

令和 4 年 6 月 20 日現在

機関番号：13101

研究種目：若手研究

研究期間：2020～2021

課題番号：20K15191

研究課題名(和文)多重擬似プラズモンモードの制御による大強度テラヘルツ波発生の高効率化

研究課題名(英文)High-efficient generation of high-power terahertz wave by controlling multimode 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) 2,400,000円

研究成果の概要(和文)：電子ビームと擬似プラズモンの相互作用を利用した大強度テラヘルツ波源である表面波発振器の研究を行った。サブテラヘルツ帯にあたる周波数100GHzで数値計算プログラムによる解析を行った。解析結果をもとに径が20mmのコルゲート導波管と電子ビーム源を製作した。製作したコルゲート導波管を使用した100GHz帯表面波発振器の動作実験を行い、2キロワットのサブテラヘルツ波の放射が得られた。また最大エネルギー変換効率8%を達成した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

テラヘルツ波は通信技術や医療など様々な分野に応用できる電磁波であるが、その光源の開発は途上である。大強度のテラヘルツ波光源の一種である表面波発振器は常温で動作でき、また比較的弱い磁場で作動するため装置構成を小さくできるという利点がある。しかし動作効率が他のテラヘルツ波源と比べて小さいという欠点があった。本研究では、サブテラヘルツ周波数にあたる100GHz帯で表面波発振器の効率を大きく改善した。この成果により大強度で小型かつ常温動作できるテラヘルツ波源の実現に近づいた。

研究成果の概要(英文)：We studied surface wave oscillator (SWO), an intense terahertz wave source based on an interaction between an electron beam and spoof plasmon. We analyze SWO at sub-terahertz frequency of 100 GHz using numerical calculation code. A corrugated waveguide with the diameter of 20 mm and electron beam source are fabricated based on the result of the numerical analysis. An experiment of 100 GHz SWO is conducted with the corrugated waveguide, and 2-kW radiation of sub-terahertz wave is obtained. SWO achieves the maximum energy-conversion efficiency of 8%.

研究分野：プラズマ工学

キーワード：大強度テラヘルツ波 擬似プラズモン 金属周期構造 電子ビーム

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

テラヘルツ波は周波数 100GHz から 10THz までの電磁波である。その特性から医療や非破壊検査、通信技術、スピントロニクスなど様々な分野への応用が期待されているが、その光源の開発は途上にある。実用のためには大強度で小型かつ室温で使える光源の開発が必要である。表面波発振器は電子ビームと疑似プラズモンの相互作用を利用した大強度テラヘルツ波光源である。室温で使用でき、1T 程度の比較的弱い磁場で動作するため装置構成を小さくできるという利点があるが、電子ビームからテラヘルツ波へのエネルギー変換効率が他のテラヘルツ波源と比べて低いという欠点があった。2020 年にサブテラヘルツ周波数にあたる 100 GHz 帯で効率が 1% に改善されたが [1]、ジャイロトロンのような他のテラヘルツ波光源と比べてまだ効率が低い。シミュレーションによる研究では 150GHz 帯で 20%の効率が報告されており、表面波発振器には改善の余地があることが示唆されている [2]。低効率の原因として、複数の疑似プラズモンのモードが同時に励起されることによりモード間に競合が生じることが挙げられる。研究代表者は 100GHz 帯表面波発振器においてモード数が 30 以上の疑似プラズモンが同時に励起されることと、励起されたモード同士が競合し放射出力が変わることを実験的に確かめている [3,4]。表面波発振器の効率改善のためにはモード競合を回避し単一のモードによるテラヘルツ波発生の手法を模索することが重要である。

2. 研究の目的

本研究では、形成される疑似プラズモンのモードの密度を疎にすることで同時に励起されるモードの数を減らし、低効率の原因となるモード競合を抑制する。これにより電子ビームからテラヘルツ波放射へのエネルギー変換効率の向上をねらう。疑似プラズモンは金属周期構造を持ったコルゲート導波管により形成する。形成される疑似プラズモンのモードの密度はコルゲート導波管の径によって決まる。コルゲート導波管の径は放射強度を上げる目的で通常波長の数倍程度に設計される [5]。しかしテラヘルツ帯では波長は数ミリメートルかそれ以下となるため、波長に対する径の比率が過剰に大きくなる傾向にあった。径が大きくなるほどモード密度も大きくなり、モード競合の影響が強くなると予想される。そこで最適な径を持つコルゲート導波管により電子ビームからテラヘルツ波放射へのエネルギー効率が改善されるかを調べる。

3. 研究の方法

数値計算プログラムによる解析結果をもとに直径 20mm のコルゲート導波管を準備した。以前より使用していた直径 30mm のコルゲート導波管と比較することで径の変化の影響を調べる。コルゲート導波管は内壁に周期的な溝を持っており、この溝の大きさによって疑似プラズモンの周波数が決まる。本研究では溝の深さを 0.6mm、溝の幅を 0.3mm、周期長を 0.5mm とし、測定機器の準備しやすい周波数の 100GHz 帯となるよう設計した。図 1 の様にコルゲート導波管に電子ビーム源となる冷陰極とアノードを接続し、真空容器内でカソードに電圧を印加することで電子ビームを発生させる。発生した電子ビームに 1T 程度の磁場を印加しコルゲート導波管内に伝搬させる。これによって電子ビームと疑似プラズモンの間に相互作用が生じテラヘルツ波放射が発生する。発生した放射はテフロン製の出力窓から真空容器の外部に放射され、それをホーンアンテナで受信して測定する。受信した放射はハイパスフィルターを通すことで周波数帯を特定する。また、電子ビームの電流量はロゴスキーコイルを用いて測定する。

4. 研究成果

数値計算プログラムを用いて解析したコルゲート導波管に形成される疑似プラズモンモードの周波数をプロットしたものを図 2 に示す。横軸はモード数、縦軸は周波数である。導波管の径

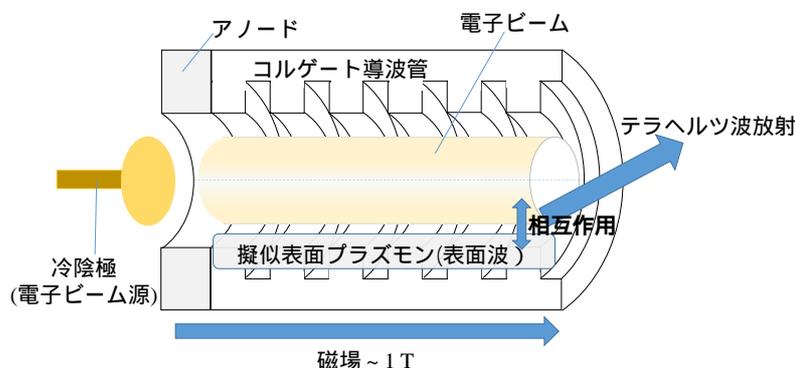


図 1 表面波発振器の模式図。

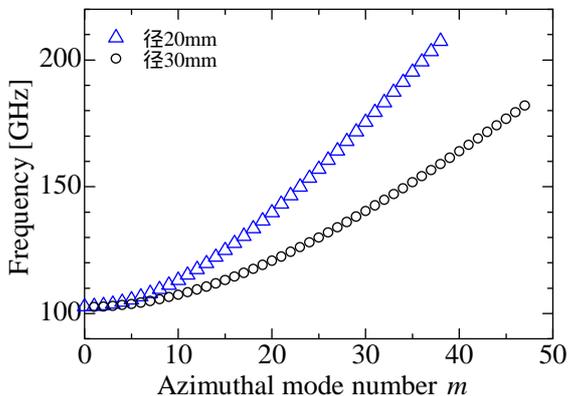


図2 疑似プラズモンのモード数に対する周波数の変化。

が 20 mm と 30 mm の場合を比較すると、20 mm のとき周波数が大きく増加しており、その分モードの密度が疎になっていることがわかる。

コルゲート導波管の直径に合わせて新たな電子ビーム源の開発も行った。電子ビーム源は冷陰極とアノードで構成されており、その径をコルゲート導波管の径に合わせる必要がある。図3は径 30mm と 20mm のビーム源を用いて発生させた電子ビームを感熱紙に焼き付けたものである。コルゲート導波管の管壁近くに存在している疑似プラズモンを効率よく励起できるように円環状になっている。焼き付け痕の径はコルゲート導波管の径に一致する。

それぞれの径のコルゲート導波管を用いて表面波発振器の動作実験を行った。発生したテラヘルツ波放射をホーンアンテナで受信して測定した。図4にカソード印加電圧に対する放射出力とビーム電流量をプロットしたものを示す。同じビーム電圧・電流量に対して径 20mm のとき出力が増大していることがわかる。次に出力窓に対してホーンアンテナの角度を変えながら測定を行った。その結果を図5に示す。各点は5回の計測の平均値となっており、エラーバーは最大値と最小値を表す。カソード印加電圧は平均 14.8kV、ビーム電流は平均 2.7A である。また実線はモード数 $m = 0$ (TM₀₁ モード)、6、10 について計算した放射角度である。放射は ± 5 度の角度で最大となっておりこれは $m = 0$ のモードと一致する。また -40 から +40 度の間で放射が広がっていることからモード数 10 程度までの疑似プラズモンが励起されたと考えられる。この放射角度について出力値を積分することで総計の放射出力が得られ、その値は 2kW となる。また、総計の出力をカソード印加電圧とビーム電流量で割ることで電子ビームからテラヘルツ波放射への変換効率がわかる。図5の場合効率 5% となる。

図5で得られた効率 5% は平均値から得られたものである。図5から総計の放射出力と検波出力の比を取ることで、一回ごとの放射の計測に対して効率を見積もった。効率をプロットしたものを図6に示す。横軸はカソードに印加する電圧の時間変化量である。電圧の時間変化が 0.06kV/ns で効率が最大になることがわかる。最大の効率は径 30mm のときが 3% で径 20mm のとき 8% 以上になる。

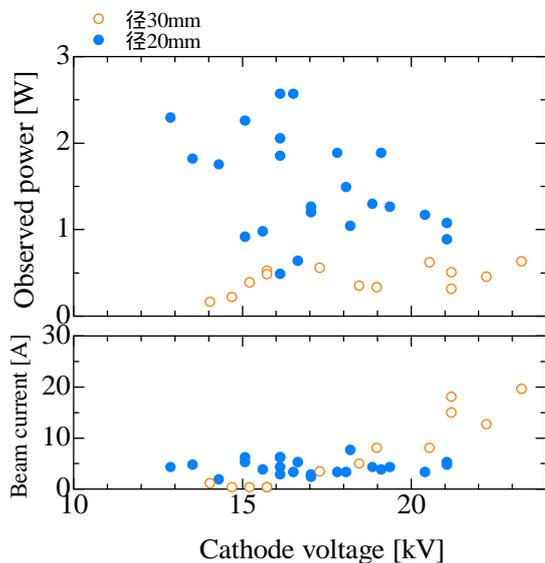


図4 カソード印加電圧に対する放射出力のプロット。

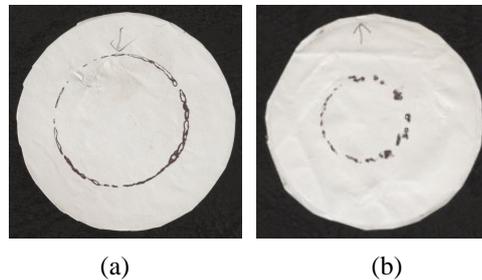


図3 (a)径 30mm と(b)径 20mm のビーム源による電子ビームの焼き付け痕。

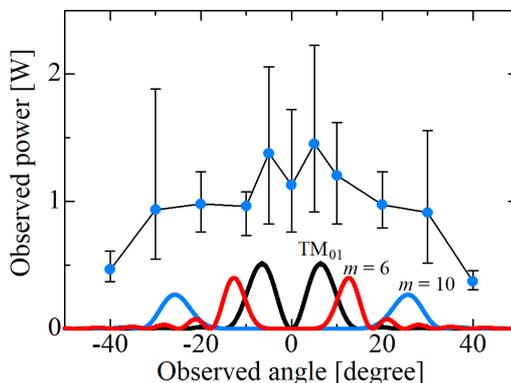


図5 径 20mm の場合のホーンアンテナの角度に対する放射出力の依存性。TM₀₁、 $m = 6$ 、 $m = 10$ のモードについての計算値も示す。

上記の通り、導波管の径の調整によって電子ビームから疑似プラズモンへのエネルギー変換効率が改善された。この効率改善の原因として二つの理由が考えられる。一つ目は電子ビーム源の改善である。ビーム源の径が小さくなったことで発生する電子ビームの電流密度が増加したことが理由として考えられる。もう一つの理由は疑似プラズモンの多重モードの抑制である。図2に示した通り、疑似プラズモンのモード密度が下がったことで同時に励起される疑似プラズモンの数が減り、低効率の原因となるモード競合の影響が弱まったとみられる。

参考文献

- [1] Y. Annaka et al., Jpn. J. Phys. 59, SHHD02 (2020).
- [2] G. Wang et al., Phys. Plasmas 23, 053113 (2016).
- [3] Y. Annaka et al., Plasma Fusion Res. 14, 2406015 (2019).
- [4] 安中裕大ほか、電気学会論文誌 A 137, 3 (2017).
- [5] K. Ogura et al., IEEJ Trans. FM 125, 733 (2005).

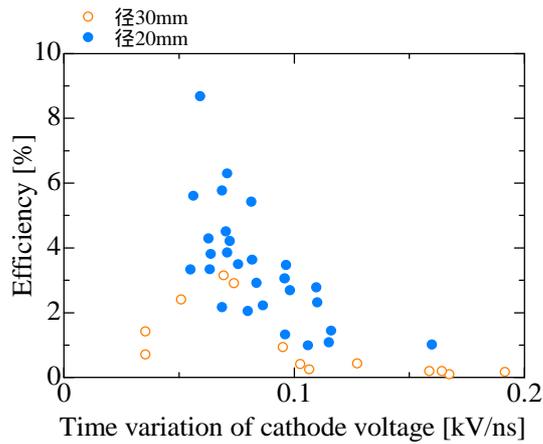


図6 カソード印加電圧の時間変化に対する効率の変化。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 ANNAKA Yuta, OGURA Kazuo, AOKI Mao, HAMADA Shingo, KATO Tsubasa, ITO Masaya	4. 巻 17
2. 論文標題 Effect of Oversized Factor on 0.1 THz Surface Wave Oscillator	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Plasma and Fusion Research	6. 最初と最後の頁 2406036 ~ 2406036
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1585/pfr.17.2406036	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 -

〔学会発表〕 計2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, Mao Aoki, Shingo Hamada, Tsubasa Kato, Masaya Ito
2. 発表標題 Effect of Oversized Factor on Multimode Radiation in 0.1-THz Surface-Wave Oscillator
3. 学会等名 International Toki Conference 30（国際学会）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 安中 裕大、小椋 一夫、青木 真生、加藤 翼、濱田 真吾
2. 発表標題 0.1 THz帯多重疑似プラズモンモードの電子ビームによる励起
3. 学会等名 第68回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2021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
---------	---------