

平成23年 5月 30日現在

機関番号： 82401
 研究種目： 若手研究(B)
 研究期間： 2009～2010
 課題番号： 21760689
 研究課題名(和文)
 核融合プラズマにおける協同散乱計測の為に大電力サブテラヘルツ帯ジャイロトロン開発
 研究課題名(英文) Development of high power sub-THz gyrotron for collective scattering measurement in nuclear fusion plasma
 研究代表者
 野竹 孝志 (NOTAKE TAKASHI)
 独立行政法人理化学研究所・テラヘルツ光源研究チーム・特別研究員
 研究者番号： 70413995

研究成果の概要(和文)：

協同散乱計測へのテラヘルツ光源応用を目指し、第二高調波で 0.4THz 近傍の発振を目指したテラヘルツ光源開発を行った。電子銃の運転特性や、非線形計算及びモード競合シミュレーション等に基づいた発振モードの選定及び共振器形状の設計を行った結果、周波数約 0.35THz で 52 kW (TE65 モード動作)、約 0.4 THz で 37 kW (TE85 モード動作) のテラヘルツ発振を達成した。これらの実験結果に基づき、共振器モードの設計変更や、電子ビームの高品質化を行った結果、TE18 モードで周波数約 0.4THz において、62kW の発振を達成した。

研究成果の概要(英文)：

We developed THz source operating at around 0.4 THz for application of collective scattering measurement. As results of careful selection of operating mode and cavity shape under the consideration of characteristics of electron gun, nonlinear effect and mode competition, 52 kW radiation at 0.35 THz and 37 kW radiation at 0.4 THz were successfully achieved. Moreover, 62 kW radiation at 0.4 THz using TE18 mode was realized due to change of operating mode and improvement of electron beam quality.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	3,000,000	900,000	3,900,000
2010年度	400,000	120,000	520,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

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：テラヘルツ光源、協同トムソン散乱

1. 研究開始当初の背景

現在世界中で精力的に研究が進められている核融合炉成立の鍵を握っているのは、アルファ粒子の閉じ込めであると言っても過言ではない。その物理機構を解明する為に、

アルファ粒子の速度分布関数を高時間・空間分解能で計測できる手法として有望視されているのが協同散乱である。プラズマ中での散乱特性を決定する無次元散乱パラメータ α は、図 1 に示すよう

に入射電磁波の周波数、散乱角、電子温度・密度に依存する。 $\alpha > 1$ の場合、アルファ粒子の熱運動に追従して協同的に運動する電子の密度揺動により入射電磁波が散乱され、協同散乱と呼ぶ。この散乱スペクトルを受信する事で、アルファ粒子のダイナミクスを計測できる。現在まで、炭酸ガスレーザーやプラズマ加熱用ジャイロトロンをプローブビームとした検討、開発が進められているが、これらの手法では電磁波の周波数が高すぎる、低すぎる等の理由から、散乱角が狭くなり空間分布が計測できない、ビームの屈折が大きくなる、密度カットオフが生じるなどの問題がある。

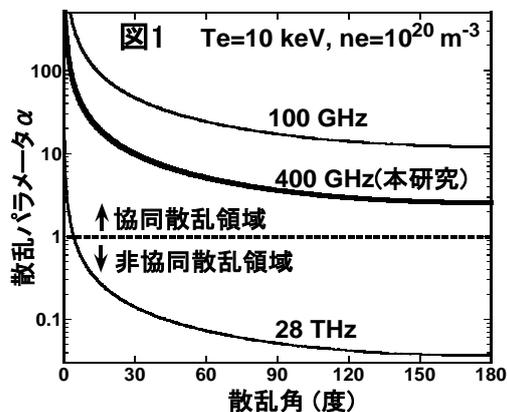


図1 散乱パラメータの散乱角・周波数依存性

2. 研究の目的

イオン協同散乱を誘起する為のプローブ電磁波の周波数としては、サブテラヘルツ帯が最適であると考えられる。しかしながら、この周波数帯には今までコヒーレントな電磁波源及び検出器が存在していなかった為に、その重要性にも関わらず、高空間・時間分解能を持ったアルファ粒子計測手法は未だ確立されていないのが現状である。本研究の目的はこうした現状を打破する為に、今後の核燃焼プラズマ実験においてイオン協同散乱計測を可能とすべく、サブテラヘルツ帯の大電力ジャイロトロンを開発する事にある。特に、発振モードや共振器形状等を最適化する手法を確立し、共振器磁場やビーム電

流、入射電子ビーム半径等に対するテラヘルツ波の発振特性を詳細計測し、これまでに類を見ないサブテラヘルツ領域での高効率発振を実現する事を目指す。

3. 研究の方法

本研究においては、非線形理論及びモード競合シミュレーションなどを行い、他のモードと競合しないで安定して発振が可能な第二高調波モードを選定する。特に既存の電子銃の運転特性などとの相性なども考慮して、最適化モードとして TE65 及び TE85 モードを選定し共振器を設計した。これを高出力電子銃と組合せることでジャイロトロン管を製作する。また、パルス幅は電源容量の問題から、数マイクロ秒程度とした。このジャイロトロンを制作後、エージング等を行い、発振物理特性を調べるために動作試験を行った。

4. 研究成果

図2に発振スペクトルの磁場強度依存性を示す。運転パラメータはカソード電圧 55.8 kV、アノード電圧 40kV、ガンコイル電流値 150A、ビーム電流値は 11A である。多くのモードによる発振が観測されるが、ハイパスフィルターを挿入した際の波形から、周波数約 0.35THz で 52 kW (TE65 モード動作)、約 0.4 THz で 37 kW (TE85 モード動作) の第二高調波発振が実現していることが分かる。

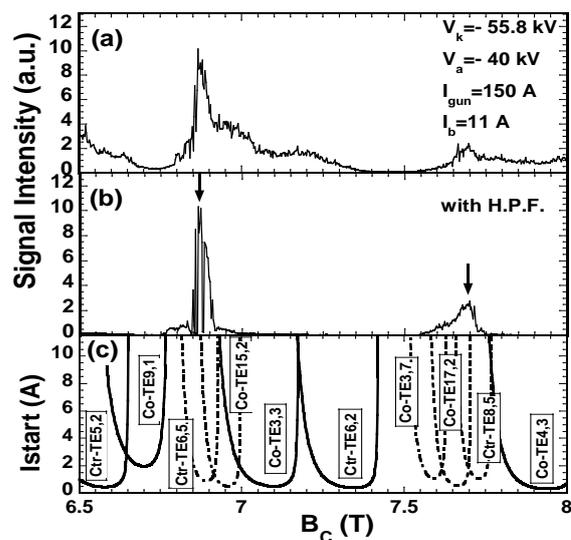


図2 発振の磁場依存性

しかし、高カソード電圧運転時に電子銃が沿面放電を起こしたり、空間電荷効果により実効的に電子ビーム加速電圧が低下してしまうという技術的な問題も生じた。また図3に示すように、高ビーム電流運転時には動作モードであるTE65及びTE85が基本波とモード競合し、発振が妨げられたり、発振効率が低下する等の物理的問題も生じた。こうした問題を克服し、より高出力で、安定した発振を目指す為に、電子ビームの空間電荷効果を抑制し、より高電圧・高電流で安定動作させる為に電子銃の改良に取り組んだ。この電子銃の改良に伴い、電子ビームの品質改善や、電子ビームと共振モード RF 電磁場とのエネルギー相互作用効率が最大となるように、共振モード、共振器半径及び相互作用軸方向長さ、Q 値等の最適化計算を非線形理論及びモード競合シミュレーション結果に基づき行った。その後、新たな共振器を設計、製作し、電子銃と共にジャイロトロン管へ組み込んだ。新たな発振試験の結果、TE18 モードで周波数約 0.4THz において、出力 62kW の発振を達成した。この改良により、更なる高出力化に成功した。このように本研究において達成されたサブテラヘルツ帯の発振出力記録は、図4に示すようにサブテラヘルツ帯において、これまでに得られている値を超える世界最高記録の出力である。また、今回の試験ではビーム電流増加に伴う極度な発振効率低下などは観測されず、今後、更に電子銃の改良や、電源の増設などを行うことで、高ビーム電流化、高加速電圧化が実現出来れば、更なるテラヘルツ波の高出力化が可能になると期待される。また、発振モードの再選定や共振器形状の更なる最適化等により、1THz 近傍までの更なる高周波での発振も期待される。

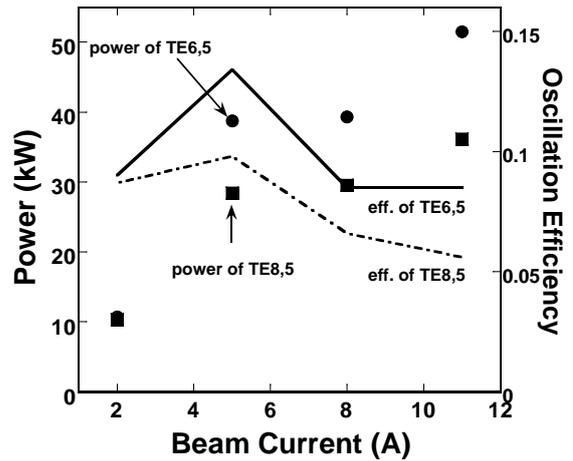


図3 ビーム電流値と発振効率の関係

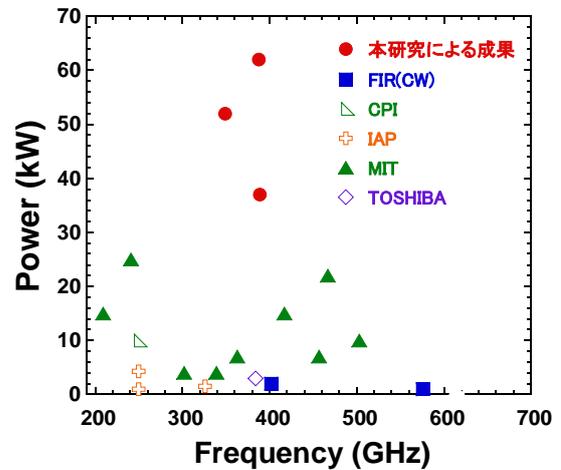


図4 サブテラヘルツ帯の出力記録

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 4 件)

- ① T Saito, T Notake, Y Tatematsu, A Fujii, S Ogasawara, La Agusu, T Idehara, S Kubo, T Shimozuma, K Tanaka, M Nishiura, K Kawahata, V N Manuilov, "Development of terahertz gyrotrons and their application to CTS on LHD" Journal of Physics: Conference Series 227 (2010) 012013 査読あり
- ② T. Notake, T. Saito, Y. Tatematsu, A. Fujii, S. Ogasawara, La Agusu, I. Ogawa, T. Idehara and V. Manuilov, "Development of a Novel High Power Sub-THz Second Harmonic Gyrotron" Phys. Rev. Lett. 103, 225002 (2009). 査読あり
- ③ T. Notake, T. Saito, Y. Tatematsu, A. Fujii, S. Ogasawara, V. Manuilov, La Agusu, I. Ogawa and T. Idehara, "Development of a Novel High Power Sub-THz Second Harmonic Gyrotron", FIR Center Report, FIR FU-95, (2009). 査読なし

- ④ T. NOTAKE, T. SAITO, Y. TATEMATSU, A. FUJII, S. OGASAWARA, La AGUSU, V. N. MANUILOV, I. OGAWA, T. IDEHARA, “Achievement of high power sub-terahertz radiations with a second harmonic gyrotron”, Plasma Fusion Res., Vol.4, 011(2009).査読あり

〔学会発表〕(計 10 件)

- ① 小笠原慎弥, 斉藤輝雄, 立松芳典, 藤井彰仁, 山田尚輝, 小川勇, 出原敏孝, 野竹孝志, V.Manuilov 二次高調波発振を用いた高周波パルスジャイロトロンの開発 VII 日本物理学会 2010 年秋季大会 2010 年 9 月 23-26 日、大阪府
- ② 野竹孝志, 縄田耕二, 唐 明, Yuye Wang, 南出泰亜, 伊藤弘昌, 横江拓人, 橋本秀樹”有機非線形光学結晶 BNA を用いた差周波テラヘルツ発生光源の最適化” 応用物理学会学術講演会 2010 年 9 月 14-17 日、長崎大学
- ③ 南出泰亜, 野竹孝志, 唐 明, Yuye Wang, 縄田耕二, 伊藤弘昌, “有機非線形結晶 DAST を用いた超広帯域 THz 波検出” 応用物理学会学術講演会 2010 年 9 月 14-17 日、長崎大学
- ④ T. Notake, M. Saito, M. Tang, Y. Wang, H. Minamide, H. Ito, “Solution growth of an organic N-benzyl-2-methyl-4-nitroaniline (BNA) crystal for DFG-THz source” 35th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves“ Roma Italy , September 5 - 10, (2010)
- ⑤ 小笠原慎弥, 斉藤輝雄, 立松芳典, 藤井彰仁, 山田尚輝, 小川勇, 出原敏孝, 野竹孝志, V. Manuilov”二次高調波発振を用いた高周波パルスジャイロトロンの開発 VI”日本物理学会第 65 回年次大会 2010 年 3 月 20-23 日、岡山大
- ⑥ 野竹孝志, 唐 明, Yuye Wang, 南出泰亜, 伊藤弘昌, 宮本克彦, 大野誠吾, 横江拓人, 橋本秀樹, ”有機非線形結晶 BNA を用いた DFG テラヘルツ光源の最適化” 第 57 回応用物理関係連合講演会 2010 年 3 月 17-20 日、東海大学
- ⑦ 野竹孝志, 唐 明, 王 與燁, 南出泰亜, 伊藤 弘昌, 宮本 克彦, 大野誠吾, 横江 拓人, 橋本 秀樹”有機非線形結晶 BNA を用いた DFG テラヘルツ光源の最適化” 電子情報通信学会研究討論会「テラヘルツ電子デバイスの新展開」 2010 年 2 月 25-26 日、仙台
- ⑧ 野竹孝志, 斉藤輝雄, 立松芳典, 藤井彰仁, 小笠原慎弥, La Agusu, 小川 勇, 出原敏孝, V. Manuilov ”Sub-THz ジャイロトロン高出力化の為の共振器設計”プラズマ核融合学会年会、2009 年 12 月 1-4 日、京都

- ⑨ T.Notake, Y.Tatematsu, T. Saito, S. Sabchevski, La Agusu, V. N. Manuilov, A. Fujii, S. Ogasawara, “ Design of a 100 kW-384 GHz second harmonic gyrotron” IRMMW-THz 2009, Sep.21-25 (2009), Korea
- ⑩ 野竹孝志, 宮本克彦, 南出泰亜, 唐明, 大野誠吾, 伊藤弘昌, 橋本秀樹, 横江拓人, 藤原正澄 “2 波長 BBO-OPO 励起による広帯域・高効率 BNA-DFG テラヘルツ光源” 第 70 回応用物理学会学術講演会 2009 年 9 月 8-11 日、富山大学

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 1 件)

名称 : BNA 結晶
 発明者 : 斉藤美紀子、野竹孝志、南出泰亜、伊藤弘昌
 権利者 : 斉藤美紀子、野竹孝志、南出泰亜、伊藤弘昌
 種類 : 特許
 番号 : 2010-148073
 出願年月日 : 平成 22 年 6 月 29 日
 国内外の別 : 国内

6. 研究組織

(1) 研究代表者

野竹孝志 (NOTAKE TAKASHI)
 独立行政法人理化学研究所・テラヘルツ光源研究チーム・特別研究員
 70413995