

平成 21 年 5 月 11 日現在

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2006～2008

課題番号：18760258

研究課題名（和文） 微細テフロン導波管回路の開発に関する研究

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

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：本研究では、放射光によるテフロン[®]の微細加工と表面への金属の蒸着を通して、ミリ波・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開発を試みた。Q 帯(33-50GHz)で動作する直線導波管、ベンド導波管の試作および測定を行い、製作プロセスの確立を行った。試作した導波管は、良好な導波特性が得られることを確認している。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006 年度	1,100,000	0	1,100,000
2007 年度	1,300,000	0	1,300,000
2008 年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
総計	3,100,000	210,000	3,310,000

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：①情報通信工学②先端機能デバイス③デバイス設計・製造プロセス④放射線、X線、粒子線⑤マイクロデバイス

1. 研究開始当初の背景

(1) 近年、メカトロニクス、光学、流体などの分野で用いられるマイクロ部品の開発が、様々な微細加工技術に基づいて試みられている。マイクロ波ミリ波工学分野においても、多くの研究者によりシリコン加工技術に基づく RF-MEMS 等の研究・開発が広く行われている。

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、レジスト(SU-8)を用いた回路製作プロセスの制限から最大で

700 μm 程度の回路厚であり、H 面導波管系で行われている。つまり、半導体微細加工プロセスに基づくもので、彼らの方法で回路厚を多く取ろうとすると、レジスト塗布の際にムラが生じて表面の平坦度が悪くなる。従ってレジスト自体の厚塗りが困難である。後者は、LIGA プロセスを応用したものであるが、厚み 517 μm のものが報告されている。

(2) テフロン (Polytetrafluoroethylene, PTFE) に放射光を照射することで、マイクロ構造体を製作できることが報告されている。テフロンは、よく知られているように優れた電気的特性(低誘電体損)、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。特に、ミリ波帯においては、テフロン自体が低損失な導波路媒体として魅力的である。

しかし、テフロンは、加工、とりわけ一定寸法以下の微細加工が非常に困難な材料としても知られている。良好な絶縁性のため放電加工は使用できない上に、赤外や紫外の波長を殆ど吸収しないため(光学吸収帯：約 160nm)、その波長帯を用いるレーザ加工も困難となる。ところが、放射光を照射すれば、厚み 1mm 以上のテフロンを直接加工することが可能である。放射光エッチングは、他の手法では製作不可能な μm ~mm オーダーの高アスペクト比微細構造体(1mm の厚みに 20 μm ~40 μm 程度の孔を貫通させるような構造)を大量生産できるプロセスであることが特長である。例えば、図 1 のようなパターンの加工例が報告されている。

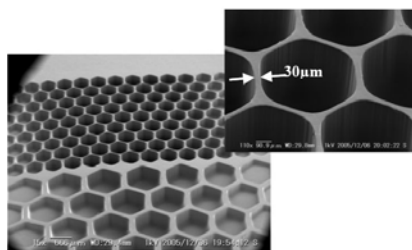


図 1 放射光によるテフロン加工例

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の加工と、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、主に Q 帯(33-50GHz)で試作を行うものとし、直線導波管およびマイターベ

ンド導波管の設計を行っている。さらに、試作した導波管を測定する際に必要となる治具(テフロン導波管—標準導波管変換器)の設計を行っている。最後に、試作したテフロン導波管の S パラメータの測定結果を示し、電磁界シミュレータ(HFSS)による解析値との比較を行うことで、導波管としての動作を確認している。

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に設置されているニュースバル放射光施設を利用して、テフロンの加工を行っている。この施設は、Spring-8 敷地内に併設された中型放射光施設で、1.5GeV の電子ビーム蓄積リングを持つ。主に、産業応用技術の開発/産業支援に利用される。

ニュースバルには、8 本のビームラインが設置されている。今回の加工では、その中の大面積波長可変型 LIGA ビームライン BL2 を利用している。このビームラインは大面積タイプ X 線リソグラフィ用で、2~12keV 及び 2keV 以下のエネルギー帯域を任意に選択でき、高アスペクト比加工とサブミクロン加工を同時に行える特徴を持っている。図 2 に示すような差動排気機構を介して接続された多軸露光装置が放射線遮蔽ハッチ内に収められている。

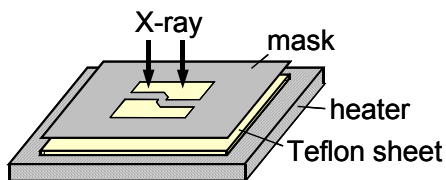


(a) 差動排気機構 (b) 多軸露光装置

図 2 ビームライン BL2

(2) 導波管の試作工程は、テフロンのパターンニングを行う放射光エッチングプロセスと、パターン表面へ金属を付加するプロセスから成る。

放射光エッチングの工程は、X 線露光により直接テフロンのパターンを切り出す作業となる。まず、適切な大きさのテフロンシートを準備し、表面研磨(上面と下面)を行っておく。このテフロンシートの厚みは、製作する導波管の高さ(本論文では方形断面の短辺の長さ)と同一にしておく必要がある。また、導波路パターンを写したステンシルマスクを準備する。ステンシルマスクは、回路形状を決定するが、テフロンを除去したい領域に穴を開けたものが必要になる。図 3(a)は、放射光エッチングを行う場合の概略図である。予め準備したテフロンシートの上にステンシルマスクを被せて、露光装置内に設置する。このとき、マスクのずれを防ぐため、クリッ



(a) 放射光エッチングの実験概略図



(b) 露光チャンバー内部

図3 放射光エッチングプロセス

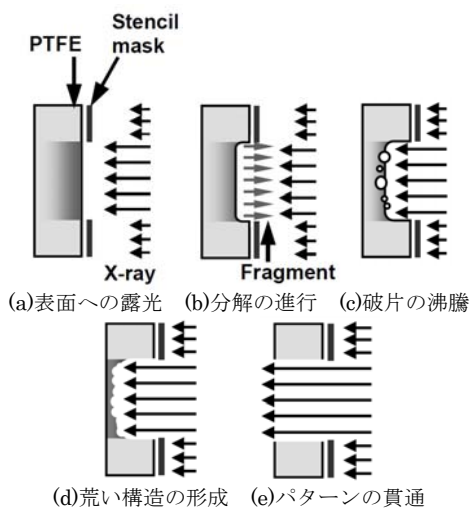


図4 エッチングメカニズム

ブ状の治具で固定する。露光ステージがヒーターになっており、背面よりテフロンを加熱する。これは、エッチングの進行速度が試料温度に依存することによる。図3(b)は、露光チャンバーに設置されたテフロンシートとマスクの写真である。図3(b)では、ひとつのパターンのみ設置しているが、露光装置はA4サイズまで対応できる。多数のパターンを一度にエッチングすることも可能である。この状態で露光チャンバー内を真空にする。そして、装置のシャッターを開いて露光することで導波路パターンが得られる。その際、露光位置の走査が自動的に行われる。

図4は、テフロンのエッチングメカニズムを表している。このメカニズムは、加工したテフロンの表面より推測されたものである。エッチングプロセス初期段階では、テフロン表面が露光される(図4(a))。それにより化学結合の分解が始まり、テフロン片が飛び出す(図4(b))。高エネルギーのX線はテフロン深くまで浸透し、分解が進む。このとき、露光

された場所は粘性のある液体状になっていると考えられ、バブル状の構造が表れる(図4(c))。露光時のテフロンシートは、ヒーターで100℃~220℃程度へ加熱されてエッチングの状態が調査されており、200℃を超えるような高温下では、テフロン片の飛散が激しくなりバブル構造は消滅すると思われ、結果として図4(d)のような荒い蜘蛛の巣状の構造となる。露光され続ければ、エッチングは止まることなく厚いパターンも形成され得る(図4(e))。

(3) 次は、Auの蒸着、電解メッキの工程となる。ここでは、切り出したテフロンの導波路パターン表面にAuを蒸着、電解メッキを施して金属膜を形成し、導波管構造を完成させる。まず、前処理として切り出したテフロンパターンを洗浄する。洗浄の手順は次のように行うものとした。

1. (バリ取り)
2. 超音波洗浄 (純水で約5分間)
3. 有機洗浄 (アセトンに約5分漬け込み)
4. 純水リンス (流水で約1分洗浄)
5. 有機洗浄 (エタノールに約2分漬け込み)
6. 純水リンス (流水で約5分洗浄)
7. ベーク (120℃で約20分乾燥)

1のバリ取りは、エッチング工程でテフロン片の残りが付着することがあるため、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形成が難しい。そこで、逆スパッタを数分程度行うことでテフロン表面を少し荒らして、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。本研究では、スパッタ蒸着によるAu薄膜を750nm程度の厚みまで形成したが、通常はこれより薄いもので良いと思われる。以上のスパッタ蒸着で、テフロン表面にAuの膜が形成されたが、Auの膜厚としては、表皮の深さより十分厚いものでなければ電磁波が放射してしまい、導波管として機能しない。そのため、電解金メッキを行ってAu膜を約10μm堆積させる。Q帯(33-50GHz)におけるAuの表皮深さが0.4μm程度であることから、十分な厚みを確保できていると考えられる。最後に周囲の不要部を除去すれば、テフロン導波管が完成する。

(4) 上述の製作プロセスに基づき、テフロン導波管の試作を行うが、本研究ではQ帯(33-50GHz)をターゲットとして製作プロセスの確立を試みることにし、Q帯の標準導波管寸法(5.70mm×2.85mm)に対し、 $\epsilon_r=2.04$ のテフロンが充填された導波管の寸法を4.00mm×1.00mmに選ぶことで、TE₁₀モードのみがQ帯で同程度に伝搬可能となるようにした。両導波管のTE₁₀、TE₂₀モードの遮断周波

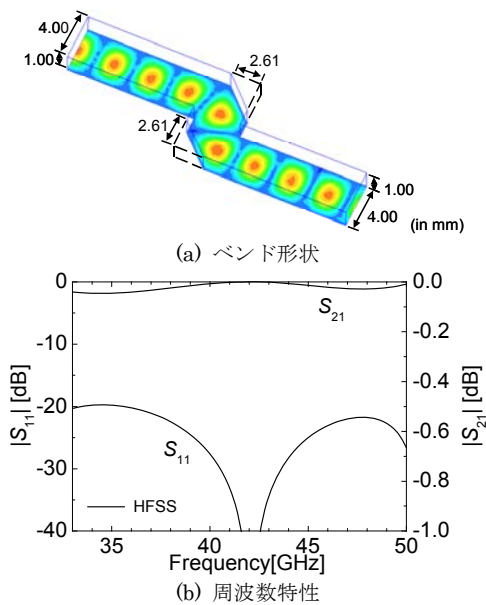


図5 テフロン充填型H面マイターバンド

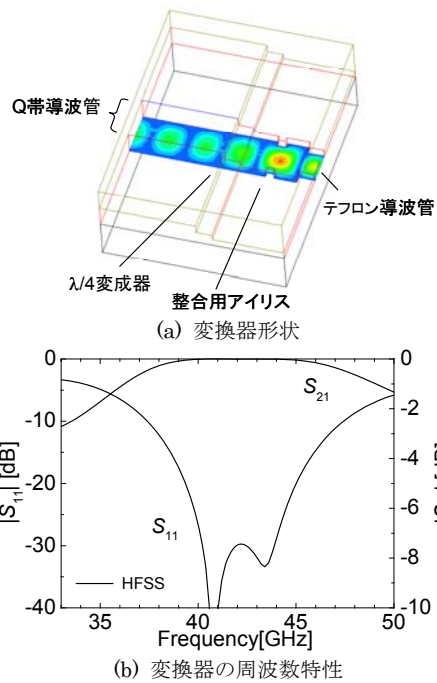


図6 テフロン導波管—標準導波管変換器

数は、標準導波管 26.3GHz, 52.6GHz に対しテフロン導波管 26.2GHz, 52.5GHz となる。この遮断周波数の調整は、方形断面の長辺の長さのみで達成される。回路高さを1mmとしているが、これは放射光エッチングプロセスで可能な厚みを勘案して決定した。なお、TE₀₁モードの遮断周波数は105GHzである。

これを基に、テフロン充填型ストレート導波管およびH面マイターバンドの素子形状を設計した。マイターバンドは、図5(a)のように2つ連続した形状で、中心周波数42GHzで設計した。設計は、短絡境界H面平面回路法とHFSSを併用して行った。角の切り込みを2.61mmとしたときに低反射の特性を得ている。このときのバンドの周波数特性は図5(b)

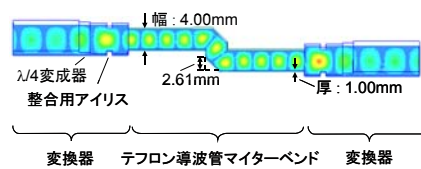


図7 試作・測定対象の回路形状



(a) エッチングで得られたテフロンパターン



(b) テフロン表面へのAu膜形成

図8 試作導波路パターン

のようになる。

試作するテフロン導波管は、断面寸法が小さくなっているため、そのままでは標準導波管との接続ができない。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、本研究では図6(a)のようなテフロン導波管—標準導波管変換器を設計した。変換器の構造は、幅4mmのテフロン導波管をQ帯導波管の幅5.70mmに広げてアイリス(有限長窓)で整合し、その後、導波管E面に1/4変換器を入れることで、高さを1mmから2.85mmまで広げるものとなっている。内部はε₀である。ここでの設計は、短絡境界H面平面回路法とHFSSに加えてE面平面回路法を併用して行った。テフロン導波管は先端2mmを変換器に挿入して、変換器を形成する上下側壁と共に固定される。設計したテフロン導波管—標準導波管変換器の周波数特性は、図6(b)のようになっている。

試作・測定対象となる回路形状は、以上を組み合わせることで図7のようになる。テフロン導波管の両側を2つの変換器が挟んだ格好となる。

4. 研究成果

(1) 図8(a)は、放射光エッチングプロセスで得られた導波路のパターンを示している。報告されている加工例と比較すると、やや大きな露光面積であるが、テフロンを直接エッチングすることで導波路パターンの得られることが確認できる。導波路側面は鏡面になっており、機械加工とは全く異なる表面となる



図9 完成した直線導波管とベンド導波管

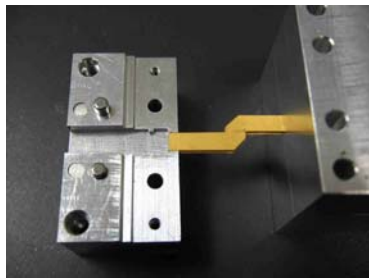


図10 変換器と試作したテフロン導波管

ことが特徴である。また、図 8(b)の写真は、Au のスパッタ蒸着および電解メッキプロセスでテフロン表面に Au 膜を形成した結果を示している。写真の左上と右下は、スパッタ時の支持具の影響で膜が形成されていない。形成された 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、周囲の枠を切り取れば、テフロン導波管が完成する。図 9 に完成した直線導波管とベンド導波管をそれぞれ示す。

(2) 試作したテフロン導波管が機能することを確認するため、ネットワークアナライザ (Agilent E8361A) で S パラメータを測定した。測定では、試作したテフロン導波管と標準導波管変換器は、図 10 のように両側から変換器で挟む形で接続する。写真では、変換器の上部を外して内部が見える状態が示されている。上板を取り付けることで、テフロン導波管が固定される。図 11 は、2つの変換器を直接向かい合わせて接続し (thru 接続)、反射損 (S_{11}) と挿入損 (S_{21}) を測定したものである。このとき、変換器のテフロン導波管を接続する側には、テフロン導波管の挿入長 2mm に合わせて長さ 4mm のテフロン片をダミーで挿入した。また、テフロン導波管マイターベンドの測定結果を図 12 に示す。図 12 は、変換器込みの特性である。HFSS で変換器込みの特性を計算しているが、良く一致していることが確認できる。 S_{21} に 2dB 弱の損失が見られるが、図 11 の thru 接続の結果を考慮すると、これは変換器の損失が原因と考えられる。

(3) 本研究課題は、研究背景で述べた Digby や Forman らの試みと関連する内容であり、

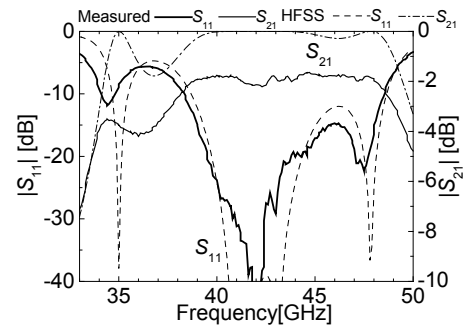


図 11 2 つの変換器を直接接続した特性(thru 接続)

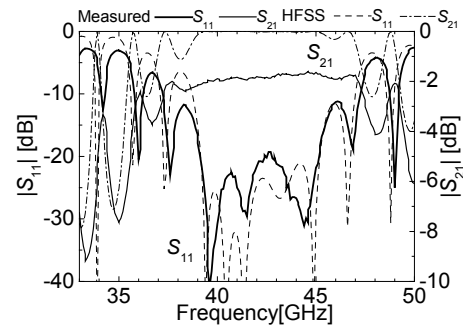


図 12 テフロン導波管マイターベンドの S パラメータ測定結果および計算値

微細加工技術によりミリ波以上の周波数帯をターゲットとした導波路・デバイスの製作という点では同じである。本研究の特色は、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。つまり、従来からマイクロ波・ミリ波の導波路を構成する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実現するところに本研究の独自性があると考えられる。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。

なお、国内の類似する研究例としては、光造形などの方法を用いる樹脂導波管の試作が報告されている。

- ・ 戸村 崇, 張 ビョウ, 広川 二郎, 安藤 真, 内面に銅電気メッキした 94GHz 帯光造形樹脂中空導波管の透過特性, 2009 年電子情報通信学会総合大会 C-2-87, p. 126, March 20, 2009
- ・ 角田 聡泰, 内田 浩光, Miao Zhang, 米田 尚史, 小西 善彦, 牧野 滋, 樹脂導波管の非接触フランジレス連結機構, 2006

年電子情報通信学会総合大会 C-2-91,
p.122, March 27, 2006

本研究では、ミリ波の最も低いバンドを想定して導波管の試作を行ったが、今後の展望として、これにより製作方法が確立された後、より高い周波数での導波管回路の製作、すなわち、短波長化、高精度化、複雑化を行うことになる。本研究は、それらに対応する試験と位置付け得る。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 6 件)

- ① 岸原 充佳, 浮田 芳昭, 山本 成明, 太田 勲, 内海 裕一, 放射光直接エッチングによるテフロン加工とミリ波テフロン導波管への応用, 電気学会論文誌Sec.C, vol.129, pp.259-266, 2009, 査読有
- ② M. Kishihara, Y. Ukita, Y. Utsumi, I. Ohta, Fabrication of a PTFE-Filled Waveguide for Millimeter-Wave Components Using SR Direct Etching, Microsystem Technologies, Springer-Verlag, vol.14, pp.1417-1422, 2008, 査読有
- ③ Y. Ukita, K. Kabda, S. Matsui, M. Kishihara, and Y. Utsumi, Fabrication of Poly (tetrafluoroethylene) Microparts by High-Energy X-ray-Induced Etching, Japanese Journal of Applied Physics, vol.47, pp.337-341, 2008, 査読有

[学会発表] (計 5 件)

- ① M. Kishihara, Y. Ukita, S. Yamamoto, Y. Utsumi, and I. Ohta, Fabrication of Millimeter-Wave PTFE-Filled Waveguide Using SR Direct Etching, 2007 Asia-Pacific Microwave Conference, Dec. 13, 2007, Thailand
- ② 岸原 充佳, 山根 國義, 浮田 芳昭, 内海 裕一, 太田 勲, 放射光エッチングを利用したテフロン導波管の試作, 2007年電子情報通信学会総合大会C-2-46, p.79, March 20, 2007, 名城大学

[産業財産権]

○出願状況 (計 1 件)

名称: PTFE 材料のエッチング方法、及び、高周波導波管

発明者: 内海 裕一, 太田 勲, 岸原 充佳

権利者: 同上

種類: 特許権

番号: 特願 2007-218602

出願年月日: 2007年8月24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 YUUICHI)

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