

令和 5 年 6 月 12 日現在

機関番号：25301

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K04602

研究課題名（和文）放射光直接エッチングによる短ミリ波帯テフロンSIW集積回路の開発

研究課題名（英文）Development of PTFE SIW integrated circuits for short millimeter-wave band by SR direct etching

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） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：放射光直接エッチングにより微細テフロン構造体を形成する方法を利用して、形状強度があり、回路設計自由度の高い誘電体基板集積導波路(SIW)型の短ミリ波帯集積回路が実現可能なことを明らかにした。

G帯(140-220 GHz)を動作帯域とするSIW十字形3dBカップラやSIW横断回路を集積化した4×4バトラーマトリクスを設計・試作し、測定したアンテナビーム方向が数値シミュレーション結果と大よそ一致しているという事実からその有効性を確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

一般生活への無線通信端末が普及した現在、ミリ波帯やテラヘルツなどの未利用周波数領域の有効活用が強く求められている。100 GHzを超えるような高周波数領域では、回路素子も精密な微細構造が求められる。その際、微細構造の形状保持と回路設計の自由度、複数回路の集積化などが求められる。本研究成果は、これらに優れるSIW型導波路を用いて短ミリ波帯からテラヘルツ帯にまで適用可能なテフロンベースのSIW集積回路が実現することを示した。

研究成果の概要（英文）：It has demonstrated that the substrate integrated waveguide (SIW) type short millimeter-wave integrated circuits, which have structural strength and high flexibility in circuit design, can be realized.

The 4×4 Butler matrices integrated with the SIW cruciform 3-dB couplers and the SIW intersection circuits were designed at G-band (140-220 GHz) and fabricated as a trial. The validity of the design and fabrication results was confirmed from the fact that the measured directions of the antenna beam roughly agreed with the results of the numerical simulations.

研究分野：マイクロ波ミリ波工学

キーワード：放射光直接エッチング 微細加工 短ミリ波帯集積回路 テフロンSIW

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

(1) 近年、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。また、積層造形技術(Additive Manufacturing Technology)に基づく樹脂/金属構造の製作にも注目が集まっている。金属 3D プリンタの性能向上により、マイクロ波・ミリ波工学の分野においても各種回路素子を積層造形技術で実現しようとする試みが多く見られる。今後の更なる技術発展により、AM 技術の寸法精度や表面粗さは向上していくものと予想されるが、現状では一般的には数 10 μm のオーダーにとどまっている。

(2) マイクロ波材料としても広く利用されるテフロン(PTFE)は、優れた電気的特性、熱的特性、耐化学特性などを持っているが、機械加工が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、サブミクロン加工と高アスペクト比加工を同時に行うことができる。また、加工後の表面粗さは数 nm となる。このことに基づいて、私はこれまでに放射光エッチングでテフロン製の微細加工を行い、これを媒体として周囲に金属を蒸着させる方法で、ミリ波・短ミリ波帯テフロン充填導波管回路の開発と集積化を積極的に行ってきた(2014-2016 基盤研究(C) 26420314)。

一般生活への無線通信端末が普及した現在、マイクロ波帯以下の周波数の逼迫に加えて、高指向性、低干渉性、高速通信などを積極的に利用するためミリ波帯やテラヘルツなどの未利用周波数領域の有効活用が強く求められている。100 GHz を超えるような高周波数領域では、回路素子も精密な微細構造が求められる。この期待に応え、電波資源拡大に貢献していくためには、当該周波数域での各種回路システムの構成方法に加えてそれを実現する製作技術(特殊加工技術)の確立が鍵である。

2. 研究の目的

本研究は、放射光直接エッチングにより微細テフロン構造体を形成する方法を利用して、形状強度、回路設計自由度の高い誘電体基板集積導波路(SIW, Substrate Integrated Waveguide)型の短ミリ波(テラヘルツ波)帯集積回路の製作方法を確立することを目的とする。これにより、文字通りテフロン基板に集積した(埋め込んだ)導波管集積回路の実現を目的とする。

3. 研究の方法

(1) 研究の大まかな流れは次のようになる。①製作する SIW 等の回路パターンを設計し、X 線マスクを準備する。②放射光でテフロンシートの精密加工を行い、微細テフロン構造物を得る。③微細テフロン構造物に Au のスパッタ蒸着と電解めっきを施す。④完成した試作回路の伝送特性等を測定・評価する。本研究の放射光エッチングは、NewSUBARU 放射光施設のビームライン“大面積 X 線露光システム BL-2”を使用する。

(2) 本研究では、SIW 型の短ミリ波帯集積回路として 4×4 バトラーマトリクスを扱う。バトラーマトリクスは、図 1 に示すように 4 つの 3dB 90° ハイブリッド、2 つの 45° 移相器、および 2 つの交差回路から構成できる。信号の入力されるポート(ポート#1~#4)に応じて出力ポート間(#5~#8)の位相差が変化するため、指向性方向を制御可能なビーム形成回路となる。各要素回路は位相を考慮して相互接続される必要がある。本研究では、90° ハイブリッドおよび交差回路として、十字形 3dB カプラおよび横断回路(0 dB カプラ)を採用する。図 2 は、4 つの十字形カプラ、2 つの横断回路、接続用および移相用テフロン SIW で構成した 4×4 バトラーマトリクスのレイアウトとポート#1 から入力した場合の信号伝搬シミュレーションを示している。このレイアウトは、電磁界シミュレータ HFSS で位相を確認しながら各素子を繋ぎ合わせることで得た。SIW を形成するスルーホールは 1 辺 0.30 mm の正方形を基本としているが、曲線区間や隣接回路との干渉を避けるため、間隔やサイズを調整している。

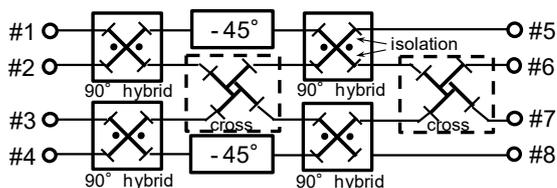


図 1 4×4 バトラーマトリクスのブロック図

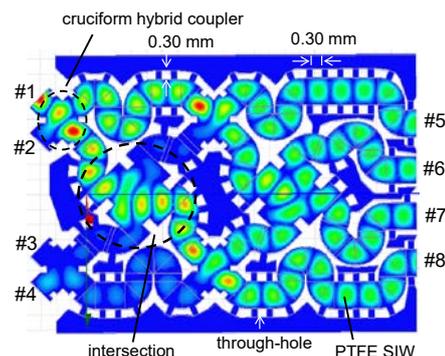


図 2 バトラーマトリクスの形状と伝搬シミュレーション

(3) テフロン SIW 型バトラーマトリクス製作プロセスは、テフロンシートの放射光直接エッチング、および金のスパッタと電解めっきから成る。図 3 は、放射光直接エッチングの実施状況を示している。回路パターンを写したステンシルマスク(厚 100 μm の SUS304, 公差 $\pm 7.5 \mu\text{m}$)をテフロンシート上に置き、ヒーターでテフロンシートの背面から加熱を行う(約 150 $^{\circ}\text{C}$)。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、化学処理することなく回路パターンが得られる。

(4) エッチングで得られたテフロンパターンの表面全体に Au をスパッタすることで、金属薄膜で覆われた SIW 構造を完成させる。Ar プラズマへの暴露を数分間行うことでテフロン表面改質を行った後に、RF スパッタで Au の薄膜を形成する(図 4)。スパッタで約 500 nm の Au 膜を形成する。スパッタは、テフロンシートの両面について行う。その後、十分な膜厚を確保するため、電解めっきで Au 膜を約 5 μm まで堆積させる。

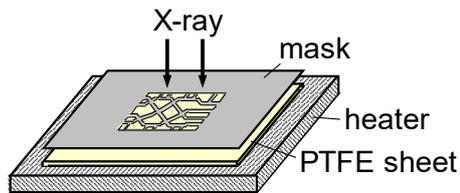


図 3 放射光エッチング概念図

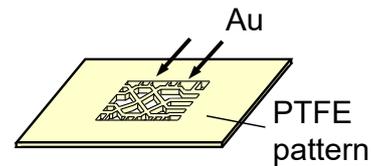
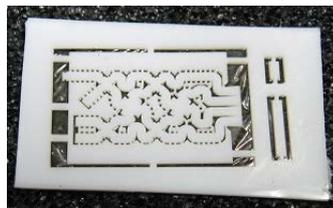


図 4 Au のスパッタ概念図

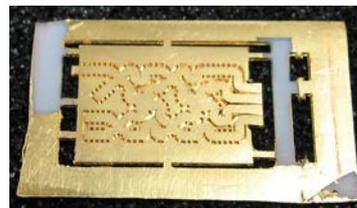
(5) なお、本研究では 4 \times 4 バトラーマトリクスの出力ポート#5~#8 にホーンアンテナを接続し、その放射パターンを測定することで妥当性を評価する。そのため、ホーンアンテナも予めバトラーマトリクスのパターンに含めて一体化して製作する。

4. 研究成果

(1) 研究方法で述べた設計、製作プロセスに基づいて、180 GHz 帯テフロン SIW 4 \times 4 バトラーマトリクスを試作した。図 5(a)に、放射光直接エッチングによって得たテフロンパターンのひとつを示している。照射した X 線量は 2560 Asec である(露光時間: 約 2.5 時間)。右側の長方形パターンは、Au スパッタを行う場合にホーンアンテナのホーン開口を塞ぎ、Au 付着を避けるために使用するテフロン片である。同図より、大よそ良好なテフロンパターンが得られていることが分かる。図 5(b)の写真は、スパッタと電解めっきを施して Au 薄膜で覆われたテフロンパターンを示している。電解めっき後、Au 膜厚は約 5 μm になっている。



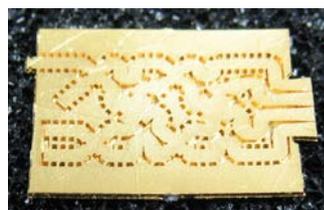
(a)



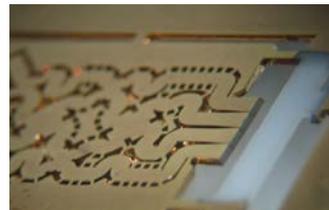
(b)

図 5 SIW 型 4 \times 4 バトラーマトリクスの試作結果 (a) 放射光直接エッチングで得たテフロンパターン (b) Au のスパッタ・電解めっきで表面に金属膜を形成したテフロンパターン

(2) Au 膜の形成後に不要な枠を切除すれば、図 6(a)に示すようなテフロン SIW バトラーマトリクスが完成する。ホーンアンテナ開口部は、Au スパッタ時に開口面を塞ぐ方法で、図 6(b)に示すように Au 膜の無い状態が実現できている。入力ポート面についても同様の処理を行った。ポート#1~#4 の内、入力を接続しないポートについては短絡状態としている。



(a)



(b)

図 6 完成したバトラーマトリクス (a)周囲の不要枠を切除したバトラーマトリクス (b)ホーンアンテナ開口付近の様子(枠切除前)

(3) 180 GHz 帯テフロン SIW バトラーマトリクスの特性を評価するため、図 7(a)に示す周波数 3 通倍器と検波器を用いた測定環境を構築し、ホーンアンテナによる放射パターンを測定した。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、パワーアンプ (Millitech, 50 GHz - 66 GHz, +15 dBm)で 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 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。今回、3 通倍器の出力にコニカルホーン (gain: 21dB, WR-5 導波管)を接続して送信アンテナとして用い、定対象となるテフロン SIW4×4 バトラーマトリクスを G 帯検波器 (VDI WR5.1 Zero-Bias Detector, 140 GHz - 220 GHz)の前に接続して受信電力を測定する。検波器は、入力電力に比例した DC 電圧を出力する。アンテナ角度を変化させて放射パターンを得るため、図 7(b)のように RC サーボによる回転台にバトラーマトリクスを載せた。

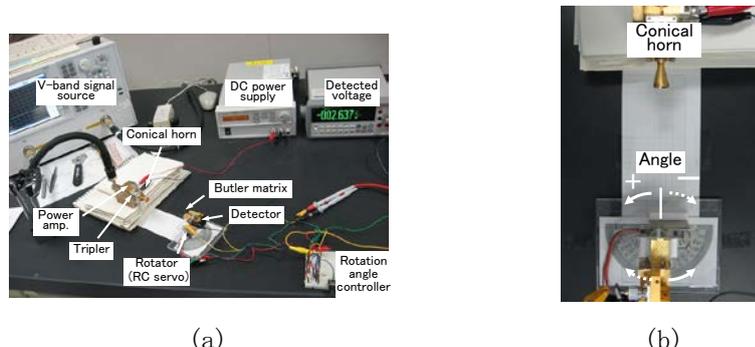


図 7 180GHz 帯テフロン SIW バトラーマトリクスの放射パターン測定システム (a) 全体 (b) 回転台に載せたバトラーマトリクスとアンテナの配置

(4) バトラーマトリクスは、入力ポート位置に応じて 2 種類のパターンを試作した。図 8(a)は、入力ポート #1 に対応する試作バトラーマトリクスについて、周波数 180 GHz で測定した H 面放射パターンを示している。アンテナを正面から左に回転させた角度をプラスに取っており、測定値は最大値で正規化している。赤の実線が測定した放射パターンで、主ビームの方向が大よそ電磁界シミュレータ HFSS の計算結果 (青の一点鎖線)と一致していることが確認できる。ホーンアンテナの配置間隔などは最適化されておらず、メインビームの方向 -10° に意味はないが、バトラーマトリクスとして動作していることが確認できる。

図 8(b)は、入力ポート #2 に対応する試作バトラーマトリクスの H 面放射パターン測定結果を示している。 $+30^\circ$ 付近と -45° 付近にピークを持つ特性になっている。 -45° 付近のピークについては HFSS の結果とも良く一致しているが、 $+30^\circ$ 付近については測定結果と HFSS の計算結果との間に約 15° の差が見られる。誤差の原因については、再試作による検証が望ましい。

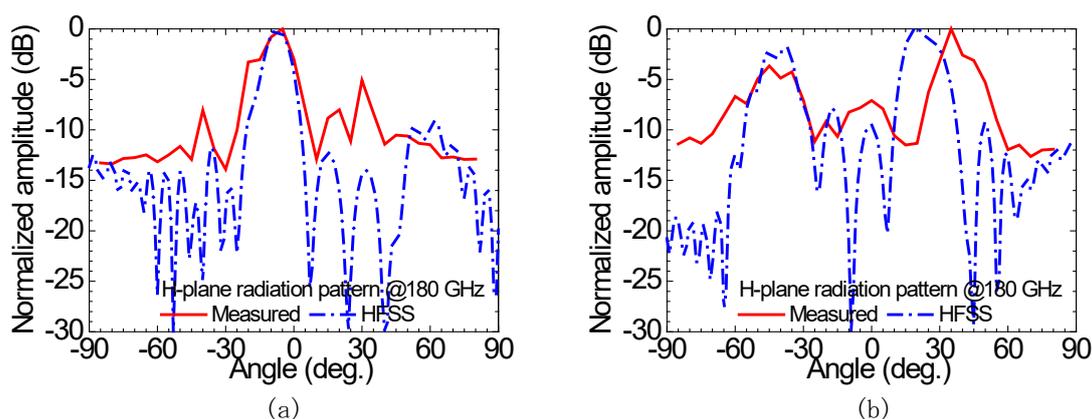


図 8 180 GHz におけるテフロン SIW4×4 バトラーマトリクスの H 面放射パターン測定結果 (a)入力ポート #1, (b)入力ポート #2

(5) 放射光直接エッチング、Au のスパッタおよび電解めっきから成る製作プロセスで短ミリ波帯のテフロン SIW 4×4 バトラーマトリクスを試作・測定することで、十字型カップラや横断回路など複数の SIW 回路素子によって構成される短ミリ波帯集積回路が実現することを示した。実現した回路は、文字通りテフロン基板に集積した導波管集積回路となった。伝搬損失を明らかにすることは、今後の課題のひとつと考える。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Mitsuyoshi KISHIHARA, Masaya TAKEUCHI, Akinobu YAMAGUCHI, Yuichi UTSUMI, Isao OHTA	4. 巻 E104-C
2. 論文標題 Design and Fabrication of PTFE Substrate Integrated Waveguide Coupler by SR Direct Etching	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEICE Transactions on Electronics	6. 最初と最後の頁 446 ~ 454
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1587/transele.2020ECP5043	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 岸原 充佳, 河合 正, 太田 勲	4. 巻 J105-C
2. 論文標題 短ミリ波帯E面空洞型導波管3dBカブラ エンドミルサイズを考慮した設計	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 電子情報通信学会論文誌C	6. 最初と最後の頁 112 ~ 113
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.14923/transelej.2021JCF6004	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Mitsuyoshi KISHIHARA, Kaito FUJITANI, Akinobu YAMAGUCHI, Yuichi UTSUMI, Isao OHTA	4. 巻 E106.C
2. 論文標題 Design and Fabrication of PTFE Substrate-Integrated Waveguide Butler Matrix for Short Millimeter Waves	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 IEICE Transactions on Electronics	6. 最初と最後の頁 111 ~ 115
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1587/transele.2022ECS6003	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 岸原 充佳, 藤谷 海斗, 中野 智之, 山口 明啓, 内海 裕一, 太田 勲	4. 巻 -
2. 論文標題 放射光エッチングによる短ミリ波帯PTFE基板集積導波管横断回路の試作	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 電子情報通信学会論文誌C	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 岸原充佳
2. 発表標題 短ミリ波帯PTFE基板集積導波管バトラーマトリクスの試作・評価
3. 学会等名 電子情報通信学会マイクロ波研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 岸原充佳, 竹内雅耶, 山口明啓, 内海裕一, 太田勲
2. 発表標題 180GHz帯PTFE基板集積導波管バトラーマトリクスの試作
3. 学会等名 2020年電子情報通信学会ソサイエティ大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 岸原充佳, 藤谷海斗, 山口明啓, 内海裕一, 太田勲
2. 発表標題 G帯PTFE SIW十字交差形3dBカブラの試作・評価
3. 学会等名 2021年電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	内海 裕一	兵庫県立大学・高度産業科学技術研究所・教授	
	(Utsumi Yuichi)		
	(80326298)	(24506)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------