

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 19 日現在

機関番号：25301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2013

課題番号：24760282

研究課題名(和文)放射光直接エッチングを用いた短ミリ波帯テフロン導波管回路の開発

研究課題名(英文)Development of PTFE-waveguide circuit for short millimeter-wave frequencies based on SR direct etching process

研究代表者

岸原 充佳 (Mitsuyoshi, Kishihara)

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) 3,500,000円、(間接経費) 1,050,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、サブミリ波領域(300GHz～)へ直接応用できる構成技術の確立を行うことを目的に、放射光直接エッチング法で微細テフロン構造体を形成し、その表面に金属膜を蒸着させることにより短ミリ波帯(G帯,140-220GHz)導波管コンポーネントを試作・評価した。

周波数3逓倍器と検波器を組み合わせてG帯信号を得る測定系を構築し、伝送損失を評価した。これにより、導波管として機能していることを確認した。また、中心周波数180GHzのフィルタ回路を試作した。測定により、フィルタの通過特性を確認することができ、本製作プロセスの短ミリ波帯での有効性を示すことができた。

研究成果の概要(英文)：In this study, the PTFE microstructures were fabricated by direct exposure to synchrotron radiation, and the waveguide components for short millimeter-wave frequencies (G-band, 140-220) were obtained by sputter deposition of metal on the PTFE surface, for the purpose of establishing the fabrication technology which could apply directly to submillimeter-wave region (300GHz>).

Then, the frequency tripler and the detector were used to equip a G-band measurement system, and the transmission losses were evaluated. It was confirmed that the fabricated structures worked as waveguide. Next, the trial fabrication of the filter circuits was performed at a center frequency 180 GHz. The passband characteristics of the filter were confirmed by the measurement. The present fabrication process for the short millimeter-wave frequencies was validated.

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

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。レーザ加工は、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、マイクロパーツなどの製作に応用されている。

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(75-110GHz)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帯導波管については、中空部内壁へのめっき条件の確立が待たれる。

(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 μ mの精度で数100 μ 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。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レートが遅い。しかし、放射光を照射すれば、厚さ1mm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)、課題番号18760258)。そこでは、直線およびマイターバンド形状のテフロン導波管をQ帯(33-50GHz)で試作評価し、良好

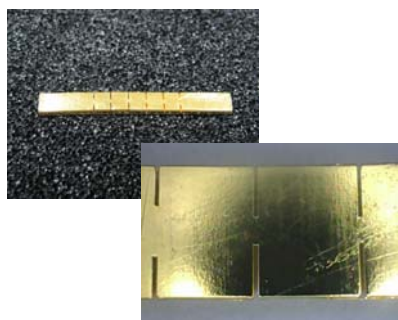


図1 Q帯テフロン導波管フィルタ

な導波特性が得られることを明らかにした。さらに、この成果に基づき、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(図1)や十字交差方向性結合器の設計と試作評価を実施してきた(若手研究(B)、課題番号21760263)。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がことが証明されるなど、本製作プロセスで着実な成果が得られることを報告している。

2. 研究の目的

本研究は、これまでの研究成果を発展させて行うものである。ディープX線リソグラフィにより微細テフロン構造体を形成する方法(放射光直接エッチング)を用いたテフロン導波管の製作プロセスは、ミリ波帯のみならずサブミリ波周波数帯の導波管コンポーネント製作に有効であると謳いながら、100GHzより低い周波数帯の成果を得るに留まっていた。そこで、短ミリ波帯(G帯、140~220GHz)のテフロン導波管基本回路(直線、ベンド)と機能回路(フィルタ)を製作・評価することにより、サブミリ波領域(300GHz~)へ直接応用できる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、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行った。テフロンの加工には2 keV ~ 12 keVのエネルギー帯域を使用する。

(2) テフロン導波管の製作は、X線照射により直接テフロンパターンを形成する放射光エッチングプロセスと、金のスパッタ蒸着、電解めっきから成る。まず、放射光エッチングプロセスの概略を説明する。

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 μ mのSUS304

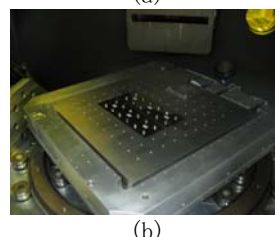
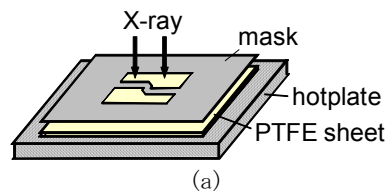


図2 放射光エッチング (a)概念図 (b)露光チャンバー内部への設置例

にレーザ加工したものをを用いている(公差 $\pm 7.5\mu\text{m}$)。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(220°C 程度)。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、パターン全体が逐次照射され、導波路パターンが得られる。

(3) 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)。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間行うことでテフロン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接着力が大きくなる。本研究では、スパッタ蒸着で約500nmのAu膜を形成する。金属膜は、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ぬ。本研究では、電解めっきを行って、Au膜を約 $5\mu\text{m}$ まで堆積させることとした。最後に、不要な枠を除去すれば、テフロン導波管が完成する。

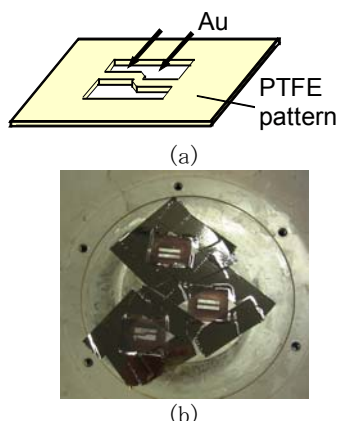


図3 Auの蒸着、電解めっき (a) 概念図 (b) スパッタ後の例

4. 研究成果

(1) まず、短ミリ波帯(G帯)テフロン導波管の寸法を決定すると共に、直線およびマイターバンド導波管の試作を行った。そして、G帯測定環境を構築することで伝送特性の測定および導波路の損失評価を行った。これにより、帯域内で平均すると直線、バンドそれぞれ72.8%、69.7%の電力が伝送し、導波管として機能していることを確認した。

① テフロン導波管の寸法は、G帯標準導波管(WR-5: $1.29\text{ mm} \times 0.65\text{ mm}$)と同等の遮断周波数が得られるようにするため、 $0.90\text{ mm} \times 0.40\text{ mm}$ と決定した。このときの TE_{10} および TE_{20} モード遮断周波数は、116.7 GHzと233.3 GHzである。導波管高さを0.4 mmにしているが、断面の縦横比が大よそ1:2となるよう利用可能なテフロンシート厚を勘案して決定した。これを基に、テフロン導波管の

直線パターンとH面マイターバンドパターンを設計した。

試作するテフロン導波管は、断面寸法が標準導波管(WR-5)より小さい。測定装置との接続には標準導波管を介する必要があることから、テフロン導波管と共にテフロン導波管-標準導波管変換構造を設計した。図4は、テフロン導波管がWR-5導波管に接続された回路構造を表している。本研究では、整合用の誘導性窓($0.20\text{ mm} \times 0.18\text{ mm}$ の突起)をテフロン導波管自体に埋め込む構造を採用した。つまり、測定を考慮して、誘導性窓が放射光エッチングの際に一緒に作られる。また、テフロン導波管を支持し、適切な整合ポジションを保つためにフランジを用いる。今回、フランジ自体もテフロンを用いて放射光エッチングにより製作するものとした。テフロンフランジにはテフロン導波管断面($0.90\text{ mm} \times 0.40\text{ mm}$)と同寸法の開口を設ける。そして、テフロン導波管の端をフランジ内に0.40 mm(フランジ厚)だけ挿入して使用する。

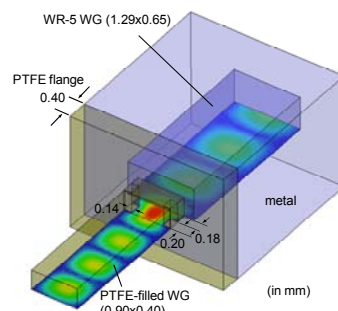


図4 テフロン導波管と標準導波管の接続構造

② 3. の製作プロセスに基づいて、180 GHz帯テフロン導波管を試作した。図5は、放射光直接エッチングにより得られた直線とマイターバンドの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、直線パターンの場合で $1000\text{ A}\cdot\text{sec}$ となった。このときの加工時間は約1.3時間であった。

図6は、スパッタ蒸着と電解めっきプロセス

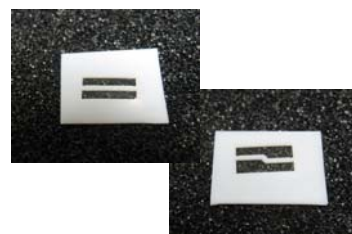


図5 直線とバンドのテフロンパターン

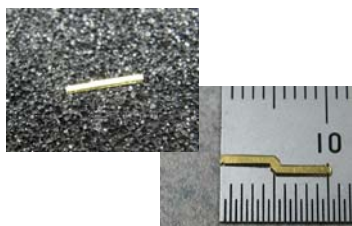


図6 スパッタ蒸着と電解めっきによりAu膜で覆ったテフロンパターン(G帯テフロン導波管)

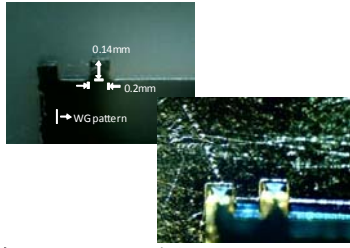


図7 放射光エッチング後およびスパッタ蒸着・電解めっき後のテフロンパターンの拡大写真



図8 測定用G帯テフロン導波管フランジ

スを経て Au 膜で覆われたテフロンパターンの写真を示している。電解めっきの後、不要なフレームを切除して同図のテフロン導波管が得られる。図7は放射光エッチング後およびスパッタ蒸着・電解めっき後のテフロンパターンの拡大写真である。整合用の誘導性窓が埋め込まれていることが確認できる。

図8に放射光エッチングプロセスで製作したG帯テフロンフランジを示している。このフランジは、テフロン導波管を支持し、適切な整合ポジションを保つために用いる。このフランジは、スパッタ蒸着でテフロンパターンに Au 膜のみを形成し、電解めっきは施していない。また、WR-5 フランジに準じて、ネジ穴を設けた。

③ 180 GHz 帯テフロン導波管の周波数特性を測定するために、周波数3通倍器と検波器を用いて測定環境を構築した(図9)。ベクトルネットワークアナライザ(Agilent E8361C)をV帯信号源(50 GHz - 70 GHz)として用いる。ネットワークアナライザの出力をパワーアンプ(Millitech, 50 GHz - 66 GHz, +15 dBm)に入力し、3通倍器の動作に必要な電力へと増幅する。そして、増幅したV帯信号を周波数3通倍器(VDI WR5.1×3 Broadband Tripler, 140 GHz - 220 GHz)へ入力すれば、150 GHz - 210 GHzの周波数を得ることができる。測定対象となる180 GHz帯テフロン導波管は、この場所に接続することになる。本システムでは、G帯検波器(VDI WR5.1 Zero-Bias Detector, 140 GHz - 220 GHz)を接続して、伝送電力のみを測定することが

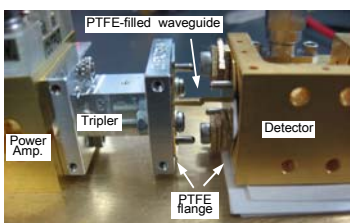


図9 3通倍器と検波器を用いたG帯測定環境

できる。同検波器は、入力電力に比例した DC 電圧を検波出力する。

試作テフロン導波管の伝送特性の測定結果を図10に示している。縦軸には、検出された DC 電圧をプロットしている。図中の“thru”は、周波数3通倍器と検波器を直接接続した状態の測定結果を表している。本研究では、測定系の校正ができないため、周波数平均を算出して、それを用いて比較検討を行った。thru に対する平均検出電圧(範囲170-190GHz)は、348.6 mV である。グラフの青と赤のラインは、それぞれ直線とマイターバンドのテフロン導波管についての測定結果を示している。これらの結果には、テフロンフランジを使った WR-5 標準導波管への変換構造が含まれている。これらの周波数特性からは、大よそ 170 GHz~190 GHz の範囲において、比較的高い電圧、つまり高い伝送電力が検出されていることが分かる。平均値は、直線とバンドそれぞれに対して 253.9 mV と 243.0 mV になる。これらの数値は、それぞれ入力電力の 72.8% (-1.38 dB)と 69.7% (-1.57 dB) が伝送されていることを表している。これより、180 GHz 帯テフロン導波管として機能していることが確認できる。

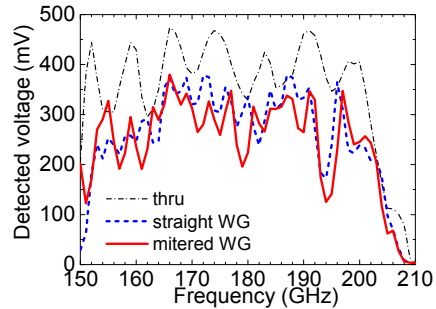


図10 伝送特性の測定結果

また、長さの異なる直線テフロン導波管を製作し、その伝送特性を測定することで損失評価を行った。図11は、10.6 mm、12.57 mm、13.06 mm、14.54 mm、16.5 mmの5本の直線テフロン導波管に対する平均検出電圧の変化を測定し、thru 接続状態で検出した平均電圧に対して得た伝送損失と近似直線を表している、大よそ1~3 dBの範囲に分布しているが、これらは変換構造を含んだ伝送損失である。近似直線の傾きを調べることで導波管長さに対する損失増加量を読み取ることができる。この場合、傾き 0.0317、切片 1.4585

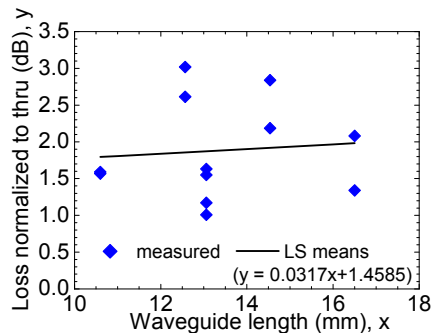


図11 伝送損失の評価と近似直線

であることから、試作した 180 GHz 帯テフロン導波管の損失が 0.0317 dB/mm 程度であると評価できる。また、テフロン導波管接続に伴う変換構造の損失は、切片の値を参考にすると 1.46dB(1 つ辺り 0.73dB)程と思われる。

(2) 次に、短ミリ波帯(G帯)テフロン導波管による機能回路の実現を試みた。本研究では、機能回路としてアイリス結合バンドパスフィルタを取り上げ、同製作プロセスで試作と実験を行い、フィルタの通過特性を確認した。

① テフロン導波管寸法は、上記と共通の 0.90 mm×0.40 mm に選ぶことで、TE₁₀モードのみが 180 GHz 帯で伝搬可能となるようにした。これを基に、図 12 に示される 5 段アイリス結合テフロン導波管バンドパスフィルタおよび 3 段バンドパスフィルタを中心周波数 180 GHz で設計した。設計は、共振器直結型フィルタの設計式に基づいて行った。なお、通過帯域下限 179.0 GHz、上限 181.0 GHz、帯域外 175.0 GHz で 50 dB の減衰を仮定した。

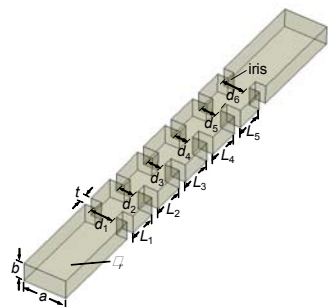


図 12 5 段アイリス結合テフロン導波管バンドパスフィルタ

② そして、放射光エッチングプロセスと金のスパッタ蒸着、電解めっきにより、180GHz 帯テフロン導波管バンドパスフィルタを試作した。図 13 に、テフロン表面に Au 膜を形成して完成させたテフロン導波管フィルタを示している。大よそ良好なテフロン導波管が得られているが、パターンを拡大するとアイリス部分にやや傾きが見られる。

V 帯信号を周波数トリブラで 3 通倍して得た G 帯信号を被測定フィルタに入力し、伝送特性のみを検波器で検波電圧として測定した。3 通倍器-検波器の thru 特性で正規化した測定結果を図 14 に示す。比較に電磁界シミュレータ(HFSS)の結果を示しているが、測定結果は、中心周波数が低い方へ 4 GHz (180 GHz に対し 2.2 %、5 段)、5 GHz (2.8 %、3 段)程移動し、通過帯域幅が広がる等の劣化

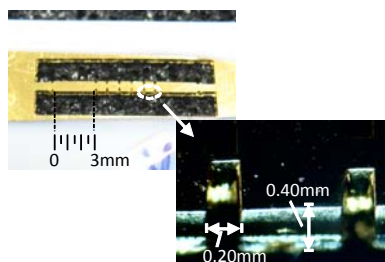


図 13 試作テフロン導波管バンドパスフィルタ

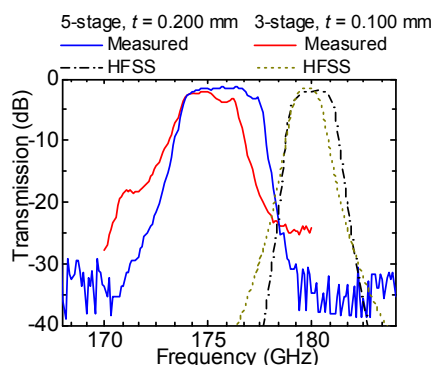


図 14 5 段、3 段アイリス結合テフロン導波管バンドパスフィルタの伝送量測定結果および計算値(5 段: $L_1 = L_5 = 0.621$, $L_2 = L_4 = 0.699$, $L_3 = 0.705$, $d_1 = d_5 = 0.462$, $d_2 = d_4 = 0.298$, $d_3 = d_4 = 0.276$, $t = 0.200$, 3 段: $L_1 = L_3 = 0.691$, $L_2 = 0.737$, $d_1 = d_4 = 0.363$, $d_2 = d_3 = 0.199$, $t = 0.100$ (in mm))

が見られる。これは、アイリスのパターン誤差が影響している可能性が大きいと考える。

(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。

本研究課題により、短ミリ波帯 H 面導波管系の簡単な機能回路が製作できるということまで明らかにできたと考えるが、課題遂行の途上において、次の問題点も明らかになってきた。1) 露光時のテフロンの熱膨張の影響、2) 検波器を使った簡易装置による測定不確かさなどの問題、3) 微小パターンの精度、4) 微小パターンを含むテフロンが強度不足で形状を維持できない問題。今後の展望としては、これらの問題点を解決することに加えて、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、本課題期間中にも一部試みたが、引き続き新たな課題として取り組んでいく予定である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 1 件)

- ① 岸原 充佳、木戸 秀樹、山口 明啓、内海 裕二、太田 勲、放射光エッチングによる 180 GHz 帯テフロン導波管の試作と評価、電子情報通信学会技術報告、vol. 113, no. 141, MW2013-64, pp. 103-108, 2013、査読無

〔学会発表〕(計 3 件)

- ① 岸原 充佳、佐々木 亮、山本 敏寛、山口 明啓、内海 裕二、太田 勲、放射光エッチングによる 180GHz 帯テフロン

導波管BPFの試作、2014年電子情報通信学会総合大会、C-2-78、p.108、March 20、2014、新潟大学

- ② M. Kihihara、H. Ikeuchi、H. Kido、Y. Utsumi、A. Yamaguchi、I. Ohta、Trial Fabrication of 180 GHz Waveguide by SR Direct Etching of PTFE、10th International Workshop on High Aspect Ratio Micro and Nano System Technology、pp.114-115、April 22、2013、Berlin
- ③ 岸原 充佳、池内 裕章、寄玉 侑司、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の試作、2013年電子情報通信学会総合大会、C-2-62、p.93、March 20、2013、岐阜大学

〔産業財産権〕

○取得状況（計1件）

名称：PTFE材料のエッチング方法
発明者：内海裕一、太田勲、岸原充佳
権利者：オプトニクス精密
種類：特許
番号：特許第5214196号
取得年月日：25年3月8日
国内外の別：国内

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