

令和 2 年 6 月 22 日現在

機関番号：32612

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2017～2019

課題番号：17H04928

研究課題名(和文)光誘起モード変調に基づくテラヘルツフェーズドアレイの実現

研究課題名(英文)Study on terahertz phased array based on photo induced mode modulation

研究代表者

門内 靖明(Monnai, Yasuaki)

慶應義塾大学・理工学部(矢上)・講師

研究者番号：90726770

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 18,300,000円

研究成果の概要(和文)：テラヘルツフェーズドアレイの基本要素となる複素変調器を光誘起キャリアを用いて実装する方法を提案し、その基本的な特性を明らかにした。具体的には、TEモード導波路端面に装荷された高抵抗シリコン基板への励起光照射に伴って生じる複素変調効果を解析し、実験結果との一致を確認した。移相量の大きさと損失の小ささはトレードオフになり、300GHzにおける減衰は10mm長のサンプルに対して0.5dB/mWとなり、30.6mW照射時の位相変化量は44°程度となった。さらに、同じTEモード導波路中の等価屈折率分布を変調する方法として、導波路に勾配を与えることでビーム軌跡を制御する方法も提案し、原理実証を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

電波と光波の中間の周波数帯に位置するテラヘルツ波は次世代の高速無線通信や無線計測における利活用が期待されている。その際、電波領域のフェーズドアレイのように、指向性の高いビームを自在に形成・走査することが重要となり、そのためには波の位相を制御する複素変調器の実現が不可欠である。しかし、テラヘルツ帯ではそれに適した材料が現時点で存在せず、実現困難である。そこで本研究では、新たに高抵抗シリコン中の光誘起キャリアを用いて導波モードの境界条件を変調する方法を提案し、その基本的な特性を明らかにした。さらに、同じTEモード導波路中の導波路に勾配を与えて等価屈折率分布を変調する方法も提案し、原理実証を行った。

研究成果の概要(英文)：We proposed a terahertz complex modulator based on photo induced carriers, which is applicable to constructing terahertz phase arrays. Specifically, we analyzed the complex modulation effect involved by the photo excitation on a high-resistivity silicon substrate in a TE mode waveguide and confirmed agreement with the experimental results. We also confirmed trade-off between the amount of the phase shift and transmission loss. The transmission loss becomes 0.5 dB/mW for a sample of 10 mm long and the phase shift reaches 44 degree when irradiating 30.6 mW, both at 300 GHz. Moreover, we also proposed a novel method of modulating the effective index inside a TE mode waveguide by slightly tilting the plate. Experiment demonstrates that the beam trajectory can be deflected inside the waveguide, which is useful for terahertz beam steering.

研究分野：波動応用工学

キーワード：テラヘルツ波 変調器 導波路 ビームステアリング

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

近年、テラヘルツ帯の基盤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。今後その実用化に向けては、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、空間伝搬を制御する伝送技術の研究が不可欠となる。特に、波長 1mm 以下の伝送では回折損失を抑えるために高い指向性が必要となるので、通信ノード間のアライメントや計測対象のラスタスキャンのためにビームステアリングが必須である。

しかし、テラヘルツ帯では低損失で広帯域な位相変調器が存在しておらず、フェーズドアレイによるビームステアリングの実現は未だに困難なままである。従来の電波領域では、媒質の誘電率・透磁率を変化させたり遅延線を切り替えたりして位相変調が実装されてきたが、これらは低損失な可変材料の利用を前提としており、テラヘルツ帯への直接的な適用は困難である。また、最近ではメタマテリアルの一部に可変材料を組み込む手法が報告されているが、その基本的な原理は共振点付近の位相変化に基づくため動作帯域が狭く、また平面波による入出力を前提としているため導波構造との親和性が低い。

2. 研究の目的

波長の短いテラヘルツ波を空間伝送するには、広帯域かつ低損失な位相変調技術が不可欠である。そこで本研究では、WR3.4 帯(220-330 GHz)のテラヘルツ帯で有効な新しい移相方式として、外部入力によって導波路の境界条件を変化させて伝搬波数を変調し、伝搬波の位相や軌跡を制御する手法を提案することを目的とする。具体的な外部入力としては光誘起キャリアや導波路のわずかな傾斜変化などを利用する。従来の電波領域の移相器が媒質全体の誘電率・透磁率を変化させていたのに対して、本手法では媒質表面の境界条件のみを局所的に変化させることで、広帯域かつ低損失な動作を目指す。電磁界シミュレーションによって設計し作製されたデバイスの評価実験を通して、提案手法の実証を行う。

3. 研究の方法

テラヘルツ波の位相を制御する新たな方法として、導波構造中の高抵抗シリコンへの光照射により生じる光誘起キャリアを用いる方法と、導体平板間を伝搬する TE モードに対して平板間距離に勾配を設ける方法とを提案し、それぞれ実験実証する。前者では、テラヘルツ帯で低損失な高抵抗シリコンをベースとして NRD ガイドを構成し、側面の空隙から光を照射する際に生じる光誘起キャリアを用いることで導波路境界条件を制御することを試みる。NRD ガイドとは、カットオフ状態の導体平板間に誘電体チャンネルを挟み込んだ構造の導波路であり、誘電体内では波長短縮により遮断状態が解除される一方、誘電体外では遮断状態のため不要放射が抑えられる。また後者では、NRD ガイドの誘電体チャンネルを取り外し、平行平板にわずかな勾配を与えることで平板間の実効的な屈折率分布を変調する。その結果伝搬波の軌跡を屈曲させ、出射ビーム方向を変えることを試みる。誘電体材料を用いないことで損失を最小限に抑える。

4. 研究成果

(1) 光誘起キャリアに基づくテラヘルツ波の複素変調

高抵抗シリコン片の上下を導体板で挟む構造により WR3.4 帯の NRD ガイドを作製した。側面の空隙から高抵抗シリコン表面への励起光を照射する際に、内部を伝搬する電磁波に対して与えられる複素変調効果を調べた。図 1 に提案構造を示す。導波管からの電磁波を反射なく伝送するために、高抵抗シリコン片の両端部をテーパ状に加工し、WR3.4 矩形導波管に挿入できるようにした。デバイスの作製にあたっては、両端を 4 mm ずつテーパ状に加工した高抵抗シリコン(全長 18 mm、幅 430 μm 、厚さ 330 μm)を 2 枚のフラットなアルミ板で挟む構造とした。また、高抵抗シリコンを励起するために波長 400~1100 μm のスペクトル成分を有するインコヒーレントな近赤外光源を用い、焦点距離 2 cm のシリンドリカルレンズを用いて側方から高抵抗シリコン片に照射した。なお、実験に先立って光源から発生される近赤外光のうち、シリコンのバンドギャップに対応する 830 nm 以上スペクトル成分のパワーを実験的に求めた。

照射光強度を変えた際の S パラメータの変化を、ベクトルネットワークアナライザ(VNA)を用いて測定した結果を図 2 に示す。キャリアを用いる原理上、位相変化と振幅減衰とは独立ではなく同時に現れ、移相量の大きさと損失の小ささはトレードオフになることが分かる。提案手法では、300GHz における減衰は 10mm 長のサンプルに対して 0.5dB/mW となり、30.6mW 照射時の位相変化量は 44° 程度となった。シリコン表面への照射光量と波長分布から計算した移相量と減衰量について実験値と理論値が一致することを確認した。なお、作製した導波路において

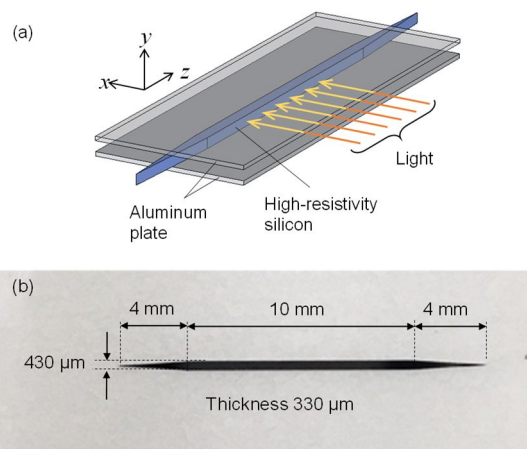


図 1 (a) 提案するデバイス構造の概念図。
(b) 加工された高抵抗シリコン片の写真。

は、従来の多くの導波型デバイスとは逆に、高周波になるほど損失が減少することを観測した。このような周波数特性は中空の平行平板中でのTEモード伝送に特徴的なものであるが、高抵抗シリコンを挿入した場合でもその特性が現れることが今回明らかになった。また、実験において本来滑らかに変化すべき周波数特性に対して230GHz付近で共振的なピークが見られた。その原因を究明するためにテーパ構造と導波路とのミスアラインメントをモデル化して電磁界シミュレーションを行ったところ、同様のピークを有する周波数特性がよく再現された。これにより、意図しないピークの発生要因および今後の改良方針が分かった。

以上により、テラヘルツフェーズドアレイの基本要素となる複素変調器を原理実証し、その基本的な特性を明らかにした。提案構造は低コストで容易に作製でき、他コンポーネントとの集積化にも資する。今後は、シリコン表面への微細構造の導入によってより高効率な減衰を生じさせることや、分岐構造に基づく集積アレイ化などへ拡張することなどが考えられる。また、キャリアによる減衰が大きく広帯域であることから、テラヘルツ波の広帯域減衰器の実装方法としても有用であると考えられる。

(2) 導体平板間屈折率分布変調に基づくビームステアリング

前記(1)と並行して、他の広帯域位相変調手法についても検討を行った。具体的には、平行平板に基づくTEモード導波路中の平板間距離に分布を設けることで屈折率分布を変調し、ルネベルグレンズと等価な作用を実現してビームをコリメートしつつ平板にわずかな勾配を与えてビームの軌跡を傾ける方法を提案した(図3)。実験では、片方の板を -25° から 25° (-0.42° から 0.42°)の範囲でわずかに傾けることで、形成された指向性ビームの方向を -25° から 25° の範囲にわたってステアリングできることを示した。これにより、平板のわずかな傾斜を約60倍の大きなビーム傾きとして取り出せることが分かった。このような微小な平板の傾きは、 piezoelectric アクチュエータやMEMSを用いることで高速に制御することが可能であると考えられる。ビームの軌跡を変分原理に基づいて解析し、実験結果と一致することを確認した。この結果により、大きなビーム角変化を達成するために必要な設計パラメータを明らかにした。

これまでも低損失な誘電体である高抵抗シリコンを用いてルネベルグレンズを実装した先行研究は存在したが、従来のルネベルグレンズではビームを走査する際にレンズ周縁部の入射位置を動かす必要があった。また、高抵抗シリコンの屈折率が3.4と高いことからレンズ内外での屈折率が大きく、自由空間にビームを放射する際のインピーダンス整合が課題となっていた。一方、今回提案した構造は、レンズに対する波の入射位置を変える必要がない。また、誘電体を使用しないことから、自由空間へ放射する際にレンズ内外の屈折率差が小さくなり特別な整合機構を設ける必要がない。等価屈折率は周波数分散を有するため、今後は広帯域伝送に向けて構造を最適化することが必要になるものの、低損失なビーム走査の新たな方法となりうることを確認した。

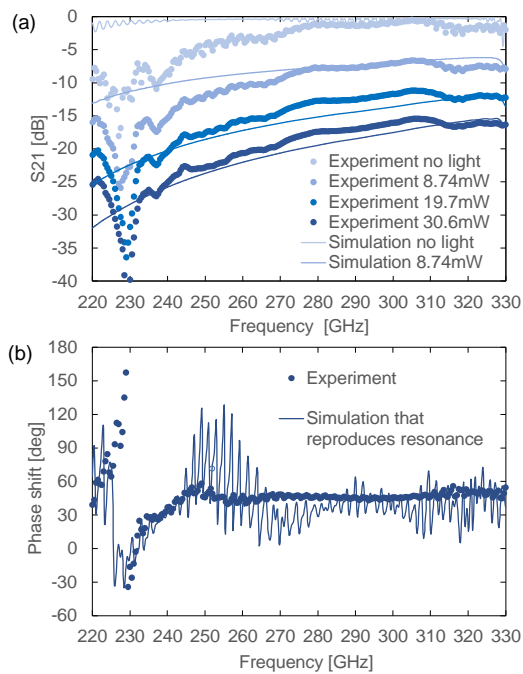


図2 励起光を照射する際のSパラメータの変化。(a) Sパラメータの絶対値の変化。(b) 励起光パワーが30.6 mWの時の、照射が無い場合を基準とするSパラメータの位相変化量。

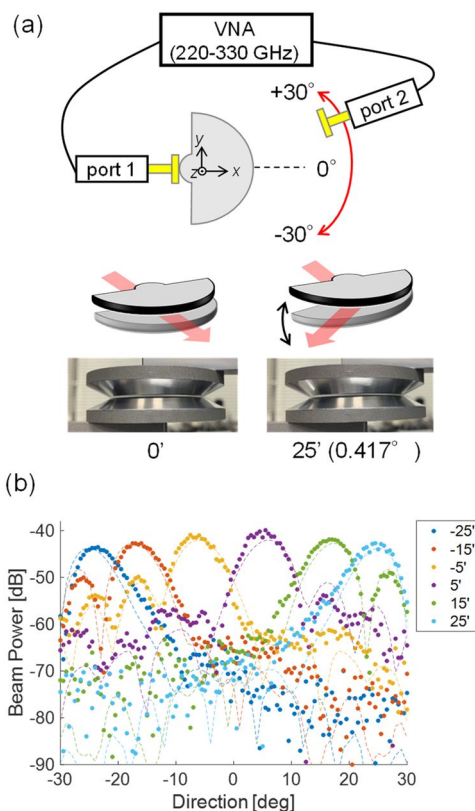


図3 (a) 平行平板の傾斜に基づく変位増幅型ビーム走査の概念図。(b) 平板をわずかに傾斜させる際の300 GHzにおける放射パターンの変化。

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 0件）

1. 著者名 Sato Kazuto, Monnai Yasuaki	4. 巻 10
2. 論文標題 Terahertz Beam Steering Based on Trajectory Deflection in Dielectric-Free Luneburg Lens	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology	6. 最初と最後の頁 229 ~ 236
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/THZ.2020.2983915	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 Sasao Keisuke, Monnai Yasuaki	4. 巻 10
2. 論文標題 Variable Terahertz Attenuator Integrated on Nonradiative Guide Using Photoinduced Carriers	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology	6. 最初と最後の頁 256 ~ 259
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/THZ.2020.2977991	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5件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 Sato Kazuto, Monnai Yasuaki
2. 発表標題 Terahertz Beam Steering Based On Luneburg Lens
3. 学会等名 The 44th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Takeda Yuki, Monnai Yasuaki
2. 発表標題 Study of Microstrip-Based Terahertz Phase Shifter Using Liquid Crystal
3. 学会等名 The 44th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 笹生啓介、門内靖明
2. 発表標題 NRDガイドと一体化された光誘起テラヘルツ可変減衰器
3. 学会等名 2019年電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 佐藤和人、門内靖明
2. 発表標題 誘電体フリーなテラヘルツ帯ルネベルグレンズの実現
3. 学会等名 シンポジウム「テラヘルツ科学の最先端」
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 島貫泰斗, 渡邊一世, 笠松章史, 田中敬幸, 門内靖明
2. 発表標題 光誘起キャリアによるテラヘルツ導波路内変調に関する基礎検討
3. 学会等名 電子情報通信学会電子デバイス研究会2017
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 レンズアンテナ、これを用いたレーダ装置、及び無線通信装置	発明者 門内 靖明、佐藤 和 人	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、2019-150591	出願年 2019年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔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
---------	---------------------------	-----------------------	----