

機関番号：25301

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2009～2010

課題番号：21760263

研究課題名（和文） 微細テフロン導波管回路の開発と集積化に関する研究

研究課題名（英文） Study on development of micro PTFE-waveguide circuit and its integration

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

研究成果の概要（和文）：本研究は、放射光によるテフロンの微細加工を行い、表面への金属の蒸着を施すことでミリ波やそれ以上のサブミリ波領域の周波数で応用が可能な微細導波管回路素子を構成する技術の開発を試みた。これにより、曲がりや不連続を集積した形状のアイリス結合バンドパスフィルタおよび空気領域ポストを持つ十字形 3dB 方向性結合器を放射光直接エッチングと Au スパッタ・電解メッキで完成させ、本加工法の有用性を明らかにした。

研究成果の概要（英文）：In this work, micro fabrication techniques for waveguide components suitable for millimeter-wave and submillimeter-wave applications have been developed. The PTFE microstructures are fabricated by direct exposure to synchrotron radiation, and the waveguiding structure is obtained by sputter deposition of metal on the PTFE surface. In this work, an iris-coupled bandpass filter and a cruciform coupler with air-filled posts inclusive of bends and discontinuities were designed and fabricated, and the validity of the present fabrication process was demonstrated.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009 年度	2,100,000	630,000	2,730,000
2010 年度	1,000,000	300,000	1,300,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,100,000	930,000	4,030,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・電子デバイス・電子機器

キーワード：ミリ波、導波管、放射光、放射光エッチング、マイクロデバイス、スパッタ蒸着、導波管フィルタ、導波管カプラ

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。マイクロ波ミリ波工学分野においても RF-MEMS 等に代表されるように、微細加工技術を用いて回路素子を実現する研究・開発が盛んに行われている。

主な微細加工技術としては、放電加工、レ

ーザ加工、リソグラフィ、LIGA などが知られている。放電加工は、硬質の金属の加工に有効な方法であるが、被加工物が導体でなければならない点で応用範囲が制限される。レーザー加工は、非接触で加工でき精度が高いのが特徴であるが、大量生産には向かないと言われている。リソグラフィには、紫外線の他、X 線を用いるものもあり、加工精度はマスク精度とレジストの性能に依存する。リソグラ

フィは、半導体製作プロセスへの応用が一般的である。LIGAは、X線リソグラフィ、電鋳、鋳型法を組み合わせた方法で、マイクロパーツなどの製作に応用されている。

マイクロ波・ミリ波分野での微細加工を扱った報告例としては、J. W. Digby らによる W 帯(75-110GHz)の H 面導波管ホーンアンテナや Forman によるコプレーナ線路とフィルタの試作がある。前者は、フォトレジスト(SU-8)を使用した製作プロセスであるため、導波管コンポーネントの厚みが最大で $700\mu\text{m}$ に制限されたものである。後者は、LIGA プロセスを応用したものであるが、厚み $517\mu\text{m}$ となっている。導波管の伝送電力は断面積に比例するため、目標とする導波管構造は十分な厚さが確保されたものでなければならない。標準導波管(H 面導波管として使用)では、管幅の $1/2$ 程度の厚さが用いられるが、上記の製作プロセスではミリ波帯導波管の厚さを確保することは困難である。十分な厚さを確保した微細構造物を実現することが課題となる。

(2) テフロン(PTFE)は、マイクロ波の基板やケーブル、コネクタ類の誘電体材料や絶縁体としても一般的に使用されているが、加工、とりわけ数 $10\mu\text{m}$ の精度で数 $100\mu\text{m}$ 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。しかし、放射光を照射すれば、厚さ 1mm 以上のテフロンを高アスペクト比で直接加工することが可能である。

これまでに、本放射光直接エッチングを利用してテフロンを加工を行えば、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目し、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が製作できることを実証した(若手研究(B), 課題番号 18760258)。図 1 に示すような、Q バンド(33-50GHz)ミリ波テフロン導波管の試作例を報告している。



図 1 放射光によるミリ波テフロン導波管試作例

2. 研究の目的

本研究は、金属導波管を出発点として、ミリ波(30GHz~)もしくはそれ以上のサブミリ波領域での応用が期待できる導波路および素子を構成する技術の確立を目的に据え、放

射光直接エッチングによるテフロン加工と、テフロン表面への金属蒸着による導波管構造の形成を試みている。

本研究では、これまでの研究成果を踏まえ、曲がりや分岐、不連続パターンなどの製作プロセス確立と評価を終え、複数の H 面導波管回路を集積した形状を持つ機能回路を実現することを目的とする。機能回路として、実用的なアイリス結合バンドパスフィルタおよび空気領域ポストを持つ十字形 3dB 方向性結合器の設計と試作を行い、良好な周波数特性の得られることを確認している。

3. 研究の方法

(1) 本研究では、兵庫県立大学高度産業科学技術研究所ニュースバル放射光施設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”を使用して放射光直接エッチングを実施した。ニュースバル放射光施設は、 1.5GeV の蓄積電子ビームリングを持ち、主に産業応用技術の開発に利用されている。BL-2 は、多軸露光ステージが差動排気機構を介して接続されており、 2keV - 12keV (highpass)と 2keV 以下(lowpass)のエネルギー帯域を任意に選択できる。本研究では、highpass モードを使用している。

(2) 本研究では、X 線照射により直接テフロンパターンを形成するため、放射光エッチングプロセスを導入する。手順は、以下のようになる。まず、適当な寸法のテフロンシートを準備する。テフロンシートの厚さは製作する導波管の高さとなるので、所望の厚さを準備する必要がある。そして、導波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 $100\mu\text{m}$ の SUS304 で製作した(公差 $\pm 7.5\mu\text{m}$)。このステンシルマスクが、回路形状とその精度を決定する。マスクの開口は、テフロン不要部に対応して開ける必要がある。

放射光エッチングプロセスの実験概略図を図 2 に示している。ステンシルマスクをテ

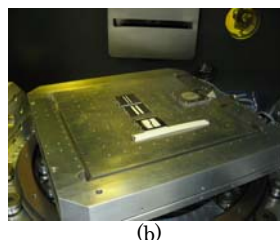
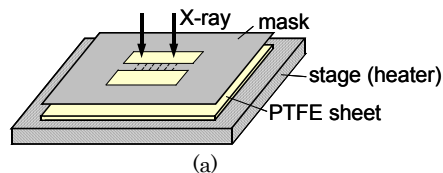


図 2 放射光エッチングプロセス(a)実験概略図 (b)露光チャンパー内部

フロンシート上に置き、露光チャンバー内のステージに固定する。図は、アイリス結合バンドパスフィルタの場合が示されている。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。テフロンの加工レートが基板の温度に依存すること、および飛散したテフロンの再付着を防ぐ目的でヒーターを使用する。その後、チャンバー内を真空に引き、露光を行う。露光中は、ステージをスキャンさせて、パターン全体が逐次照射される。これにより、導波路パターンが得られる。

(3) 次は、金属のスパッタ蒸着と電解メッキの工程に移る。前節でエッチングし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が実現する(図 3(a))。まず前処理として、エッチングで得たテフロンパターンを洗浄する。もし、テフロン片の残りが付着していれば、この段階で除去しておく。テフロンは撥水性であるため、表面改質を行わなければ金属膜の接着強度が得られない。そこで、Ar プラズマへの暴露を数分程度行うことでテフロン表面(側面を含む)を少し荒らして、その後スパッタ蒸着法で Au の薄膜を形成することにした。Ar プラズマへの暴露により生まれるアンカー効果が接着力を大きくする。本研究では、スパッタ蒸着で約 500nm の Au 膜を形成した。図 3(b)は、スパッタ蒸着後のテフロンパターンの写真である。写真では、右側の固定テープを剥がされており、スパッタ前のテフロンとの対比ができる。スパッタ蒸着は、テフロンシートの表と裏の両側を行う。側面やスリットについては、本方法で自然に蒸着される。

金属膜は、電磁界が漏洩しないよう表皮深さを考慮した厚さでなければならない。この目的のため、電解メッキを行って、Au 膜を約 10 μm まで堆積させた。Q 帯の表皮深さは約 0.4 μm であるので、十分な膜厚が確保されており、導波管として十分動作すると考えられ

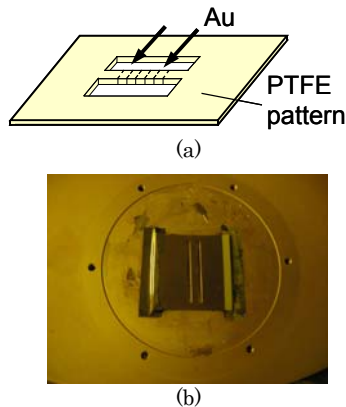


図 3 スパッタ蒸着(a)テフロンパターンへの Au 蒸着 (b)スパッタ蒸着後の写真

る。最後に、パターンの不要な枠を除去すれば、テフロン導波管回路が完成する。

4. 研究成果

(1) まず、5 段チェビシェフ応答を持つ Q 帯アイリス結合テフロン導波管バンドパスフィルタ(BPF)の試作を行い、本製作プロセスが細かいスリットパターンを含む実用回路に対しても有効であることを確認した。

① 図 4 に、5 段チェビシェフ応答を持つアイリス結合テフロン導波管 BPF の形状を示している。幅 d_i で厚さ t の誘導性窓(アイリス)が間隔 L_i (約 1/2) で並んでいる。窓と窓に挟まれた各区間は、空洞共振器を構成している。導波管の内部は、比誘電率 ϵ_r の誘電体材料で満たされている。本 BPF の設計は、共振器直結型フィルタの設計理論に基づいて行える。動作帯域として Q 帯を選択したときのテフロン導波管の寸法は、 $\epsilon_r=2.04$ に対して $a=4.0\text{mm}$ 、 $b=1.0\text{mm}$ となる。このときの TE_{10} および TE_{20} モードの遮断周波数は、それぞれ 26.2GHz と 52.5GHz であり、Q 帯標準導波管のものとほぼ一致している。高さ b の 1.0mm は、エッチングレートを考慮して決定している。

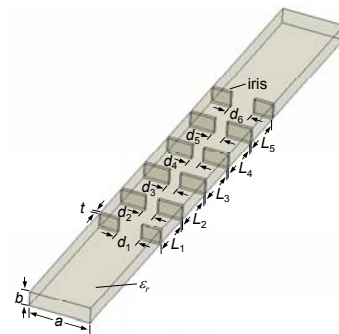


図 4 アイリス結合テフロン導波管 BPF の形状

上記寸法に基づき、5 段チェビシェフ応答を持つアイリス結合テフロン導波管 BPF の設計を行った。設計では、中心周波数 $f_0=42.0$ GHz、通過帯域リップル 0.01 dB、通過帯域下限および上限周波数 $f_1=41.8$ GHz、 $f_2=42.2$ GHz、帯域外 41.3 GHz での減衰 50 dB を仮定する。これらの仕様を満足するフィルタ寸法をアイリス板厚 $t=0.2$ mm として計算した。設計には、アイリス窓のリアクタンス値が必要となるが、本研究では電磁界シミュレータ HFSS を使用して求めた。結果として、 $L_1=L_5=2.909$ mm、 $L_2=L_4=3.106$ mm、 $L_3=3.116$ mm、 $d_1=d_5=1.514$ mm、 $d_2=d_4=0.812$ mm、 $d_3=d_4=0.727$ mm を得た。

② 前述の製作プロセスに基づいて、図 4 の 5 段チェビシェフ応答を持つアイリス結合テフロン導波管 BPF を試作した。放射光直接エッチングにより得られたフィルタのテフロ



図5 放射光直接エッチングにより得られたフィルタのテフロンパターン

ンパターンを図5に示す。露光の際、真空チャンパー内の基板温度は約220°Cに保った。照射されたX線量は3600 A*secである。ニューズバルは平均220mAの蓄積電流値で運転されていることから、図5のテフロンパターンを得るには約4.5時間必要であった。写真より、フィルタパターンが直接エッチングできていることが確認できる。

図6は、スパッタ蒸着と電解メッキによりAu膜を形成したテフロンパターンの写真を示している。Au膜は、セロハンテープの粘着力程度には十分耐え得る接着力を有しており、通常の扱いで剥離しないことを確認している。この後、周囲の不要な枠を除去すれば、テフロン導波管BPFが完成する。



(a)



(b)

図6 スパッタ蒸着、電解メッキによりAu膜でコーティングされたフィルタパターン(a)全体写真(b)アイリス部分拡大写真

③ テフロン導波管BPFのSパラメータの周波数特性をネットワークアナライザ(Agilent E8361C)で測定した。図7にテフロン導波管BPFの測定結果を示す。測定結果には、2個のQ帯標準導波管への変換器特性が含まれる。変換器を含むフィルタの周波数特性をHFSSで計算し、併せて図7に示している。中心周波数が高周波数側に約180MHz(42GHzに対して0.4%)ずれて、 S_{21} に約3dBの挿入損が見られるが、測定結果は設計結果と一致していることが確認できる。

測定結果に約3dBの挿入損があるが、変換

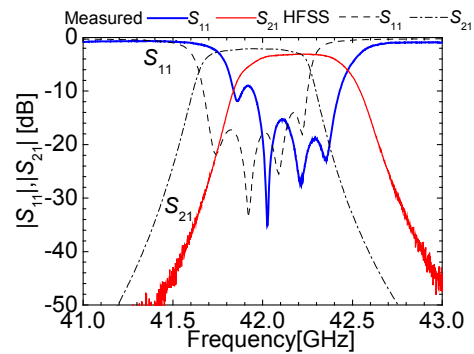


図7 アイリス結合テフロン導波管BPFのSパラメータ測定結果

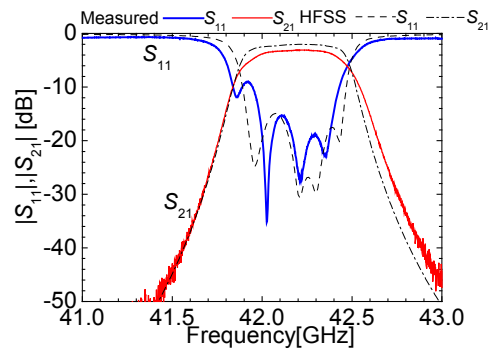


図8 フィルタ寸法を0.5%縮小(平均15μm)した場合の計算結果と測定結果の比較

器の無い形状で導体損($\sigma=4.1 \times 10^7$ S/m)および誘電体損($\tan\delta=0.0002$)を考慮して計算すると、 S_{21} は2.04dB(無負荷Q:346)となる。2つの変換器のthru接続(back-to-back)状態を測定すると、1.2から2dBの挿入損のあることが確認できる。これらのことから判断して、フィルタ自身(全長36mmで直線部分を含む)の挿入損は約2dBであり、これは理論値とほぼ同等であることが分かる。

周波数のずれは、共振器長が0.5%から1%短くなることに相当している。これは、ステンシルマスクの製作精度、もしくは露光時のテフロン熱膨張(200°Cで約2%)によって説明し得る範囲である。図8は、フィルタ寸法を0.5%縮小(平均15μm)した場合の計算結果と測定結果を比較したものである。これより、両結果の通過帯域がほぼ一致することが確認できる。

(2) 次に、空気領域ポストを持つ十字形3dB方向性結合器の設計と試作を行った。これは、誘電体充填導波管の一部をくり抜いた空気領域ポストを用いる構造で4ポート回路の方向性と整合を制御したものである。十字交差に誘電率の異なる不連続領域が一体化された形状を有している。誘電体の一部をくり抜くこの構造は、特に、放射光によるテフロン微細加工プロセスに適している。

① 図9に、空気領域ポストを用いたテフロ

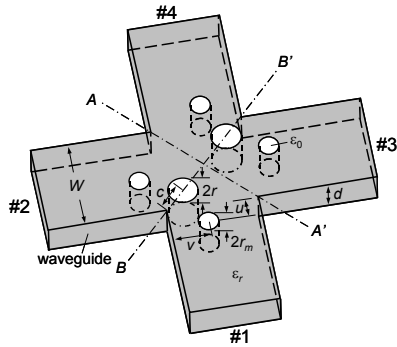


図9 空気領域ポストを持つ十字形方向性結合器の形状

ン導波管十字形方向性結合器の形状を示す。テフロン導波管は、内部を比誘電率 2.04 のテフロンで充填した構造であるが、テフロンの一部を円形にくり抜くことで空気領域を作り、それを誘電率の異なる円形ポストとして利用する回路構造である。本形状は、入出力ポートが直交し、対角線上に半径 r の空気領域ポストが 2 本装荷され、各入出力ポートに半径 r_m の整合用空気領域ポストが 1 本ずつ装荷されている。Q 帯を動作帯域とする導波管寸法 (4 mm×1 mm) を仮定し、平面回路法を用いて 42 GHz で空気領域ポストの径 (r , r_m) と位置 (c , u , v) を最適化設計して得た結果を図 10 に示す。比帯域幅は 10.5% である。設計結果は、HFSS の計算結果と良く一致している。

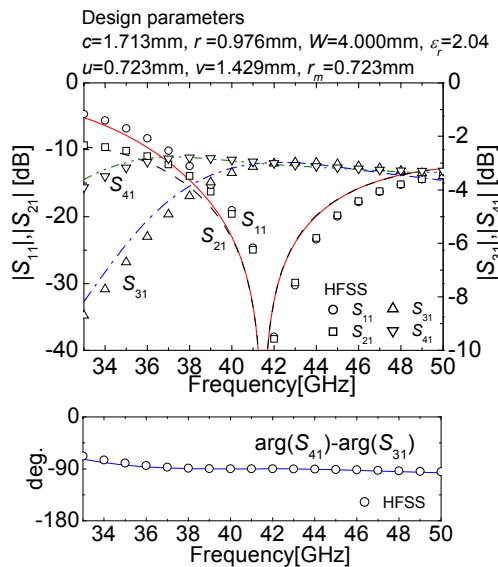


図 10 空気領域ポストを持つ十字形 3dB 方向性結合器の設計結果。Sパラメータの周波数特性

② 放射光直接エッチングによるテフロンパターンの加工と、テフロン表面への Au の蒸着・電解メッキにより本十字形方向性結合器を試作した。結果として、図 11 に示されるようなテフロンパターンを得た。露光過程において、真空チャンバー内の基板温度は 220° C に保った。照射された X 線量は 6000

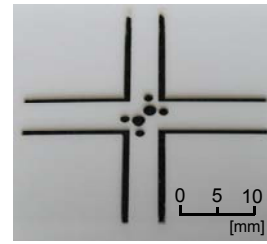


図 11 放射光直接エッチングにより得られた十字形方向性結合器のテフロンパターン

A*sec である。図 11 のテフロンパターンを得るために、平均蓄積電流値 220mA に対し約 6.5 時間必要であった。貫通空気領域を持つパターンが正しくエッチングされていることが分かる。

テフロンシートのエッチングを行った後は、金属のスパッタ蒸着と電界メッキの手順になる。空気領域ポストを形成するためには、穴の上下面を導体で覆う必要がある。今回、穴の上下面は、図 12(a) に示すように真空蒸着に耐え得るポリイミドテープを貼り、その上から直接蒸着とメッキを行った。図 12(b) に完成した十字形方向性結合器を示す。



(a)



(b)

図 12 スパッタ蒸着、電解メッキ(a)Au 蒸着前に行う空気領域へのマスク(b)完成した十字形方向性結合器

③ 空気領域ポストを持つテフロン導波十字形 3dB 方向性結合器の Sパラメータの周波数特性をネットワークアナライザで測定した。図 13 に測定結果を示す。測定結果には、4 個の Q 帯標準導波管変換器の特性が含まれる。S₃₁ と S₄₁ の間に約 0.7dB の分配差が見られるが、測定結果は設計結果と良く一致している。空気領域のマスキングに利用したポリイミドフィルム (厚 69μm) が分配差の原因と考えられる。変換器の挿入損が 1.2dB~2.0dB あることから、分配 S₃₁, S₄₁ に見られる約 1dB の挿入損を説明できる。また、出力位相差もほぼ 90 度になっていることが分かる。従って、設計結果の妥当性が実験的に確認で

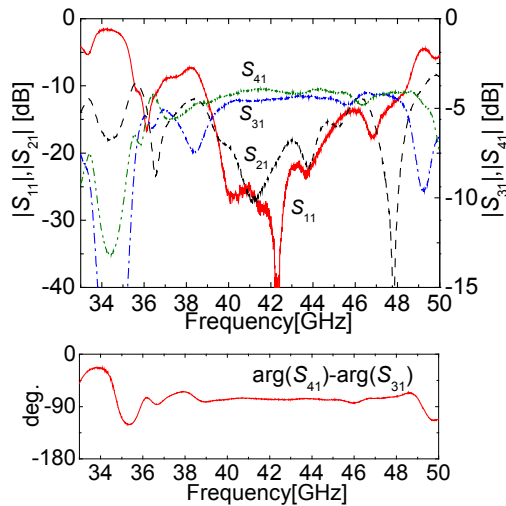


図 13 空気領域ポストを持つ十字形 3dB 方向性結合器の測定結果. S パラメータの周波数特性

きたと考える。

(3) 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。回路の厚みも 1mm 以上に対応できる。現在のところ、本研究以外に放射光直接エッチングを高周波導波路の作製へ応用した例は報告されていない。波長 160nm の真空紫外レーザーを用いてテフロンの加工を行うことは可能であるが、加工レートが遅いため低アスペクト比な加工が可能となるのみである。高アスペクト比な構造物を形成するには非現実的と考えられる。

本研究課題により、H 面導波管系の機能回路製作プロセスを確立することができたと考えるが、今後の展望として、短波長化と E 面導波管回路系の機能回路の実現と集積化を試みるのが目標となる。これらは、本課題期間中にも継続的に試みられたが、最大露光時間の制約やマスク固定精度の問題から、現在のところ完成するに至っていない。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 2 件)

- ① 岸原 充佳, 太田 勲, 河合 正, 大久保賢祐, 誘電体ポストを用いた H 面導波管十字交差形方向性結合器の設計, 電子情報通信学会論文誌(C), vol. J94-C, no. 7, 2011, 掲載決定, 査読有。
- ② 岸原 充佳, 池内 裕章, 村井 克弥, 内

海 裕一, 河合 正, 太田 勲, 放射光直接エッチングによるテフロン導波管 BPF の試作と評価, 電子情報通信学会技術研究報告, vol. 110, MW2010-19, pp. 29-33, 2010, 査読無。

〔学会発表〕(計 6 件)

- ① M. Kishihara, H. Ikeuchi, K. Murai, T. Azeta, Y. Utsumi, T. Kawai, and I. Ohta, Design and Fabrication of PTFE-Filled Waveguide Cruciform Coupler with Air-Filled Posts, 2011 IEEE MTT-S International Microwave Symposium, THPL-2, June 9, 2011, Baltimore, USA, 採択済。
- ② 岸原 充佳, 池内 裕章, 村井 克弥, 畔田 吏, 内海 裕一, 河合 正, 太田 勲, 空気領域ポストを用いたテフロン導波管十字ハイブリッドの試作, 2010 年電子情報通信学会ソサイエティ大会, C-2-43, p. 79, Sept. 16, 2010, 大阪府立大学。
- ③ M. Kishihara, M. Kato, H. Ikeuchi, K. Murai, Y. Ukita, Y. Utsumi, T. Kawai, I. Ohta, Fabrication of PTFE-Filled Waveguide Bandpass Filter Using SR Direct Etching, 2010 IEEE MTT-S International Microwave Symposium, pp. 1724-1727, THPQ-3, May 27, 2010, Anaheim, USA.
- ④ 岸原 充佳, 加藤 宗彦, 池内 裕章, 村井 克弥, 浮田 芳昭, 内海 裕一, 河合 正, 太田 勲, 放射光エッチングによるテフロン導波管 BPF の試作, 2010 年電子情報通信学会総合大会, C-2-74, p. 117, Mar. 17, 2010, 東北大学。

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・准教授
研究者番号: 80326298