

令和 5 年 6 月 5 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20H02154

研究課題名（和文）誘電体フリーな導波構造に基づく高速2自由度テラヘルツビーム走査の実現

研究課題名（英文）Study on 2D fast terahertz beam steering based on dielectric-free waveguiding structures

研究代表者

門内 靖明（Monnai, Yasuaki）

東京大学・先端科学技術研究センター・准教授

研究者番号：90726770

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 14,000,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、中空導体平板間を多重反射伝搬する導波モードのテラヘルツ波に着目し、等価屈折率分布を制御してビームを走査する方法を提案・実証した。具体的には、屈折率勾配と周波数掃引とを組み合わせることで300GHz帯の漏れ波ビームを2自由度走査できることを示した。また、構造中の周波数分散性をトポロジー最適化に基づいて補償し、広帯域動作が可能な屈折率分布を設計・製作し、実証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

提案したビーム走査方法では、導体壁面に垂直な電場が存在しないため壁面電流による伝送損失が抑えられ、また中空であるため誘電損失も生じず、低損失な実装が可能となる。ビーム指向性の制御から検波までの処理を導波構造ベースで行えるようにしたことで、将来の100Gbps級の無線通信やサブミリ分解能のレーダー計測の技術基盤を確立した。

研究成果の概要（英文）：In this study, we have proposed and demonstrated a terahertz beam steering method based on the control of the equivalent refractive index distribution for a waveguide mode propagating between hollow conductor plates with multiple reflection. Based on the proposed method, we have shown that leaky-wave beams in the 300 GHz band can be steered in two axes by combining refractive index gradient and frequency sweep. We have also designed, fabricated, and demonstrated a refractive index distribution that compensates for frequency dispersion in the structure based on topology optimization enabling broadband operation.

研究分野：テラヘルツ波工学

キーワード：テラヘルツ波 ビームステアリング アンテナ 導波路

### 1. 研究開始当初の背景

テラヘルツ帯の半導体技術が整備され始め、超高速無線通信や非破壊検査など様々な応用が視野に入ってきている。今後の応用展開のためには、これまで国内外で盛んに取り組まれてきた送受信器の研究に加えて、キャリアあるいはプローブとなる波動をスマートに空間伝送する技術が不可欠となる。しかし、実用的なフェーズシフタが存在していないテラヘルツ帯では、低損失・広帯域なビーム走査は未だ実現困難である。テラヘルツ波を空間伝送する際に根本的な課題となるのが、波面広がりによる回折損失である。離れた2地点のアンテナ間で伝送可能なパワーは、フリスの伝送公式に従って波長の2乗に反比例する。つまり、周波数が上がるほど回折損失が増大し、0.3THzで1m伝搬する際の受信信号は-82dBにまで減衰する(一方、大気分子による減衰は一部の共鳴を除くと0.3THz付近で概ね数dB/km以下であり、近距離では回折損失と比べて無視できる)。それを抑制するためには高指向性ビームを形成し自在に走査することが不可欠となる。

### 2. 研究の目的

実用的なフェーズシフタが存在していないテラヘルツ帯でのビーム走査に向けた新たなアプローチとして、中空導体平板間を多重反射伝搬するTE1モードに着目し、等価屈折率の勾配を変調してビームを走査する方法を世界に先駆けて提案する。ビーム指向性の制御から検波までの処理を導波構造中で完結できることを実験的に実証し、将来の100Gbps級の無線通信やサブミリ分解能のレーダー計測の技術基盤を構築する。

### 3. 研究の方法

本研究では、中空導体平板間を多重反射伝搬するTE1モードに着目し、等価屈折率の勾配を変調してビームを走査する方法を世界に先駆けて提案する。平板間中のTE1モードは、矩形導波管中のTE10モードと異なり、導体壁面に垂直な電場が存在しないため壁面電流による伝送損失が低下することが知られている。また、中空であるため誘電損失も生じない。このようなTE1モードに対する等価屈折率は、平板間距離に応じて変化する(ただし、TE1モードの位相速度は光速度を超えるため、等価屈折率は0から1までの値となる)。そこで、平板表面に微細な凹凸を形成して屈折率分布を制御することで、誘電体を用いることなくレンズや合分波器などの素子を平板中に集積実装したり、波動伝搬軸の周りに平板を微小傾斜させることで屈折率分布に勾配を形成してビームの出射角を大きく曲げたりできることを示す。このようにビーム指向性の制御から検波までの処理を導波構造中で完結できることを実験的に実証し、将来の100Gbps級の無線通信やサブミリ分解能のレーダー計測の技術基盤を構築する。

### 4. 研究成果

#### (1) 2次元導波構造内での波面制御に関する研究開発

本研究では、2次元導波構造中のTEモードを空間中に漏出させることで2自由度のテラヘルツビーム走査の実現を目指した。そのためにまず、導体平板間中のTE1モードのテラヘルツ波を均一な波面に変換するための2次元ルネベルグレンズを導体平板間に形成した(図1(a-c), (i))。ルネベルグレンズは、円周上の点波源から発せられた波動を中心対称な方向の無限遠点に無収差結像させるレンズである。TE1モードに対する実効屈折率は平板間距離に依存して0から1までの値をとるため、下側の平板表面に凹面を形成して平板間距離を連続的に変化させることでレンズを実装した。

ルネベルグレンズは理想的には無収差であるものの、TE1モードの実効屈折率は周波数に依存するため、ある中心周波数に対して形成された凹面に対するレンズの動作帯域幅は有限となる。そこで、広

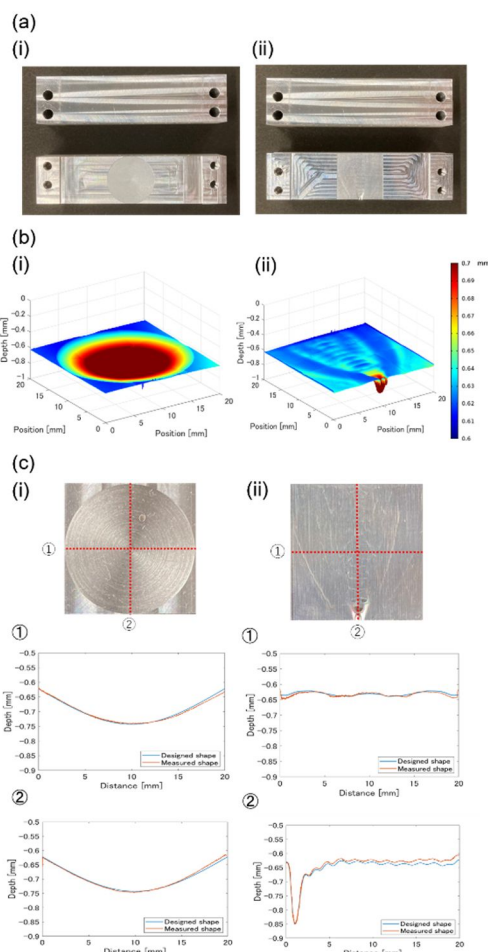


図1 (a) 底板に凹部を設けることで作製したレンズ. (i) ルネベルグレンズ, (ii) 最適化構造, (b) OCTで観察した表面形状, (c) 表面形状の実測値と設計値との比較(2方向を抜粋).

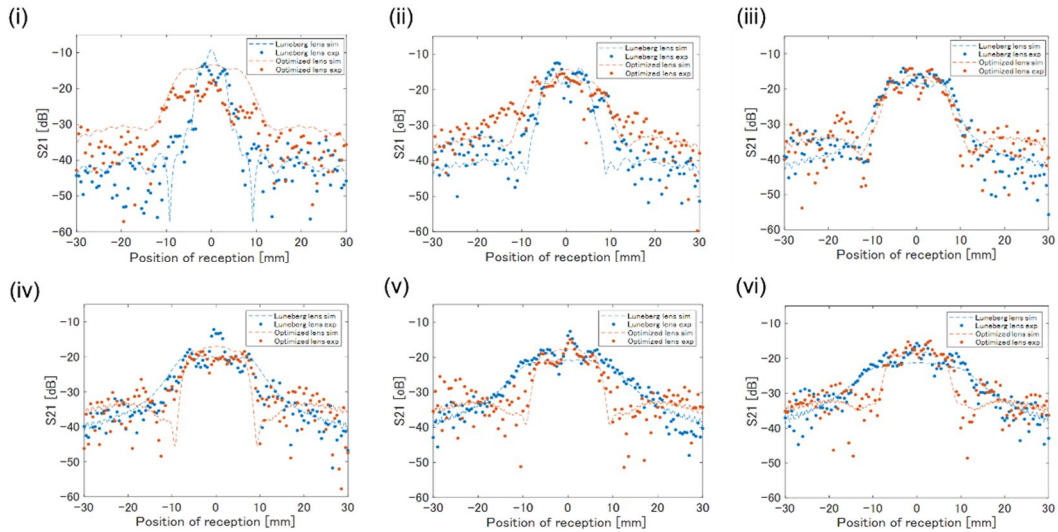


図 2 放射パターンの実験値とシミュレーション値の比較。(i) 250 GHz (ii) 260 GHz (iii) 270 GHz (iv) 280 GHz (v) 290 GHz (vi) 300 GHz.

帯域化に向けた数値的検討として、中心周波数を変えながら設計された複数の凹面の平均をとる方法、および評価関数に基づいて最適な凹面を設計する方法を試みたが、いずれも指向性の低下を免れなかった。そこで、2次元導波構造内において点励振を平面波に変換するためのレンズ作用を持つ構造の広帯域化に取り組んだ。広帯域な動作を達成するため、トポロジー最適化の手法を用いて、多周波数にわたって均一な2次元波面が形成されるよう導体板間の距離分布(凹凸分布)を設計した。評価関数に基づいて数値的にトポロジー最適化された結果を基に実機を作製した(図1(a-c), (ii))。

以上の2つの構造に対して、導波構造の片側の辺上の1点を点励振した際に、対向するもう片側の辺上に現れる出力の複素透過係数を測定する評価実験を行った(図2)。点励振によって約20mm幅のコリメートされた波面を約50GHz帯域幅にわたって生成できることを確認した。また、最適化された構造はルネベルグレンズと比較してより広帯域になることを実験的に確認した。なお、いずれの構造についても表面形状精度は光コヒーレンストモグラフィ(OCT)を用いて実測され、設計通りの作製が行えていることを確認している。提案手法は、簡便かつ低コストに低損失・広帯域のテラヘルツビームを生成する方法となりうる。

## (2) 2次元導波構造からの漏れ波に基づく空間指向性制御に関する研究開発

次に、2次元空間中で形成されたテラヘルツ波面を、漏れ波ビームとして外部空間に放射させる方法について検討・実装した。なお、ここでは簡単のため、トポロジー最適化された構造ではなくルネベルグレンズを用いている。上側の平板を導体メッシュ層で置き換えるための実装方法を検討し、銅がスパッタリングされたポリマーフィルムをレーザー加工でパターンニングした構造を試作した(図3(a)-(c))。そのためにまず、上側平板を導体メッシュ層で置き換えて波

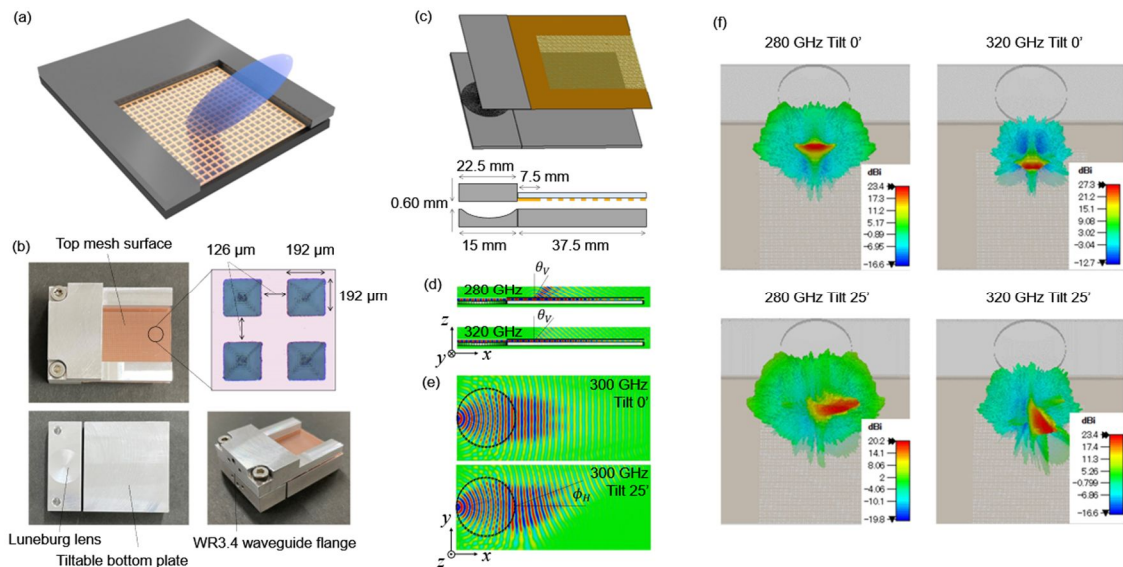


図 3 (a) 概念図, (b, c) 作製物の写真と構造図, (d) 底板が傾いている場合の 280GHz と 320GHz の電場シミュレーション結果( $E_y$  成分), (e) 底板の傾きが  $0^\circ$  と  $25^\circ$  の場合の 300GHz での電場シミュレーション結果( $E_y$  成分), (f) 周波数掃引と底板傾斜を組み合わせた 2次元ステアリング機能を示す遠距離放射パターン結果。

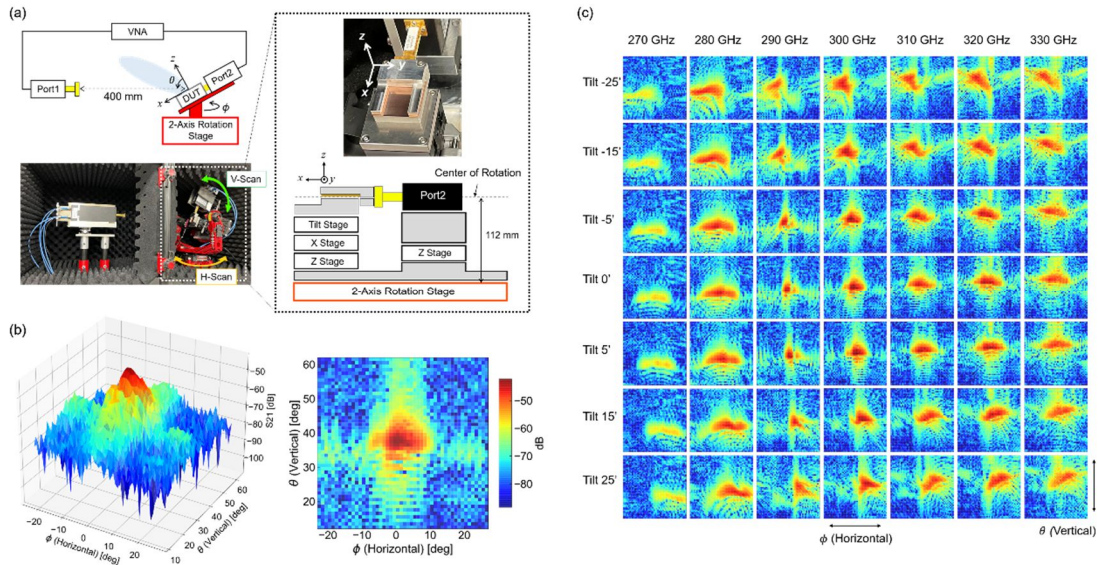


図4 (a) 構築した放射パターン測定系 . (b) 300GHz における放射パターンの実測結果 . (c) 周波数と底板の傾斜を変化させたときの2自由度ビーム走査の実験結果 .

動の漏れが生じるようにした。また、下側の板をわずかに傾斜させることで、楕子を効かせるようにしてビーム角を大きく変えられることを数値シミュレーションにより確認した(図3 (d,e))。

次に、周波数掃引および導波板勾配を制御することで、2自由度テラヘルツビームステアリングを原理実証した。具体的には、周波数を掃引することでビームを垂直方向走査、および平板間の相対的な傾斜を制御することで実効屈折率分布の空間勾配により水平方向走査する。これらを組み合わせることで、ビームを2自由度走査可能なことを実証した。その実測のために、漏れ波ビームの放射パターンを電波暗室内で実測するための実験系を構築した(図4 (a))。具体的には、作製されたデバイスを回転ステージ上に設置して送受信点間の位置合わせを行うことで、2点間の複素透過係数を測定できるようにした。形成されるビーム指向性、およびその走査可能な角度範囲を実験的に明らかにした(図4 (b,c))。その結果、3dB ビーム幅が最小  $6^\circ$  のビームを水平方向に  $\pm 20^\circ$  (傾斜幅  $-25^\circ \sim +25^\circ$ )、垂直方向に  $15^\circ$  (掃引幅 270 ~ 330 GHz) の範囲で走査した。伝送帯域幅は3dB 幅で 5 GHz、10dB 幅で 30 GHz となった。今後、ルネベルグレンズ部分をより広帯域な導波構造に置き換えることで、広帯域化を図っていく。

また、本研究では導波構造に対して送信器だけでなく受信器を同時に接続することで、外部から到来する波動を検波できるようにし、レーダーセンサとして使えるようにもした。並行して、らせん状の構造を持つ金属表面によって角運動量を持った Vortex beam をサブテラヘルツ帯で生成する手法についても実験実証を行うなど、金属表面の微細加工を用いてテラヘルツビームを生成・走査し、応用する研究について広く取り組みを行った。そしてまた、テラヘルツビーム走査に関するレビュー論文や解説記事の執筆にも取り組んだ。これら一連の成果は、今後のテラヘルツ通信や計測技術の応用に資するものと考えられる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Sato Kazuto, Monnai Yasuaki	4. 巻 11
2. 論文標題 Two-Dimensional Terahertz Beam Steering Based on Trajectory Deflection of Leaky-Mode	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology	6. 最初と最後の頁 676 ~ 683
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/THZ.2021.3108392	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 Hira Yumina, Monnai Yasuaki	4. 巻 29
2. 論文標題 Sub-terahertz vortex beam generation using a spiral metal reflector	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Optics Express	6. 最初と最後の頁 24118 ~ 24118
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/OE.430805	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 -

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 3件／うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Yumina Hira and Yasuaki Monnai
2. 発表標題 Polarization Insensitive Sub-Terahertz Vortex Beam Generator Using Spiral Metal Reflector
3. 学会等名 46th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz) 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 門内靖明
2. 発表標題 テラヘルツレーダーの集積的実現と非接触身体情報計測への応用
3. 学会等名 Microwave Workshops & Exhibition MWE 2020 (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 門内靖明
2. 発表標題 集積型テラヘルツレーダーの実現とその非接触身体情報計測への応用
3. 学会等名 テラヘルツ波科学技術と産業開拓第182 委員会（招待講演）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 門内靖明
2. 発表標題 集積型テラヘルツレーダーの実現と非接触身体情報計測への応用
3. 学会等名 テラヘルツシステム応用推進協議会（招待講演）
4. 発表年 2020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

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