T. Huong, Y. She, J. Hirokawa, K. Sakurai, Y. Kogami, and M. Ando, “Evaluation of Effective Conductivity of Copper-Clad Dielectric Laminate Substrates in Millimeter-Wave Band using a Whispering Gallery Mode Resonator,” IEICE Trans. Electron., Vol. E92-C, No.12, pp.1504-1511, Dec. 2009.
- ⑤ T. Huong, Y. She, J. Hirokawa, K. Sakurai, Y. Kogami, M. Ando, “Evaluation of Effective Conductivity of Copper-clad Dielectric Substrates in Millimeter-Wave Band”, Triangle Symposium on Advanced ICT 2009(TriSAI2009), Session R5-3, pp.95-100, Tokyo, Japan, October 28-30, 2009.
- ⑥ Y. Kogami, T. Shimizu, S. Osawa, N. Abe, “Evaluation of the Millimeter-Wave Characteristics of Dielectric Substrates by using Whispering Gallery Mode Resonators”, 2008 China-Japan Joint Meeting on Microwaves (CJMW '2008), Conference Proceedings, vol.2, FC-2, pp.703-706, Sep. 2008.

[学会発表] (計 11 件)

- ① 清水隆志, 古神義則, 平地康剛, “20-100GHz 帯における AlN 平板の複素誘電率の周波数依存性測定,” 2011 電子情報通信学会総合大会, C-2-49, p.87, Mar. 2011.
- ② 清水隆志, 中村雅人, 川原祐紀, 赤坂清三, 古神義則, “遮断円筒導波管法による W 帯における複素誘電率測定の検討,” 信学技報, MW2010-106, pp.7-10, Nov.25, 2010.
- ③ 渡邊渉, 中村雅人, 清水隆志, 菊池幸市, 古神義則, “WG モード共振器法による積層基板材料の複素誘電率測定に関する検討,” 信学技報, MW2010-107, pp.11-14, Nov.25, 2010.
- ④ 古神義則, 清水隆志, 中村雅人, 渡邊渉, “ミリ波誘電体基板材料と材料評価法の最新動向,” 平成 22 年電気学会電子・情

報・システム部門大会講演論文集, TC16-1, pp.566-569, Sep.3, 2010.

- ⑤ 中村雅人, 清水隆志, 小宮谷壽郎, 古神義則, “遮断円筒導波管法による誘電体基板の複素誘電率の面内分布測定,” 2010 電子情報通信学会ソサイエティ大会, C-2-34, p.70, Sep.3, 2010.
- ⑥ 清水隆志, 中野洋, 古神義則, 平地康剛, “ミリ波集積回路フリップチップ実装時におけるアンダーフィル剤の影響に関する検討,” エレクトロニクス実装学会超高速高周波エレクトロニクス実装研究会, 平成 22 度第 2 回公開研究会論文集, Vol.10, No.2, pp.17-22, Jul.9, 2010.
- ⑦ 足立亮子, 島内浩一, 清水隆志, 古神義則, “ミリ波誘電体基板材料の複素誘電率温度特性評価,” 信学技報, MW2010, pp.1-6, May.14, 2010.
- ⑧ 清水隆志, 中村雅人, 古神義則, “遮断円筒導波管法によるアンダーフィル材料の複素誘電率測定に関する検討,” 信学技報, MW2010, pp.51-54, May.14, 2010.
- ⑨ 大澤悟, 中村雅人, 清水隆志, 古神義則, “WG モード共振器法によるミリ波誘電体基板材料の複素誘電率測定に関する検討,” 信学技報, vol.109, no.431, MW2009-188, pp.53-58, Mar.4, 2010.
- ⑩ 清水隆志, 中野洋, 須賀良介, 古神義則, 平地康剛, “アンダーフィル材料がミリ波 MMIC に及ぼす影響の検討,” 第 24 回 エレクトロニクス実装学会春季講演大会, 10B-4, pp.24-25, Mar.12, 2010.
- ⑪ 清水隆志, 中村雅人, 古神義則, “50GHz, 70GHz 帯におけるアンダーフィル材料の複素誘電率測定,” 2010 電子情報通信学会総合大会, C-2-57, Mar.16, 2010.

[図書] (計 1 件)

- ① 橋本修, 古神義則 他, “ミリ波技術の基礎”, 電気学会, 全 302 ページ (担当部分 19-25, 32-33, 48-55, 79-80 ページ), July 2009

6. 研究組織

(1) 研究代表者

古神 義則 (KOGAMI YOSHINORI)
宇都宮大学・工学研究科・准教授
研究者番号: 10260473