

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 6月10日現在

機関番号：12101

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2010～2012

課題番号：22560818

研究課題名（和文）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

研究課題名（英文）Research and Developments of fast switching device of millimeter wave for electron cyclotron current drive

研究代表者

三枝 幹雄 (SAIGUSA Mikio)

茨城大学・工学部・教授

研究者番号：10292476

研究成果の概要（和文）：トカマク型核融合炉で発生する新古典ティアリングモードの安定化を目的として、新しい原理の大電力ミリ波帯高速スイッチを開発した。まず電磁界解析コードを開発し、その結果に基づいて設計した高速スイッチを試作した。次に原子力機構との共同研究で全金属スロット鏡とサファイア鏡を用いて低電力試験を行い、スイッチ特性を確認した。また、全金属スロット鏡を用いて、従来にない広帯域特性を確認した。最後に全金属鏡の非周期スロットで有害な高次回折波を抑制し、170GHzで約150kW、パルス幅30msの大電力試験を行い、装置に損傷が無いことを確認した。

研究成果の概要（英文）：A new type wideband diplexer as a fast switching device of high power millimeter wave has been developed for an electron cyclotron current driving system. A main purpose of fast switching is a stabilization of neoclassical tearing mode in tokamak plasmas. The short-slotted metal half mirror, which is one of the key components of a wideband diplexer is proposed. Two types of short-slotted metal half mirrors were designed and tested. One is periodic slot, and the other is non-periodic slot in a longitudinal direction. The switching operation of a mock-up diplexer with short-slotted metal half mirrors was verified at the two frequency bands about 137 GHz and about 170 GHz at low power. Finally, the high power test (~150kW) of diplexer was performed at the frequency of about 170 GHz. No significant damage by rf discharges were observed in our diplexer.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,800,000	540,000	2,340,000
2011年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2012年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学・核融合学

キーワード：トカマク、電子サイクロトロン電流駆動、大電力ミリ波、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圧力駆動型の不安定性である新古典ティアリングモード

の発生が予測されており、その安定化には電子サイクロトロン共鳴周波数帯の電磁波による磁気島中の局所的な電流駆動が有効で

ある事が理論的に予測され実験で実証されている。安定化効率は磁気島の O 点に電流駆動する時が最も高く X 点に電流駆動した場合には逆に不安定化になる。この磁気島は数 kHz 程度の高速で主にトロイダル方向に回転している為、従来はジャイロトロンを高速でスイッチングしデューティ 50% で運転する事で O 点付近での電流駆動を実現してきた。しかし、ドイツのシュツツガルト大学のグループは、反射型回折格子の高次回折を用いた高速大電力ミリ波帯スイッチを開発し、周波数 f_1 と f_2 を高速に切り替えることにより、高速で電磁ビームの方向切替えに成功した。これによりジャイロトロンのデューティを 50% から 100% にし、常に磁気島の O 点に電流駆動できる。ただこの大電力ミリ波帯高速スイッチは反射型回折格子の 0 次回折波と 1 次回折波を利用しているため原理的に狭帯域(帯域幅 500MHz 以下)であった。

2. 研究の目的

トカマク型核融合プラズマで発生する圧力駆動型の新古典ティアリングモードの高効率安定化を目指し、電子サイクロトロン共鳴周波数帯の電磁ビームの経路を高速に切り替える事ができる新しい原理に基づく広帯域高速大電力ミリ波帯スイッチの試作開発を目指す。

3. 研究の方法

2010 年度は、本研究室で開発中の FDTD 法を用いて数値計算を行い、高速スイッチの原理の実証を行った後、実際に高速スイッチの設計を行う。次にその入力部にあたる十字型円形コルゲート導波管内の反射鏡に設ける HE_{11} モードを励起する為最適なスロットアンテナの最適化設計を行う。また、市販の電磁界解析コード(構造計画研究所製 XFDTD)を購入し本研究室で開発した電磁界解析コードのベンチマーク試験を行い、その結果の正当性を確認する。

2011 年度は、2010 年度に設計した高速スイッチを試作し、日本原子力研究開発機構(以後原子力機構と呼ぶ)との共同研究で、170GHz 帯十字型円形コルゲート導波管を用いたハーフミラーの特性評価および高速スイッチの低電力特性試験を行う。キーコンポーネントであるハーフミラーには、金属スロット鏡と誘電体鏡(サファイア鏡)を用い、全金属スロットアンテナでは、137GHz 帯と 170GHz 帯の両方でスイッチ特性の測定を行う。

2012 年度には、高次回折波の抑制を考えて設計した金属スロット鏡を 3 種類製作し、周波数特性を数値計算と低電力実験で最適化研究を行う。また、耐電力試験を目的として、170 GHz で大電力試験を行い、リング共振器

本体の耐電力特性評価を行う。

4. 研究成果

2011 年度は、まず FDTD 法を用いた電磁界解析コードを開発し、キーコンポーネントであるハーフミラーの最適化研究を行った。その結果、誘電体ハーフミラーの場合には、誘電体の厚みが、全金属スロットアンテナ型ハーフミラーの場合には、スロットの周期、幅、厚み、向きが重要である事が判った。また市販の電磁界解析コードとの比較で本研究で用いた解析コードの正当性を確認した。次に、ハーフミラーの試験のため十字型円形コルゲート導波管の設計・試作を行った。

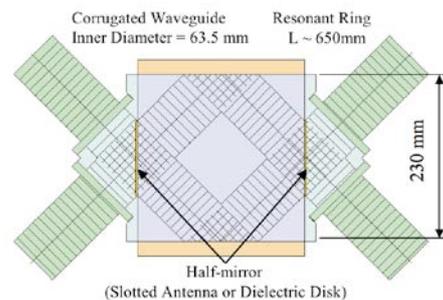


図1 大電力広帯域高速スイッチ

2011 年度の解析結果に従い、2012 年度は高速スイッチの低電力試験用モックアップ(図 1 参照)を製作し、原子力機構との共同研究で 170 GHz 帯、137 GHz 帯での低電力試験を行った。試験は、2 種類のハーフミラー(全金属スロットアンテナとサファイア)を用いて行った。その結果、サファイアハーフミラーの場合には、誘電体の厚みによって大きく反射率が代わり、全金属スロットアンテナ型ハーフミラーの場合には、スロットの周期が波長より短い場合には高次回折波が励起されないため、きれいに切り替えが可能であるが、スロット周期が波長よりも長い場合には高次回折波が励起され、高次回折波によって励起された導波管の高次モードがリング共振器内で共鳴した際に、損失が増加することが判った。

2012 年度には、全金属スロットアンテナ型ハーフミラーの最適化を目指して 3 種類の全金属スロット反射鏡を製作した。入射面に垂直方向の回折格子の周期を 1 波長以下にすると入射面に垂直方向の高次回折波は抑制できた。しかし熱伝導を改善する為に導入したショートスロット構造が、入射面内で高次モードを励起していることを確認し、その高次モードを抑制する為に、ショートスロットを非周期に配列することで有害な高次回折波の抑制に成功した。(図 2 参照)最後に、

170GHz で 150kW 程度の大電力試験を行い、高速スイッチ本体に放電等による損傷が無いことを確認した。(図 3 参照)

(a) 周期スロット鏡, (b) 非周期スロット鏡

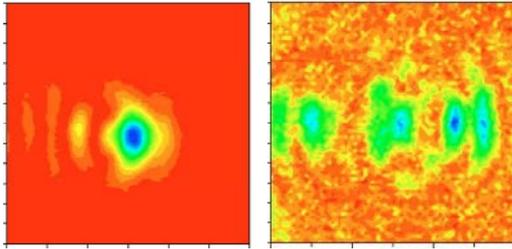


図 2. 高次回折波の放射パターン, (a)入射電力の 4.2%, (b)入射電力の 0.53%



図 3 高速スイッチの大電力試験

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 7 件)

①Kohei Atsumi, Tomoki Yamaguchi, Koji Nagashima, Mikio Saigusa, Masafumi Fukunari, Yasuhisa Oda, Keishi Sakamoto, “Numerical estimation of Ohmic loss of high power wideband diplexer for ECCD system,” Plasma and Fusion Research, Vol. 8, No. 2405077, (in print) (2013), 査読有.

②M. Saigusa, K. Atsumi, T. Yamaguchi, K. Nagashima, Y. Oda, M. Fukunari, and K. Sakamoto, “High power test of a wideband diplexer with short-slotted metal half mirrors for electron cyclotron current drive system,” Proc. of 20th Topical Conference on Radio Frequency Power in Plasmas, Sorrento, Italy, June 25-28, 2013, 査読無.

③Mikio Saigusa, Kohei Atsumi, Tomoki Yamaguchi, Yasuhisa Oda, and Keishi

Sakamoto, “Development of a high power diplexer with short-slotted metal half mirrors for electron cyclotron current drive,” Fusion Engineering and Design, Vol. 2013, No.2, 163, (in print) (2013), 査読有, DOI:10.1016/j.fusengdes.2013.02.163.

④Mikio SAIGUSA, Shuhei SUGAWARA, Kohei ATSUMI, Yasuhisa ODA, Tomoki YAMAGUCHI and Keishi SAKAMOTO, “Proposal of New Type Diplexer for ECCD System,” Plasma and Fusion Research, Vol. 7, No. 2405099, (2012), 査読有. DOI: 10.1585/pfr.7.2405099.

⑤Kohei Atsumi, Tomoki Yamaguchi, Koji Nagashima, Mikio Saigusa, Masafumi Fukunari, Yasuhisa Oda, Keishi Sakamoto, “Numerical estimation of Ohmic loss of high power wideband diplexer for ECCD system,” Proc. of 8th International Student Conference at Ibaraki University, Nov. 10, (2012), 査読無.

⑥ Sugawara Shuhei, Atsumi Kohei, Yamaguchi Tomoki, Saigusa Mikio, Oda Yasuhisa, Takahashi Koji, Kajiwara Ken, Sakamoto Keishi, “Development of High Power Wideband Diplexer for ECCD System in Fusion Devise,” Proc. of The 7th International Student Conference at Ibaraki University, Ibaraki, Japan, December 3-4, 2011, 2011, P-032, 査読無.

⑦ Saigusa Mikio, Takekawa Tetsuya, Sugawara Shuhei, and Atsumi Kohei, “Fast Switching Device of High Power Millimeter Wave in ECCD System”, Proc. of 13th International Conf. AMPERE Toulouse 2011, Microwave and RF Power Applications, 2011, 285-288, 査読無.

[学会発表] (計 13 件)

①M. Saigusa, K. Atsumi, T. Yamaguchi, K. Nagashima, Y. Oda, M. Fukunari, and K. Sakamoto, “High power test of a wideband diplexer with short-slotted metal half mirrors for electron cyclotron current drive system,” Proc. of 20th Topical Conference on Radio Frequency Power in Plasmas, Sorrento, (イタリア), June 25, 2013.

②小田靖久・渥美幸平・山口智輝・長嶋浩司・三枝幹雄・福成雅史・坂本慶司, 「大電力ジヤイロトロンを用いたミリ波帯導波管リン

グ型ダイプレクサー出力における不要モードに関する研究」, 日本原子力学会北関東支部「2013年度若手研究者発表会」, (茨城県東海村東海会館) 2013.4.19.

③ Mikio Saigusa, Kohei Atsumi, Tomoki Yamaguchi, Koji Nagashima, Masafumi Fukunari, Yasuhisa Oda, and Keishi Sakamoto, “Development of high power wide band switch for ECCD system,” S-EU-Japan RF Heating Technology Workshop: Dec. 12, 2012, Nara, Japan.

④ 山口智輝, 渥美幸平, 長嶋浩司, 三枝幹雄, 小田靖久, 福成雅史, 坂本慶司, 「電子サイクロトロン電流駆動用ミリ波帯広帯域高速スイッチの開発研究」, 29E01P, 第29回プラズマ・核融合学会年会, (福岡県春日市), 2012.11.29.

⑤ Kohei Atsumi, Tomoki Yamaguchi, Koji Nagashima, Mikio saigusa, Masafumi Fukunari, Yasuhisa Oda, Keishi Sakamoto, “Numerical estimation of Ohmic loss of high power wideband diplexer for ECCD system,” 22nd International Toki Conference, Toki, Japan, 2012.11.21.

⑥ M. Saigusa, K. Atsumi, T. Yamaguchi, Y. Oda, and K. Sakamoto, “Development of a high power diplexer with short-slotted metal half mirrors for electron cyclotron current drive system,” 27th Symposium on Fusion Technology, Liege, (ベルギー) (SOFT 2012).

⑦ 小田靖久・菅原修平・渥美幸平・山口智輝・三枝幹雄・坂本慶司, 「大電力ミリ波帯導波管リング型ダイプレクサーにおける不要高次モードに関する研究」, 日本原子力学会北関東支部若手研究者発表会, (茨城県東海村東海会館), 2012.4.20.

⑧ M. Saigusa, S. Sugawara, K. Atsumi, Y. Oda, T. Yamaguchi, and K. Sakamoto, “Proposal of New Type Diplexer for ECCD System,” International Toki Conference (ITC-21), Toki, Japan, Nov. 28, 2011.

⑨ Kohei Atsumi, Sugawara Shuhei, Yamaguchi Tomoki, Saigusa Mikio, Oda Yasuhisa, Takahashi Koji, Kajiwara Ken, Sakamoto Keishi, “Research and Development of High Power Wideband Diplexer for ECCD System,” Plasma Conference 2011, Nov. 11, Knazawa, Japan, (2011).

⑩ Saigusa Mikio, Takekawa Tetsuya, Sugawara Shuhei, and Atsumi Kohei, “Fast Switching Device of High Power Millimeter Wave in ECCD System”, 13th International Conf. AMPERE Toulouse, (フランス), Sept. 6, 2011.

⑪ 武川哲也, 菅原修平, 渥美幸平, 三枝幹雄, 「電子サイクロトロン電流駆動用ミリ波帯高速スイッチの開発研究(全金属ハーフミラーの数値解析)」, 第27回プラズマ・核融合学会年会, 北海道大学学術交流会館, (北海道札幌市) 2010年12月2日.

⑫ 菅原修平, 武川哲也, 渥美幸平, 三枝幹雄 「電子サイクロトロン電流駆動用ミリ波帯高速スイッチの開発研究(誘電体ハーフミラーの数値解析)」, 第27回プラズマ・核融合学会年会, 北海道大学学術交流会館, (北海道札幌市) 2010年12月2日.

⑬ 渥美幸平, 武川哲也, 菅原修平, 三枝幹雄, 「大電力ミリ波帯高速スイッチの研究」, 電気学会東京支部茨城支所研究発表会, 日立市シビックセンター, (茨城県日立市) 2010年11月7日.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

三枝 幹雄 (SAIGUSA MIKIO)
茨城大学・工学部・教授
研究者番号: 10292476

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

今井 剛 (IMAI TSUYOSHI)
筑波大学・数理物質科学研究科・教授
研究者番号: 80354637