

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 16 日現在

機関番号：13401

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23560393

研究課題名(和文) ジャイロトロンの高周波化によるテラヘルツ高出力光源の開発

研究課題名(英文) Development of high power terahertz radiation source through high frequency gyrotron

研究代表者

小川 勇 (Ogawa, Isamu)

福井大学・遠赤外領域開発研究センター・教授

研究者番号：90214014

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円、(間接経費) 1,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の目的は、1 THz領域において出力が10 W程度得られる高出力光源を実現することである。ハイパスフィルターを取り付けた焦電型検出器により、磁場強度19.3 Tにおいてジャイロトロンが発振を確認した。この出力は、磁場強度19.3 Tにおける二次高調波動作によるものであり、周波数1 THzを越え、十分な出力であることが分かった。

高純度モード出力が得られる共振器とアップテーパーを設計製作し、テラヘルツ・ジャイロトロン装置を完成した。このジャイロトロン装置は高純度モード出力を得られるという特長を持ち、ガウスビームへの変換も見通せ、光源としての応用に適している。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this research is to realize high power (~ 10 W) radiation source in the terahertz range. Gyrotron is characterized by delivering high output power. In order to obtain high frequency radiation, the gyrotron is equipped with a 20 T superconducting magnet. The gyrotron operated in the magnetic field intensity of 19.3 T produced output radiation. The radiation is detected by a pyroelectric detector. The radiation is not blocked by attaching the high-pass filter to the detector. Cutoff frequency of the high-pass filter is lower than fundamental operation frequency of the gyrotron. The gyrotron output frequency for second harmonic operation is higher than 1 THz. The output power is intense enough to radiation source. The cavity and up-taper to ensure high mode purity output are manufactured and are installed in the gyrotron. High purity mode output will be efficiently converted into the Gaussian beam. This gyrotron is suitable for radiation source in the terahertz range.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・電子デバイス・電子機器

キーワード：高周波ジャイロトロン テラヘルツ・ジャイロトロン 高純度モード出力ジャイロトロン テラヘルツ光源

1. 研究開始当初の背景

ジャイロトロンは、プラズマ加熱用の発振管として 170 GHz 帯において 1 MW の出力を目指した開発が進展してきた。一方で、ジャイロトロンは高周波化にも適しており、波長が 1 mm から 0.3 mm のサブミリ波領域からテラヘルツ領域の電磁波領域(周波数 300 GHz から 1 THz)では、ジャイロトロン以外に 10 W 程度以上出力が得られるものはない。

周波数 460 GHz までの領域では、ジャイロトロンは、プラズマ計測や物性研究あるいは、蛋白質の構造解析の手法として期待されている DNP-NMR 測定法等への応用が進展している。

申請者らは、ジャイロトロンのさらなる高周波化を行い、ジャイロトロンの最高周波数記録 889 GHz を達成した(T.Idehara, I.Ogawa, et al., IEEE Trans. Plasma Sci. 27, 340, 1999)。さらに、強磁場を発生するパルス磁場を用いて、二次高調波動作を実現することにより、1 THz の領域の発振を実現した(O.Watanabe, I.Ogawa, et al., Plasma and Fusion Research: Regular Articles Volume 2, S1000, 2007)。その後、ロシアのグループも、より強力なパルス磁場を用い、基本波動作により、1 THz の領域の発振を実現した(M.Yu. Glyavin, et al., PRL 100, 015101, 2008)。

ジャイロトロンによる最高周波数の達成の背景には、1 THz の領域における高出力が得られる光源を実現しようとする狙いがある。しかし、パルス磁場コイルを用いるかぎり、コイルの冷却が必要で、数分から数 10 分に一度の割合で 1 ms 間程度の短パルス発振になり、光源としての利用には適さない。

申請者らは、最近、室温ボア径が大きく、20 T まで発生できる超伝導マグネットを整備し、この超伝導マグネットを用いたジャイロトロンを開発した(T.Idehara, I.Ogawa, et al., J. Plasma Fusion Res. SERIES, Vol. 8, 2009)。超伝導マグネットが連続的に発生する磁場を利用するので、長パルス動作あるいは連続動作による発振が可能となり、二次高調波動作が実現できれば、1 THz の領域の光源としての利用に道を開くことができる。

2. 研究の目的

本研究では、超高周波ジャイロトロンを実現し、その発振の特性改善により、1 THz 領域の高出力光源を開発することを研究目的とする。

(本研究の具体的な目的)

1). 20 T 近くの磁場強度において、二次高調波動作を実現し、1 THz 以上の発振出力を得る。

2). 動作パラメーターの最適化による、発振出力の向上(発振出力 10 W 以上)、長パルス動作及び連続動作の実現を図る。

3). ジャイロトロン出力のモード純度の改善

を図り、ガウスビームへの変換を行う。

3. 研究の方法

1). ジャイロトロンを用い、1 THz 以上の発振出力を実現する。その後、発振出力の向上(発振出力 10 W 以上)、出力の時間変動の軽減(発振出力の時間変動を数%以下、周波数変動を数 10 MHz 以下、長パルス動作及び連続動作の実現)を図る。

2). ジャイロトロン出力のモード純度の改善を図り、ガウスビームへの変換を行う。

申請者は、20 T 超伝導マグネットを用いたジャイロトロンを開発している。これまでに、周波数測定により、589.72 GHz の発振を確認している。詳細な実験により、1 THz 以上の発振を実現し、その発振の高出力化と安定化を行い、最終的には、ガウスビームへの変換を実現する。

平成 23 年度の計画

(1) ジャイロトロンにより、1 THz 以上の発振の探索(研究代表者 小川、研究分担者 池田が担当) 小川と池田は、ともにジャイロトロンの実験と各種の測定技術を習得しており、成果を上げるため、本申請では、両者が緊密に協力して研究を進める体制を取る。

磁場強度 20 T 近辺において、二次高調波動作によって発振が得られると、その発振の周波数は、1 THz 以上となる。そこで、磁場強度を掃引しながら、焦電型検出器でジャイロトロン出力を調べる実験を行う。磁場強度の関数として、各動作モードに対して、発振開始電流を求めておき、磁場強度の関数として得られた出力についての実験結果と比較し、得られた出力の動作モードの同定を行う。

焦電型検出器は広い周波数領域に感度があるので、磁場強度の関数として得られた出力についての実験結果には、基本波動作と二次高調波動作による両方の出力が含まれる。ジャイロトロン出力部と焦電型検出器との間に、低い周波数の電磁波を通さないハイパスフィルターを挿入して、磁場強度を掃引し、同様の実験を行うと、基本波動作出力を除去でき、二次高調波動作出力についてのみの結果を得られる。各動作モードに対して、計算した発振開始電流との比較により、基本波動作と二次高調波動作による出力の同定をする。これらの同定の結果から、1 THz 以上の発振となる動作モードを想定し、20 T 近辺において磁場強度を掃引する実験を詳しく行い、1 THz 以上の発振を探索する。特に、カソード電圧、アノード電圧、電子ビーム電流、補助磁場コイル電流を細かく設定した磁場強度掃引実験により、1 THz 以上の発振が起こる可能性を引き上げる。

平成 24 年度以降の計画

(1) ジャイロトロンの最適設計

平成 23 年度の 1 THz 以上の発振探索実験の結果を基に、発振の高出力化、高安定化及び高純度モード出力が可能なジャイロトロン設計を行う。ガウスビームへの変換に感

力を発揮する高純度モード出力を得るため、散乱行列を用いて設計製作した非線形形状の共振器をジャイロトロンに組み込む。共振器は、ドイツとの共同研究で既に製作されている。以前にこれと同様の共振器を用いたジャイロトロンにより、高純度モード出力を得ることができている (T. Idehara, I. Ogawa, et al., Int. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 23, No.9, 2002)。シミュレーションのコードを使用し、ジャイロトロンの動作解析に経験を持つ連携研究者がジャイロトロンの設計を行う。まず、電子ビーム軌道のシミュレーションにより、共振器への最適入射位置と電子ビームパラメータが得られる電子銃と補助コイルの位置及び電子銃のエミティング半径を求める。また、このシミュレーションにより求めた共振器への入射位置と電子ビームパラメータを用い、電子ビームと高周波電磁場との相互作用のシミュレーションにより、設定した動作モードに対する発振出力の情報を得ることで、ジャイロトロンの設計を完了する。

(2) ジャイロトロンの製作 (研究代表者 小川が担当) 設計に基づき、電子銃を整備し、ジャイロトロンを製作する。以前のジャイロトロンはデマンタブル型であるので、電子銃と共振器以外は以前の部品を再利用して組み立てる。

(3) 1 THz 以上の発振の探索と高出力化、高安定化及び高純度モード出力の発生 (研究代表者 小川, 研究分担者 池田が担当) ジャイロトロンの磁場強度を掃引し、以前と同様の方法で 1 THz 以上の発振を探索する。目的の発振に対して、動作パラメータを最適化し、長パルス動作あるいは連続発振で高出力化、高安定化を目指す。また、周波数測定システムにより、周波数測定と周波数の変動を調べ、動作パラメータの最適化により、高安定化な領域を見出す。さらに、出力の放射パターンを調べ、高純度モード出力になっていることを確認する。

(4) ジャイロトロンの高純度モード出力のガウスビームへの変換 ガウスビームへの変換器に経験を持つ連携研究者が放射パターン測定の結果に基づき、変換器の設計と製作を行う。ジャイロトロンに変換器を設置し、放射パターン測定を行い、良質なガウスビームになっているかを調べ、変換器位置の微調整により、さらにガウスビームの質の向上を図る。

(5) ジャイロトロンの光源としての適正の評価 (研究代表者 小川担当) 以上のジャイロトロンの特性 (周波数, 出力, 出力安定性, 周波数安定性, ガウスビームの質と強度) から光源としての適正を評価し、応用への検討を進める。

4. 研究成果

ジャイロトロンにおいて、二次高調波動作を用いて 1 THz 領域の発振を得るためには、

20 T 程度の磁場強度が求められる。パルス磁場を用いるジャイロトロンでは、遅い繰り返しパルス発振となるので、光源としての利用に向かない。そこで、磁場強度が 20 T まで発生できる超伝導マグネットを用いたジャイロトロン装置を製作した。

本研究では、1 THz 領域の発振を得ることが前提になる。超伝導マグネットが発生する磁場強度を掃引しながら、動作試験を行ったところ、多くの磁場強度のところで、焦電型検出器により発振を観測することができた。発振開始電流の磁場強度依存性のグラフと比較し、実験で得られた発振出力について動作モードの同定を行うことができた。

周波数 1 THz 以上の発振を観測するとき、高出力で得られる基本波動作の低い周波数の発振を分離する必要がある。そこで、ジャイロトロン出力部と焦電型検出器との間に、ハイパスフィルターを挿入し、動作試験を行った。このとき、ハイパスフィルターは、カットオフ周波数が基本波動作による発振の周波数を超えるものを選んだ。その結果、磁場強度 19.3 T において、発振を得ることができた。磁場強度と加速電圧を考慮し、二次高調波動作である場合、周波数は 1 THz 以上であり、十分な出力が得られていることが分かった。

光源として、ジャイロトロンを確立するためには、発振出力や発振周波数の測定や出力の高品位化を行うことが求められる。特に、1 THz 領域を対象とする周波数測定を行う必要がある。測定系としては、局部発振器とミキサーよりなるヘテロダイン受信系の動作試験を BWO や分子レーザーを光源として用いて、詳細に行った。1 THz 以上のミキサーでは、ミキサーの変換損失が大きくて、そのままでは測定が困難であった。変換損失の過大さを補うため、中間周波信号を増幅することにより、測定が可能となった。

光源としての利用では、発振出力をガウスビームに変換することが重要で、高純度モード出力を達成することが求められる。散乱行列を用いて、高純度モード出力のためのジャイロトロンの非線形形状の共振器およびアップテーパーをドイツとの共同研究で製作した。この共振器およびアップテーパーを組み込み、20 T まで発生できる超伝導マグネットを用いたジャイロトロン装置を完成させた。このジャイロトロン装置は高純度モード出力を得られるという特長を持ち、ガウスビームへの変換も見通せ、光源としての応用に適している。

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 9 件)

T. Yamazaki, A. Miyazaki, T. Suehara, T. Namba, S. Asai, T. Kobayashi, H. Saito, I. Ogawa, T. Idehara, S. Sabchevski,

Direct Observation of the Hyperfine Transition of Ground-State Positronium, *Physical Review Letters*, **108** (2012) 141-147, DOI 10.1007/s10751-011-0399-0
A. Rogalev, J. Goulon, G. Goujon, F. Wilhelm, I.Ogawa, T.Idehara, X-Ray Detected Magnetic Resonance at sub-THz frequencies using a high power gyrotron source, *J. Infrared Milli Terahz Waves*, **33**(2012)777-793, DOI 10.1007/s10762-011-9855-9
S.Asai, T. Yamazaki, A. Miyazaki, T. Suehara, T. Namba, T. Kobayashi, H. Saito, T.Idehara, I.Ogawa, S. Sabchevski, Direct Measurement of Positronium HyperFine Structure~A New Horizon of Precision Spectroscopy Using Gyrotrons~, *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, **33** (2012)766-776, DOI 10.1007/s10762-011-9864-8
F. Horii, T.Idehara, Y. Fujii, I.Ogawa, A. Horii, G. Entzminger, F.D. Doty, Development of DNP-Enhanced High-Resolution Solid-State NMR System for the Characterization of the Surface Structure of Polymer Materials, *Journal of Infrared, Millimeter and Terahertz Waves*, **33** (2012) 756-765, DOI 10.1007/s10762-012-9874-1
Toshitaka Idehara, Jagadish C. Mudiganti, La Agusu, Tomohiro Kanemaki, Isamu Ogawa, Toshimichi Fujiwara, Yoh Matsuki, Keisuke Ueda, Development of a compact sub-THz gyrotron FU CW CI for application to high power THz technologies, *Journal of Infrared, Millimeter and Terahertz Waves*, **33** (2012)724-744, DOI:10.1007/s10762-012-9911-0
Yoh Matsuki, Keisuke Ueda, Toshitaka Idehara, Ryosuke Ikeda, Kosuke Kosuga, Isamu Ogawa, Shinji Nakamura, Mitsuru Toda, Takahiro Anai, Toshimichi 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** (2012)743-755
Yoh Matsuki, Keisuke Ueda, Toshitaka Idehara, Ryosuke Ikeda, Isamu Ogawa, Shinji Nakamura, Mitsuru Toda, Takahiro Anai, Toshimichi 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**(2012)1-9
Akira Miyazaki, Takayuki Yamazaki,

Taikan Suehara, Toshio Namba, Shoji Asai, Tomio Kobayashi, Haruo Saito, Toshitaka Idehara, Isamu Ogawa, Yoshinori Tatematsu, The Direct Spectroscopy of Positronium Hyperfine Structure Using a Sub-THz Gyrotron, *Journal of Infrared, Millimeter and Terahertz Waves*, **35**(2014) 91-100, DOI 10.1007/s10762-013-0001-8
R.Ikeda, Y.Yamaguchi, Y.Tatematsu, T.Idehara, I.Ogawa, T.Saito, Y. Matsuki, T.Fujiwara, Broadband continuously frequency tunable gyrotron for 600 MHz DNP-NMR spectroscopy, *Plasma and Fusion Research*, **9** (2014) 1206058, DOI 10.1585/pfr.9.1206058

[学会発表](計 9 件)

Isamu Ogawa, Kosuke Kosuga, Toshitaka Idehara, Ryosuke Ikeda, and Jagadish Mudiganti, Development of THz Gyrotron FU CW III using a 20 T superconducting magnet, 36th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (2011 年 10 月 5 日), Hyatt Regency Houston, Texas, USA
小川 勇, 池田亮介, 細窪素直, 出原敏孝, 高周波ジャイロトロンの発振出力の安定化, プラズマ・核融合学会第 28 回年会/応用物理学会第 29 回プラズマプロセッシング研究会/日本物理学会(領域 2)2011 年秋季大会(2011 年 11 月 23 日), Ishikawa Ongakudo, Kanazawa-shi, Ishikawa
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 400 GHz 帯周波数連続可変ジャイロトロンの開発, プラズマ・核融合学会第 28 回年会/応用物理学会第 29 回プラズマプロセッシング研究会/日本物理学会(領域 2)2011 年秋季大会(2011 年 11 月 23 日), Ishikawa Ongakudo, Kanazawa-shi, Ishikawa
I.Ogawa, R.Ikeda, Y.Tatematsu, T.Idehara, T.Saito, Stabilization of gyrotron output power using feedback control, 37th International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves, 2012 年 09 月 22 日 ~ 2012 年 09 月 28 日, Wollongong (Australia)
T.Idehara, I.Ogawa, S. Mitsudo, Y.Tatematsu, T.Saito, Development of THz gyrotrons for application to high power THz technologies, The 9 th Australia-Japan workshop on plasma diagnostics (招待講演), 2012 年 12 月 03 日 ~ 2012 年 12 月 06 日 Naka, Ibaraki, Japan
宮崎 彬, 山崎 高幸, 難波 俊雄, 浅井 祥仁, 小林 富雄, 斎藤 晴雄, 末原 大

幹, 立松 芳典, 小川 勇, 出原 敏孝,
大強度ミリ波を用いたポジトロニウム超
微細構造の直接測定, 日本物理学会第 69
回年次大会(2014 年 3 月 28 日)

T. Idehara, R. Ikeda, Y. Tatematsu,
I. Ogawa, Y. Yamaguchi, T. Kanemaki,
T. Saito, Development of Broadband
Frequency Tunable Gyrotron Operating at
the Fundamental Resonance for 600 MHz
DNP-NMR Spectroscopy, 38th
International Conference on Infrared,
Millimeter and Terahertz Waves (2013
年 9 月 6 日) Mainz

T. Idehara, Y. Tatematsu, Y. Yamaguchi, R.
Ikeda, I. Ogawa, T. Saito, Y. Matsuki, K.
Ueda, T. Fujiwara, M. Toda, 460 GHz
Second Harmonic Gyrotrons for a 700 MHz
DNP-NMR Spectroscopy, 38th
International Conference on Infrared,
Millimeter and Terahertz Waves (2013
年 9 月 2 日) Mainz

T. Yamazaki, A. Miyazaki, T. Namba,
S. Asai, T. Kobayashi, T. Suehara,
Y. Tatematsu, I. Ogawa, T. Idehara,
Sub-THz spectroscopy of the ground
state hyperfine splitting of
positronium, 38th International
Conference on Infrared, Millimeter and
Terahertz Waves(2013 年 9 月 4 日) Mainz

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

取得状況(計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

小川 勇 (OGAWA Isamu)

福井大学・遠赤外領域開発研究センター・教授

研究者番号：90214014

(2) 研究分担者

池田 亮介 (IKEDA Ryoussuke)

独立行政法人日本原子力研究開発機構・研究員

研究者番号：80533364

(3) 連携研究者

()

研究者番号：