

平成 31 年 5 月 3 日現在

機関番号：14301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K17529

研究課題名(和文) テラヘルツ近接場測定技術を用いた擬似局在表面プラズモンの時空間分解測定

研究課題名(英文) Time- and space-resolved study of spoof localized surface plasmon using terahertz near field spectroscopy

研究代表者

有川 敬 (Arikawa, Takashi)

京都大学・理学研究科・助教

研究者番号：70598490

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,400,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、テラヘルツ周波数帯に重くのしかかる回折限界による制限を取り除くための研究を行った。そのための有力なツールとして、擬似局在表面プラズモンに着目して研究を行い、その基礎的性質を実験的に明らかにし、共鳴周波数などを制御することに成功した。また、軌道角運動量を持つ光渦を用いた高次擬似局在表面プラズモンの励起を行った。その結果、全角運動量の保存を満たす選択則が確認できた。これは、可視域のプラズモニクスで予測されていた結果と同じである。これらの結果は、擬似局在表面プラズモンを用いる事で、可視域プラズモニクスで実現している高分解能、高感度測定技術をテラヘルツ帯に応用できる可能性を示している。

研究成果の学術的意義や社会的意義

擬似局在表面プラズモンを利用することにより、テラヘルツ帯においても可視域プラズモニクスの莫大な研究の蓄積を継承し、高分解能、高感度測定を実現できる可能性がある。本研究による擬似局在表面プラズモンの基礎特性の理解はこのような技術的発展の基礎となるものであると言える。

研究成果の概要(英文)：Spoof localized surface plasmon is studied as a promising tool to overcome the poor spatial resolution of terahertz spectroscopy due to the diffraction limit. The basic properties predicted from the theory are experimentally confirmed and controlled by changing the geometry parameters of the metallic structure. Also, vortex beam, i.e., light with orbital angular momentum is used to selectively excite multipolar modes of spoof localized surface plasmon. As a result, selection rules governed by the conservation of the total angular momentum between light and spoof localized surface plasmon are confirmed. This is the same selection rules known for localized surface plasmon in visible/infrared region. These results show spoof localized surface plasmon would allow us to realize spatial resolution beyond the diffraction limit with ultrahigh sensitivity, as realized in the visible/infrared plasmonics.

研究分野：テラヘルツ分光

キーワード：テラヘルツ プラズモニクス 近接場 メタマテリアル 擬似局在表面プラズモン

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

### 1. 研究開始当初の背景

遠赤外またはテラヘルツ (THz) 分光は、低輝度な黒体輻射光源と低速な熱型検出器に頼らざるを得なかったフーリエ変換型分光の時代から、高輝度光源を用いた超高速分光が可能な時代へと大きく進歩した。この新しい光技術は多様な分野の基礎研究に用いられるとともに、セキュリティや安心・安全分野等における産業応用にも広がりを見せている。

しかし、赤外や可視の光より長波長なテラヘルツ光には、回折限界の問題が重くのしかかる。1 THz の光の波長が 300  $\mu\text{m}$  と長いと、小さな測定対象を苦手とし、テラヘルツ分光の適用範囲を制限している。テラヘルツ帯における近接場測定技術も存在するが、原理的に空間分解能を上げると信号強度が下がるため、非破壊測定では  $\lambda/30$  程度（空間分解能 10  $\mu\text{m}$  程度）が限界となっている。この問題を解決することで、テラヘルツ分光の裾野をさらに広げ、新しい現象の理解や技術の創成に繋がる事が期待されている。

### 2. 研究の目的

本研究が見据える最終目標は、THz 分光に重くのしかかる回折限界による制限を取り除くことである。これを実現するための有望なツールとして、本研究では擬似局在表面プラズモン（外周に周期構造を持つ波長以下の完全導体ディスクに存在する局在表面モード）に着目する。擬似局在表面プラズモンを用いる事で、可視域プラズモニクスで実現している高分解能、高感度測定技術をテラヘルツ帯に応用できる。本研究ではテラヘルツ近接場イメージング技術を用い、擬似局在表面プラズモンの基本的かつ重要な性質を実験的に明らかにする。

### 3. 研究の方法

回折限界を超えて高分解能を達成する技術は近赤外・可視域ではすでにプラズモニクスの分野で高波数の光を用いて行われている。そこでは波長以下のサイズの金属粒子の近傍に存在する局在表面プラズモン (Localized Surface Plasmon, LSP) を利用している。しかし、波長でスケールアップして同様の事をテラヘルツ帯で行うことは不可能である。それは、テラヘルツ帯で金属は完全導体とみなす事が出来るため、表面モードが存在しないからである。

ところが 2012 年、完全導体ディスクの外周に周期構造をつけることで、その近傍に局在型の表面モードを持たせることが可能であることが理論的に示された。この表面モードの共鳴周波数は周期構造の大きさに制御でき、テラヘルツ帯に設定する事も可能である。また、最も驚くべきは、この表面モードが可視域の LSP と同様の分散関係を持つということである。このことから、この表面モードは擬似局在表面プラズモン (擬似 LSP) と呼ばれる。この擬似 LSP の存在意義は非常に大きい。それは、テラヘルツ帯においても可視域プラズモニクスの莫大な研究の蓄積を継承できるからである。本研究ではテラヘルツ近接場イメージング技術を用い、擬似局在表面プラズモンの基本的かつ重要な性質を実験的に明らかにする。

また、様々な金属構造を用いることでより小さな電場のホットスポット作成を試みる。

### 4. 研究成果

ホットスポットの微小化を図るために、まずは金属構造の微細化を行い、理論予想通りに共鳴周波数などの性質が変化することを確認した。また、さらに電場のホットスポットを小さくする手法として、より大きな波数を持つ四重極、六重極といった高次の擬似 LSP モードを利用した。しかし、高次のモードは通常のガウスビームでは励起できないダークモードである。この困難を乗り越えるために、本研究では励起光として軌道角運動量を持つ光渦を用いた。近年の理論的研究で、光渦の軌道角運動量を用いることで高次の LSP モードを選択的かつ効率的に励起できる事が示されており、それを擬似 LSP を用いて実験的に証明することに成功した。これらの結果は、擬似局在表面プラズモンを用いる事で、可視域プラズモニクスで実現している高分解能、高感度測定技術をテラヘルツ帯に応用できる可能性を示している。また、電磁場解析シミュレーションを行うことで擬似局在表面プラズモンの理解を深めた。

また、新たな金属構造として、アンテナ構造を用いた回折限界の突破を行った。具体的には、放射状に並べた 4 組のダイポールアンテナを金属微細加工技術を用いて作成し、広帯域テラヘルツパルス照射した。その結果、中心部分に存在する波長以下のギャップ部分 (直径 50 マイクロメートル) に波長 600 マイクロメートル程度のテラヘルツ波の縮小レプリカが生成されることがわかった。位相分布の測定により、波長の選択はダイポールアンテナの半波長共鳴周波数により選択されていることがわかった。さらに、この金属構造は軌道角運動量を持つテラヘルツ光渦も回折限界以下に縮小する機能を持つことを実験的に示した。

### 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 (計 1 件)

1. "Focusing light with orbital angular momentum by circular array antenna"  
T. Arikawa, S. Morimoto, and K. Tanaka.  
Optics Express **25**, 13728 (2017).

〔学会発表〕 (計 15 件)

1. Takashi Arikawa, Shohei Morimoto, Tomoki Hiraoka, Francois Blanchard, Kyosuke Sakai, Keiji Sasaki, and Koichiro Tanaka  
"Control of Spoof Localized Surface Plasmons Using Terahertz Near-field Microscope"  
CLEO  
2018 年
2. 瀧口賢治, 猪瀬裕太, 有川敬, 田中耕一郎  
"テラヘルツ領域における光トポロジカル絶縁体の研"  
日本物理学会 2018 年秋季大会  
2018 年
3. F. Amirkhan, R. Nechache, R. Sakata, K. Takiguchi, T. Arikawa, T. Ozaki, K. Tanaka, F. Blanchard  
"Characterization of thin-film optical properties by THz near-field imaging"  
Photonics North  
2018 年
4. Francois Blanchard, Riad Nechache, Ryoichi Sakata, Fatemeh Amirkhan, Kenji Takiguchi, T. Arikawa, and Koichiro Tanaka  
"Near-field terahertz imaging using Bi<sub>2</sub>FeCrO<sub>6</sub> (BFCO) thin-film sensor"  
PIERS (Progress In Electromagnetics Research Symposium)  
2018 年
5. F. Amirkhan, R. Sakata, K. Takiguchi, T. Arikawa, T. Ozaki, K. Tanaka, F. Blanchard  
"Characterization of Thin Film Materials Using Near Field THz Imaging"  
OTST (Optical Terahertz Science and Technilogy)  
2019 年
6. Kenji Takiguchi, Yuta Inose, Takashi Arikawa, and Koichiro Tanaka  
"Direct observation of the band topology in photonic crystals by terahertz spectroscopy"  
OTST (Optical Terahertz Science and Technilogy)  
2019 年
7. Ryoichi Sakata, Kenji Takiguchi, Takashi Arikawa, Francois Blanchard, Koichiro Tanaka  
"Subwavelength focusing of light with orbital angular momentum by circular array antenna"  
第 9 回電磁メタマテリアル講演会(招待講演)  
2019 年
8. Takashi Arikawa, Shohei Morimoto, Francois, Blanchard, Kyosuke Sakai, Keiji Sasaki, Koichiro Tanaka  
"Control of spoof localized surface plasmons using terahertz vortex beam"  
Optical Terahertz Science and Technology 2017 (OTST2017, London)  
2017 年
9. 坂田諒一, 森本祥平, 有川敬, 田中耕一郎  
"放射状アンテナアレイによる光渦の集光"  
電子情報通信学会 テラヘルツ応用システム研究会  
2017 年
10. 坂田諒一, 森本祥平, 有川敬, 田中耕一郎  
"放射状アンテナアレイによる光渦の集光"  
日本物理学会 2017 年秋季大会  
2017 年
11. Takashi Arikawa  
"Selective excitation of multipolar spoof plasmons using orbital angular momentum of light"

電磁メタマテリアル講演会(招待講演)  
2018年

12. Ryoichi Sakata, Kenji Takiguchi, Takashi Arikawa, Francois Blanchard, Koichiro Tanaka  
”Subwavelength focusing of terahertz vortex beam by circular array antenna”  
Terametananano-3 (UXMAL, Mexico)  
2018年
13. Shohei Morimoto, Takashi Arikawa, Francois Blanchard, Kyosuke Sakai, Keiji Sasaki, Koichiro Tanaka  
“Control of Spoof Localized Surface Plasmons by Vortex of Light in Terahertz Region”  
41st International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves  
2016年09月25日~2016年09月30日  
Copenhagen
14. Shohei Morimoto, Takashi Arikawa, Francois Blanchard, Kyosuke Sakai, Keiji Sasaki, Koichiro Tanaka  
“Observation and Control of Spoof Localized Surface Plasmons Using Terahertz Near- field Microscope”  
41st International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves(招待講演)  
2016年09月25日~2016年09月30日  
Copenhagen
15. 森本祥平、有川敬、Francois Blanchard、酒井恭輔、笹木敬司、田中 耕一郎  
“テラヘルツ光渦による疑似局在表面プラズモンの励起モード制御”  
日本物理学会 第72回年次大会  
2017年03月17日~2017年03月20日  
大阪大学

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 0 件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
出願年：  
国内外の別：

○取得状況 (計 0 件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
取得年：  
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

## 6. 研究組織

### (1) 研究分担者

研究分担者氏名：

ローマ字氏名：

所属研究機関名：

部局名：

職名：

研究者番号（8桁）：

(2)研究協力者

研究協力者氏名：

ローマ字氏名：

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。