

令和 6 年 5 月 23 日現在

機関番号：13101

研究種目：若手研究

研究期間：2022～2023

課題番号：22K14617

研究課題名（和文）疑似プラズモンが運ぶ角運動量を利用した大強度テラヘルツ波源のモード制御

研究課題名（英文）Mode control of intense terahertz wave source based on angular momentum carried by spoof plasmon

研究代表者

安中 裕大 (Annaka, Yuta)

新潟大学・工学部・教室系技術職員

研究者番号：20835699

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,000,000円

研究成果の概要（和文）：電子ビームと疑似表面プラズモンの相互作用による高効率なテラヘルツ波発生を実現するため、疑似表面プラズモンのモード制御を試みた。まずプラズモニック構造をコルゲート導波管に組み込むことで疑似表面プラズモンを励起し、その特性を調べた。次にテラヘルツ波発生実験を行い、発生したテラヘルツ波と数値計算の比較により、電子ビームで励起されるモードについて調べた。また周波数が0.3から0.35THzのテラヘルツ波を1kWの出力で発生させることに成功した。発生したテラヘルツ波放射の非対称性から電子ビームによって励起されたモードを解析する手法を考案した。これらの研究成果は5編の論文と1件の口頭発表で公表された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

テラヘルツ波は電波と光の中間の周波数の電磁波である。通信や医療応用、非破壊検査など様々な応用が期待されており、高効率なテラヘルツ波源の開発が重要である。本研究では疑似表面プラズモンと呼ばれる電磁波モードの励起により1kWの出力電力を持つ大電力テラヘルツ波発生に成功している。また異なる軌道角運動量を運ぶ複数の疑似表面プラズモンモードを同時に励起したときテラヘルツ波放射の非対称な強度分布が生じることが分かった。この放射の非対称性はテラヘルツ電磁波モードの解析の指標となるほか、指向性テラヘルツ波送電などの応用が考えられる。

研究成果の概要（英文）：Analysis of spoof surface plasmon modes is conducted to realize efficient terahertz-wave generation based on a Cherenkov interaction between an electron beam and spoof surface plasmons. Firstly, I perform an experiment to excite spoof surface plasmons in a cylindrical corrugated waveguide by combining a plasmonic structure. Next, I perform experiment to generation of terahertz wave and examine the spoof plasmon modes excited by the electron beam. I successfully generate a kilowatt power terahertz wave in a frequency range from 0.30 to 0.35 THz. I also devise a method to analysis the excited spoof plasmon modes by asymmetry of terahertz radiation pattern. These research achievements were published in five papers and one oral presentation.

研究分野：テラヘルツ波発生

キーワード：テラヘルツ波発生 疑似表面プラズモン 電子ビーム

1. 研究開始当初の背景

テラヘルツ波は 0.3THz から 30THz までの周波数を持つ電磁波であり、医療や通信、非破壊検査など様々な応用が考えられている。しかしその技術開発は他の周波数の電磁波と比べて遅れている。テラヘルツ波発生技術もまた開発途上であり、様々な波源が考案されている。代表的なテラヘルツ波発生源として半導体装置の量子カスケードレーザー、電子ビームから電磁波を発生させるジャイロトロンや表面波発振器、レーザー光で誘起するパラメトリック変換や光伝導スイッチなどがある。この中で表面波発振器は電子ビームで疑似表面プラズモンと呼ばれる電磁波モードを励起しテラヘルツ波を発生させる装置である。比較的小型の装置で大出力テラヘルツ波を発生できるが、他の装置と比べて動作効率の低さが課題であった。効率の低さの原因としてモード競合が考えられる。複数の電磁波モードが励起されることで励起されたモード間に競合が生じ、動作効率を下げると考えられている。これまでの実験ではサブテラヘルツ周波数にあたる 0.1THz でモード数が 30 までの疑似表面プラズモンの励起が確認されていた[1]。このモード数を抑えることでこれまで 1%程度だった動作効率を最大 8%まで改善していた[2]。しかしテラヘルツ周波数にあたる 0.3THz 付近では実験報告は少なく、動作効率は 0.1%かそれ以下にとどまっていた[3,4]。そのためテラヘルツ周波数において疑似表面プラズモンモードの励起を制御する手法が必要とされていた。

2. 研究の目的

本研究の目的は電子ビームで励起される疑似表面プラズモンのモードを制御することでテラヘルツ波源の動作効率を改善することである。疑似表面プラズモンは円筒コルゲート導波管に励起する。疑似表面プラズモンは円筒コルゲート導波管のハイブリッドモードとして形成されるが、そのハイブリッドモードは軌道角運動量を運ぶことが指摘されている[5]。光や電磁波の角運動量はプラズモニック構造と呼ばれる金属周期構造の影響を受けることが指摘されており[6,7]、コルゲート導波管の疑似表面プラズモンにおいてもプラズモニック構造でモード制御が可能になるかもしれない。よってプラズモニック構造による疑似表面プラズモンのモード制御を試み、テラヘルツ波発生の効率を改善できるかを確認するのが本研究の目的である。

3. 研究の方法

本研究では図 1 のようなプラズモニック構造をコルゲート導波管に組み込み、疑似表面プラズモンを励起する実験を行う。電子ビームによって疑似表面プラズモンを励起し発生したテラヘルツ波を測定する実験と、ベクトルネットワークアナライザを用いた電子ビームが存在しない実験系(コールドテスト)での実験を実施する。電子ビームは真空容器内で冷陰極に高電圧を印加させることで発生する。コイルによって 1T までの磁場を発生させ、電子ビームの伝搬をサポートする。電子ビームによって励起された疑似表面プラズモンは電磁波放射として導波管の端から放出され、それをホーンアンテナで測定する。放射の強度や角度、周波数などから励起された疑似表面プラズモンのモードを特定する。発振器内においてプラズモニック構造はビームリミッター部分に組み込み、電子ビームの伝搬を邪魔しない配置にした。



図 1 プラズモニック構造の例

4. 研究成果

(1) プラズモニック構造を用いた疑似表面プラズモン励起実験

ベクトルネットワークアナライザを用いたコールドテスト実験を行い、プラズモニック構造に励起される疑似表面プラズモンの特性を調べた。プラズモニック構造は図 1 のように同心円の溝が周期的に彫られたコルゲート構造になっている。ベクトルネットワークアナライザに接続した針アンテナをプラズモニック構造の中心の穴に挿入し、疑似表面プラズモンを励起した。励起された疑似表面プラズモンの電界や位相の分布を実験的に測定し、実験結果から疑似表面プラズモンの分散関係が得られた。この研究成果は論文にまとめ、AIP Advance 誌に掲載された[8]。次に図 2 のとおりにプラズモニック構造をコルゲート導波管に接続し、プラズモニック構

造を介してコルゲート導波管に疑似表面プラズモンを励起させようと試みた。励起された疑似表面プラズモンにより導波管の端から放射された電磁波を測定し、励起されたモードを特定した。プラズモニック構造は図1の同心円コルゲートの他にらせん状に溝を彫ったスパイラルコルゲートを用意した。同心円コルゲート構造とスパイラルコルゲート構造で励起される疑似表面プラズモンのモードに変化が見られた。この結果からプラズモニック構造によって疑似表面プラズモンのモードを選択的に励起できることを示した。この研究成果は論文にまとめ、Plasma and Fusion Research 誌に掲載された[9]。

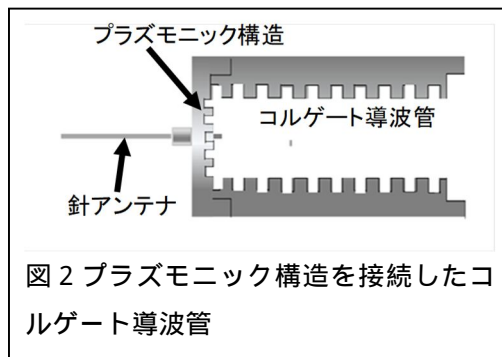


図2 プラズモニック構造を接続したコルゲート導波管

(2) 電子ビームによる疑似表面プラズモン励起実験

まずプラズモニック構造のない場合に電子ビームによって励起される疑似表面プラズモンのモードを調べた。サブテラヘルツ周波数にあたる 0.1THz 帯のコルゲート導波管に電子ビームを入射し、発生した電磁波放射の角度や周波数から励起された疑似表面プラズモンのモード数を推定した。Field-matching 法による線形解析で電子ビームと疑似表面プラズモンとの相互作用を解析し、成長率を求めた。計算の結果を実験結果と比較したところ、コルゲート導波管の長さによって疑似表面プラズモンと電子ビームの相互作用が変化し、支配的に励起されるモードも大きく変わることが分かった。この研究成果は論文にまとめ、Physics of Plasmas 誌に掲載された[10]。

次にテラヘルツ周波数での疑似表面プラズモンの励起を確認するため、0.3THz 帯の2種類のコルゲート導波管を用意し、テラヘルツ波発生実験を行った。二つのコルゲートの違いは溝の深さである。その結果、浅いコルゲートでは1kWのテラヘルツ波出力電力が得られたのに対し、深いコルゲートでは0.4kWの出力電力が得られた。深いコルゲート構造と比べて浅いコルゲート構造に励起された疑似表面プラズモンは電界の広がりが大きい。電界の広がりが大きいほど電子ビームとの相互作用が生じる面積が増え、出力電力が大きくなると考えられる。またハイパスフィルターを用いてテラヘルツ波測定を行い、発生した電磁波の周波数が0.3から0.35THzの間であることが確認された。この研究成果は論文にまとめ IEEE Transactions on Electron Devices 誌に掲載された[11]。

プラズモニック構造をコルゲート導波管に組み込み、電子ビームによる疑似表面プラズモンの励起実験を行った。しかしプラズモニック構造による有意な効果は見られなかった。プラズモニック構造によるモード制御は電子ビームの存在しない実験系では有効であったが、残念ながら電子ビームが存在する場合うまく機能しなかった。そこでプラズモニック構造を用いないモード制御の手法を模索するため、複数の疑似表面プラズモンモードが励起された場合のテラヘルツ波放射に着目した。異なる軌道角運動量を運ぶ複数の疑似表面プラズモンモードの電磁場を重ね合わせて数値計算を行ったところ、発生するテラヘルツ放射が非対称の強度分布を持つことが分かった。放射の対称性を指標にすることで励起したモードのスペクトルを解析することが可能になる。この研究成果は論文にまとめ、Japanese Journal of Applied Physics 誌に掲載された[12]。今後の研究では放射の対称性という指標をもとに単一のモードが励起される条件を探し、テラヘルツ波発生の効率化を図っていく。

引用文献

- [1]Y. Annaka et al., Plasma Fusion Res. 14, 2406015 (2019). DOI: 10.1585/pfr.14.2406015
- [2]Y. Annaka et al., Plasma Fusion Res. 17, 2406036 (2022). DOI: 10.1585/pfr.17.2406036
- [3]M. T. San et al., IEEE Trans. Plasma Sci. 46, 530 (2018). DOI: 10.1109/TPS.2018.2796559
- [4]J. Wang et al., Sci. Rep. 8, 6978 (2018). DOI: 10.1038/s41598-018-25466-w
- [5]H. Kawaguchi et al., IEEE Microwave Wireless Technol. Lett. 33, 118 (2023). DOI: 10.1109/LMWC.2022.3205060
- [6]Y. Gorodetski et al., Phys. Rev. Lett. 101, 043903 (2008). DOI: 10.1103/PhysRevLett.101.043903
- [7]Y. Gorodetski et al., Phys. Rev. Lett. 110, 203906 (2013). DOI: 10.1103/PhysRevLett.110.203906
- [8]Y. Annaka et al., AIP Advances 12, 115005 (2022). DOI: 10.1063/5.0123732
- [9]K. Ogura, Y. Annaka et al., Plasma Fusion Res. 18, 1406007 (2023). DOI: 10.1585/pfr.18.1406007
- [10]Y. Annaka et al., Phys. Plasmas 30, 043103 (2023). DOI: 10.1063/5.0139713
- [11]Y. Annaka et al., IEEE Trans. Electron Devices 70, 4450 (2023). DOI: 10.1109/ted.2023.3288844

[12]Y. Annaka et al., Jpn. J. Appl. Phys. 63, 046001 (2024). DOI: 10.35848/1347-4065/ad3280

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Annaka Yuta, Ogura Kazuo, Ito Masaya	4. 巻 12
2. 論文標題 Dispersion relation of spoof surface plasmon resonant mode on concentric annular metal corrugation	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 AIP Advances	6. 最初と最後の頁 115005 ~ 115005
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0123732	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 OGURA Kazuo, ANNAKA Yuta, KUBO Shin, TSUJIMURA Toru	4. 巻 18
2. 論文標題 Plasmonic Cavity Formation by Circular and Spiral Corrugations	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Plasma and Fusion Research	6. 最初と最後の頁 1406007 ~ 1406007
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1585/pfr.18.1406007	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Annaka Y., Ogura K., Ito M.	4. 巻 30
2. 論文標題 Absolute and global instabilities driven by Cherenkov interaction between magnetized electron beam and spoof surface plasmon polaritons	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Physics of Plasmas	6. 最初と最後の頁 043103 ~ 043103
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0139713	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Annaka Yuta, Ogura Kazuo	4. 巻 70
2. 論文標題 Influence of Field Profile of Surface Wave on Terahertz Backward-Wave Oscillator	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Electron Devices	6. 最初と最後の頁 4450 ~ 4455
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/ted.2023.3288844	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Annaka Yuta, Sugawara Akira, Kokubo Yuma, Takebuchi Aoi, Funaki Kazuto, Matsuzaki Rei, Iguchi Tota	4. 巻 63
2. 論文標題 Analysis of multimode radiation from 0.4 THz backward wave oscillator	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 046001 ~ 046001
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1347-4065/ad3280	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計1件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件)

1. 発表者名 Yuta Annaka, Kazuo Ogura
2. 発表標題 Selective excitation of spoof plasmon combining corrugated disk with corrugated waveguide
3. 学会等名 The 13th Asia-Pacific Conference on Near-Field Optics (国際学会)
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------