

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 17 日現在

機関番号：25301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26420314

研究課題名(和文)放射光を用いた短ミリ波帯テフロン導波管回路の開発とその集積化に関する研究

研究課題名(英文) Study on development of PTFE-waveguide circuits for short millimeter-wave frequencies and its integration using synchrotron radiation

研究代表者

岸原 充佳 (Kishihara, Mitsuyoshi)

岡山県立大学・情報工学部・准教授

研究者番号：50336905

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、放射光エッチング製作プロセスに基づき、サブミリ波領域(300 GHz～)へ直接応用できるテフロン導波管集積回路技術の確立を目的に、機能回路への発展と集積化(複数回路の一体化)を試みた。

2つのE面方形空洞方向性結合器が接続された構造、E面電力分配器とホーンアンテナ2個の一体構造、十字型カプラと横断回路を組み合わせた4×4バトラーマトリクスを周波数180 GHzで試作・評価した。測定によりこれら回路特性を確認することができ、短ミリ波帯E面およびH面導波管機能回路の集積化が可能であることを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：In this study, development of the functional PTFE-waveguide circuits and its integration was attempted based on the fabrication technology using synchrotron radiation, for the purpose of establishing the fabrication technology which could apply directly to submillimeter-wave region (300 GHz >).

A structure consisting of two E-plane cavity-type couplers, an integrated structure of an E-plane power divider and two horn antennas, and a 4x4 Butler matrix circuit based on combinations of cruciform couplers and intersection circuits were fabricated and evaluated at 180 GHz. The characteristics of these circuits were confirmed by the measurements. It was made clear that the integration of functional E-plane and H-plane waveguide circuits for short millimeter-wave frequencies could be realized.

研究分野：マイクロ波ミリ波工学

キーワード：ミリ波 導波管 放射光 放射光エッチング 微細加工 スパッタ蒸着 集積回路 バトラーマトリクス

1. 研究開始当初の背景

(1) 種々の微細加工技術を活用して機械部品や光スイッチの様なマイクロデバイスを実現しようとする研究が盛んである。主な微細加工技術としては、レーザ加工、リソグラフィ、LIGAなどが知られている。特にリソグラフィは、紫外線の他にX線を光源として用いるものもあり、加工精度はマスクとレジストの性能に依存する。LIGAは、X線リソグラフィ、電鍍、鋳型法を組み合わせた方法で、マイクロパーツ等の製作に活用されている。

マイクロ波・ミリ波分野に微細加工技術を応用した例としては、リソグラフィによるW帯(75-110 GHz)のH面導波管ホーンアンテナ試作(J.W. Digbyら)、LIGAプロセスを応用したコプレーナ線路とフィルタの試作(Forman)、光硬化樹脂と銅メッキを用いたW帯中空導波管の試作(広川ら)などが報告されている。また、Digbyの試作したW帯導波管ホーンアンテナは、内部を中空にするため、一旦レジストで作製したベース形状に金属を付着させ、その後不要なレジストを取り除くためプロセスが煩雑になる。広川らのW帯導波管はスロットアレーアンテナへ応用されているが、内壁への良好なめっき条件としてのスロット幅が1.2 mmと広い。

(2) テフロン(PTFE)は、優れた電気的特性、熱的特性、低摩擦性、耐化学特性などを持っており、マイクロ波の誘電体材料や導波路媒体としても広く利用されている。このテフロンは、とりわけ数10 μmの精度で数100 μmの高さをもつ構造体の微細機械加工が非常に困難な材料としても知られている。レーザ加工などでは、高アスペクト比構造物を形成するには加工レートが遅い。しかし、放射光を照射すれば、厚さ1 mm以上のテフロンを直接加工することが可能である。

私は、これまでに放射光直接エッチングを利用してテフロンの加工を行い、テフロンで形成された導波路パターンを作成し得ることに着想し、これを導波路の核(媒体)として周囲に金属を蒸着させることで誘電体で満たされた金属導波管の開発を行ってきた(若手研究(B), 18760258)。さらに、その機能回路への発展、導波管回路の集積化(複数回路の一体化)を行うべく、共振器直結型バンドパスフィルタや十字交差方向性結合器の試作評価を実施してきた(若手研究(B), 21760263)。これにより、微細パターンを組み合わせたフィルタや方向性結合器が実現可能なことが証明されるなど、本製作プロセス

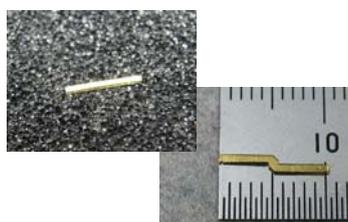


図1 G帯テフロン導波管

スで着実な成果が得られている。

加えて、本プロセスは、ミリ波帯のみならずサブミリ波帯の導波管コンポーネント製作に有効であることを明確に示すため、短ミリ波帯(G帯, 140-220 GHz)で動作するテフロン導波管(図1)の試作と評価を行い、G帯で十分動作するとの結果を纏めている(若手研究(B), 24760282)。

2. 研究の目的

これまで、本プロセスにてG帯のテフロン導波管基本回路(直線、バンド等)の製作と評価を行い、短ミリ波帯導波管として十分に動作することを明らかにしたが、複数の実用機能回路実現とそれらの集積化には至っていない。そこで、短ミリ波帯(G帯)を中心とするテフロン導波管機能回路(フィルタ、カプラ等)の製作と集積化を行い、本プロセスで200 GHz程度の周波数で動作するチップサイズの集積導波管回路構成技術を確立することを目的とする。

3. 研究の方法

(1) 本研究では、中型放射光施設 NewSUBARU に設置されたビームライン“大面積X線露光システム BL-2”を使用してテフロンの放射光エッチングを行った。エッチングには、1.5 GeV 運転で発生する 2 keV ~ 12 keV のエネルギー帯域を利用する。

(2) テフロン導波管回路の製作プロセスは、テフロンの放射光エッチング、および金のスパッタ蒸着と電解めっきから成る。

図2は、放射光エッチングの実施状況を示している。まず、テフロンシートと回路パターンを写したステンシルマスクを準備する。本研究のマスクは、厚さ100 μmのSUS304にレーザ加工したものを用いている(公差±7.5 μm)。そして、ステンシルマスクをテフロンシート上に置き、露光ステージに固定する。ステージにはヒーターが内蔵されており、テフロンシートの背面から加熱を行う。この温度はエッチングレートおよび加工精度に関係する。テフロンシートが比較的薄く(約0.4 mm)寸法精度が要求される場合、低めの温度設定(約150°C)で加工精度を確保する。

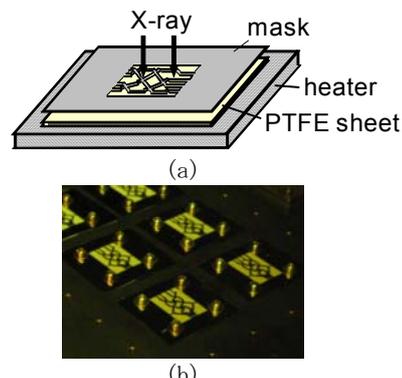


図2 放射光エッチング (a) 概念図 (b) 露光チャンバー内部への設置例

その後、チャンバー内を真空に引きスキャン露光を行えば、化学処理することなく回路パターンが得られる。

(3) エッチングで得られたテフロンパターンの全表面に Au をスパッタ蒸着することで、金属薄膜で覆われた導波管構造を完成させる(図3)。Ar プラズマへの暴露を数分間行い PTFE の表面を少し荒らした後に、スパッタ蒸着法で Au の薄膜を形成する。アンカー効果により Au 膜の接着力が増大する。本研究では、スパッタ蒸着で約 500 nm の Au 膜を形成する。スパッタ蒸着は、テフロンシートの両面について行う。なお、Au 膜は、電磁界が漏洩しないよう G 帯の表皮深さを考慮した厚さでなければならない。そのため、電解めっきプロセスで Au 膜を約 5 μm まで堆積させる。最後に不要な枠を除去すれば、テフロン導波管回路が完成する。

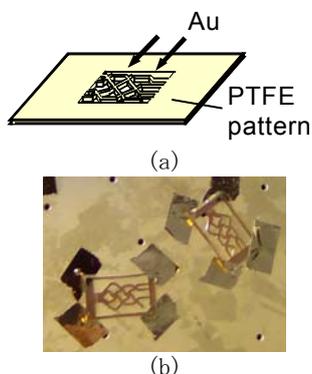


図3 Auの蒸着，電解めっき (a) 概念図 (b) スパッタ後の例

4. 研究成果

(1) まず、放射光直接エッチングによりテフロン加工を行い、2 個の G 帯テフロン導波管型 E 面方形空洞方向性結合器から成る構造を試作し、集積構造の伝送特性を確認した。

① 図4は、方形空洞 ($a \times b \times d$) の E 面内に 2 重鏡像対称性を保つよう 4 本の導波管 ($w \times d$) を接続した E 面方形空洞方向性結合器の構造を示している。方形寸法や入出力導波管の接続位置などをパラメータとする E 面内の 2 次元界分布で回路特性が決定される。

本研究では、テフロンで満たされた E 面導波管寸法を $0.40 \text{ mm} \times 0.80 \text{ mm}$ ($w \times d$) に選び、 TE_{10} モードが G 帯で伝搬するようにした。これを基に、中心周波数 180 GHz で 3dB 結合器を設計した。結合器は 4 ポート回路であるが、図5に示すように結合器 2 個を接続して再度

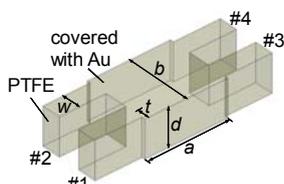


図4 E面方形空洞方向性結合器

合成された出力を評価した。図5の試作構造には、標準導波管からテフロン E 面導波管への変換構造も含まれており、集積化された導波管回路構造である。

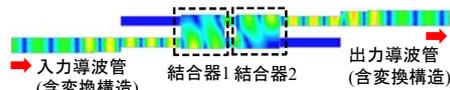


図5 結合器 2 個を接続した試作構造

② 3. の製作プロセスに基づいて、テフロンシート (厚 0.80 mm) 上に図5の構造を試作した。図6は、放射光エッチングにより得られたテフロンパターンである。導波路パターンが直接切り出されていることが確認できる。照射した X 線量は 1700 Asec であった。これは、加工時間としては 1.6 時間程度である。テフロン試料は約 200°C に保った。

その後、テフロン表面に Au の蒸着と電解めっきを施すことで金属導波管構造を得た。図7に試作した結合器を示す。



図6 結合器 2 個のテフロンパターン



図7 試作した E 面方形空洞方向性結合器

③ 周波数 3 通倍器とデテクタを用いて構成した測定環境を用いて、180 GHz 帯テフロン導波管 E 面方形空洞方向性結合器の伝送特性を測定した。通倍器-検波器間の Thru 特性で正規化した測定結果 S_{21} を図8に赤色の実線で示す。また、電磁界シミュレータ HFSS で計算した同構造の S_{21} 、 S_{11} を一点鎖線、点線で示す。HFSS と比較して、測定結果には 176 GHz、183 GHz に落ち込みが見られるが、再度合成された 3dB 結合器の出力を G 帯域内で確認できる。

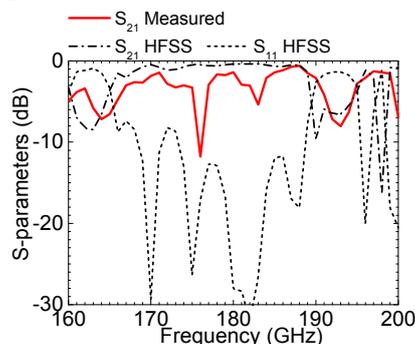


図8 伝送量測定結果および計算値 ($a = 1.77$, $b = 1.42$, $t = 0.27$, 結合器 1, 2 間 = 0.50, 入出力導波管長 (変換構造を除く) = 2.50 (in mm))

(2) 次に、G帯テフロン導波管E面2分配器を一体化したホーンアンテナを試作・評価した。180 GHzにおけるE面およびH面放射パターンを測定し、計算値と比較して大よそ一致していることを確認した。

① 上記の結合器の場合と同様、導波管寸法を0.40 mm×0.80 mmに選び、図9に示されるE面2分配器を中心周波数180 GHzで設計した。分配器の寸法 a_i 、 b_i は、3段チェビシェフ変成器の寸法を初期値として最適化設計した。分配器出力側には0.20mmの隙間を空けて2本の曲げ導波管を接続し、開口幅1.40mmのE面ホーンをE面内に2個配置した。また、分配器入力側は、WR-5標準導波管との接続を考慮するため、幅 W_m 、長さ l_m の1/4波長変換器を設けている。

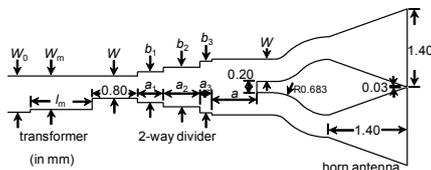


図9 E面2分配器とホーンアンテナの構造

② 3. の製作プロセスに基づいて、180 GHz帯テフロン導波管E面分配器とアンテナの一体構造を試作した。図10は、放射光エッチングにより得られたテフロンパターンである。照射したX線量は1700 Asecである。

その後、テフロン表面にAuの蒸着と電解めっきを施すことで金属導波管構造が完成する。図11に完成したE面2分配器とホーンアンテナの一体構造を示す。上記のスパッタ蒸着では、テフロンの周囲全体にAu膜が形成される。本研究では、アンテナ開口部は、後から手作業でAu膜を切除することで実現した。



図10 分配器一体化アンテナのテフロンパターン



図11 完成したE面2分配器とホーンアンテナの一体構造

③ 周波数3逓倍器とデテクタを用いて構成した測定環境を用いて、180 GHz帯テフロン導波管アンテナの指向性特性を測定した。ここでは、3逓倍器の出力にコンカルホーンを接続して送信アンテナとして用い、測定対象となるE面2分配器・E面ホーンアンテナを

G帯デテクタの前に接続して、受信電力の測定を行った。本研究では、指向特性を測定するため図12の写真に示されるように回転台(RCサーボ)の上にデテクタを置き、デテクタごと受信アンテナの角度を変えられるようにした。このとき、アンテナ間距離は10cm、高さは5cmという配置とした。距離10cmは、180GHzにおいて約60波長に相当する。

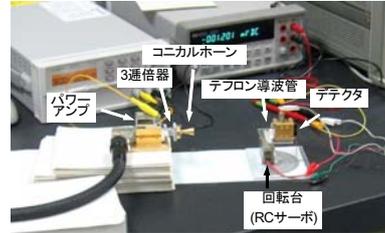
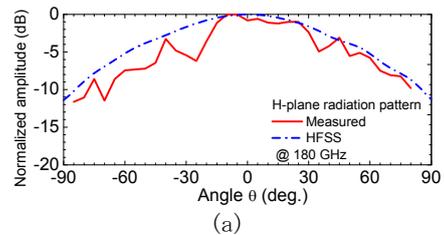


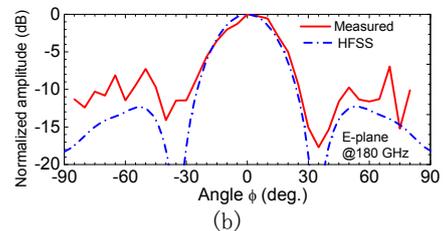
図12 180GHz帯(G帯)テフロン導波管アンテナの測定系

まず、H面放射パターンを測定した。測定は、アンテナ正面方向を0°として-85°から+80°まで5°刻みで変化させて行った。このときの放射パターンを図13(a)に示している。赤の実線が測定値で青の一点鎖線はHFSSの計算値である。-30°付近に落ち込みが見られるが、大よそHFSSと一致していることが確認できる。-30°付近の落ち込みは、アンテナ開口部の製作時に生じたAu膜の剥離の影響と思われる。

同様に、E面放射パターンを測定した。このときの放射パターンを図13(b)に示している。測定環境が良くないにも関わらず、メインビームのパターンと30°付近のヌル点の現れる場所などが大よそHFSSと一致しており、2個のE面ホーンアンテナの指向特性を再現できていることが確認できる。



(a)



(b)

図13 放射パターン (a) H面放射パターン (b) E面放射パターン ($a_1 = 0.46$, $a_2 = 0.65$, $a_3 = 0.21$, $b_1 = 0.55$, $b_2 = 0.71$, $b_3 = 0.92$, $a = 0.80$, $W_m = 0.60$, $l_m = 1.10$, $W_0 = 0.65$ (in mm))

(3) 次に、G帯テフロン導波管4×4バトラーマトリクスを試作・評価した。バトラーマトリクスは十字型3 dBカプラと交差回路を組み合わせて構成し、ホーンアンテナを一体化した構造で放射パターンを測定し、入力ポ

ートに応じてビーム方向が変化することを確認した。

① 一般的なバトラーマトリクスは、図 14 のような構成である。これは、4つの 90° ハイブリッド、2つの 45° 移相器、および2つの交差回路で構成される。本研究では、十字型カプラを 90° ハイブリッドとして用いた。交差回路としては、H面導波管横断回路を採用した。

まず、180GHz でバトラーマトリクスを構成するため、テフロン導波管十字型カプラと横断回路の設計を行った。これらはH面導波管型回路であるため、テフロン導波管の寸法を $0.90\text{ mm} \times 0.40\text{ mm}$ と決定した。この導波管寸法を基に、カプラと横断回路の形状を最適化した。そして、これら回路素子を組み合わせて 4×4 バトラーマトリクスを構成した。各素子の接続は、180 GHz での波長 1.53 mm を基にして導波路長を概算し、HFSS 上で調整した。このとき得られた 4×4 バトラーマトリクスの形状とポート#2 から入力した場合の電界分布を図 15 に示している。

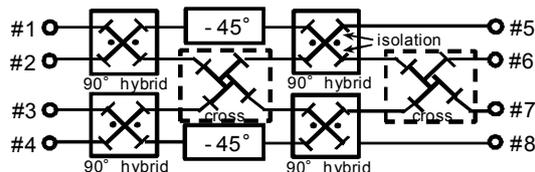


図 14 4×4 バトラーマトリクスのブロック図

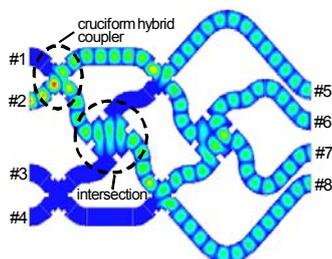


図 15 4×4 バトラーマトリクスの形状、および電界分布(ポート#2 から入力)

② 3. の製作プロセスに基づいて、180 GHz 帯テフロン導波管 4×4 バトラーマトリクスを試作した。図 16 は、放射光エッチングにより得られたテフロンパターンである。照射した X 線量は 2560 Asec である。加工時間としては約 2.5 時間である。なお、テフロンシートが 0.4 mm と薄いため、試料を低めの温度(約 150°C)に保って露光した。

その後、テフロン表面に Au の蒸着と電解めっきを施すことで金属導波管構造が完成する。図 17 に完成したバトラーマトリクス



図 16 バトラーマトリクスのテフロンパターン

を示す。本導波管バトラーマトリクスはテフロンベースで薄く小さく十分な機械強度がない。本研究では、回路形状を保持する目的で PMMA 容器内に固定させた。

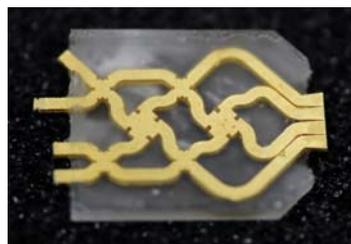


図 17 完成したバトラーマトリクス

③ 周波数 3 通倍器とデテクタを用いて構成した測定環境を用いて、180 GHz 帯テフロン導波管 4×4 バトラーマトリクスの指向性特性を測定した。バトラーマトリクスの試作は 2 つ行い、それぞれについて 180 GHz で測定した H 面放射パターンを図 18 (a)、(b) に示す。試作バトラーマトリクスの妥当性は、ポート #1 およびポート #2 から入力された場合の結果を比較することで確認した。赤の実線が測定した放射パターンであるが、主ビームの方向が信号入力場所に応じて変化していることが確認できる。それらは、HFSS を使ってシミュレーションした結果と一致していることが分かる。

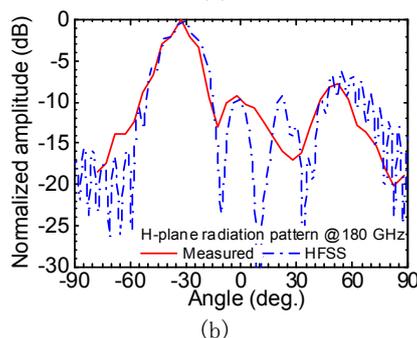
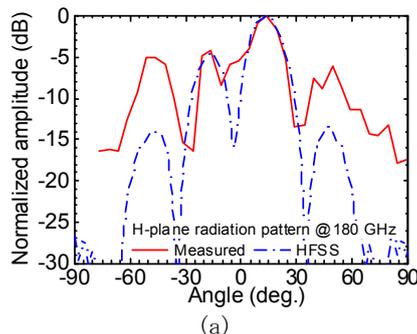


図 18 4×4 バトラーマトリクスの H 面放射パターン (a)入力ポート#1、(b)入力ポート#2

(4) 本研究課題の特色は、露光によるレジストや PMMA シートの変質、エッチング溶液による不要分の除去という一般的な微細加工プロセスを用いずに、高分子材料 PTFE(テフロン)を放射光で直接加工するプロセスとなるところにある。即ち、マイクロ波・ミリ波の導波路材料のひとつとして広く用いられているテフロンで、微細導波管構造および

各種回路素子を直接実現するところに本研究の独自性がある。

本研究課題により、短ミリ波帯 E 面および H 面導波管機能回路の集積化が可能であるというところまで明らかにできたと考え、これにより所期の目的がほぼ達成できたと考えられる。

しかしながら課題遂行の過程において、本テフロン導波管集積回路に課される制限として、次の問題点も明らかになってきた。1) 長い単独導波路部分の位置精度保持、2) 側面金属面積の増加による損失増大の懸念、3) 集積化されたテフロン導波管回路の入出力インターフェースや異種ガイドとの相互接続の制限である。これらが今後の新たな課題になると考えている。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 3 件)

- ① 岸原 充佳, 山口明啓, 内海裕一, 太田 勲、放射光エッチングによる集積化された短ミリ波帯 PTFE 充填導波管バトラーマトリクスを試作 – 十字型カプラと横断回路による構成 –、電子情報通信学会技術報告、vol. 116, no. 486, MW2016-188, pp. 1-6, 2017、査読無、ISSN: 0913-5685
- ② 岸原 充佳, 山口 明啓, 内海 裕一、太田 勲、PTFE 充填導波管による 180GHz 帯 E 面 2 分配器とホーンアンテナの試作評価、電子情報通信学会技術報告、vol. 116, no. 142, AP2016-47, pp. 61-66, 2016、査読無、ISSN: 2432-6380
- ③ 岸原 充佳, 村上 元規, 山口 明啓, 内海 裕一、太田 勲、放射光エッチングによる短ミリ波帯テフロン導波管バンドパスフィルタの試作、電子情報通信学会論文誌(C)、vol. J99-C, no. 7, pp. 361-364, 2016、査読有、ISSN: 1881-0217

[学会発表] (計 6 件)

- ① M. Kishihara, A. Yamaguchi, Y. Utsumi, I. Ohta, Fabrication of Waveguide Butler Matrix for Short Millimeter-Wave Using X-Ray Lithography, 2017 IEEE MTT-S International Microwave Symposium, TUIF2-7, June 6, 2017, Honolulu
- ② 岸原 充佳, 村上 元規, 山口 明啓, 内海 裕一, 太田 勲、テフロン導波管による 180GHz 帯 E 面 2 分配器とホーンアンテナの試作、2016 年電子情報通信学会総合大会、B-1-138, p. 138, March 18, 2016、九州大学
- ③ 岸原 充佳, 太田 勲、十字形カプラと横断回路によるバトラーマトリクス、平成 27 年電気・情報関連学会中国支部連合大会、p. 385, Oct. 17, 2015、山口大学
- ④ M. Kishihara, M. Murakami, A. Yamaguchi, Y. Utsumi, I. Ohta, Trial

Fabrication of PTFE-Based E-Plane Waveguide Coupler for Short Millimeter-Wave by SR Etching, 2015 IEEE International Symposium on Radio-Frequency Integration Technology (RFIT2015), pp. 127-129, Aug. 27, 2015, Tohoku University

- ⑤ 岸原 充佳, 佐々木 亮, 山本 敏寛, 山口 明啓, 内海 裕一, 太田 勲、放射光エッチングによるテフロン導波管型 E 面方形空洞方向性結合器の試作、2015 年電子情報通信学会総合大会、C-2-65, p. 85, March 12, 2015、立命館大学
- ⑥ M. Kishihara, R. Sasaki, T. Yamamoto, A. Yamaguchi, Y. Utsumi, I. Ohta, Fabrication of 180 GHz PTFE-Filled Waveguide and Its Bandpass Filters by SR Direct Etching, 2014 Asia-Pacific Microwave Conference, Nov. 5, pp. 49-51, 2014, Sendai

6. 研究組織

(1) 研究代表者

岸原 充佳 (KISHIHARA, Mitsuyoshi)
岡山県立大学・情報工学部・准教授
研究者番号：50336905

(2) 連携研究者

内海裕一 (UTSUMI, Yuichi)
兵庫県立大学・高度産業科学技術研究所・教授
研究者番号：80326298