

令和 2 年 6 月 15 日現在

機関番号：32621

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K06442

研究課題名(和文) テラヘルツ波集積回路の研究

研究課題名(英文) Study on Terahertz wave integrated circuits

研究代表者

高橋 浩 (Takahashi, Hiroshi)

上智大学・理工学部・教授

研究者番号：40500468

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：金属基板に形成した中空導波管からなるテラヘルツ波の集積回路の基礎研究を実施した。従来理論とは異なり導波管の内寸を大きくして伝搬損失低減、分岐部に反射防止構造を導入することで散乱損失を削り、1THzを中心に0.1THz間隔の5波(すなわち0.8, 0.9, 1.0, 1.1, 1.2 THz)を分波するフィルタの動作を実験実証した。また、2波の光の差周波数としてテラヘルツ波を発生させる方法において差動フォトダイオードを利用し振幅を従来の2倍にする方法も確認した。以上よりテラヘルツ波を扱う集積回路の基礎技術を構築した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

テラヘルツ波は超広帯域通信、医薬品・化学物質の分析、有機物質透視イメージングで用いられておりその技術のさらなる高度化が求められている。しかし、電波と光の中間の電磁波であり技術の谷間に存在していたため、エレクトロニクスや光技術と同様の集積化の研究は盛んではなかった。本研究では、テラヘルツ波を伝搬させる導波路の寸法を基本から見直すとともに新たな構造を導入することにより、5波のテラヘルツ波を分離できるフィルタを実現した。この一例によりテラヘルツ波集積回路を金属基板上に実現可能であることを明らかにした。集積回路は量産化が可能であり、上述の分野において応用されれば低価格、高機能な製品の実現に貢献できる

研究成果の概要(英文)：For building advanced Terahertz wave technology for ultra broadband communication, analysis of medicine and chemicals and fluoroscopic examination imaging, new Terahertz wave integrated circuit based on hollow waveguide on metal substrate has been investigated. By enlarging inner size of waveguide, which breaks traditional rule, propagation loss is found to be reduced. Terahertz filter, which can separates 0.1 THz-spaced 5 frequencies around 1 THz (0.8, 0.9, 1, 1.1, 1.2 THz), was realized. Beside, introducing new structure at branching point successfully reduced scattering loss in the filter. Moreover, it proposed and confirmed that balanced photodiodes can double output voltage of radio wave in Terahertz wave generation method using two-lightwave mixing.

研究分野：光エレクトロニクス

キーワード：テラヘルツ波 導波路 電磁波 周波数フィルタ 導波管

## 1. 研究開始当初の背景

電波と光の中間に位置する電磁波であるテラヘルツ波については、超広帯域通信、有機物(医薬品、生体など)の定量分析、透視画像撮影・センシングなどへの応用に関する研究開発が活発に行われている[1]。しかし、現状ではテラヘルツ波の強度情報をもとに評価を行っているケースが大半であり、波の可干渉性を積極的に活用していない。一方、電波や光を用いた通信やセンシングにおいては、波の振幅と位相(すなわち可干渉性)を利用し大容量情報伝送や高感度計測がすでに実現されており、その基盤技術としてモノリシックマイクロ波集積回路(MMIC)や光集積回路が発展している。今後、電波や光と同様にテラヘルツ波でも同様の技術開発のトレンドが予想されるため、テラヘルツ波領域でも集積回路の研究開発が期待されている。

テラヘルツ波の波長はおよそ 0.3mm であるため MMIC の延長で集積回路を作るのは困難が予想される。一方、光集積回路は微細加工技術を用いて形成される導波路(=導波管)からなる構造であり、光を低損失で伝送できることを活用して、様々な応用回路が実現されている。これと類似の技術を開発すればテラヘルツ波の集積回路の実現が可能であるため、第一歩となる実証例の研究が待ち望まれていた。

## 2. 研究の目的

上述の背景に基づき、本研究の目的は、光集積回路と同様に、テラヘルツ波の導波路(導波管構造)を平面基板の表面に加工技術を用いて形成し、テラヘルツ帯で動作する集積回路の概念を提唱するとともに、その初めての実現例を用いて実現可能性を世に示し、テラヘルツ波集積回路という新しい技術分野を開拓することである。

具体的には、導波路中の伝搬損失やテラヘルツ波源との接続効率を考慮して、集積回路に利用する場合の導波路の最適寸法を明らかにする(この寸法は従来のミリ波・マイクロ波の導波管管理論から導かれる値とは異なることを示す)。また、実証例として、1THz 付近のテラヘルツ波の周波数分離フィルタとして機能するテラヘルツ波集積回路の動作を実証し、本提唱技術の有効性を明らかにする。

## 3. 研究の方法

事前の理論的検討にもとづき、導波路の構造としては中空導波管構造を採用することとし、その作製方法として、基板(金属平板)の表面に精密機械加工で溝を掘り、基板と同材料の平板を貼り付け溝に蓋をすることで中空導波管構造を得る手法を取った。目的とする集積回路の導波路パターンに合わせて溝を形成して蓋をすれば、マイクロ波・ミリ波で良く用いられる手法(導波管をつないで回路を構成する方法)を用いることなく、一気に回路を実現できる。優れた量産性が期待される。

集積回路内のテラヘルツ波伝搬特性の測定には、時間領域分光法を採用した。THz の帯域を有する超短パルスレーザー光を用いてテラヘルツ波を発生させ、作製したサンプルに入射させる。サンプルから出力されたテラヘルツ波の時間波形を測定し、それをフーリエ変換することで周波数特性を得る方法である[2]。

上記 2 つの手段を用いて以下の検討を行った。

### (1)導波路伝搬特性評価と最適導波路寸法

集積回路を構成する導波路の形状・寸法は伝搬損失やテラヘルツ波発生器や検出器との結合損失を左右する重要なパラメータであるため、理論だけでなく実際に試作してその評価を行い、最適な導波路構造を求める。

### (2)テラヘルツ波帯で動作する周波数フィルタの試作と評価

テラヘルツ波集積回路の実現可能性を実証するためのサンプルとして、アレイ導波路型回折格子(arrayed-waveguide grating、以下 AWG と略す)を作製した。AWG は光集積回路の分野において研究開発が活発に行われ、波長分割多重(WDM)伝送システムにおける周波数の異なる多数の光を分離するフィルタとして実用化されている。多数の導波路からなる回路であり、テラヘルツ波集積回路の実証例として適切な回路と考えられる。

### (3)伝搬特性のシミュレーションと特性改良

集積回路中の分岐部においてテラヘルツ波の散乱が発生すると予測されるため、その対策も必要である。そこで、電磁界シミュレーションを用いて散乱したテラヘルツ波が AWG 周波数フィルタの特性に悪影響を与える状況の把握と解決手法の検討を行う。

### (4)テラヘルツ波生成の高効率化

テラヘルツ波生成にはいくつかの手法が知られているが、0.1THz~1THz の範囲においては同程度の帯域を有するフォトダイオードに周波数の異なる 2 つのレーザー光を入射する方法が知られている。この方法において、出力効率を向上する方法も検討する。

#### 4. 研究成果

(1) 図1に示すように、アルミニウム板に溝を掘ったのち、蓋をする手法で、様々な内寸の中空導波路を含むサンプルを作製した。上述の時間領域分光法の装置を用いてテラヘルツ波を導波路に入力し、伝搬後のテラヘルツ波の位相測定結果を解析して規格化群速度を算出した。その特性はグラフに示すように TE<sub>10</sub> モードに一致した。良く知られた導波管理論[3]に従えば、導波管の内寸は波長の0.9倍程度とすべきであるが、伝搬損失および発生源との結合損失を低減するため導波路断面内寸を波長0.3mmよりも大きい1.5mm×2mmとしても基本モードのみが伝搬することを明らかにした。波源からのテラヘルツ波の電界分布が TE<sub>10</sub> モードに近いガウス型であること、TE<sub>10</sub> 以外のモードは減衰が大きく長距離伝搬しないことが理由である。次の実験で明らかになるように、他のモードを回路の途中で励振しないよう導波路パターンを工夫すれば、この導波路を用いてテラヘルツ集積回路を作っても動作可能であることを明らかにした。

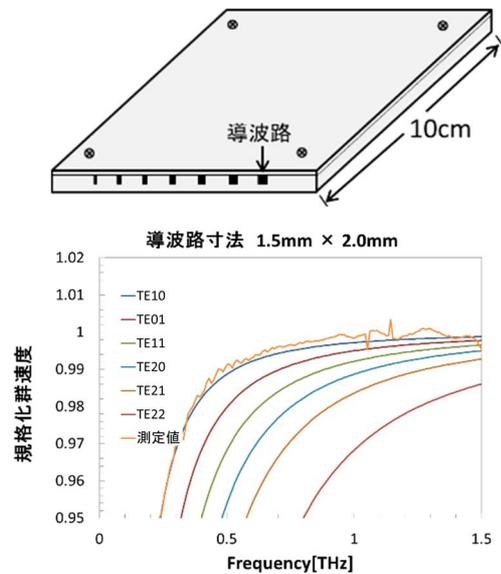


図1 サンプル外観と規格化群速度測定結果

(2) 光集積回路における AWG の理論[4]を拡張し、0.8、0.9、1.0、1.1、1.2THz の5波のテラヘルツ波を一括分離可能な AWG 型の周波数フィルタを設計・作製した。図2に示すよう不要なモードの励振を抑制するためアレイ導波路が直線となるように反射型の回路レイアウトを採用した。なおスラブ導波路に渦巻き状の加工跡が見られるが撮影時の照明によるもので実際には平らである。基板サイズは10cm×10cmである。左端の入力兼出力導波路からテラヘルツ波を入力するとスラブ導波路領域では水平方向の閉じ込めがないため回折により広がり、43本のアレイ導波路に到達する。アレイ導波路端で反射し逆の行程を経て出力導波路から出力される。入力波を基準とし、出力されたテラヘルツ波の相対強度スペクトルの一例を示す。AWG 特有の周期的特性からピークが複数見られるが通過帯域幅が0.04THz程度の周波数選択フィルタとして動作することが確認できた。また、非選択波長における抑圧比は良いところで20dB以上も確保できており、TE<sub>10</sub> 以外のモードの存在による特性劣化は見られない。なお、0.3THzより周波数の低い領域で見られる出力増大は波源の出力が弱いために測定が正確に行われなかったためである(ダイナミックレンジ不足)。出力導波路を変えると出力される周波数がシフトした同様のスペクトルが得られることを確認しており、5波一括の周波数分離が可能であること実証した。

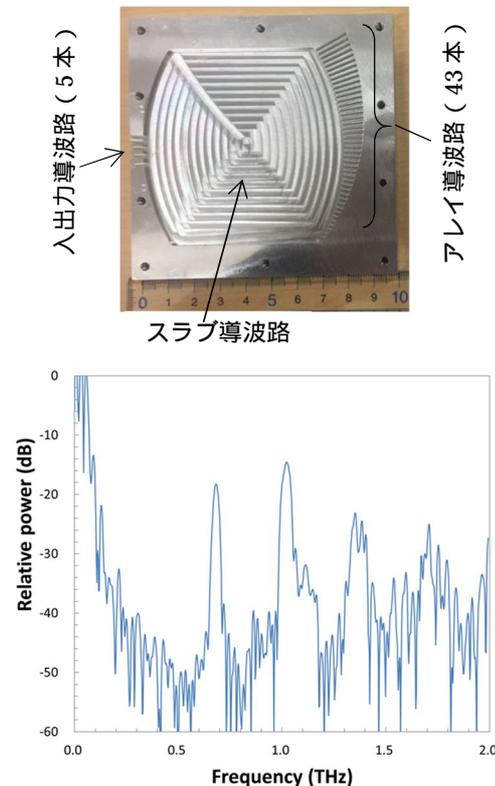


図2 AWG 外観 (蓋する前) と相対出力スペクトルの一例

(3) 多数あるアレイ導波路の間にある金属壁部分は反射点となる。スラブ導波路内を回折したテラヘルツ波の大半は導波路に入射するが、一部は金属壁部分で反射するためアレイ導波路に入らない。その波はアレイ導波路の作用を受けないため、周波数特性を持たないフラットなスペクトルを有するため、上述の抑圧比が劣化(低下)する影響が比較的大きいことが研究途中で判明した。そこで、図3-1に示すような金属壁がスラブ導波路と接する部分に坂道構造を導入し反射波が斜め上に進み出力導波路に進まない構造を考案した。その効果を図3-2に示すように電磁界シミュ

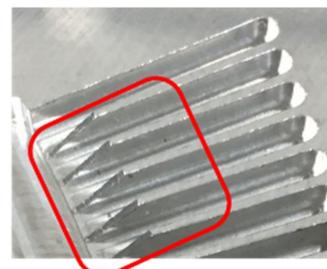


図3-1 反射低減のために考案した坂道構造

レータを用いて理論的に検討した。その結果坂道で反射した波がさらに蓋で反射するが、坂道角度によっては入射波と同じ光路を逆に戻る最悪ケース（角度が 30、45、85 度の時）と、ほとんど戻らないケース（角度 70 度）があることが判明した。実際に、坂道角度が 36、45、60、90 度の 4 種類のサンプルを作製してスペクトル測定を行い、抑圧比を評価したところ、70 度に近い 60 度の時に 6dB 以上の抑圧比の向上が見られ、45 度時には全く見られなかった。このことから、坂道構造を用いれば抑圧比の改善が可能であることを明らかにした。

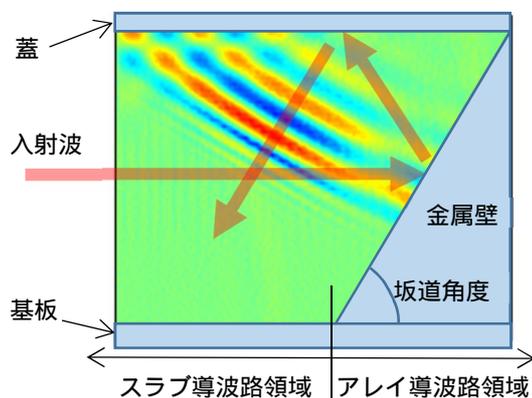


図 3-2 反射シミュレーションの一例

(4)周波数の異なる 2 台の安定化光源（それぞれの周波数を  $f_1$ 、 $f_2$ ）の光を混合して光電変換すると  $f_1-f_2$  の周波数を有する高周波信号が得られる。今回、混合用に用いた 3dB 結合器の 2 つの出力を差動フォトダイオードとトランスインピーダンスアンプからなる差動光電変換器に入力することで通常の 2 倍の振幅を有する高周波出力が得られることを提案した。図 4 の実験系（ $f_1=196,250\text{GHz}$ 、 $f_2=196,249\text{GHz}$ ）を用いて、フォトダイオード 1 つの場合の振幅  $V_s$  と差動の場合の振幅  $V_D$  を測定し、 $V_D/V_s = 2.11 \sim 2.19$  が得られ、原理を確認できた。使用した光電変換器の都合（帯域制限）により GHz 帯での実験結果であるが、THz 帯でも同様に動作することが期待される。

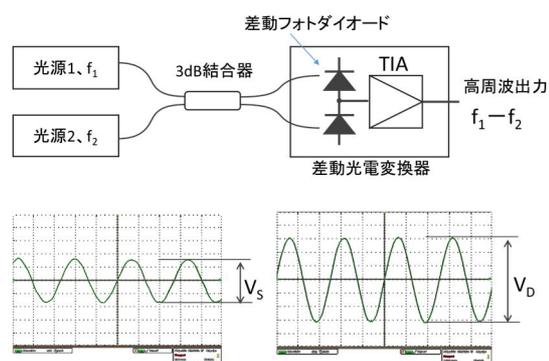


図 4 差動光電変換を用いた高周波出力振幅倍増

#### 参考文献

- [1] 斗内政吉監修，“テラヘルツ波新産業《普及版》”，シーエムシー出版，2017.
- [2] 深澤亮一，分析・センシングのためのテラヘルツ波技術，日刊工業新聞社，東京，2013
- [3] 内藤喜之 マイクロ波・ミリ波工学，(社)電子情報通信学会（編），コロナ社，東京 1986
- [4] H. Takahashi, K. Oda, H. Toba, Y. Inoue, Transmission characteristics of arrayed-waveguide N x N wavelength multiplexer, IEEE Journal of Lightwave Technology, Vol.13, No.3, pp.447-455, March 1995

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔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<br>Hiromu Yada, Yuji Matsuura, and Hiroshi Takahashi               |
| 2. 発表標題<br>Crosstalk reduction of THz band reflective AWG frequency filter |
| 3. 学会等名<br>Photonic Devices Workshop, IEICE                                |
| 4. 発表年<br>2019年  |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>矢田 拓夢, 松浦 祐司, 高橋 浩              |
| 2. 発表標題<br>THz 帯反射型 AWG 周波数フィルタのクロストーク低減手法 |
| 3. 学会等名<br>電子情報通信学会光エレクトロニクス研究会            |
| 4. 発表年<br>2020年                            |

|                                |
|--------------------------------|
| 1. 発表者名<br>高橋浩 藤崎尚貴 松浦祐司       |
| 2. 発表標題<br>THz帯AWG周波数フィルタの実験検討 |
| 3. 学会等名<br>電子情報通信学会ソサイエティ大会    |
| 4. 発表年<br>2018年                |

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

|       | 氏名<br>(ローマ字氏名)<br>(研究者番号)                      | 所属研究機関・部局・職<br>(機関番号)                | 備考 |
|-------|--|--------------------------------------|----|
| 連携研究者 | 松浦 祐司<br><br>(Matsuura Yuji)<br><br>(10241530) | 東北大学・工学研究科・教授<br><br><br><br>(11301) |    |