

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 3 日現在

機関番号：13601

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2013～2015

課題番号：25706026

研究課題名(和文) テラヘルツ波による超解像リアルタイムイメージングシステムの開発

研究課題名(英文) Development of terahertz real-time imaging with sub-wavelength resolution

## 研究代表者

宮丸 文章 (MIYAMARU, Fumiaki)

信州大学・学術研究院理学系・准教授

研究者番号：20419005

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 16,500,000円

研究成果の概要(和文)：光であるものを観察するとき、一般的に光はその波長程度までしか集光することができないため、空間分解能も光の波長程度に限られます。本研究では、光の波長以下の空間分解能を実現するために、ハイパーレンズと呼ばれる光学素子の開発を目的としています。ハイパーレンズは、光の波長よりも小さい像を波長よりも大きな像に拡大するレンズであり、これにより波長以下の空間分解能を持った像をリアルタイムで観測できるようになります。本研究では、テラヘルツ領域においてハイパーレンズを設計・作製し、かつ波長よりも小さい像を波長よりも大きな像に拡大できることを実験的に確認しました。

研究成果の概要(英文)：Generally, since the ability of focusing electromagnetic waves (light) is limited to the order of wavelength, the spatial resolution of the optical image is also limited to the same order. In this research, we aim to develop the hyperlens that can enlarge the sub-wavelength image to the conventional image, which is larger than the wavelength. By using the hyperlens, we can obtain the enlarged conventional image that have the information of the original sub-wavelength image, and correspondingly, we can realize the real-time measurement of the sub-wavelength image. In this research, we designed and fabricated the hyperlens in terahertz region by using layer-by-layer technique, and experimentally measured the electromagnetic property of the hyperlens. As a result, we obtained the expected magnification of the hyperlens, indicating that the sub-wavelength image could be enlarged to the conventional image that is larger than the wavelength of the electromagnetic waves.

研究分野：テラヘルツ工学

キーワード：メタマテリアル 双極型分散媒質 テラヘルツ波 ハイパーレンズ

1. 研究開始当初の背景

(1) テラヘルツ波の応用

周波数でおよそ0.1~10THzの電磁波はテラヘルツ波と呼ばれており、このテラヘルツ領域では、テラヘルツ波と物質の相互作用に起因した特徴的な吸収スペクトルが得られる。他の周波数領域には無い特徴を持つことから、テラヘルツ波は、様々な領域への応用が期待されている。特に、イメージング応用に関しては、テラヘルツ波研究の初期から多くの期待が寄せられ、実際、今日においてテラヘルツ波応用の最も重要なテーマの一つとなっている。

(2) テラヘルツイメージングの問題点

テラヘルツイメージング技術開発の初期において、光源を固定し試料を二次元面内で走査することによってイメージを測定するラスタースキャン法が行われていた。その後、高強度のテラヘルツ波発生技術の進展とテラヘルツカメラ開発の進展に伴い、カメラ方式によってリアルタイムイメージングが可能となった。これにより、動きのある試料のイメージングを行うことができるというメリットがある。しかしながら、これらの方式では、伝搬光を用いるため、電磁波の回折限界の制約が生じ、波長以下の空間分解能を得ることが出来ないという問

題がある(図1上参照)。

空間分解能の制約を突破する方法として、近接場光を用いる方法がある。放射素子または検出器(またはプローブチップ)を試料近傍で走査することにより、波長以下の分解能(超解像イメージング)を得ることができる。しかし、これはラスタースキャン法であるため、リアルタイムでイメージの測定はできない(図1下参照)。

2. 研究の目的

電磁波の回折限界による空間分解能の制約を突破し、超解像イメージングをリアルタイムで計測することができるシステムを実現するため、本研究では、ハイパーレンズと呼ばれる光学素子の開発を行う。ハイパーレンズとは、波長以下の分解能を持つ近接場光のイメージ情報を、伝搬光のイメージ情報として取り出すことができる光学素子である(図2参照)。つまり、ハイパーレンズは近接場光から伝搬光へ、イメージ情報を変換(NF-FF変換)する役割を果たす光学素子である[1]。一旦伝搬光のイメージ情報に変換された像は、カメラなどの撮像素子に結像することができる。これらにより、波長以下の空間分解能を持つ超解像イメージの情報をリアルタイムで取得することが可能になる。

本研究の具体的な目的としては、まずテラヘルツ領域におけるハイパーレンズを設

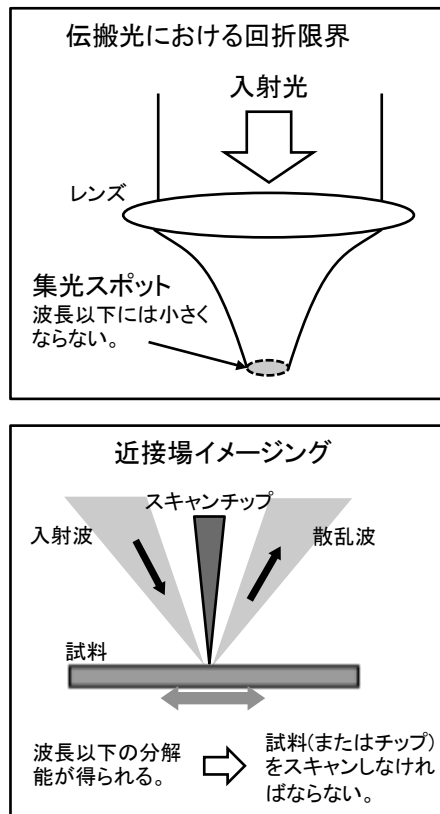


図1. 空間分解能における回折限界とスキャン型近接場イメージング

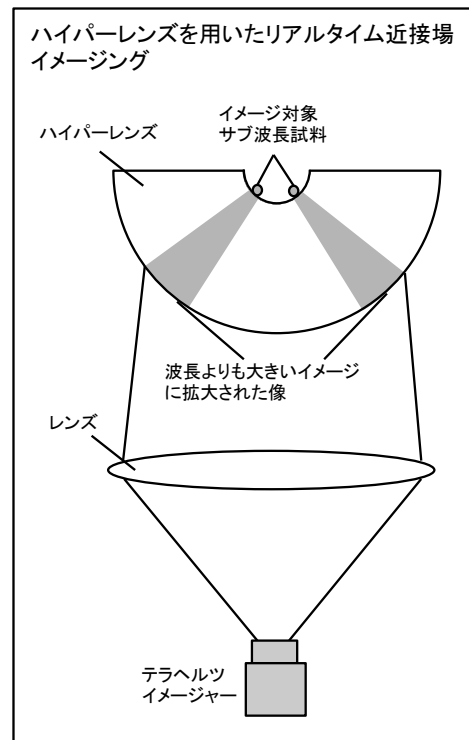


図2. ハイパーレンズを用いたリアルタイム近接場イメージングの概念図

計し、作製することである。設計の段階では電磁界シミュレーションによって伝搬特性の解析を行う。その後、作製したハイパーレンズのテラヘルツ波の伝搬特性を測定し、近接場光のイメージが伝搬光のイメージに変換されるかどうかを調べる。

### 3. 研究の方法

#### (1) ハイパーレンズの作製

ハイパーレンズとは、ここでは近接場光のイメージを伝搬光のイメージに変換させる素子として使用しているが、その原理は非等方的な誘電率を実現することによって、双曲型分散媒質を形成することに起因する[2]。例えば、主に  $y$  方向に伝搬させることを考えた時、電磁波の電場が  $x$  方向を向く偏光状態の電磁波を入射させる。その場合、誘電率がある正の値を取るようになっておく。一方、電磁波が  $x$  方向に伝搬する際には、電磁波は  $y$  方向の偏光状態になるが、このとき誘電率は負の値を取るようにする。すると、電磁波が  $x$ - $y$  平面内を伝搬するとき、 $x$  方向の伝搬では電磁波の感じる誘電率は負となるので、伝搬することが出来ない。この場合、電磁波の伝搬が許されるのは  $y$  方向だけである。もし、入射時において波長よりも小さなイメージがある場合、正の誘電率を持つ媒質であれば回折の効果によりすぐに  $x$  方向に広がってしまい、サブ波長のイメージを保つことが出来ない。しかし、双極性分散媒質の場合は、 $x$  方向の伝搬ができませんので、サブ波長のイメージを保ったまま電磁波は伝搬する。この双極型分散を進行方向に沿って徐々に緩和していくことにより、サブ波長のイメージを波長よりも大きいイメージに変換することができる。

ハイパーレンズの実現方法として、本研究では、サブ波長の金属ワイヤーを集積する構造を用いる(図3)[3, 4]。金属ワイヤー間を電磁波が伝搬する。入り口側でのワイヤーピッチは波長よりも十分に小さくし、

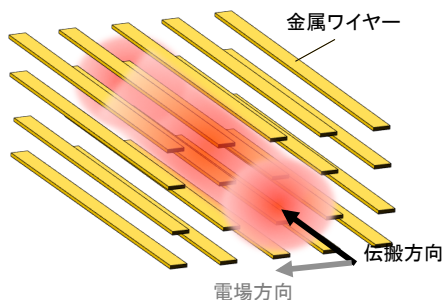


図3. 金属ワイヤー配列型ハイパーレンズの概念図

出口側でのワイヤーピッチは波長よりも大きくすることによって、入口側のサブ波長のイメージが出口側で波長よりも大きなイメージに変換させることになる。

#### (2) 作製したハイパーレンズの特性評価とTHz波伝播解析

(1)で作製したハイパーレンズにおいて、その特性評価とテラヘルツ波伝播解析は以下に示す方法で行うことができる。作製したハイパーレンズの基礎的な光学応答特性を、テラヘルツ時間領域パルス分光装置を用いて測定する。ハイパーレンズの入り口に、サブ波長のイメージとしてスリットをおき、ハイパーレンズの出口面における透過テラヘルツ波の電場分布を、出口面にもスリットをおきそれをスキャンすることにより測定することができる。

また、実験では観測できないハイパーレンズ内部の電磁波の伝播解析を、コンピュータシミュレーションを用いて行う。

#### (3) リアルタイムTHzイメージングシステムの構築

ハイパーレンズの表面上の像をリアルタイムでイメージングすることができるテラヘルツイメージング光学系を構築する。システムの概略図を図4に示す。近接場イメージから伝搬光イメージに変換されたハイパーレンズ表面上の像を、通常のレンズによ

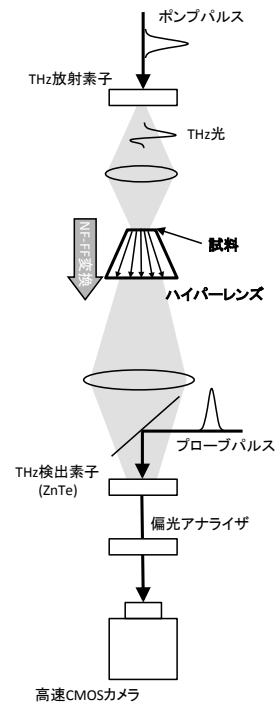


図4. 近接場リアルタイムテラヘルツイメージングシステム概念図

って非線形光学結晶のZnTeに結像する。ZnTeのポッケルス効果によってテラヘルツ波-可視光間でイメージ情報の変換が可能である[5]。可視光の情報として変換されたイメージをCMOSカメラによって撮像することにより、最終的にリアルタイムテラヘルツイメージング装置を構築する。この装置において、テラヘルツ光源として高強度の光源が求められるため、高強度のテラヘルツ光源の開発も合わせて行う必要がある。

最終的に、構築したリアルタイムイメージングシステムを用いて、作製したハイパーレンズの実証実験を行い、サブ波長の分解能を持った超解像リアルタイムイメージングシステムの構築を目指す。

#### 4. 研究成果

##### (1) 近接場イメージ伝搬ハイパーレンズの作製

本研究では、まず双極型分散特性をもつ媒質の作製を行い、そのテラヘルツ波伝搬特性を測定した。これは、最終的なハイパーレンズの基礎となるとともに、ハイパーレンズの作製手法を確立することも目的としている。具体的な作製手法は以下の通りである。まずレーザー加工により、数ミクロン~数十ミクロンの金属微細構造(ストレートライン)を周期的に並べた2次元シートを作製する。それを数十枚積層することによって、3次元の金属ライン周期構造を作製する。

この構造はストレートラインの周期構造であるため、入り口面の近接場のイメージをそのまま出口面における近接場イメージに転送することが期待される。実際、入り口面におけるテラヘルツ波の波長(600ミクロン, 0.5THz)よりも小さい200ミクロン幅のスリットの像が、出口面において500ミクロン幅程度しか広がらないという測定結果が得られた(図5)。この試料の伝搬長は10mmであるので、空気中ではすぐに回折

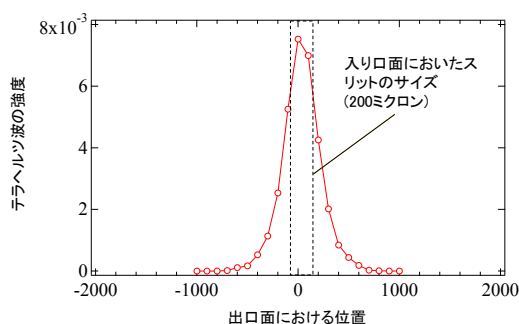


図5. ストレートラインにおけるテラヘルツ波のサブ波長伝搬 (入り口面に200ミクロン幅のスリットを置いた時の、出口面でのテラヘルツ波強度分布。テラヘルツ波の周波数: 0.5 THz)

の効果で広がってしまう距離であることから、双極性分散特性をもった媒質を作製できていると考えられる。

##### (2) 近接場イメージ-伝搬光イメージ変換ハイパーレンズの作製

次に、近接場イメージを伝搬光イメージに変換するハイパーレンズの作製を行った。作製方法は(1)と同様であるが、ハイパーレンズの場合、イメージを拡大する必要があるため、入り口付近と出口付近でワイヤーの間隔が異なる。具体的には入り口のワイヤー間隔を10ミクロン、出口でのワイヤー間隔を30ミクロンにした。このとき、拡大率は3倍になる。つまり、金属ワイヤーは、入口付近から扇型に広がるような構造になっている。

このハイパーレンズのテラヘルツ波伝搬特性を調べるため、入り口面に1つのスリット幅が200ミクロン、スリット間隔が400ミクロンのダブルスリットを置いて、出口面での電場分布を測定したところ、概ね3倍に拡大された像が観測された。さらに、拡大率を6倍にしたハイパーレンズを作製し、同様のダブルスリットを入り口面に置いたところ、6倍に拡大された像が観測された。そのとき、ダブルスリットの像の間隔は2.4mmとなり、これは使用周波数0.5THzの空気中での波長600ミクロンより十分大きいことから、この像を従来のレンズを用いた結像系で観察することができると考えられる。

##### (3) 高強度テラヘルツ光源とリアルタイムイメージング装置の開発

最後に、ハイパーレンズで観測された像をリアルタイムで観測するために、テラヘルツリアルタイムイメージングシステムの開発を行っている。リアルタイムイメージングシステムの概略図を図4に示す。試料を透過したテラヘルツ波の像を非線形光学結晶に結像し、ポッケルス効果を用いることにより同軸で入射したレーザー光の偏光を変化させ、その偏光変化分の強度を像としてCMOSセンサ上に結像する[5]。この方法においてハイパーレンズの光利用効率あまり大きくないため、比較的高強度なテラヘルツ光源が必要となる。本研究では、ニオブ酸リチウム結晶という非線形光学結晶をテラヘルツ波の発生素子として用いて、高強度のテラヘルツ波を発生させた[6]。本光源から発生したテラヘルツ波のビームプロファイルは、マイクロボロメータアレイ

タイプのテラヘルツイメージャー(NEC 社製)で観測することができ,十分に強い強度であることが確認された。現在,このテラヘルツ光源を用いて,図4に示したシステムの構築を進めている。

#### (4) 今後の展望

今後の展望として,リアルタイムイメージングシステムを完成させ,すでに作製したハイパーレンズを用いることによって,サブ波長の近接場像をリアルタイムでイメージングすることを目指す。また,より高強度な光源を用いることによって,(3)で用いたテラヘルツイメージャーを用いることができるようになれば,より簡便なシステムを構築することができると考えており,最終的に,化学物質や生体関連物質などへの応用を目指す。

#### (参考文献)

1. Z. Liu *et al.*, *Science* **315**, 1686 (2007).
2. Z. Jacob *et al.*, *Optics Express* **14**, 8247 (2006).
3. P. A. Belov *et al.*, *Physical Review B* **77**, 193108 (2008).
4. A. Tuniz *et al.*, *Nature Communications* **4**, 2706 (2013).
5. Q. Wu *et al.*, *Applied Physics Letters* **69**, 1026 (1996).
6. H. Hirori *et al.*, *Applied Physics Letters* **98**, 091106 (2011).

#### 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 F. Miyamaru, K. Hattori, K. Shiraga, S. Kawashima, S. Suga, T. Nishida, M. W. Takeda, and Y. Ogawa, “Highly sensitive terahertz sensing of glycerol-water mixtures with metamaterials”, *Journal of Infrared Millimeter and Terahertz Waves*, vol. 25, 198-207, 2014, 査読有  
DOI:10.1007/s10762-013-0036-x

[学会発表] (計7件)

- ① 宮丸文章, “メタマテリアルの概要紹介とテラヘルツ領域のメタマテリアル”, 第5回光科学異分野横断萌芽研究会, 2015. 8. 4~8. 6, ホテル竹島 (愛知)
- ② F. Miyamaru, K. Murai, T. Furuie, T. Nishida, Y. Nakata, S. Hayashi, K. Nawata, H. Minamide, M. Tani, and M. W. Takeda, “Magnification of sub-wavelength images to far-field images with hyperbolic metamaterials in terahertz

region”, The Second International Symposium on Frontiers in THz Technology, 2015. 8. 30~9. 2, アクトシティ浜松 (浜松)

- ③ F. Miyamaru, “Control of electromagnetic waves with artificial metallic structures in terahertz region”, 7th International Symposium on Advanced Plasma Science and Its Applications for Nitrides and Nanomaterials, 2015. 3. 26~.3.31, 名古屋大学 (名古屋)
- ④ T. Nishida, F. Miyamaru, Y. Ogawa, and M. W. Takeda, “Terahertz sensing with coupled resonators consisting of two split ring resonators”, International Symposium on Frontier of Terahertz Science, 2014. 8. 4~8. 6, 沖縄科学技術大学院大学 (沖縄)
- ⑤ 宮丸文章, “メタマテリアルを用いたテラヘルツ波の空間制御とテラヘルツパルスの時間制御”, International Symposium on Frontier of Terahertz Science, 2014. 8. 4~8. 6, 沖縄科学技術大学院大学 (沖縄)
- ⑥ F. Miyamaru, K. Murai, T. Nishida, S. Hayashi, K. Nawata, H. Minamide, M. Tani, and M. W. Takeda, “Experimental verification of subwavelength propagation of THz wave through hyperbolic metamaterials”, 8th International Congress on Advanced Electromagnetic Materials in Microwave and Optics, 2014. 8. 25 ~ 8. 30, Copenhagen (Denmark)
- ⑦ 島田翔平, 宮丸文章, 武田三男, “メタマテリアルを用いた双極関数型非等方分散媒質の電磁波伝搬”, 日本物理学会 2013 年秋季大会, 2013. 9. 25~9. 28, 徳島大学 (徳島)

[その他]

ホームページ等

<http://science.shinshu-u.ac.jp/~thz/>

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

宮丸 文章 (MIYAMARU, Fumiaki)  
信州大学・学術研究院理学系・准教授  
研究者番号: 20419005