

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 6 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2016

課題番号：26790055

研究課題名(和文) 金属ワイヤー導波路を用いたテラヘルツ近接場プローブ計測技術の開発

研究課題名(英文) THz near-field probing by using metal wire waveguides

研究代表者

小西 邦昭 (Konishi, Kuniaki)

東京大学・大学院理学系研究科(理学部)・助教

研究者番号：60543072

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、理想的なTHz導波路である金属ワイヤーの形態制御によって、THz波に対する回折限界を超えた集光及び電場増強、伝搬波の分岐等の光波操作を実現し、それらを組み合わせた新たな開口型THz近接場プローブ計測方法を開拓することを目的とした。より強いテラヘルツ波を金属先端に集光させるための、高強度テラヘルツベクトルビーム生成手法を新たに考案した。また、任意の金属導波路形状を作製可能な3Dプリンターの高分解能化を進め、造形後の構造に金メッキを施して作製した導波路において、世界で初めて1THz以上のテラヘルツ波を伝搬させることに成功した。

研究成果の概要(英文)：The object of this study is the development of THz-wave manipulation by controlling shape of THz waveguides fabricated by metal wires and of novel THz near-field probing technique. We developed a new method for high-power terahertz vector beam generation which can enlarge the intensity of THz wave which is coupled to a THz waveguide. We also improved our 3D printer for the development of THz waveguides. We succeeded to make hollow waveguides, by using our 3D printing and metal plating, in which THz wave which frequency is higher than 1 THz can propagate at the first time.

研究分野：メタマテリアル・テラヘルツ

キーワード：テラヘルツ 3Dプリンター

1. 研究開始当初の背景

周波数範囲が 0.1 ~ 10THz(波長 3mm ~ 30 μ m)程度の電磁波は、テラヘルツ(THz)電磁波と呼ばれている。0.4 ~ 40meV に相当するこのエネルギー領域には、固体中の自由電子やフォノン、マグノン、超伝導ギャップ、分子の回転・振動などの様々な励起モードが存在するため、THz 波を用いることによって可視光のエネルギー領域とは異なる多様な物性の情報に直接アクセスし、制御することが可能になる。近年、超短パルスレーザーや半導体技術を用いた THz 波発生法が確立し、分光、セキュリティ、情報通信など様々な分野においてその活用が進められている。特にここ数年の間に、1MV/cm を超える高強度 THz パルス発生や THz カメラの実現など、THz 波の発生・検出技術において著しい進歩が見られている。

その一方で、THz 波を用いた微小領域計測技術の確立は、現在の大きな課題の一つである。THz 波の波長は可視光と比べて 3 桁程度も大きいと、通常のレンズ等で集光した場合のスポット径は数 100 μ m 程度にもなってしまう。そのため、高い空間分解能を有するイメージングや、微小試料への THz 照射・計測が困難であるという点が問題となる。

回折限界を超える光学的な高分解能イメージング手法として、先鋭な探針(プローブ)の先端に生じる近接場を利用した近接場光学顕微鏡(SNOM)が知られている。これには大きく分けて、金属探針の先端に電磁波を照射しそこに生じる近接場を利用する散乱型と、光が伝搬する光ファイバを先端化し、開口を有する金属膜を形成してそこに生じる近接場を利用する開口型とがある。開口型の場合、プローブ自身が光を導波するため装置調整や測定が容易であり、試料照明を近接場光のみで行えるため信号強度が強く背景光の影響を受けにくいといった長所がある。しかしながら、これまでに報告されている THz 領域の近接場光学顕微鏡は散乱型で、開口型についての報告例はなかった。これは、光領域における光ファイバのような、高性能かつシンプルな形状の THz 導波路が存在しなかったことが大きな要因の一つであると考えられる。

申請者らは、THz 領域での広帯域シリンドリカルベクトル(CV)ビーム(=ビーム内での偏光の空間分布が軸対称になっているビーム)を生成する新手法を開発し、それを用いて自由空間を伝搬する広帯域 THz 波を、65%を超える非常に高い効率で金属ワイヤへ結合させることに成功している。シンプルな金属ワイヤが THz 波に対する理想的な低損失・低分散導波路であることはすでに知られていたが、通常の THz 平面波との結合効率は 0.5%以下と非常に低く、これが THz 導波路としての応用を阻む大きな障害となっていた。申請者の実証した手法はこの問題点を克服し、実用的な強度の広帯域 THz 伝搬

波を金属ワイヤに結合可能な方法である。申請者は、この THz 導波路としての金属ワイヤを先鋭化して用いることにより、THz 領域で初めて、プローブが導波路を兼ねる開口型に相当する近接場プローブを実現できるのではないかとこの着想に至った。

2. 研究の目的

本研究では、理想的な THz 導波路である金属ワイヤの形態制御によって、THz 波に対する回折限界を超えた集光及び電場増強、伝搬波の分岐等の光波操作を実現し、それらを組み合わせた新たな開口型 THz 近接場プローブ計測方法を開拓する。また、複雑な金属ワイヤ構造の作製手法として、三次元(3D)プリンティング技術の活用を試みることを目的とする。以下のことを明らかにする。

(1)テーパ金属ワイヤ導波路を用いた THz 局在電場生成と電場増強の実証

THz 波が伝搬する金属ワイヤ導波路の先端を針状に細くすることによって、先端部における THz 局所電場増強を実現する。テーパ部及び先端部の形状と、先端部に誘起される近接場分布の関係を電磁波解析シミュレーションおよび THz 時間領域分光法を用いた実験で明らかにする。

(2) 金属ワイヤ導波路分岐による THz 波の分波

金属ワイヤ THz 導波路の片端を分岐させることによって、THz 伝搬波の分波を実現する。分波の際のロスをも最小にする分岐構造をシミュレーションを用いて明らかにするとともに、実際に分岐された金属ワイヤを作製して導波実験を行い、分波効率を実験的に検証する。

(3) Y 字分岐型金属テーパワイヤを用いた THz 局所プローブ計測

上記の項目で検証した要素を組み合わせ、Y 字分岐型金属テーパワイヤ構造を作製し、微小領域の THz プローブ計測実験を行う。Y 字の片方から入射した THz 波がプローブ先端で反射されてもう一方から出射することを確認し、プローブ先端と試料との距離および試料の種類を反映した THz スペクトル情報が得られることを実験的に検証する。これを用いて、回折限界を超える高分解能イメージングを試みる。

(4) 3D プリンターを用いた任意形状金属ワイヤ構造の作製

任意形状の金属ワイヤ作製に、3D プリンターを活用する。3D プリンターを用いて作製したワイヤ構造に金属コーティングを行ったものを THz 導波路として用い THz 伝搬特性を評価し、通常の金属ワイヤとの性能比較を行う。

3. 研究の方法

(1)金属テーパワイヤを用いた THz 局在電場生成と電場増強の実証

THz 波が伝搬する金属ワイヤの先端を針

状に細くすることによって、先端部に近接場 THz 増強電場が生成されることを実証する。申請者らは、先行研究において、金属ワイヤの THz 伝搬を精度よく電磁波解析シミュレーションで再現することに成功している。まずはこの数値計算によって、テーパ部の長さや先端形状を変えた場合に、先端部に生成される THz 近接場分布を明らかにし、実際に作製可能でなおかつ電場増強が最も効果的に生じる構造を明らかにする。

さらに、金属テーパワイヤ構造を実際に作製し、先端部における近接場 THz 増強電場を実測する。金属ワイヤのテーパ加工を精度よく行うには特殊な加工法が必要であるため、専門の業者に行ってもらう予定である。作製した金属テーパワイヤに、先端とは逆側から THz-CV ビームを入射させ、先端部近傍に生じる THz 近接場の電場分布を、THz 時間分解計測法を用いて測定する。

(2) 金属ワイヤ導波路分岐による THz 波の分波

金属ワイヤ THz 導波路の先端を分岐させることによる、THz 波の分波特性を明らかにする。シミュレーションを進めて、分岐の際のロスがより少ない構造を探索するとともに、実際に金属ワイヤ分岐構造を作製し、分岐の効率を実測する。Y 字型金属ワイヤの作製は、放電加工でワイヤを斜めに切断したのち、半田もしくは接着剤を用いて向きを変えて再度張りあわせることによってハンドメイドで行う。

(3) Y 字型金属ワイヤ構造を用いた THz 局所プローブ計測

初年度の項目 1,2 で得られた知見を活用し、Y 字型金属ワイヤ構造と金属テーパ構造を組み合わせた開口型 THz 近接場プローブを作製し、THz 近接場分光を試みる。ワイヤの片端から入射した THz-CV ビームがプローブの先端部に到達して反射され、もう一方のワイヤ端に到達し、再度放射される。放射される THz 波の波形から、プローブ先端近傍に存在する試料の物性及びプローブからの距離の情報を抽出することができる。まずは、金属ミラーや高抵抗シリコンのような、THz 領域での光学応答がシンプルな物質を測定対象としてプローブと試料の距離が THz スペクトル波形に与える影響を明らかにし、空間分解能を評価する。その後、糖類・アミノ酸のようなテラヘルツ領域に明瞭な指紋スペクトルを持つ高分子を用いて、微量サンプルの計測及び複数成分試料の高分解能イメージング等を試みる。計算機シミュレーションも並行して進めることにより、実験で得られた結果の解釈を進める。

(4) 3D プリンターを用いた任意形状金属ワイヤ構造の作製

3D プリンターを用いて任意形状の金属ワイヤを作製することを試みる。通常の 3D プリンティングは樹脂を用いて行われるため、3D 造形後の表面に金属メッキもしくは蒸着を

行う。THz 領域における金属への電磁波の侵入長はせいぜい 200nm 以下であるため、その程度以上の厚さの金属膜を施すことで、疑似的に金属ワイヤと同等の THz 波伝搬特性を示すはずである。

4. 研究成果

シミュレーションによる検討を進めた結果、Y 字分岐型の金属テーパワイヤ構造を用いて十分な S/N 比で近接場プローブを行うためには、テラヘルツ CV ビームの強度をより増大させる必要があることが明らかになった。そのため、既存の広帯域テラヘルツベクトルビーム発生法とは異なる、高強度テラヘルツベクトルビーム発生法の開発を進めた。具体的には、LN 結晶を用いて発生させた直線偏光の高強度テラヘルツパルス、損失なく CV ビームに変換するための手法を考案した。また、この手法の実現に必要な、広帯域なテラヘルツビームスプリッターと偏光制御プリズムを設計した。この手法を用いることによって、集光点において数 100kV/cm オーダーの電場強度を有する CV ビームが生成可能となることを確認した。

3D プリンターを用いた導波路応用に向けて、3D プリンターの作製分解能の高度化が必要であった。我々は、独自の 3D プリンターの開発を進め、世界最高クラスの、数 10 ミクロンの構造分解能を有する 3D プリンターを実現することに成功した。また、3D プリンターを用いて作製可能な構造はアクリルのプラスチック構造であるため、その表面にメッキを用いて金属コートを行う方法に関しても検討を進めた。その結果、1THz を超えるカットオフ周波数を有する中空導波路構造を、3D プリンターを用いて作製することに成功した(図 1、発表論文 1)。

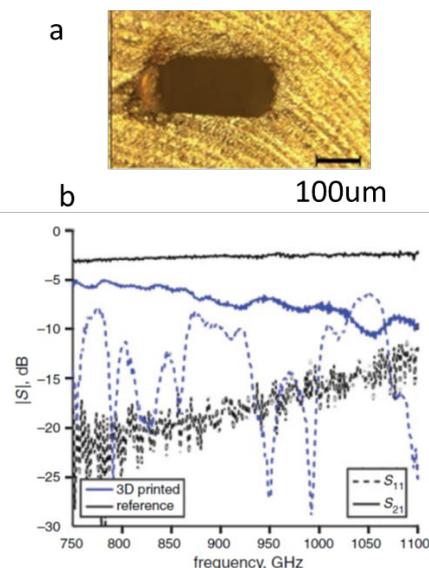


図 1 (a)作製したテラヘルツ導波路の顕微鏡像 (b)S パラメータの測定結果 青実線が透過特性を示している。

3D プリンターを用いてテラヘルツ電場可能な導波路が作製できることが明らかになったため、この手法と上記の高強度テラヘルツ CV ベクトルビームを組み合わせることでテラヘルツプローブ測定系の構築を進めていく。

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1件)

1. W. J. Otter, N. M. Ridler, H. Yasukochi, K. Soeda, K. Konishi, J. Yumoto, M. Kuwata-Gonokami, S. Lucyszyn, 3D printed 1.1 THz waveguides, Electronics Letters, 53, pp471 (2017).
<http://ieeexplore.ieee.org/document/7888681/>
(査読有)

[学会発表](計0件)

[図書](計0件)

[産業財産権]

○出願状況(計0件)

6. 研究組織

(1)研究代表者

小西 邦昭 (KONISHI, Kuniaki)
東京大学・大学院理学系研究科・助教
研究者番号：60543072

(4)研究協力者

田丸 博晴 (TAMARU, Hiroharu)
神田 夏輝 (KANDA, Natsuki)
根本 夏紀 (NEMOTO, Natsuki)