

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 18 日現在

機関番号：82110

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23760307

研究課題名(和文)高周波数ジャイロトロンにおける周波数連続可変性と高性能化の研究

研究課題名(英文)Research of continuous frequency tunability in high-frequency gyrotron and upgrading of the ability

研究代表者

池田 亮介(Ikeda, Ryosuke)

独立行政法人日本原子力研究開発機構・核融合研究開発部門 那珂核融合研究所・任期付研究員

研究者番号：80533364

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円、(間接経費) 1,080,000円

研究成果の概要(和文)：蛋白質構造解析のために、周波数連続可変性を有する高出力光源であるジャイロトロンの開発を行った。磁場強度の掃引により、本研究の目標である395GHz周辺にて約4GHzに亘る周波数連続可変性と50W以上の発振出力を達成した。加えて、電子銃のアノードとカソード間電圧の掃引でも約1GHzの周波数可変性を実現した。今回開発した周波数連続可変ジャイロトロンは、400GHz帯において最高性能を実現した。

研究成果の概要(英文)：A broadband continuous frequency tunable gyrotron was developed as power source for analysis of protein structures. Frequency tuning of about 4 GHz around 395 GHz was observed with output power greater than 50 W by changing the cavity magnetic field. The frequency also varied about 1 GHz as the anode&#8211;cathode voltage in a magnetron injection gun varied. Thus, the broadest tuning bandwidth in the 400 GHz band gyrotrons was achieved.

研究分野：：電気電子工学

科研費の分科・細目：電子デバイス・電子機器

キーワード：ジャイロトロン Gyro-BWO テラヘルツ サブミリ波 電子管 周波数可変性 蛋白質 動的核偏極

## 1. 研究開始当初の背景

遠赤外領域における高出力光源であるジャイロトロンは、生命科学、物質科学、基礎物理等の様々な応用研究分野にて期待されている。特に蛋白質研究の分野においては、蛋白質試料に数 W のサブミリ波を照射することで分子構造を解析する核磁気共鳴分光スペクトルの感度を 100 ~ 300 倍に向上させる動的核偏極の為の電磁波源として適用されてきている。これにより高い計測信頼度と膨大な測定時間の短縮が可能となる。しかし、照射するサブミリ波の周波数を電子スピニング共鳴周波数±核磁気共鳴周波数 (600 MHz NMR の場合には 394.6 GHz ± 0.6 GHz) となる最適周波数で蛋白質へ照射することが出来るかが感度向上率に対して大きく影響する。ジャイロトロン発振の安定度は 10 MHz オーダーであり、加えて高周波数ジャイロトロンの空洞共振器径は小さいことから数  $\mu\text{m}$  の製作誤差により 100 MHz オーダーのズレが生じることがある為、完全に一致させることが難しい。その為、周波数の連続可変性が求められてきた。

一般的なジャイロトロン発振における周波数変化は、空洞共振器の径方向に励起する  $\text{TE}_{m,n,1}$  モードを変えることで可能であるが、その発振周波数は離散的となる。しかし、周波数を連続的に可変させる手法として、空洞共振器の軸方向に励起する縦方向モード  $\text{TE}_{m,n,q}$  を励起させることで得られることが明らかとなった。この発振は、通常のジャイロトロン発振領域よりも強磁場側にて、空洞内で発生する後進波と電子ビームとの相互作用により発振するジャイロトロン後進波 (Gyro-BWO) 発振と呼ばれる現象である。磁場強度や電子の磁力線に平行方向速度を変えることにより、空洞共振器内に複数の電界ピークを持つ縦方向モード次数  $q$  を変化させながら周波数は変化する。我々は、周波数連続可変性の実証管として 15T 超電導マグネットを用いた基本波発振による 400GHz 帯周波数連続可変ジャイロトロンの開発を行った。磁場強度幅 0.25T に対して  $\text{TE}_{0,6,q}$  モードにて 1.6 GHz(394.65~396.27GHz)の周波数連続可変性を実現し、10~30W の出力を達成した。しかし、この周波数可変幅は、強磁場側で励起される  $\text{TE}_{7,4}$  モードとの競合により制限されており、性能向上の課題であった。

## 2. 研究の目的

我々は、ジャイロトロンによる動的核偏極核磁気共鳴分光スペクトルの感度向上を効果的に行う技術の確立を目指している。その為、周波数連続可変性の理解と周波数連続可変ジャイロトロンの高性能化が重要となる。そこで、本研究では 600 MHz NMR における 2 つの最適周波数 (394.0GHz, 395.2GHz) を含む周波数可変幅 2 GHz 以上、最大出力 100W 程度の周波数連続可変ジャイロトロンの実現を目的とした。

## 3. 研究の方法

本研究では、先行研究と同様に 15T 超電導マグネットを用いて基本波発振のジャイロトロンの開発を行う。製作するジャイロトロン管は、製作コストの抑えられる点と空洞共振器等の内部部品の交換が容易な点から真空フランジ接合によるデマウント管とした。また、本ジャイロトロンでは、周波数連続可変性の評価を主目的としている為、ガウスモードへのモード変換器は内蔵しない。ジャイロトロン管は、ターボ分子ポンプで常時排気する。

2 GHz を超えるような幅広い周波数可変を実現するためには、隣り合うモード、特に強磁場側モードとの競合を避けることが重要となる。その為、装置サイズの制限等を考慮しつつ、選択可能な最適発振モードの選定を行う。

モード選定後は、そのモードを励起するために必要な電子ビーム半径を実現させるマグネトロン入射型電子銃の設計を行う。電子銃は、3 極管型を採用し、アノードとカソード間の電圧掃引による電子の磁力線に平行方向成分の操作を可能とさせる。発振出力と周波数可変幅の性能は、空洞共振器に入射される電子ビームの品質 (電子速度のばらつき) に強く影響される為、電子銃形状の最適化は空間電荷効果を取り入れた電子軌道計算コード EGUN を用いて行う。電子銃の制作は、設計データを基に外注する。

以上の空洞共振器と電子銃部の設計に加えて、電子が最終的に衝突するコレクターの設計および出力窓であるサファイア窓の厚みの最適化を行う。

ジャイロトロン管は、管内圧力上昇を極力抑えるために、組み立てた後にベーキングを行う。ベーキング完了後は、超電導マグネットに挿入し、電子銃周りの磁場を制御する補助磁場コイルを装着する。既存の最大 30 kV、500 mA のカソード電源、最大 20 kV のアノード電源、半導体スイッチ等の電源設備を用いて動作試験を行う。動作試験は、焦電型検出器による発振信号測定、流水ダミーロードによる出力測定、ハーモニックミキサ、シenseサイザー、スペクトルアナライザーを組み合わせたヘテロダイン受信システムによる周波数測定を行う。

## 4. 研究成果

15T 超電導マグネットの室温ボア径は  $\phi 52$  mm と小さい。その為、選択可能な発振モードと電子銃サイズが制限される。本ジャイロトロンは、デマウント管ではあるが将来性を考慮して真空フランジ以外の電子銃外形を室温ボア以下に抑えた。発振モードは、 $\text{TE}_{m,n}$  の  $m$  次数に対する電子銃カソード部の電子放出帯半径と電子ビーム半径の関係と  $n$  次数に対する強磁場側に隣接するモードとの発振磁場強度間隔から選定した。電子銃の主磁

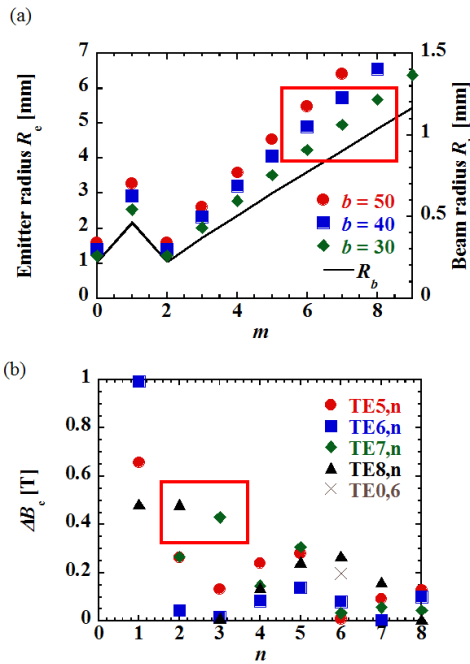


図1 TE<sub>m,n</sub>モードの選定条件

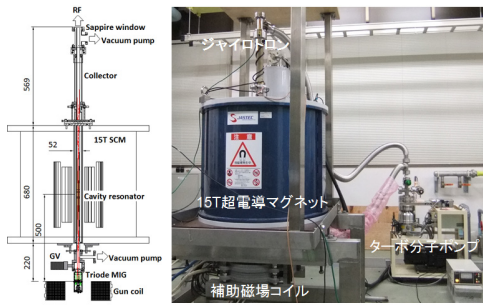


図2 周波数連続可変ジャイロトロン

場中心からの距離により、主磁場に対するカソード磁場比が変化する。磁場比を30~50とし、また電子銃外形の制限から電子放出帯半径は6 mm以下となる。これらの制限により選択可能な $m$ 次数は5~8となる。これらの $m$ 次モードに対して隣接モードが十分に離れる $n$ 次数は1~3にある。しかし、 $n=1$ と2の場合では空胴共振器径が小さくなり、製作誤差が大きくなるため、 $TE_{7,3}$ モードを選定した。このモードの場合、空胴共振器径は4 mmであり、電子ビーム半径は0.91 mmとなる。発振が途切れることなく、より高次数の縦方向モードを連続的に励起するためには、空胴長を長くして共振器の $Q$ 値を上げて、発振開始電流を下げるのが重要となる。縦方向モードの発振開始電流を数値計算から評価し、周波数連続可変が期待出来る空胴長として25mmを選んだ。

電子銃の設計は、EGUNコードを用いて行った。その結果、電子速度の垂直成分と平行成分の比(ピッチファクター)は1~2の領域において、ピッチファクターの分散を5%程度に抑えた設計を実現した。この設計性能

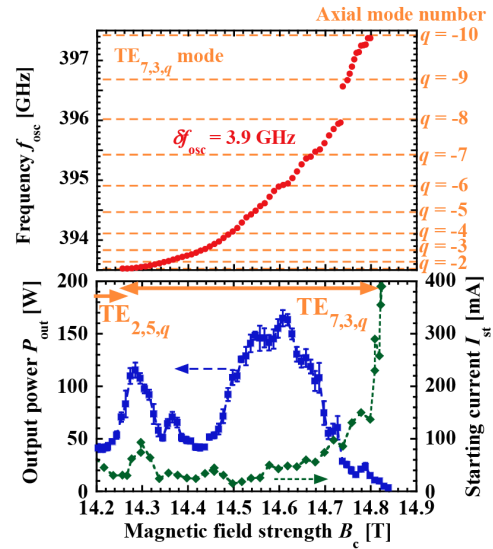


図3 磁場強度掃引による周波数可変と発振出力および発振開始電流。

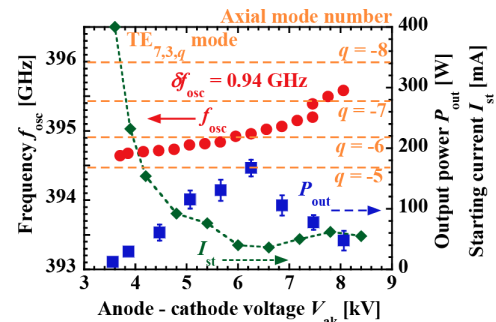


図4 アノードカソード電圧掃引による周波数可変と発振出力および発振開始電流。

は、先行研究で開発した $TE_{0,6}$ モードの周波数連続可変ジャイロトロンで使用した電子銃性能を十分に改善させており、発振性能の向上が期待された。

各 부품の製作完了後、ジャイロトロンを組み立てを行い、図2に示す装置を完成させた。ジャイロトロンが発振は、磁力線に対する軸出しが極めて重要であるため、超電導マグネット上にジャイロトロン設置位置を微調整するための非磁性XYステージを製作し、発振強度を確認しながら最適調整を行った。

以下に、動作試験にて得られた周波数連続可変性の結果を示す。図3は、磁場強度に対する発振周波数、発振出力、発振に必要なビーム電流の変化を示している。実験は、ビーム電流400 mA、ビーム電圧15 kV、アノードカソード間電圧6 kV、繰り返し周波数1 Hz、デューティ比2%の条件で行った。14.27 Tまでは弱磁場側の競合モード $TE_{2,5}$ モードが発振しているが、 $TE_{7,3}$ の発振開始とともに $TE_{2,5}$ モードの発振は停止している。 $TE_{7,3}$ の発振周波数は、磁場強度が上がるにつれて393.5 GHzから397.4 GHzまで連続的な周波

数の上昇が得られた。途中で周波数のジャンプが見られるが、この原因についてはまだ明らかでない。この周波数の変化は、縦方向モード  $q$  が 10 次まで励起することで実現している。この時の発振出力は 120 W 程度から始まり、一旦 50 W 程度まで減少するが再度上昇して 170 W までに達した。発振開始電流が上昇し始めたところで出力が徐々に減少して 14.8 T 付近で発振が停止した。強磁場側のモード競合から解放されたことにより、発振開始電流の限界まで発振が連続的に続いた。今回、得られた周波数可変幅および出力は、400 GHz 帯の光源として最高性能となった。

周波数変化は、磁場強度掃引だけでなく電子速度の磁力線と平行方向の成分の変化でも得られる。電子の平行方向速度は、電子銃のアノードとカソード間の電圧を掃引することにより変化を与えることが出来る。磁場強度 14.6 T におけるアノード-カソード間電圧を 3 kV ~ 9 kV 掃引した結果を図4に示す。発振周波数は 0.94 GHz 変化し、発振出力は約 20 ~ 170 W 得られた。電圧掃引による周波数変化幅は、磁場掃引に比べて狭いものの、周波数の高速掃引が可能で利点がある。

本研究により得られた成果は、周波数連続可変ジャイロトロンの高性能化を十分に達成しており、蛋白質構造解析の為に高性能光源の実現に大きく貢献するものである。

#### 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 14 件)

- 1) R. Ikeda, Y. Yamaguchi, Y. Tatematsu, T. Idehara, I. Ogawa, T. Saito, Y. Matsuki and T. Fujiwara, *Broadband Continuously Frequency Tunable Gyrotron for 600MHz DNP-NMR Spectroscopy*, Plasma and Fusion Research 9, pp.1206058-1~3 (2014). (査読有り)
- 2) R. Ikeda, T. Idehara, Y. Tatematsu, I. Ogawa, Y. Yamaguchi, T. Kanemaki and T. Saito, *Development of broadband frequency tunable gyrotron operating at the fundamental resonance for 600 MHz DNP-NMR spectroscopy*, Proceedings of the 38th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves, WE-P2-80 (2013). (査読無し)
- 3) Y. Matsuki, K. Ueda, T. Idehara, R. Ikeda, I. Ogawa, S. Nakamura, M. Toda, T. Anai and T. Fujiwara, *Helium-cooling and -spinning dynamic nuclear polarization for sensitivity-enhanced solid-state NMR at 14 T and 30 K*, Journal of Magnetic Resonance 225, pp.1-9 (2012). (査読有り)
- 4) Y. Yamaguchi, Y. Tatematsu, T. Saito, R. Ikeda, J.C. Mudiganti, I. Ogawa, and T. Idehara, *Formation of a laminar electron flow for 300 GHz high-power pulsed gyrotron*, Physics of Plasmas 19, pp.113113-1-6 (2012). (査読有り)
- 5) T. Saito, Y. Tatematsu, Y. Yamaguchi, S. Ikeuchi, S. Ogasawara, N. Yamada, R. Ikeda, I. Ogawa, and T. Idehara, *Observation of Dynamic Interactions between Fundamental and Second-Harmonic Modes in a High-Power Sub-Terahertz Gyrotron Operating in Regimes of Soft and Hard Self-Excitation*, Physical Review Letters 109, pp.155001-1-5 (2012). (査読有り)
- 6) T. Saito, N. Yamada, S. Ikeuchi, S. Ogasawara, Y. Tatematsu, R. Ikeda, I. Ogawa, T. Idehara, V.N. Manuilov, T. Shimozuma, S. Kubo, M. Nishiura, K. Tanaka, and K. Kawahata, *Generation of high power sub-terahertz radiation from a gyrotron with second harmonic oscillation*, Physics of Plasmas 19, pp. 063106-1-9 (2012). (査読有り)
- 7) Y. Yamaguchi, Y. Tatematsu, T. Saito, R. Ikeda, J.C. Mudiganti, I. Ogawa and T. Idehara, *Formation of Laminar Electron Flow for a High-Power Sub-THz Gyrotron*, Plasma and Fusion Research Volume 7, pp.1205004-1~3 (2012). (査読付き)
- 8) Y. Tatematsu, Y. Yamaguchi, T. Idehara, T. Ozeki, R. Ikeda, T. Kanemaki, I. Ogawa and T. Saito, *Development of a kW Level-200 GHz Gyrotron FU CW GI with an Internal Quasi-optical Mode Convertor*, Journal of Infrared, Millimeter and Terahertz Waves 33, pp.292-305 (2012). (査読有り)
- 9) Y. Matsuki, K. Ueda, T. Idehara, R. Ikeda, K. Kosuga, I. Ogawa, S. Nakamura, M. Toda, T. Anai and T. Fujiwara, *Application of Continuously Frequency-Tunable 0.4 THz Gyrotron to Dynamic Nuclear Polarization for 600 MHz Solid-State NMR*, Journal of Infrared, Millimeter and Terahertz Waves 33, pp.745-755 (2012). (査読有り)
- 10) R. Ikeda, T. Idehara, I. Ogawa, Y. Tatematsu, T.H. Chang, N.C. Chen, Y. Matsuki, K. Ueda and T. Fujiwara, *Development of a continuously frequency tunable gyrotron operating at the fundamental resonance for 600 MHz DNP-NMR spectroscopy*, Proceedings of the 37th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves, Tue-Pos-29 (2012). (査読無し)
- 11) R. Ikeda, Y. Tatematsu, T. Idehara, J.C. Mudiganti, T. Ozeki, T. Kanemaki, I. Ogawa, and T. Saito, *Development of a table-top 200 GHz gyrotron FU CW CII with an internal mode convertor*, Proceedings of the 37th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves, Mon-C-3-4 (2012). (査読無し)

- 12) R. Ikeda, Y. Tatematsu, T. Idehara, J.C. Mudiganti, T. Ozeki, T. Kanemaki, I. Ogawa, and T. Saito, *A table-top 200 GHz gyrotron FU CW CII with an internal mode converter*, Proceedings of the 4th International Workshop on Far-Infrared Technologies (2012). (査読無し)
- 13) 池田亮介, 出原敏孝, 立松芳典, 小川勇, 山口裕資, Jagadish. C. Mudiganti, 斉藤輝雄, *200 GHz 帯におけるコンパクトジャイロトロン*の設計及び *400 GHz 帯における周波数連続可変ジャイロトロン*の開発, 映像情報メディア学会技術報告 36(5), pp.19-26 (2012). (査読無し)
- 14) R. Ikeda, Y. Tatematsu, T. Idehara, Y. Yamaguchi, J.C. Mudiganti, T. Ozeki, I. Ogawa and T. Saito, *Design of a tabletop gyrotron with an internal mode converter*, Proceedings of the 36th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves, Tu5.13.1 (2011). (査読無し)
- [学会発表] (計 12 件)
- 1) R. Ikeda, T. Idehara, Y. Tatematsu, Isamu Ogawa, Y. Yamaguchi, T. Kanemaki and T. Saito, *Development of broadband frequency tunable gyrotron operating at the fundamental resonance for 600 MHz DNP-NMR spectroscopy*, The 38th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves, Mainz, Germany, 1-6 September, 2013.
- 2) 池田亮介, 桑原太貴, 出原敏孝, 小川勇, 立松芳典, 松木陽, 植田啓介, 藤原敏道, T.H.Chang, *400GHz 帯高周波数ジャイロトロンにおける周波数連続可変性と高性能化の研究 II*, 日本物理学会 2013 春季大会, 広島大学東広島キャンパス, 2013 年 3 月 26-29 日.
- 3) R. Ikeda, Y. Tatematsu, T. Idehara, Y. Yamaguchi, I. Ogawa and T. Saito, *Development of 203 GHz/ 1 kW table-top size gyrotron FU CW CII*, International Symposium on Development of Terahertz Gyrotrons and Applications, University of Fukui, 14-15 March, 2013.
- 4) 池田亮介, 桑原太貴, 出原敏孝, 小川勇, 立松芳典, 松木陽, 植田啓介, 藤原敏道, T.H.Chang, *203 GHz コンパクトジャイロトロン FU CW CII の開発*, プラズマ・核融合学会 第 29 回年会, 福岡県春日市クローバープラザ, 2012 年 11 月 27-30 日.
- 5) 池田亮介, 桑原太貴, 出原敏孝, 小川勇, 立松芳典, 松木陽, 植田啓介, 藤原敏道, T.H.Chang, *600MHz DNP-NMR 分光の為の 400GHz 帯周波数連続可変ジャイロトロン Gyrotron FU CW VIB の開発*, 日本物理学会 2012 秋季大会, 横浜国立大学, 2012 年 9 月 18-21 日.
- 6) 池田亮介, 桑原太貴, 立松芳典, 山口裕資, 出原敏孝, 小川勇, 斉藤輝雄, *400GHz 帯高周波数ジャイロトロンにおける周波数連続可変性と高性能化の研究*, 日本物理学会 2012 秋季大会, 横浜国立大学, 2012 年 9 月 18-21 日.
- 7) R. Ikeda, Y. Tatematsu, T. Idehara, Y. Yamaguchi, I. Ogawa and T. Saito, *Development of a table-top 200 GHz gyrotron FU CW CII with an internal mode convertor*, The 37th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves, Wollongong, Australia, 24-28 September, 2012.
- 8) R. Ikeda, T. Idehara, I. Ogawa, Y. Tatematsu, T.H. Chang, N.C. Chen, Y. Matsuki, K. Ueda and T. Fujiwara, *Development of a continuously frequency tunable gyrotron operating at the fundamental resonance for 600 MHz DNP-NMR spectroscopy*, The 37th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves, Wollongong, Australia, 24-28 September, 2012.
- 9) R. Ikeda, Y. Tatematsu, T. Idehara, J.C. Mudiganti, T. Ozeki, T. Kanemaki, I. Ogawa and T. Saito, *A table-top 200 GHz gyrotron FU CW CII with an internal mode converter*, The 4th International Workshop on Far-Infrared Technologies, University of Fukui, Japan, 7-9 March, 2012.
- 10) 池田亮介, 出原敏孝, 立松芳典, 小川勇, 山口裕資, Jagadish. C. Mudiganti, 斉藤輝雄, *200 GHz 帯におけるコンパクトジャイロトロン*の設計及び *400 GHz 帯における周波数連続可変ジャイロトロン*の開発, 第 9 回赤外放射の応用関連学会年会, 東京工科大学, 2012 年 2 月 7 日.
- 11) 池田亮介, 出原敏孝, 小川勇, 立松芳典, 山田幸毅, 山口裕資, 斉藤輝雄, 松木陽, 植田啓介, 藤原敏道, T.H. Chang, N.C. Chen, *基本波発振による 400GHz 帯周波数連続可変ジャイロトロン*の開発, プラズマカンファレンス 2011, 石川県立音楽堂, 2010 年 11 月 22-25 日.
- 12) R. Ikeda, Y. Tatematsu, T. Idehara, Y. Yamaguchi, J.C. Mudiganti, T. Ozeki, I. Ogawa and T. Saito, *Design of a tabletop gyrotron with an internal mode converter*, The 36th International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves, Houston, USA, 2-7 October, 2011.
6. 研究組織  
 (1) 研究代表者  
 池田亮介 (IKEDA RYOSUKE)  
 独立行政法人日本原子力研究開発機構  
 核融合研究開発部門 那珂核融合研究所  
 任期付職員  
 研究者番号 : 80533364