

機関番号：15401  
 研究種目：基盤研究（B）  
 研究期間：2008～2010  
 課題番号：20360039  
 研究課題名（和文） 高感度・局所センサーのためのテラヘルツストリップ線路構成法の確立  
 研究課題名（英文） Development of terahertz striplines for high sensitivity and local sensing  
 研究代表者  
 角屋 豊（KADOYA YUTAKA）  
 広島大学・大学院先端物質科学研究科・教授  
 研究者番号：90263730

## 研究成果の概要（和文）：

テラヘルツ波を用いた高感度物質計測・局所センシングを実現するためのストリップ線路構成法に関する研究を行った。高感度物質計測に関しては、マイクロストリップ線路とコプレーナストリップ線路のフィルターには大きな差はなくいずれも有効であること、また分岐ストリップ線路構成を用いた差動検出により、時間領域分光測定における感度を約1桁向上できることを明らかにした。局所センシングに関しては、金属探針を一体化したストリップ線路により、波長の100分の1の空間分解能で、スペクトル情報も取得可能なセンサーを構成し得ることを明らかにした。

## 研究成果の概要（英文）：

We investigated the stripline structures for high sensitivity and local sensing of matter using terahertz waves. On the high sensitivity sensing, we demonstrated that both the microstrip and coplanar line filters are equally useful and that, by utilizing a differential detection scheme with split lines, the sensitivity of time domain spectroscopy can be improved by about one order of magnitude. On the local sensing, we showed that the spectroscopic sensing becomes possible with a spatial resolution of 1/100 wavelength using a metal probe integrated on the striplines.

## 交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	5,900,000	1,770,000	7,670,000
2009年度	4,400,000	1,320,000	5,720,000
2010年度	3,900,000	1,170,000	5,070,000
年度			
年度			
総計	14,200,000	4,260,000	18,460,000

研究分野：光物性・デバイス

科研費の分科・細目：応用物理学・工学基礎・応用物理学一般

キーワード：テラヘルツ，光物性，電子デバイス・機器，センサー

## 1. 研究開始当初の背景

テラヘルツ（THz）電磁波の発生・検出や機能性コンポーネント，および種々の応用に関する研究開発が国内外で活発に行われている。THz波の発生・検出の主要な方式の1つである，フェムト秒幅パルス光源を用いた

時間領域法では，1サイクル程度のTHz波が用いられ，その広帯域性を利用した種々の物質の分光計測や，パルスの遅延時間に着目したターゲット物質の検出や多層膜測定などへの応用が期待されている。THz技術における重要な課題として，①微量物質の計測

に向けた高感度化、②波長以下の空間分解能の実現、が挙げられる。これまで前者に対しては、被測定試料による金属開口やスプリットリング共振器などの透過・反射スペクトルの変化を利用する方法などが、後者に対しては、金属探針の近接場を用いる方法などが広く研究されている。これらに共通する考え方は、金属構造の近傍に集中した THz 電界を利用するというものであるが、実際には金属構造に対して有効に THz 波を集光し、あるいは放射される THz 波を効率よく検出することが、重要な技術課題となっていた。一方、本研究の代表者らは THz 波の発生・検出素子が集積化されたストリップ線路分光チップを開発してきた。この素子では、発生から検出に至る過程で THz 波が波長以下の寸法に閉じ込められた状態が維持されているため、上記の課題の解決に有効である。

## 2. 研究の目的

本研究では、①微量物質の計測に向けた高感度化、②波長以下の空間分解能の実現に向けて、ストリップ線路構成法やその効果を明らかにすることを目的とした。具体的には、①(A)ストリップ線路におけるフィルター構成の検討と試料感度を明らかにすること、①(B)ストリップ分岐線路を形成し、両線路の差信号を取り出すことによりスペクトル安定性を向上させること、②ストリップ線路と集積化した金属探針による局所プローブを開発すること、を目標とした。

## 3. 研究の方法

研究は有限差分時間領域 (FDTD) シミュレーションと実験の両面から進めた。

○シミュレーション：市販のソフトウェアを用いたが、有意なシミュレーションを行うためには、計算に用いるグリッドの選択が極めて重要であるため、多くの予備的なシミュレーションを行い、グリッドの最適化を行った。特に困難を生じる原因は THz 領域の波長 (~300  $\mu\text{m}$ ) と金属内での表皮厚さ (<100nm) のスケールの違いにある。このため、グリッドを不均一に設定するなどの方策と同時に、THz 領域では金属は良導体とみなせることを利用して、金属を完全導体として扱う、あるいは計算領域の境界を電気壁とするなどの方法も採用した。

○実験：素子の基本的な構造は図 1 に示すようなマイクロストリップ線路 (MSL) である。基板 (ガラスまたは Si) 上に形成した金薄膜を接地導体とし、このうえにポリマー絶縁膜 (厚さ 10  $\mu\text{m}$ ) をスピンコート法で作製し、その後、THz 波発生および検出用の低温成長 GaAs 薄膜光伝導スイッチを含む金線路パターンを形成している。作製技術そのものは本研究開始以前に確立していたが、ポリマーと

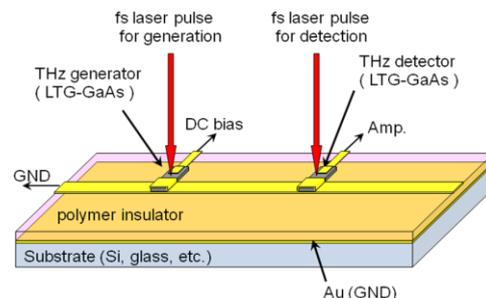


図 1：マイクロストリップ線路の概要

して従来用いていたポリイミドに加えて、ベンゾシクロブテンを立ち上げた。THz 波の測定には一般的な時間領域分光系を複数構築した。光源としてはモードロックチタンサファイアレーザーまたはファイバーレーザーを用いた。また、初年度に測定系のノイズ解析を行い、ノイズ要因とその特性に関する予備データを取得した。

## 4. 研究成果

### ①微量物質の計測に向けた高感度化

#### (A) ストリップ線路フィルター

種々のフィルター構成を検討したが、ここでは最も基本的な構成である半波長フィルターの場合について述べる。特に、ストリップ線路として、MSL とコプレーナストリップ線路 (CPS) の優劣を比較した。まず FDTD 法によって、フィルター上に置かれた試料に対する共振周波数の変化を予測した。図 2 に予想された振幅スペクトルの例を示す。この結果、誘電率 2、厚さ 2  $\mu\text{m}$  の試料がある場合の共振周波数シフトは 30 GHz あることが分かり、十分に観測可能であることが明らかになった。

図 3 には実際に作製した素子における共振スペクトルをシミュレーションの予想と比較した。共振周波数に若干のずれがあるものの、線幅に関しては予想通りの結果が得られている。

以上のように、従来試料感度の点で CPS が MSL に勝ると考えられていたが、実際には殆ど差はなくいずれも良好な試料感度を示すこと、また予測通りの素子が作製可能である

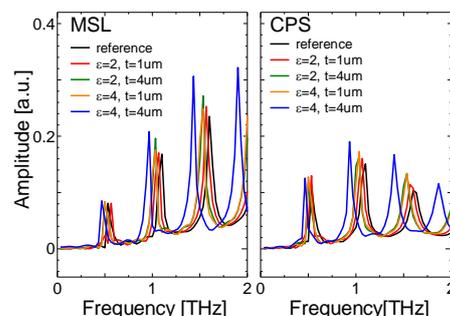


図 2：MSL および CPS の半波長フィルターにおける共振特性変化の予測

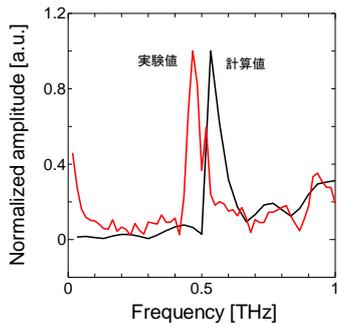


図3：試作した半波長MSLフィルターの特性

ことなどが明らかになった。

(B) 差動検出法

従来、THz 時間領域分光測定の実験結果、実際の分光計測においては参照信号と測定信号の比をとるケースが多いため、光源である入射 THz 波の安定性がより重要である。本研究ではこの点に注意し、差動検出によって測定信号と参照信号を同時に取得する、あるいは差信号を計測することの可能性と効果を詳細に調べた。

差動検出を実現するには、ストリップ線路を分岐する必要がある。そこで、まずMSLの分岐や曲げがTHzパルスの伝搬にどのような影響があるかを調べた。線路としては、分岐前の線路幅  $20\mu\text{m}$ 、分岐後の線路幅を  $10\mu\text{m}$  とし、おおよそのインピーダンスマッチングをとった。曲げ角度は45度と90度の2種類を、分岐形状はY型とT型の2種類を調べた。

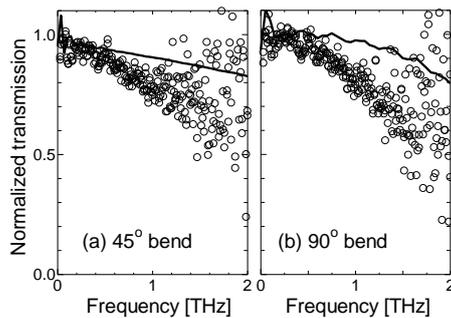


図4：MSL曲げにおける透過係数

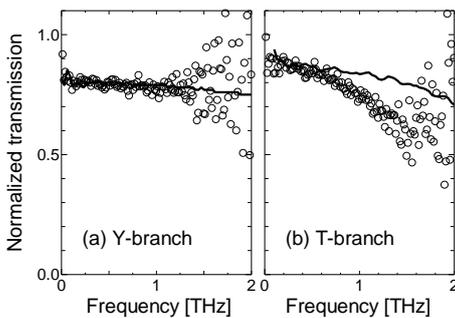


図5：MSL分岐における透過係数

図4および図5に曲げおよび分岐点におけるTHz波透過係数の周波数依存性の例を示す。図中シンボルは実験結果、実線はFDTDシミュレーションの結果である。いずれの構造においても、1THzまでは比較的良好な伝搬特性を示すことが明らかになった。

上記の結果に基づいて、Y分岐と45度曲げを用いた分岐線路を試作した。図6に素子の例を示す。1か所の光伝導スイッチで発生したTHzパルスが分岐され、それぞれの線路におかれた光伝導スイッチで検出される。分岐前後の線路長は、いずれも  $500\mu\text{m}$  とした。

図7(左)に2つの検出点で観測されたTHzパルスの1スキャンの例をしめす。この図で見ると、分岐後の2つのパルスは同一とみなせるが、詳細にみると下記のようにわずかに差がある。また、数10分にわたるパルスの安定性を検証するため、1分毎に30回のスキャンを行ったときのパルス変動量を図7(右)に示した。2~3%の変動があることが分かる。また図8(左)は30回のスキャンにおける検出器1と検出器2の差を重ねてプロットしたものである。特段のデータ処理は

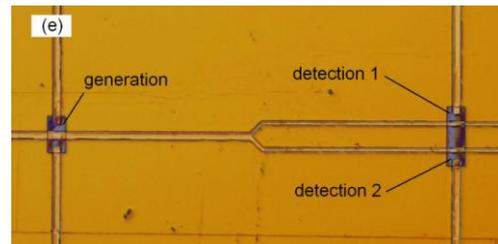


図6：試作した素子の顕微鏡写真

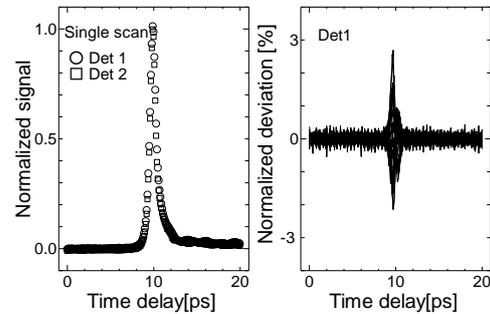


図7：各検出点の測定例(左)と検出点1の30回スキャンの変動量(右)

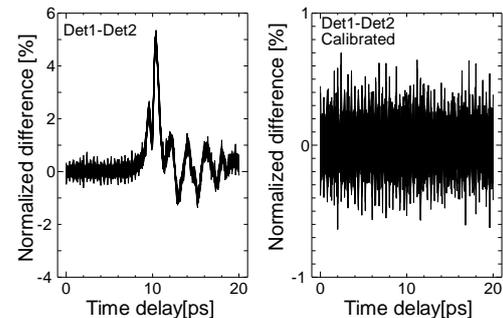


図8：差信号(左)とその変動(右)

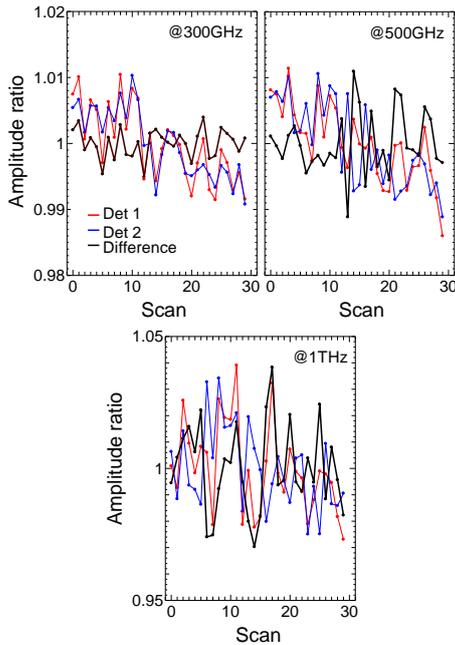


図 9：スペクトル安定性

していないが、分岐後の線路での差は 5%程度に収まっていることがわかる。この差の原因は、2つの線路や検出器が厳密に同一の特性を持たないことによるものである。実際 30 回のスキャンでほぼ同一の差が発生していることがわかる。このような固有の差はキャリブレーションによって取り除くことができる。そこで差信号の変動を調べた結果を図 8 (右) に示した。偏差は±0.3%程度に収まっており、単一の線路のみでみた図 8 (右) と比較して、約 1 桁の改善ができることが明らかになった。

スペクトルの安定性を詳細に調べるため、300GHz、500GHz、および 1THz での振幅をスキャンの関数として図 9 に示した。図中の細線は各検出器の変動を、太線は2つの検出器の比をとったものであり、比を用いることで、300GHz においては、変動に明らかな改善がみられる。500GHz、1THz と周波数が高くなるにつれて、改善効果は失われるが、その原因は各検出器のノイズにあり、周波数が高くなるに伴って、振幅が小さくなり、ノイズレベルに近づくためであると考えられる。

以上のように、差動検出を採用することで、分光測定の実験的安定性が増すこと、従って微量試料によるわずかな変化を捕える上で有効であることが示された。

## ②局所プローブ

本研究では種々のストリップ線路と金属探針の組み合わせや探針形状を検討したが、ここでは MSL と一体化したテーパ付き探針の場合の例を示す。素子イメージを図 10 に示す。探針の長さは  $30\mu\text{m}$ 、底部および先端部の直径はそれぞれ  $10\mu\text{m}$  および  $3.3\mu\text{m}$  と

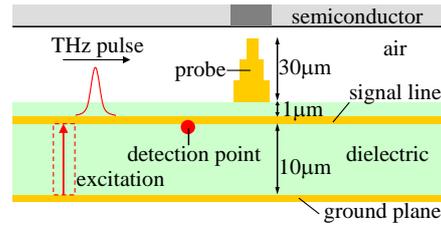


図 10：金属探針を一体化した MSL の概念図

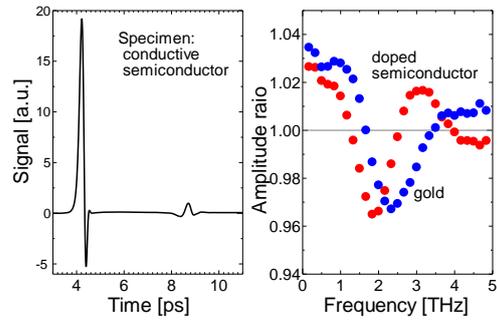


図 11：(左) 観測される THz パルスの例 (右) 参照スペクトルを基準にした試料依存性

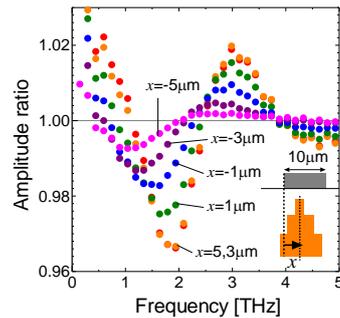


図 12：金属探針を導電領域に対して動かした場合のスペクトル変化

した。図 11 (左) に線路上の検出点で観測される THz 信号の例を示す。ここでは、テスト試料として半導体表面の導電性部 ( $10\mu\text{m} \times 10\mu\text{m}$ ) を想定し、探針先端と試料の距離は  $1\mu\text{m}$  とした。最初のパルスは入射波であり、参照信号として用いられる。2 回目のパルスが探針からの反射波であり、この中に探針と相互作用する被測定体の情報が含まれる。図 11 (右) は絶縁性半導体を基準にした、反射スペクトルの変化である。導電性部が金の場合と、ドープした半導体の場合で明確な差が観測できることが分かる。

図 12 には探針を導電性を横切るように動かした場合の結果を示す。面内のいずれの方向においても、丁度探針中心が導電性部の端になるところで、変化量がわずかになっており、空間分解能として数  $\mu\text{m}$  (波長の  $1/150$ ) は十分に実現できることが明らかになった。実際図 13 に示すように、金属探針近傍の電界は先端の  $5\mu\text{m}$  程度の領域に集中しており、

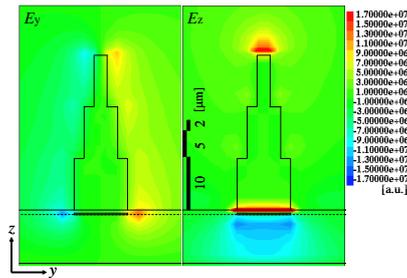


図 13 : 金属探針近傍の電界分布

この集中が波長以下の分解能を実現する上で有効に働いていると考えられる。

以上のように、ストリップ線路と金属探針を一体化することで、波長の 100 分の 1 以下の空間分解能を持ち、スペクトル情報も取得可能な局所プローブを構成しえることを明らかにした。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 2 件)

1. Naoko Sato, Jiro Kitagawa and Yutaka Kadoya, THz pulse propagation on microstrip discontinuities, Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves, 査読有, 2011 年, 印刷中.
2. T. Kataoka, K. Kajikawa, J. Kitagawa, Y. Kadoya, and Y. Takemura, Improved sensitivity of terahertz detection by GaAs photoconductive antennas excited at 1560 nm, Applied Physics Letters, 査読有, Vol. 97, 2010 年, p. 201110.

[学会発表] (計 9 件)

1. 大野 旭, 佐藤 尚子, 北川 二郎, 角屋 豊, マイクロストリップスプリッターにおけるテラヘルツ波伝搬特性, 第 58 回応用物理学会関連連合講演会, 2011 年 3 月 27 日, 厚木市
2. Y. Kadoya, N. Sato, T. Tone, and J. Kitagawa, THz transmission lines - Properties and Applications, International Workshop on Terahertz Technology, 2009 年 12 月 2 日, 大阪
3. Naoko Sato, Jiro Kitagawa, and Yutaka Kadoya, Propagation of THz pulses on microstrip discontinuities, The 34th International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves, 2009 年 9 月 22 日, 釜山, 韓国
4. Takayuki Tone, Jiro Kitagawa, and Yutaka Kadoya, Design of THz Near-Field Probes Integrated on Printed Striplines,

The 34th International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves, 2009 年 9 月 22 日, 釜山, 韓国

5. 佐藤尚子, 北川二郎, 角屋豊, マイクロストリップ線路の不連続点における THz パルス伝搬特性の測定, 第 70 回応用物理学会学術講演会, 2009 年 9 月 8 日, 富山

6. 刀祢貴行, 北川二郎, 角屋豊, ストリップ線路と一体化した THz 近接場プローブの設計, 第 70 回応用物理学会学術講演会, 2009 年 9 月 8 日, 富山

7. N. Ohta, S. Yanagi, M. Onuma, J. Kitagawa, and Y. Kadoya, Propagation of terahertz pulses on polymer-based coplanar striplines, Asia Pacific Microwave Conference, 2008 年 12 月 18 日, 香港, 中国

8. 佐藤尚子, 北川二郎, 角屋豊, マイクロストリップ線路の不連続点における THz パルスの伝搬特性, 第 69 回応用物理学会学術講演会, 2008 年 9 月 3 日, 春日井市

9. 角屋豊, ストリップ線路素子を用いた THz 分光, 応用物理学会関西支部セミナー, 2008 年 6 月 20 日, 大阪

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

角屋 豊 (KADOYA YUTAKA)

広島大学・大学院先端物質科学研究科・教授

研究者番号 : 9 0 2 6 3 7 3 0

### (2) 研究分担者

( )

研究者番号 :

### (3) 連携研究者

北川 二郎 (KITAGAWA JIRO)

広島大学・大学院先端物質科学研究科・助教

研究者番号 : 9 0 3 4 6 5 2 8