

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 4 年 6 月 22 日現在

機関番号：13401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19K04509

研究課題名(和文) 共振器の多段化による超多周波数発振ジャイロトロンの研究

研究課題名(英文) Multi-frequency gyrotron with multi-cavity configurations

研究代表者

山口 裕資 (Yuusuke, Yamaguchi)

福井大学・遠赤外領域開発研究センター・助教

研究者番号：10466675

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：高周波ジャイロトロン空洞共振器を多段化することで、従来の単一共振器では得ることのできない、超多周波数発振を実現した。はじめに共振器を二段化した結果、単一共振器に比して、発振可能な共振器モードの数が倍増することがわかった。続いて、二段共振器による発振実験の結果を受けて共振器を三段化し、発振領域の更なる拡大を試みた。最終的に、三段共振器実験の結果、110 - 220 GHz の周波数範囲において、約 30% の周波数包含率を得た。この周波数可変機能の向上により、テラヘルツ光源としてのジャイロトロン汎用性が更に高まったと言える。

研究成果の学術的意義や社会的意義

テラヘルツ帯(0.1～10 THz)の電磁波の需要が高まる中、同周波数帯で高出力かつ連続発振可能な電子管(ジャイロトロン)に注目が集まりつつある。これまで、ジャイロトロンは単一の空洞共振器にて設計、運用されてきた。本研究では、ジャイロトロンに複数の共振器を組み込むことで、より多くの周波数での発振を可能とした。

これまででは、周波数の異なる電磁波を得るために、複数のジャイロトロンを用いる必要があったが、本研究の結果により、単一のジャイロトロンで多くの周波数の電磁波を供給できるようになる。これは、同周波数帯の電磁波の応用研究の促進に、大きく寄与するものである。

研究成果の概要(英文)： We have developed a high-frequency gyrotron that provides a large number of oscillation frequencies in the terahertz range. In this study, the number of oscillation modes (frequencies) has been increased by adopting a two-stage and then a three-stage cavity resonator in a gyrotron. The oscillation experiments showed that oscillation in many modes, which could not be obtained with a single resonator, was possible. 22 modes were observed in the two-stage resonator and 28 modes were observed in the three-stage resonator in the frequency range of 110 to 220 GHz. In addition, continuous frequency tunability was realized with backward wave oscillation, and the occupancy rate in the same frequency range was about 27% for the two-stage resonator and about 30% for the three-stage resonator. The output power is more than several watts making it applicable to a wide range of applications. This improvement in frequency tunability enhances the versatility of the gyrotron as a terahertz source.

研究分野：高周波工学

キーワード：テラヘルツ発振 超多周波数発振

1. 研究開始当初の背景

(1) テラヘルツ領域の波源開発について

テラヘルツ (THz) 領域の電磁波は、可視領域の光波と、目に見えない電波の間の周波数領域に存在し、両者の特徴である直進性と透過性を併せ持つ。その優位性から、通信、イメージング、物性研究、医療等への応用に、大きな期待が寄せられている。しかし、THz 波の発生と検出には課題が多く、開拓が遅れたことから、電磁波利用における谷間の領域 (THz ギャップ) と呼ばれてきた。

我々は、この THz ギャップを埋めるべく、同周波数帯で高出力かつ定常発振の可能な唯一の電子管であるジャイロトロンの研究開発を進めている。これまで、高周波数化と高出力化に加え、伝送に有利なガウスビーム出力や周波数調節を可能とするなど、機能の向上を実現してきた。近年は、外部機関との共同研究の下で、ジャイロトロンの実用化に注力している。特に、生体関連試料への THz 波の照射実験において、新しい現象が次々と観測されており [1-3]、ジャイロトロンの需要は年々増加している。これら新現象の発生機構を解明するためには、周波数や出力、偏波などの電磁波の特性を様々に設定して、被照射試料の応答を探る必要がある。

(2) ジャイロトロンの概要および開発状況

ジャイロトロンは、強磁場中に配置した真空管の内部で、電子ビームを生成・加速する電子管の一種である。図 1 に、ジャイロトロンの構造を模式的に示す。電子ビームを生成する電子銃は、電子放出帯を含む陰極 (カソード) と、電子を引き出す陽極 (アノード)、そして管軸方向へ電子ビームを加速する為の接地電極により構成される。磁場中で螺旋運動する電子ビームが、円筒状の空洞共振器において電磁波と結合する現象 (電子サイクロトロン共鳴メザ) を利用し、電磁波を発生させる。

高効率のジャイロトロン発振を実現するためには、螺旋運動における回転成分の割合 (速度ピッチ因子: $v_{\perp} / v_{\parallel}$) を大きくし、速度拡がり () を小さく抑える必要がある。 v_{\perp} が大きいと、発振効率が低下するだけでなく、電子ビームが磁気ミラー反射して共振器へ正常に入射しなくなる可能性もある。

空洞共振器内の電磁波は、電子のサイクロトロン周波数ならびに空洞の境界条件に強く影響を受け、ある特定の空間構造を持つもの (共振器モード) が強く励起される。そのため、電子ビームの共振器への入射径や速度ピッチ因子を調節し、励起するモードを変えることで、離散的ではあるが周波数を調節することができる。これまで、共振器内の磁場強度を 5.94 T ~ 9.71 T の範囲で調節することにより、161 ~ 265 GHz の範囲において約 10 GHz の間隔で発振周波数を変え、更に共振器モードをガウス分布に近い放射分布にて出力することに成功している [4]。

2. 研究の目的

一つの空洞共振器に励起しうるモードの数 (発振可能な周波数) は限られている。そのため、複数の空洞を軸方向に連結することで、励起可能なモードを増やせないかと考えた。本研究では、径の異なる二つあるいは三つの空洞を連結した共振器を導入し、その発振特性を調べることを目的とした。

3. 研究の方法

(1) 二段共振器の導入と発振実験

はじめに、径の異なる円筒空洞を軸方向に連結した二段共振器 (図 2-a) を製作し、ガウス分布へのモード変換器の無い、単純な構造を持つ直線型の管 (図 2-c) へ搭載して、発振実験を行った。電子ビームの電圧と電流を 15 kV、400 mA に設定し、可能な範囲で共振器内の磁場強度、ならびに電子ビームのパラメタ (入射径、速度ピッチ因子) を変えて、発振特性を調べた。その際、ジャイロトロン発振の有無は、焦電素子により検出した。発振周波数は、ハーモニックミキサを用いたヘテロダイン受信により低周波変換し、スペクトラムアナライザで測定した。また出力は、主に水負荷への吸収に伴う温度上昇を利用して測定した。出力が小さい場合には、テラヘルツ波に感度のあるパワーメータも利用した。

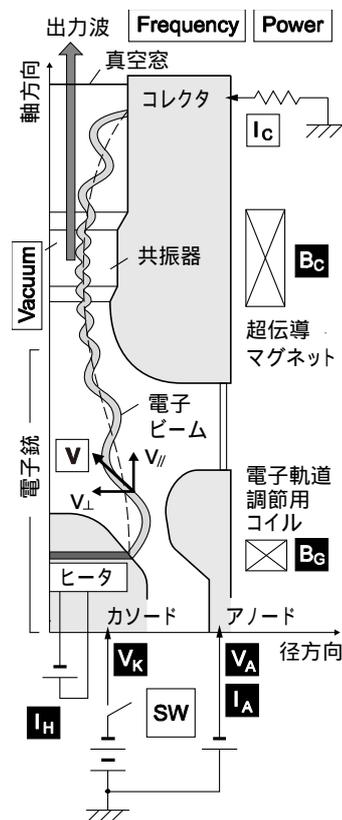


図 1. ジャイロトロン構造

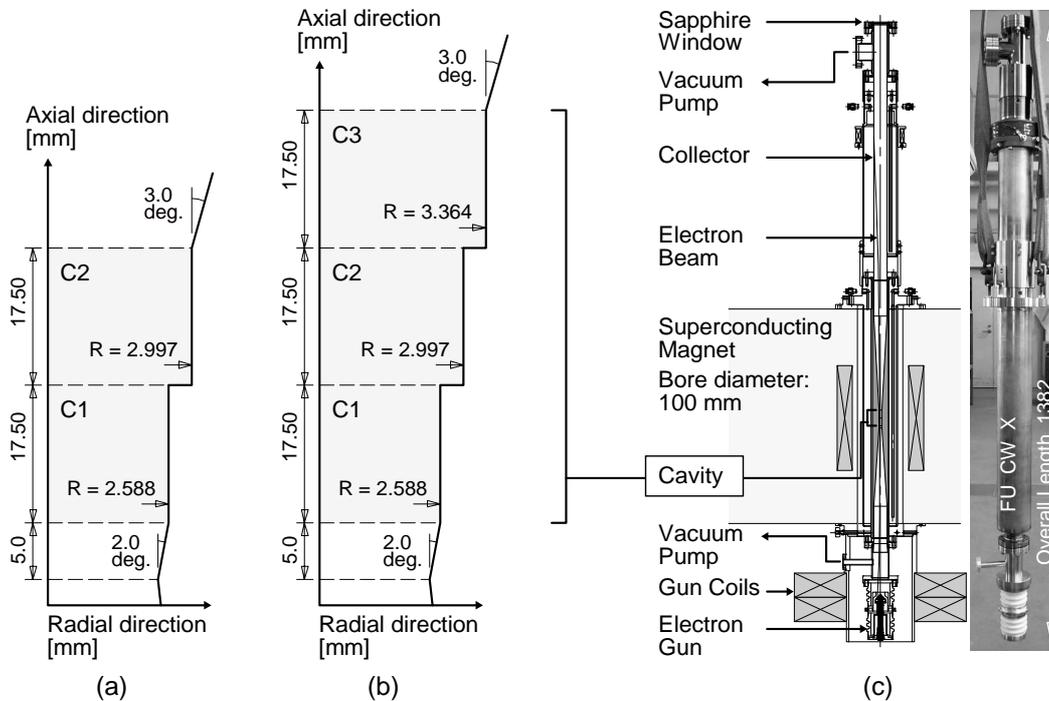


図 2 . 実験装置 (a) 二段共振器 , (b) 三段共振器 , (c) 直線型ジャイロトロン

(2) 共振器の三段化

二段共振器実験の結果をもとに、更なる多周波数化を狙って共振器の三段化を試みた。二段共振器の発振実験と対比するため、第一段 (C1)、第二段 (C2) の空胴形状を変えずに第三段 (C3) を追加した (図 2-b)。第三段: C3 は二段目までと同じ空胴長とし、二段共振器では発振しなかった周波数領域を埋める様に、電子ビームと結合可能なモード群を選択しつつ空胴の径を決定した。

4 . 研究成果

(1) 二段共振器実験の結果

図 3 に、二段共振器を用いたジャイロトロン発振実験の結果を示す。図の横軸は共振器内 (C1 と C2 の結合部) の磁場強度、縦軸は発振周波数を示す。図中、印は第一段 C1、印は第二段の空胴 C2 で発振したモードの周波数を表す (矢印記号により、対応する共振器モードの名称も付した)。また実線は、共振器内の磁場強度に対する電子サイクロトロン周波数を表している。図に示されるとおり、これまで単一の空胴では実現し得なかった、多数のモードでの発振が観測されている。

共振器内の磁場強度を 4 ~ 8 T の範囲で調節し、電子ビームの入射パラメータを最適化することで、110 ~ 220 GHz の範囲で 22 のモードの発振を同定した [2]。図中で隣接するモード間の、周波数の平均間隔は約 5 GHz 程度であった。加えて、後進波発振による周波数の連続可変領域が存在することもわかった。磁場の設定値により、前段 C1 と後段 C2 が異なるモードで同時に発振する場合もあるが、電子ビームの入射径と速度ピッチ因子を調節することで、ほぼ全てのモードを選択的に励起できる [3, 4]。

周波数の連続可変領域を含め、120 ~ 220 GHz の範囲で周波数包含率を求めると、30% 程度となった。また、単独発振が可能なすべての周波数において出力を計測したところ、28 W 以上を得られることがわかった [5]。

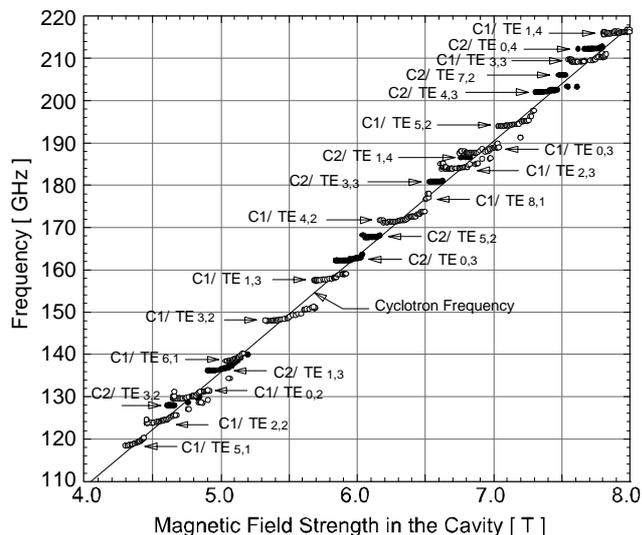


図 3 . 二段共振器実験の結果

(2) 三段共振器実験の結果

図 4 に、三段共振器を搭載したジャイロトロンが発振特性を示す。図の横軸は共振器内 (C2 と C3 の結合部) の磁場強度、縦軸は発振周波数を表す。図中の ○, □, △ は、それぞれ第一段 (C1), 第二段 (C2), 第三段 (C3) の空胴で発振したモードの周波数を示している。

電子ビームのパラメータを最適化した結果、110 ~ 220 GHz の周波数範囲において、計 28 (C1 で 11, C2 で 8, C3 で 9) の共振器モードの発振を観測した。第三段 C3 で発振したモードの後進波発振による連続周波数可変幅は 3.13 GHz であり、C3 の追加に伴う周波数包含率の上昇幅は、約 3% であった。

二段共振器実験と同様に、同じ磁場領域で同時発振するモードについて、各モードを選択的に励起できるかを調べたところ、C3 の 9 つのモードの内 6 つのモードの単独励振が可能であった。最後に、C3 の発振モードに対して出力を測定した結果、2 W 以上得られることがわかった。

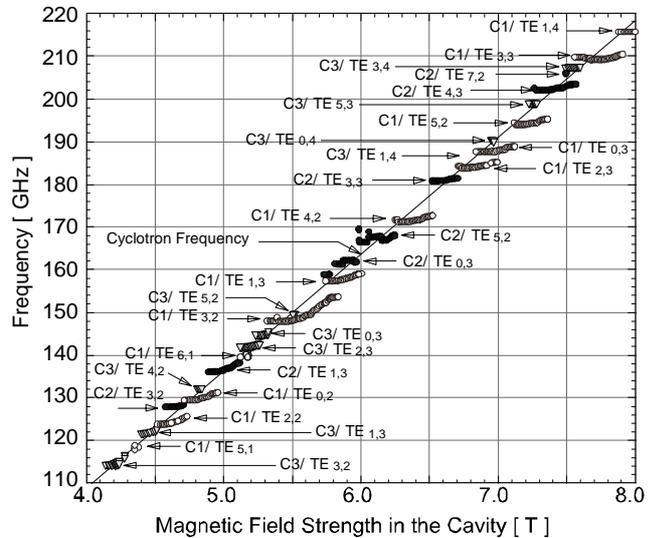


図 4 . 三段共振器実験の結果

(3) まとめ

高周波ジャイロトロン共振器を三段化し、単一の共振器では実現し得ない、多数のモードの発振を観測した。後進波発振による周波数の連続変化も得られ、110 ~ 220 GHz の範囲において約 30% の周波数包含率を実現した。出力は最低数 W あり、広範な用途へ適用可能である。今後、共振器の多段化、多段共振器に対応したモード変換器の開発により、さらに多くの周波数でガウス分布放射の可能な汎用管の実現が期待される。

< 引用文献 >

- [1] S. Yamazaki *et al.*, Scientific Reports **8**, 9990 (2018)
- [2] T. Kawasaki *et al.*, Biomedical Optics Express **11**, 5341 (2020)
- [3] Y. Tsunawaki *et al.*, J Infrared Milli Terahz Waves **42**, 1 (2021)
- [4] T. Tatematsu *et al.*, J Infrared Milli Terahz Waves **36**, 697 (2015)
- [5] Y. Yamaguchi *et al.*, IEEE Electron Device Letters **41**, 1241 (2020)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2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 0件）

1. 著者名 Yamaguchi Yuusuke, Ogura Taisei, Ueyama Tatsuya, Maeda Yuto, Takayama Kyoya, Sasano Junki, Fukunari Masafumi, Tatematsu Yoshinori, Saito Teruo	4. 巻 41
2. 論文標題 Super Multi-Frequency Oscillations at Fundamental Harmonics With a Complex Cavity Gyrotron	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEEE Electron Device Letters	6. 最初と最後の頁 1241 ~ 1244
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/LED.2020.3000640	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 Yamaguchi Yuusuke, Watanabe Masato, Mitsumoto Ryota, Ogura Taisei, Fukunari Masafumi, Tatematsu Yoshinori, Saito Teruo	4. 巻 1
2. 論文標題 Observation of Multi-Frequency Oscillations at Second-Harmonics with a Two-Cavity Sub-THz Gyrotron	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proc. of 2020 45th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz)	6. 最初と最後の頁 P109
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/IRMMW-THz46771.2020.9370590	査読の有無 無
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11件（うち招待講演 0件/うち国際学会 4件）

1. 発表者名 Yuusuke Yamaguchi, Masato Watanabe, Ryota Mitsumoto, Taisei Ogura, Masafumi Fukunari, Yoshinori Tatematsu and Teruo Saito
2. 発表標題 Observation of Multi-Frequency Oscillations at the Second-Harmonic with a Two-Cavity Sub-THz Gyrotron
3. 学会等名 45th International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves, 2020, P109（国際学会）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Y. Tatematsu, Y. Yamaguchi, M. Fukunari Y. Ishikawa, S. Mitsudo and T. Saito
2. 発表標題 Recent Progress on Development and Applications of Gyrotrons at FIR UF
3. 学会等名 The 8th International Workshop on Far-Infrared Technologies 2021（国際学会）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 M. Watanabe, Y. Yamaguchi, R. Kani, R. Kamiya, K. Nakagawa, S. Ito, R. Okamoto, M. Fukunari and Y. Tatematsu
2. 発表標題 Design of a Three-Stage-Cavity for Super Multi-Frequency Oscillations in a 100 - 200 GHz Gyrotron
3. 学会等名 The 8th International Workshop on Far-Infrared Technologies 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 可児怜也, 渡邊将翔, 山口裕資, 福成雅史, 立松芳典
2. 発表標題 100 ~ 200 GHz 帯の超多周波数発振ジャイロトロンにおける共振器の三段化の検討
3. 学会等名 2020年度 日本物理学会 北陸支部 定例学術講演会 2020/12/05 B-a9
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 石岡はるか, 山口裕資, 福成雅史, 立松芳典
2. 発表標題 高周波ジャイロトロンの組立構造および排気性能の改善設計
3. 学会等名 2020年度 日本物理学会 北陸支部 定例学術講演会 2020/12/05 B-a7
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 渡邊将翔, 山口裕資, 可児怜也, 神谷亮汰, 中川和輝, 伊藤慎悟, 岡本瞭太郎, 福成雅史, 立松芳典, 斉藤輝雄
2. 発表標題 100 ~ 200 GHz 帯の超多周波数発振の実現を目指した三段共振器ジャイロトロンの設計
3. 学会等名 プラズマ・核融合学会 第37回年会 2020/12/03 03Ca05
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 立松芳典, 伊藤慎悟, 山口裕資, 福成雅史
2. 発表標題 2 段共振器ジャイロトロン用モード変換器の開発
3. 学会等名 プラズマ・核融合学会 第37回年会 2020/12/01 01Cp02
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yoshinori Tatematsu, Kyoya Takayama, Yuto Maeda, Tatsuya Ueyama, Taisei Ogura, Kazuki Nakagawa, Ryota Kamiya, Masafumi Fukunari, Yuusuke Yamaguchi, and Teruo Saito
2. 発表標題 Development of a Second Harmonic Multi-Frequency Gaussian Beam Output Gyrotron FU CW GV11
3. 学会等名 44th International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves (2019/09/01 - 06) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 山口裕資, 三ツ本涼太, 渡邊将翔, 小椋大聖, 福成雅史, 金子大輝, 神谷亮汰, 中川和輝, 上山達也, 立松芳典, 齊藤輝雄
2. 発表標題 超多周波数共振ジャイロトロンの実現に向けた二段共振器の導入
3. 学会等名 第28回(2019年度)日本赤外線学会研究発表会(2019/11/14 - 15)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 山口裕資, 福成雅史, 小椋大聖, 渡邊将翔, 三ツ本涼太, 金子大輝, 上山達也, 中川和輝, 立松芳典, 齊藤輝雄
2. 発表標題 二段共振器ジャイロトロンにおける二次高調波の超多周波共振の観測
3. 学会等名 第36回プラズマ・核融合学会 年会(2019/11/29 - 12/02)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 三ツ本涼太, 山口裕資, 小椋大聖, 福成雅史, 渡邊将翔, 金子大輝, 上山達也, 神谷亮汰, 中川和輝, 立松芳典, 斉藤輝雄
2. 発表標題 二段共振器搭載ジャイロトロンにおける 200-400 GHz帯の二次高調波超多周波数発振
3. 学会等名 2019年度 日本物理学会 北陸支部会 定例学術講演会 (2019/12/07)
4. 発表年 2019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
研究協力者	立松 芳典 (Tatematsu Yoshinori)	福井大学・遠赤外領域開発研究センター・教授 (13401)	
研究協力者	福成 雅史 (Fukunari Masafumi)	福井大学・遠赤外領域開発研究センター・助教 (13401)	
研究協力者	斉藤 輝雄 (Saito Teruo)	福井大学・遠赤外領域開発研究センター・教授 (13401)	

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
---------	---------