

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 2 年 6 月 4 日現在

機関番号：13401

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2017～2019

課題番号：17K05725

研究課題名（和文）広周波数帯域でガウスビーム出力するサブテラヘルツ帯ジャイロトロンの実証

研究課題名（英文）Demonstration of a sub-terahertz band gyrotron that radiates Gaussian beams in a wide frequency range

研究代表者

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

研究者番号：50261756

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,500,000円

研究成果の概要（和文）：2次高調波マルチ周波数ガウスビーム発振ジャイロトロン管を開発した。同一のモード変換器でガウスビームに変換できる9つの2次高調波を選定し、発振試験を行い、そのうちの8つのモード及び他の1つあわせて9つの周波数でガウスビーム出力できることを実証した。このうち4つの周波数では2次高調波単独発振が得られた。また、同じジャイロトロンで10の基本波モードを観測し、そのうち5つの周波数帯について周波数が連続的に変化することを実証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

広周波数帯でガウスビーム出力するジャイロトロンが実現可能であることを示した。これにより、周波数のファインチューニングが可能になると同時に、いろいろな試料に対して適用が可能になるため、分光分野をはじめとして、多くの分野での周波数依存を調べる学術研究にジャイロトロンを応用できるようになった。また、一般的に電磁波を用いた研究において、空間分解能は波の波長程度であるので、波長を小さくする、すなわち周波数を大きくすることで、空間分解能を改善できる。このため、サブテラヘルツ帯2次高調波発振の高周波数ジャイロトロン応用は、広い分野の学術研究の進展につながる。

研究成果の概要（英文）：A second harmonic multi-frequency Gaussian beam output gyrotron has been developed. Nine second harmonic modes that can be converted into a Gaussian beam with the same mode converter were selected. An oscillation test was performed and it was demonstrated that a Gaussian beam can be output in eight modes out of the nine and one more. Single mode oscillations of the second harmonics were obtained at four frequencies. In addition, ten fundamental wave modes were observed with the same gyrotron, and it was proved that the frequency could be continuously changed in five frequency bands.

研究分野：プラズマ理工学

キーワード：マルチ周波数ジャイロトロン 広周波数発振 2次高調波発振 サブテラヘルツ ガウスビーム出力

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

ジャイロトロンは、元々核融合プラズマの加熱用光源としてメガワット級の大出力を目標に開発されてきた。それに対し、福井大学では、分光分野等における学術的応用課題のための光源として、サブテラヘルツ波帯のワットからキロワットの中程度の出力のジャイロトロンを開発してきた。いろいろな学術分野に応用するには、1台で広い周波数帯をカバーし、ガウスビームを出力するジャイロトロン開発が必要である。

ジャイロトロンは共振器内の磁場強度を変えれば、共振する電磁波モードを変えることができ、発振する周波数も変えられるが、共振器壁の境界条件のため発振する周波数は離散的である。しかし、応用課題の中には周波数のチューニングが要請されるものもあり、離散的な周波数しか出せないと応用には不利であった。これに対し、ジャイロトロン発振から磁場強度をあげると、ジャイロ後進波発振に連続的につながり、その結果発振周波数を連続的に変化できる場合があることを福井大の実験で実証した[T. H. Chang et al., Journal of Applied Physics, **105**, 063304 (2009)]。それ以後、周波数連続可変ジャイロトロンの研究が世界的に盛んになった。

ジャイロトロンからの出力を応用しやすいガウスビームにジャイロトロン内で変換して出力するためのブラゾフアンテナは古くから知られている。円形導波管内の電磁波はある点で壁に向かう波と壁から反射した波の2つの波の足し合わせで表現できる。このため、発振モードに応じて導波管壁にうまく穴をあけると、壁に向かう波が穴から通り抜け、それらを準放物鏡を用いて反射させることで平行ビームが得られる。この平行ビームを複数枚の鏡でガウスビームに変換するモード変換器を内蔵するジャイロトロンが現在主流となっている。しかし、このように特定の発振モード(周波数)を対象に設計されるガウスビーム出力のジャイロトロンでは、広い分野への応用が困難であった。

2. 研究の目的

本研究では1台のジャイロトロンで広周波数帯域でガウスビーム出力することを実証することが目的であり、具体的には以下の2項目を実証する。

- (1) 1台のジャイロトロンで2次高調波発振で複数(～8)の周波数でガウスビーム出力できることを実証する。
- (2) さらにこのジャイロトロンで複数(～4)の基本波発振モード(周波数)に対して、周波数が連続的に変化できることを実証する。

3. 研究の方法

既存の8T超伝導マグネットを用いるとし、これに合わせてジャイロトロンの最高周波数を2次高調波発振で～420 GHzと設定する。発振モード群は1つのモード変換器でガウスビームに変換できる組み合わせを選ぶ。そのためには、導波管内のCaustic面の半径 R_{cau} が近いモード群を選ばよ。選んだモード群に対する共振器形状を決定する。また、発振周波数を計算できる自己無撞着コードを用いて、磁場強度による周波数変化を計算し、複数のモードで周波数が連続的に変化できる共振器長を決める。共振器の製作は福井大学で行う。選んだモード群に対してガウスビームに変換するモード変換器を設計する。モード変換器は、通常1つのモードを対象に設計されるが、 $TE_{m,n}$ モードの固有値を $\omega_{m,n}$ として、 $m/\omega_{m,n}$ の値が等しいとき R_{cau} は等しく、円形導波管の中での波の振る舞いは同じになる。そのため、ある1つのモードに対して設計されたモード変換器は $m/\omega_{m,n}$ の値が近い他のモードでも、ガウスビームに変換できる。モード変換器は福井大学で製作する。

ガウスビーム出力ジャイロトロン管を製作する。電子銃は2次高調波発振しやすいようにカソード径6 mmとする。電磁波をとり出すための真空窓は、サブテラヘルツ帯の電磁波を透過するサファイアを用いるが、1枚のサファイア板の透過率は周波数に依存する。このため、ジャイロトロン内で大きな出力で発振しても、周波数によっては真空窓の反射率が大きく、真空窓からの電磁波の出力が低下することもあるため、窓を2枚のサファイア板で構成し、板間距離を変えられるようにし、干渉計の原理で周波数に応じて距離を調整することによりすべての周波数に対して透過率をほぼ1にできる。

4. 研究成果

マルチ周波数発振ジャイロトロンが発振モードの選定を行った。福井大学での過去のジャイロトロン実験において発振した経験のある2次高調波モードの中から、1つのモード変換器でガウスビームに変換が可能なモード群を選んだ。その結果、 TE_{85} 、 TE_{56} 、 TE_{75} 、 TE_{65} 、 TE_{55} 、 TE_{45} 、 TE_{64} 、 TE_{54} 、 TE_{44} の9つのモードを選定した。こ

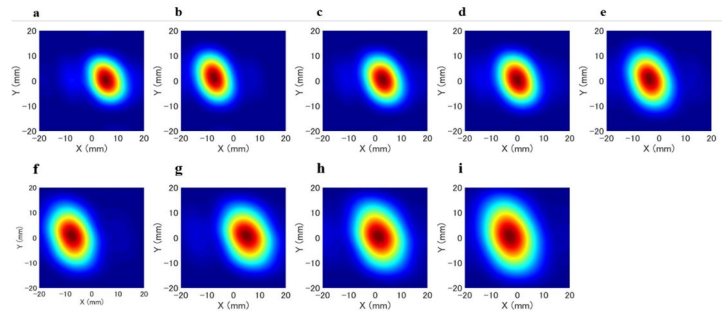


図1 9つの設計モードに対して計算した放射パターン: a $TE_{8,5}$, b $TE_{5,6}$, c $TE_{7,5}$, d $TE_{6,5}$, e $TE_{5,5}$, f $TE_{4,5}$, g $TE_{6,4}$, h $TE_{5,4}$, i $TE_{4,4}$

れらを発振できる共振器形状を決定した。また、これらのすべてのモードに対して、共振器に入射する電子ビームの速度分布拡がりができるだけ小さくなるような電子銃を設計した。上の設計モードに対してジャイロトロン内でガウスビームに変換できるモード変換器の形状を検討し決定した。図1にジャイロトロン軸から500 mmの位置での9つの設計モードから変換されるビームパターンの計算結果を示す。すべてが中心にピークを持つビーム形状に変換されている。ビームの出射方向はモードにより異なるが、すべて窓の法線から0.5度以内である。窓から出る放射ビームの方向は、モードの $m/m_{,n}$ の値と相関がある。また窓からのビーム出射方向を変えるための内蔵ミラーを動かす機構を設計し、ジャイロトロンの設計を完了した。

ジャイロトロン管を製作し、管の発振実験を行った。発振効率に大きく影響するジャイロトロンの位置調整を行った。ジャイロトロンの発振効率は、共振器に入射する電子が電磁波に結合する度合いで決まり、結合に最適な電子の入射半径が存在する。理想的には円環状の電子ビームは共振器軸に対して軸対称に入射すると考えられるが、実際には共振器軸(ジャイロトロン軸)と磁気軸を一致させるようにジャイロトロンを設置することは非常にむずかしい。このため、ジャイロトロン位置をマグネットに対して微調できるXYステージを導入し、XYステージによりジャイロトロンを水平面内で2 mm四方動かし、発振信号強度分布を測定した。その結果、あるジャイロトロン位置で発振信号は最大となり、その点を中心として、信号強度分布は同心円となった。ジャイロトロン軸と磁気軸にずれがあるときの電子と電磁波の結合の大きさを、理論モデルを用いて計算した結果、実験結果をうまく再現する計算結果を得た。このことは、信号強度が最大の点がジャイロトロン軸と磁気軸が一致しているときであることを裏付けた。

2軸が一致する状態で、周波数測定を行った結果、9つの2次高調波設計モードのうち8つのモードでの発振を観測した(図2)。これらの8つのモードのうち、 TE_{85} 、 TE_{65} および TE_{54} の3つのモードは同じ条件で他の基本波および2次高調波の周波数が観測されず、単一発振であった。次に設計モードの周波数が得られた条件で、放射ビームパターンの計測を行った(図3)。図1の結果から発振モードによりビームの放射方向は決まっているので、ビームの位置から発振モードを同定できる。モード同定の結果を図3に示す。周波数測定で単独発振であった TE_{85} 、 TE_{65} および TE_{54} モードについては、ほぼ窓中心から1つのビームが出射されており、パターン測定からも2次高調波の単独発振といえる。

TE_{56} 、 TE_{55} および TE_{45} モードについては、複数のビームが観測されたことより、2次高調波に加えて、基本波も同時発振していることがわかる。しかしながら、基本波のビームとは出射する方向が異なるため、方向の違いを利用して2次高調波モードのビームのみをとりだすことは可能である。直線管では、基本波モードと2次高調波モ

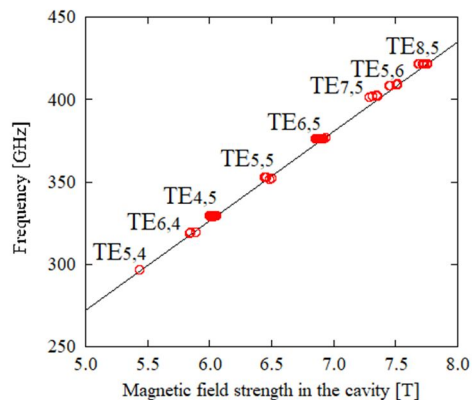


図2 周波数の測定結果。直線はサイクロトロン周波数の2倍を表す。

ードが同時発振する場合、その分離は容易ではないが、モード変換器内蔵管では、放射ビーム方向の違いにより、2次高調波ビームを基本波ビームから分離できることを実証した。また、周波数による電磁波出力の窓による減衰を防ぐために採用した二重窓で、その窓間距離を調節し、周波数(モード)による窓透過率の違いを利用して、基本波との同時発振の場合も、2次高調波ビームのみ窓の透過率が高い条件にすることで、ほとんど2次高調波ビームの単一モード発振に近い出力を得ることができた。

一方、TE₇₅およびTE₆₄モードについては、周波数測定では観測されたが、パターン計測では基本波のパターンが強く、ビームを同定できなかった。

発振出力の測定を行った結果、2次高調波の単独発振が得られたTE₈₅、TE₆₅、TE₅₄モードではそれぞれ最高30、77、35 Wを得た。また、設計モード以外にもTE₂₆モードの2次高調波を観測した。このモードは単独発振であり、このジャイロトロンにおいて合計4つの単独発振する2次高調波モードを得られた。

以上の結果をJournal of Infrared, Millimeter and Terahertz Wavesに投稿しその掲載が決まった。

2つ目の目的である基本波発振の測定を行った。2次高調波発振を目的として開発した管であるが、10の基本波モードを観測し、そのうち5つのモードに対して周波数連続可変を観測した。そのうちの2例を図4に示す。

以上のように当初目的である1台のジャイロトロンで2次高調波発振で9つの周波数でガウスビーム出力すること、さらにこのジャイロトロンで5つの基本波発振モード(周波数)に対して、周波数が連続的に変化できることを実証した。

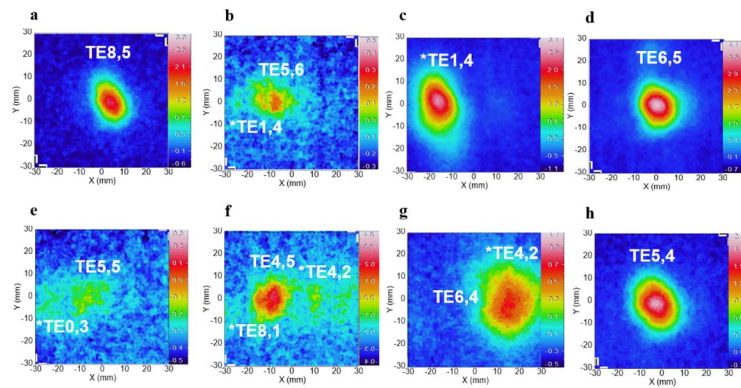


図3 8つの磁場強度での放射パターン計測結果: a $B = 7.6950$ T, b $B = 7.4537$ T, c $B = 7.2780$ T, d $B = 6.8650$ T, e $B = 6.4530$ T, f $B = 6.0180$ T, g $B = 5.8777$ T, h $B = 5.4337$ T。図中の文字は同定したモードを示している。(*は基本波モード)

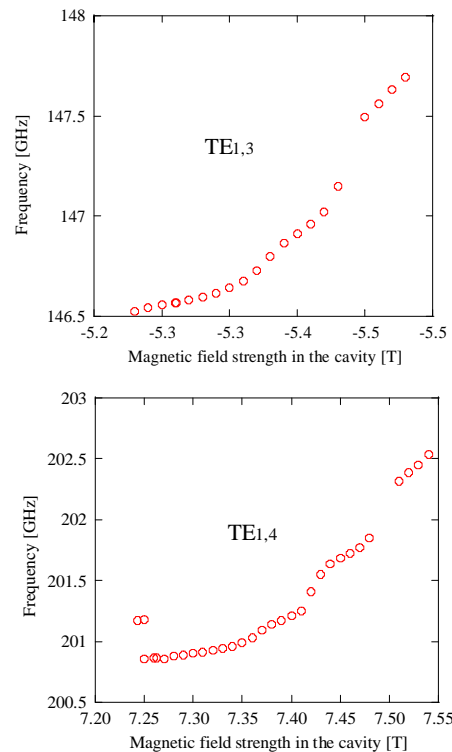


図4 基本波 TE_{1,3} TE_{1,4} モードの周波数測定結果。上図の磁場強度のマイナスは、磁場方向を反転していることを示す。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計8件（うち査読付論文 6件 / うち国際共著 3件 / うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Fukunari Masafumi, Nusinovich Gregory S., Tatematsu Yoshinori, Saito Teruo, Yamaguchi Yuusuke	4. 巻 46
2. 論文標題 Saturation Effects in Frequency Pulling of Gyrotrons Operating in High-Order Axial Modes	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Plasma Science	6. 最初と最後の頁 2848 ~ 2855
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TPS.2018.2849379	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 該当する

1. 著者名 Tatematsu Y.	4. 巻 195
2. 論文標題 Recent progress in development and application of sub-THz gyrotrons in University of Fukui	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 EPJ Web of Conferences	6. 最初と最後の頁 01018 ~ 01018
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1051/epjconf/201819501018	査読の有無 無
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 Tatematsu Yoshinori, Yamaguchi Yuusuke, Fukunari Masafumi, Takayama Kyoya, Maeda Yuto, Ueyama Tatsuya, Ogura Taisei, Nakagawa Kazuki, Kamiya Ryota, Ito Shingo, Okamoto Ryotaro, Saito Teruo	4. 巻 41
2. 論文標題 Development of Gyrotron FU CW GVII: a Second Harmonic, Multifrequency Gyrotron that Radiates Gaussian Beams	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves	6. 最初と最後の頁 576 ~ 589
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10762-020-00681-7	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28件（うち招待講演 3件 / うち国際学会 11件）

1. 発表者名 Yoshinori Tatematsu, Kyoya Takayama, Yuto Maeda, Tatsuya Ueyama, Taisei Ogura, Masafumi Fukunari, Yuusuke Yamaguchi, and Teruo Saito
2. 発表標題 Development of a Second Harmonic Multi-Frequency Gyrotron with Gaussian Beam Output
3. 学会等名 43rd International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Y. Tatematsu
2. 発表標題 Recent progress in development and application of sub-THz gyrotrons in University of Fukui
3. 学会等名 3rd International Conference Terahertz and Microwave Radiation: Generation, Detection and Applications (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 上山達也, 高山京也, 中川和輝, 前田悠斗, 小椋大聖, 神谷亮汰, 笹野準貴, 若林優次, 福成雅史, 山口裕資, 斉藤輝雄, 立松芳典
2. 発表標題 二次高調波多周波数ガウスビーム出力ジャイロトロンの発振特性評価
3. 学会等名 プラズマ・核融合学会第35回年会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 高山京也, 立松芳典, 上山達也, 中川和輝, 前田悠斗, 小椋大聖, 神谷亮汰, 笹野準貴, 若林優次, 山森英智, 峠正範, 青山直樹, 川崎孝俊, 山口裕資, 福成雅史, 斉藤輝雄
2. 発表標題 二次高調波多周波数ガウスビーム出力ジャイロトロンのモード変換器設計及びビーム形状計測
3. 学会等名 プラズマ・核融合学会第35回年会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 立松芳典
2. 発表標題 サブミリ波ジャイロトロン開発と応用
3. 学会等名 プラズマ・核融合学会第35回年会
4. 発表年 2018年

1 . 発表者名 Y. Tatematsu, Y. Yamaguchi, M. Fukunari, K. Takayama, Y. Maeda, T. Ogura, T. Ueyama, K. Nakagawa, R. Kamiya, S. Sasano, Y. Wakabayashi and T. Saito
2 . 発表標題 Development of sub THz gyrotrons in wide frequency band in FIR UF
3 . 学会等名 The 7th International Workshop on Far-Infrared Technologies (招待講演) (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 T. Ueyama, Y. Tatematsu, Y. Yamaguchi, K. Takayama, Y. Maeda, T. Ogura, K. Nakagawa, R. Kamiya, J. Sasano, Y. Wakabayashi, M. Fukunari, T. Saito
2 . 発表標題 Development of a Second Harmonic Multi-Frequency Gyrotron with Gaussian Beam Output, Gyrotron FU CW GVII
3 . 学会等名 The 7th International Workshop on Far-Infrared Technologies (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 M. Fukunari, N. Ryskin, A. Rozhnev, K. Takayama, Y. Maeda, M. Iizawa, Y. Yamaguchi, Y. Tatematsu, and T. Saito
2 . 発表標題 Study on Starting Current and Oscillation Frequency of a Multi-Frequency Tunable Gyrotron
3 . 学会等名 Strong Microwaves and Terahertz Waves: Sources and Applications (国際学会)
4 . 発表年 2017年

1 . 発表者名 Yoshinori Tatematsu, Moe Iizawa, Yuto Maeda, Kyoya Takayama, Masafumi Fukunari, Yuusuke Yamaguchi, Teruo Saito
2 . 発表標題 Experimental Demonstration of Multi-Frequency-Band Frequency Tunability with Gyrotron FU CW XA
3 . 学会等名 42nd international conference on infrared, millimeter and terahertz waves (国際学会)
4 . 発表年 2017年

1 . 発表者名 Yuusuke Yamaguchi, Yoshinori Tatematsu, Kyoya Takayama, Moe Iizawa, Yuto Maeda, Masafumi Fukunari, Teruo Saito
2 . 発表標題 Frequency Step-Tuning Experiment of a Second-Harmonic Gyrotron from 270 to 420-GHz
3 . 学会等名 42nd international conference on infrared, millimeter and terahertz waves (国際学会)
4 . 発表年 2017年

1 . 発表者名 Yuusuke Yamaguchi, Yoshinori Tatematsu, Yuto Maeda, Kyoya Takayama, Tatsuya Ueyama, Taisei Ogura, Masafumi Fukunari, Teruo Saito
2 . 発表標題 Development of Magnetron-Injection Gun for Sub-THz Second-Harmonic Multi-Frequency Gyrotron with Gaussian Beam Output
3 . 学会等名 Plasma Conference 2017
4 . 発表年 2017年

1 . 発表者名 Y. Maeda, Y. Yamaguchi, K. Takayama, M. Fukunari, T. Ueyama, T. Ogura, Y. Tatematsu, and T. Saito
2 . 発表標題 Evaluation of Stable Operating Conditions for Sub-THz Second-Harmonic Multi-Frequency Gyrotron with Gaussian Beam Output
3 . 学会等名 Plasma Conference 2017
4 . 発表年 2017年

1 . 発表者名 K. Takayama, Y. Tatematsu, Y. Yamaguchi, Y. Maeda, T. Ueyama, T. Ogura, M. Fukunari, and T. Saito
2 . 発表標題 Mode selection and Gaussian beam conversion for Sub-THz Second Harmonic Multi-Frequency Gyrotron with Gaussian Beam Output
3 . 学会等名 Plasma Conference 2017
4 . 発表年 2017年

1. 発表者名 上山達也, 小椋大聖, 前田悠斗, 高山京也, 福成雅史, 山口裕資, 立松芳典, 斉藤輝雄
2. 発表標題 270 ~ 420 GHz二次高調波多周波数ガウスビーム出力ジャイロトロンの実現に向けた発振領域の評価
3. 学会等名 2017年度日本物理学会北陸支部定例学術講演会
4. 発表年 2017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 GVII
3. 学会等名 44th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 上山達也, 中川和輝, 伊藤慎悟, 岡本瞭太郎, 福成雅史, 山口裕資, 斉藤輝雄, 立松芳典
2. 発表標題 二次高調波多周波数ガウスビーム出力ジャイロトロン電子ビーム入射位置最適化による発振出力の向上
3. 学会等名 プラズマ・核融合学会第36回年会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 中川和輝, 上山達也, 伊藤慎吾, 岡本瞭太郎, 福成雅史, 山口裕資, 斉藤輝雄, 立松芳典
2. 発表標題 二次高調波多周波数ガウスビーム出力ジャイロトロンにおける二重窓を用いた二次高調波モード出力の抽出
3. 学会等名 プラズマ・核融合学会第36回年会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 伊藤慎悟, 上山達也, 中川和輝, 岡本瞭太郎, 福成雅史, 山口裕資, 立松芳典, 齊藤輝雄
2. 発表標題 Gyrotron FU CWG におけるジャイロトロン管軸位置調整による発振出力の向上
3. 学会等名 2019年度日本物理学会北陸支部 定例学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 立松芳典
2. 発表標題 遠赤センターでの取り組み：現状と展望（ジャイロトロン開発関係）
3. 学会等名 第1回高出力遠赤外光・分子物質科学研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 立松芳典
2. 発表標題 福井大学におけるジャイロトロンの開発と応用
3. 学会等名 レーザー学会学術講演会第40回年次大会
4. 発表年 2020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	齊藤 輝雄 (Saito Teruo)	福井大学・遠赤外領域開発研究センター・特命教授 (13401)	

6. 研究組織（つづき）

	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	山口 裕資 (Yamaguchi Yuusuke)	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	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)	