

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 5 年 6 月 26 日現在

機関番号：12101

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2022

課題番号：19K03789

研究課題名(和文)固有振動を利用した広帯域大電力ミリ波帯高速スイッチの開発

研究課題名(英文) Development of broadband high power millimeter wave fast switching device using natural vibrations

研究代表者

三枝 幹雄 (Saigusa, Mikio)

茨城大学・理工学研究科(工学野)・教授

研究者番号：10292476

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：核融合プラズマの電子サイクロトロン電流駆動によるMHD不安定性抑制に有効な、大電力ミリ波帯高速スイッチの開発を行なった。その原理は円形コルゲート導波管で3角形のリングを作り、入出力部のX字導波管にはC面カットサファイアーフミラーを設置し、60度マイターバンド部の反射鏡を高速振動させ、ミリ波出力を高速に切り替える。まず、反射鏡をスピーカーと同じ原理の小型振動発生器で振動させ、300 Hzまでの切替えを確認した。次に4個の積層圧電アクチュエータで直径108mm厚さ2 mmの反射鏡を固有振動周波数付近で振動させ、170 GHz帯の低電力ミリ波を3.4 kHzの高速で切り替えた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

トカマク型核融合炉の閉じ込め性能を劣化させる不安定性の一つに新古典ティアリングモードがある。モードの抑制には、磁気島中心への局所的な電子サイクロトロン電流駆動が有効であるが、磁気島は数kHzで高速回転しており、従来はこれに同期してミリ波源であるジャイロトロンをデューティ50%でon/offすることでモードを抑制してきた。しかしジャイロトロン立ち上げ時に磁場と高圧電源のヒステリシスを利用したモード競合の抑制が高効率運転には有効であり、高速のon/off制御は適さない。今回開発した固定周波数の高速スイッチがあれば、2アンテナ間を高速切替することで従来の2倍の安定化効果が期待できる。

研究成果の概要(英文)：An electron cyclotron current drive (ECCD) is useful tool for controlling MHD instabilities with pulse modulated gyrotron operations. Several types of fast directional switch (FADIS) using frequency modulation were proposed for improving a stabilizing efficiency of MHD instabilities. However, the optimized operation of high power gyrotron demands the specified start-up scenario for suppressing mode competitions, so that the pulse modulated operation and the frequency modulation should be avoided.

A new fast directional switch for high power millimeter waves using a natural vibration of a reflector was proposed for an electron cyclotron current drive system of a fusion experimental reactor. The principle is the triangle ring resonator of circular corrugated waveguides with a vibration reflector driven by four piezoelectric actuators around the natural frequencies. The switching frequency was obtained up to 3.4 kHz at a millimeter wave frequency of 170 GHz in low power test.

研究分野：核融合プラズマ工学

キーワード：核融合
ミリ波 新古典ティアリングモード 電子サイクロトロン電流駆動 ジャイロトロン 高速スイッチ

1. 研究開始当初の背景

トカマク型核融合炉ではプラズマ圧力の上昇により新古典ティアリングモード(NTM)の発生と閉じ込めの劣化が予測されており、その安定化には磁気島内部への局所的な電子サイクロトロン電流駆動(ECCD)が有効である事が理論と実験で確認されている[1]。安定化効率には磁気島のO点に電流駆動する場合が高く、X点に電流駆動すると逆に不安定になる。この磁気島は数kHz-数十kHzで高速回転している為、従来はミリ波の電子発振管であるジャイロトロンの高圧電源を高速でon/off制御する事でO点付近の電流駆動を実現してきた。しかし、ドイツのシュツットガルト大学とロシアの応用物理学研究所の共同研究グループは、反射型回折格子と複数の反射鏡を組み合わせた大電力ミリ波帯スイッチを開発し、ジャイロトロン周波数変調で近接する2周波数(数十MHz程度)を高速に切り替えることにより、電磁ビームの高速切替えに成功した[2]。これにより2つのアンテナ間で高速で切替えれば常に磁気島O点への入射が可能になるが、周波数変調によるジャイロトロン発振効率の低下が避けられなかった[3]。

一方、近年トカマク型核融合炉のECCDシステムでは、様々な磁場配位に対応した複数周波数での発振が求められており、ドイツのマックスプランク研究所のASDEX-Uでは105GHzと140GHz、量子科学研究開発機構のJT-60SAの2周波数ジャイロトロンでは110GHzと138GHzで出力1MW、100秒が報告されており、それに伴って広帯域伝送システムが必要となっている[4]。

本代表者のグループは、通信用光スイッチの原理を応用した周波数変調型大電力ミリ波高速スイッチを独自に提案・設計・製作し、低電力での広帯域特性試験および大電力での耐電力試験を行ってきた[5]。図1に我々が開発した高速スイッチの原理を示す。円形コルゲート導波管から入力されたHE₁₁モードの高周波Pは、共振しない周波数では出力1からP₂が、共振周波数では出力2からP₄が出力される。共鳴周波数の周期fはc/Lで与えられる(L:リング共振器の周長、c:真空中の光速)。fはジャイロトロン発振開始時の共振空洞の熱膨張による周波数変動(約200-300MHz)以上が望ましく、試作器の共振周波数周期は約460MHzと世界最高値を達成した[5]。次に、リング共振器の共振周波数の温度依存性を利用し、切り替え周波数の調整機能を付加し、図2に示すように大電力試験により明確な切り替えを確認した[6]。さらに、周波数変調を用いない振動鏡による高速切り替えスイッチを提案し、図3に示すように小型振動発生器により2枚のミラーを同期させて振動させることでリング共振器の周長を変化させ600Hzまでの切り替えを確認した。ただ、通常の振動機構では非常に大きな加速度を必要とするため、kHzオーダーの切り替えが困難であることが明確となった。また、振動鏡の冷却と導波管内の真空保持の構造設計が困難なことが判明した。

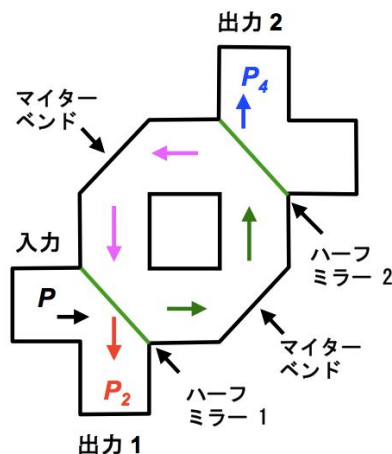


図1 高速スイッチの原理

そのため本研究では、機械的共振により振動鏡の振幅が共振のQ値倍になることを利用し、世界で初めて振動鏡の固有振動を用いた数kHzの高速切り替えが可能高速スイッチの開発を目指した。

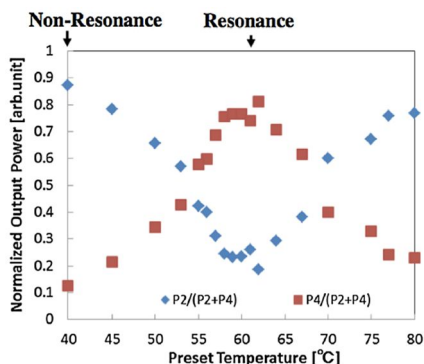


図2 温度制御による切り替え特性

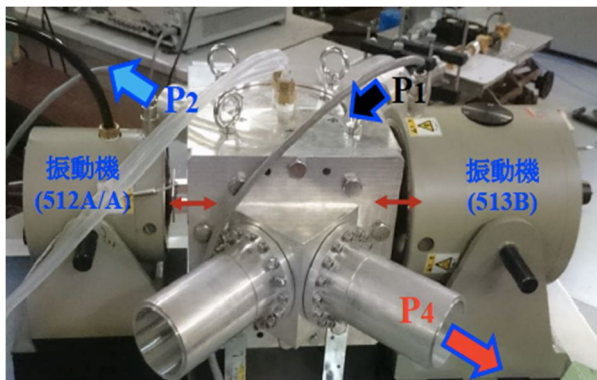


図3 2振動鏡による固定周波数での切り替え試験

2. 研究の目的

世界で初めての固定周波数型大電力ミリ波帯高速スイッチをトカマク実験の使用に耐えるレベルまで完成させることが目的である。この研究の独創性は、マイターバンドを複数組み合わせたリング共振器を、金属ブロックに3本の円形コルゲート導波管の溝を切ることによりコンパクトで安価に実現している点である。共振周波数の周波数間隔は c/L で決まるため、周長の短いリング共振器程、共振周波数間隔を大きくでき、立ち上げ時の共振空洞の熱膨張に伴う周波数の低下 (200-300 MHz 程度) の影響を受けない点でドイツ方式より優れている。またドイツの方式では、回折格子の0次回折波と1次回折波をビームスプリッターに用いているため狭帯域であるが、本研究グループのハーフミラーによる分離方式は原理的に広帯域である。また、本研究グループが世界で初めて開発した精密な温度制御によるリング共振周波数の調節方式は、ジャイロトロン毎にばらつく発振周波数の 200 MHz 程度の違いを補うのに最適な技術である。今回は通常の90度バンドではなく60度バンドを採用することにより、損失が大きい反射面の数を減らすことができ、1個あたりの回折損の増加分を考慮してもトータルで損失低減が期待される。

3. 研究の方法

- (1) 周波数変調を必要としない大電力ミリ波帯高速スイッチには、マイターバンド部に高速振動する反射板を駆動部を含む固定器具が必要である。その振動周波数の上限を ITER で予想される NTM の周波数帯である数 kHz に引き上げるため、共振を利用して振幅を増すために固有振動を利用する。
- (2) 高速スイッチを大電力で使用するために必要な冷却が可能な振動鏡を設計・製作する。
- (3) 量研那珂研究所との共同研究で 170GHz 帯ミリ波を用いた低電力試験で高速切り替えの確認を行う。
- (4) 量研那珂研究所が ITER 計画の中で担うジャイロトロン開発・制作・調整運転計画の中で可能であれば、170 GHz, 1 MW ジャイロトロンを使った大電力試験を、量研那珂研究所との共同研究で実施する。ただし、ハーフミラーの冷却がサファイア製では不十分なのでパルス幅の上限は 100 ms とする。(将来的にはジャイロトロンの出力真空窓と同じダイヤモンド製のハーフミラー採用で長パルスも可能)

4. 研究成果

(1) ハーフミラーの電力反射率測定

入出力部の十字円形コルゲート導波管内に設置するC面カットサファイアハーフミラーを製作し、その電力反射率測定を行なった。C面カットサファイアハーフミラー(直径: 99.8 ± 0.1 mm, 仕様厚さ 0.97 mm)の透過・反射測定を、周波数特性を 169.5 GHz - 170.5 GHz において測定した。図4にハーフミラーの電力反射率を評価するための測定系を示す。仕様厚さ 0.97 mm 厚のサファイアハーフミラーはこの範囲での周波数依存性は大きくなく、平均電力反射率は約 56% であった。

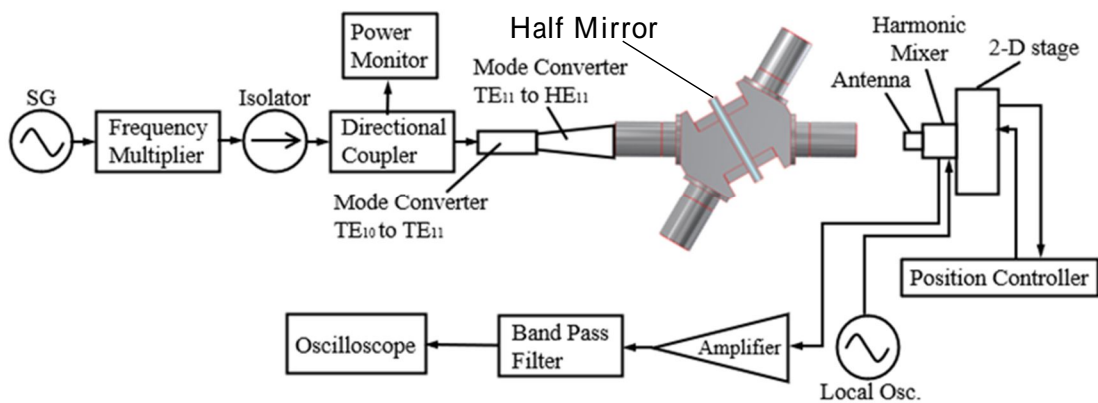


図4. ハーフミラーの電力反射率測定系

(2) 高速スイッチの周波数測定

高速スイッチの周波数特性を 169.5 GHz-170.5 GHz の周波数帯域で測定した。図 5 に測定試験系を、図 6 に P2 出力、図 7 に P4 出力の周波数特性を示す。測定帯域内の共振周波数は、169.895 GHz、170.46 GHz であった。

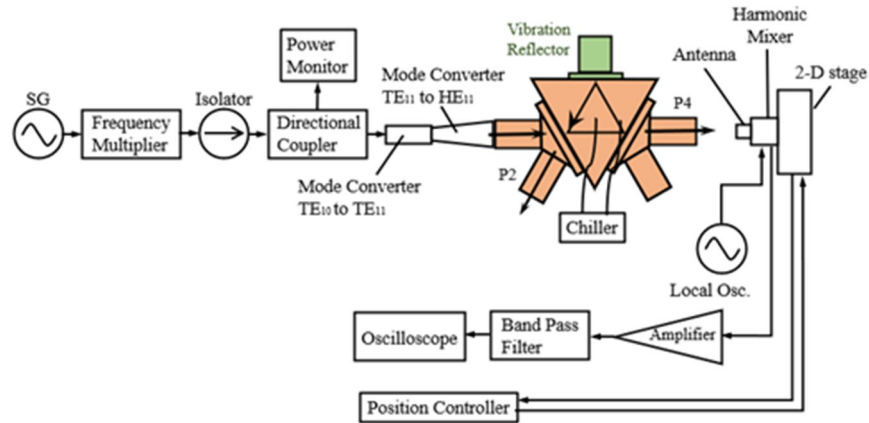


図 5 切り替え特性の測定系 (P4 測定時)

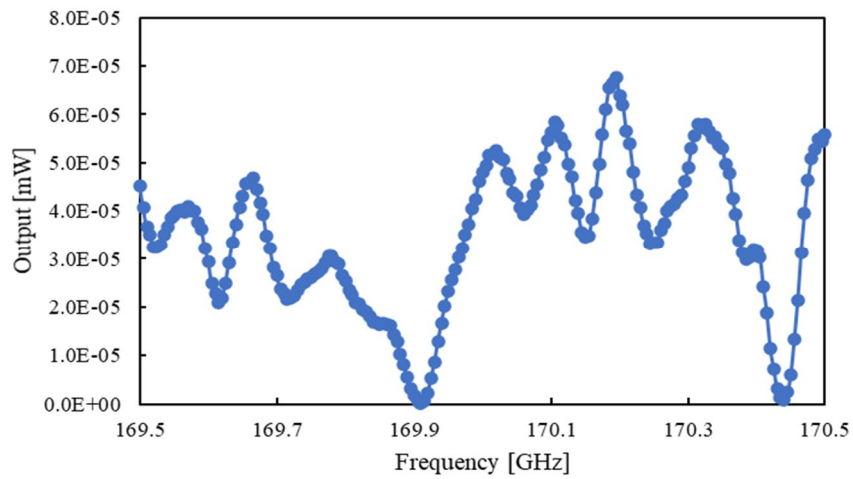


図 6 振動鏡装着時の P2 出力の周波数特性

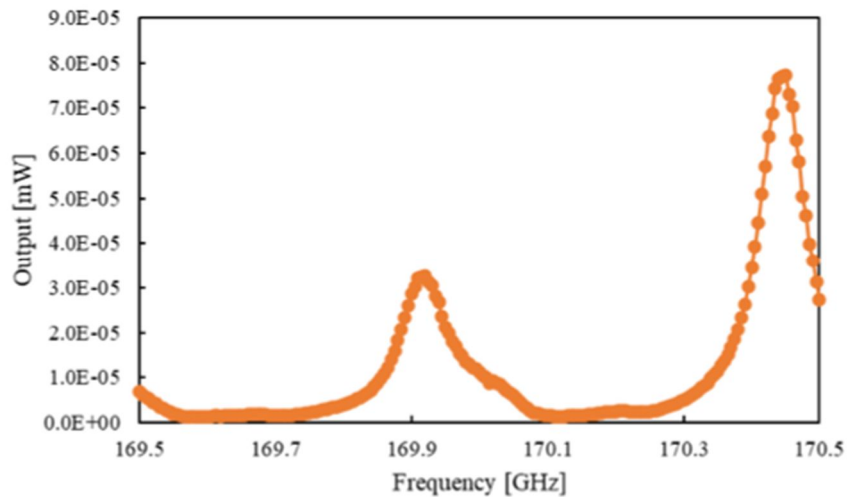


図 7 振動鏡装着時の P4 出力の周波数特性

(3) 高速スイッチの切り替え測定

直径 108 mm 厚さ 2 mm のアルミナ分散強化銅製振動鏡を 4 本のアクチュエータで固有振動周波数付近で振動させ、共振周波数 169.895 GHz、170.46 GHz で測定した P2 出力の時間変化を図 8 に示す。

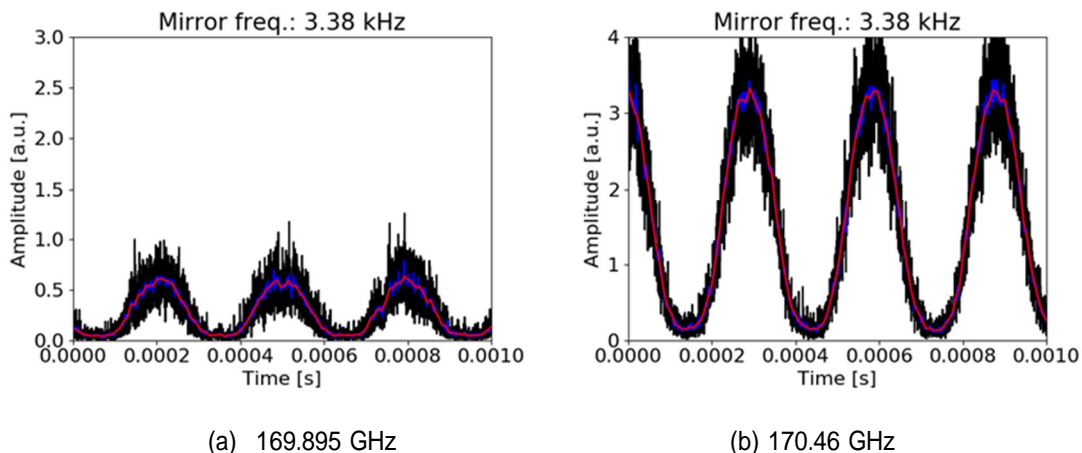


図 8 反射鏡振動時の P2 出力の時間変化

図 9 に振動鏡装着時の P4 出力の時間変化を示す。図のように、P4 出力に関して 3.4 kHz で振幅変調度 33%を達成した。また、振動鏡を直径 103mm に小型化しアクチュエータ 2 本を用いた場合には、P4 出力 1.54 kHz で約 60%の振幅変調度を達成した。

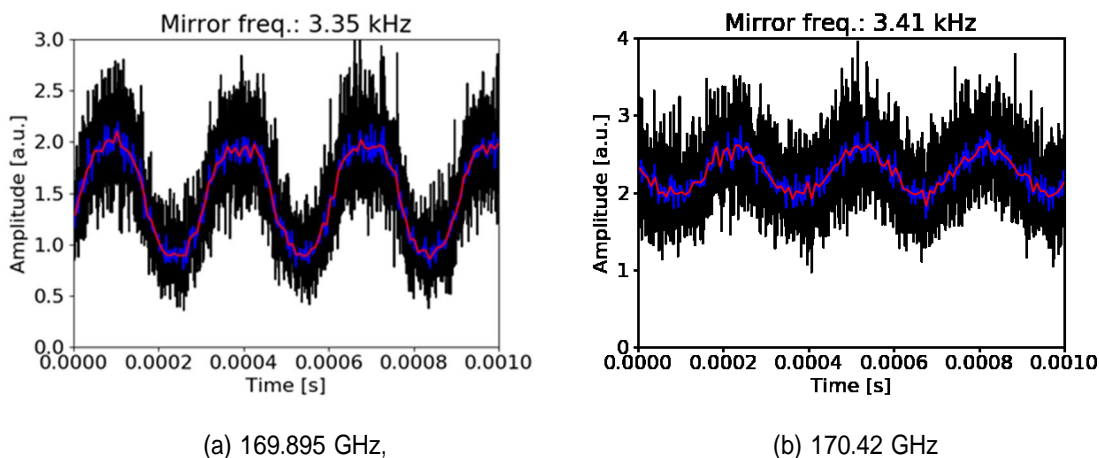


図 9 振動鏡振動時の P4 出力の時間変化

(4) 今後の課題と展望

大電力試験を目指したが、アクチュエータが水冷した際動作しなくなり行えなかった。防水アクチュエータの開発が必要である。また、ITER での NTM の周波数は 1 kHz 以下との予想もあり、アクチュエータ 12 本なら固有振動を用いず直接駆動することも十分可能である。

<引用文献>

- [1] H. Zohm et al., Nucl. Fusion 39 (1999) 577.
- [2] W. Kasperek et al., Nucl. Fusion 48, 054010 (2008).
- [3] K. Sakamoto, et al., Nat. Phys., 3, 411 (2007).
- [4] T. Kobayashi et al., Proc. of 25th IAEA Fusion Energy Conf., FIP/2-2Rb (2014).
- [5] M. Saigusa et al., Fusion Eng. and Des., Vol. 88, pp. 964-969 (2013).
- [6] M. Saigusa et al., Fusion Eng. and Des., Vol. 123, pp. 385-389 (2017).

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 0件）

1. 著者名 Mikio Saigusa, Hiroki Shozu, Fumiaki Inoue, Kana Yokoyama, Daichi Handa, Ken Kajiwara, Yasuhisa Oda, Ryosuke Ikeda, and Koji Takahashi	4. 巻 17
2. 論文標題 Development of new triangle fast directional switch for high power millimeter wave	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Fusion Engineering and Design	6. 最初と最後の頁 112937
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.fusengdes.2021.112937	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8件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 村山岬、飯田大智、鈴木拓実、工藤遼太、三枝幹雄、梶原健、池田亮介、中井拓、矢嶋悟
2. 発表標題 固有振動を利用した大電力ミリ波帯高速スイッチの開発
3. 学会等名 2021年プラズマ・核融合学会 年会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 村山岬、飯田大智、鈴木拓実、工藤遼太、三枝幹雄、梶原健、池田亮介、中井拓、矢嶋悟
2. 発表標題 固有振動を利用した大電力ミリ波帯高速スイッチの開発
3. 学会等名 2021年電気学会東京支部茨城支所研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 飯田大智、横山花奈、村山岬、前中拓夢、三枝幹雄、梶原健、池田亮介、中井拓、矢嶋悟、新屋貴浩、高橋幸司
2. 発表標題 周波数変調が必要ない170 GHz帯大電力高速スイッチの開発
3. 学会等名 第37回プラズマ・核融合学会年会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名	K. Yokoyama, M. Murayama, D. Handa, M. Saigusa, K. Takahashi, K. Kajiwara, R. Ikeda, T. Nakai, S. Yajima, T. Shinya
2. 発表標題	Development of Fast Switching Device of High-Power Millimeter Wave
3. 学会等名	The 16th International Student Conference in Ibaraki (国際学会)
4. 発表年	2020年

1. 発表者名	横山花奈、井上史章、飯田大智、三枝幹雄、中井拓、池田亮介、梶原健、高橋幸司
2. 発表標題	周波数変調の必要ない電子サイクロトロン電流駆動用大電力ミリ波帯高速スイッチの開発研究
3. 学会等名	第36回プラズマ・核融合学会
4. 発表年	2019年

1. 発表者名	井上史章、飯田大智、横山花奈、下野晃大、三枝幹雄、中井拓、池田亮介、梶原健、高橋幸司
2. 発表標題	固有振動を利用した大電力ミリ波帯高速スイッチの開発研究
3. 学会等名	第27回電気学会東京支部茨城支所研究発表会
4. 発表年	2019年

1. 発表者名	飯田大智、井上史章、横山花奈、下野晃大、三枝幹雄、中井拓、池田亮介、梶原健、高橋幸司
2. 発表標題	大電力ミリ波帯高速スイッチの開発
3. 学会等名	第27回電気学会東京支部茨城支所研究発表会
4. 発表年	2019年

1. 発表者名 Fumiaki Inoue, Daichi Handa, Kana Yokoyama, Akihiro Shimono, Mikio Saigusa, Ken Kajiwara, Ryosuke Ikeda, Koji Takahashi
2. 発表標題 Research and Development of High Power Millimeter Wave Fast Switching Device Using Natural Vibration
3. 学会等名 The 15th International Student Conference in Ibaraki, Ibaraki, Japan (国際学会)
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

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