

科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成25年 5月10日現在

機関番号：13401

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2011～2012

課題番号：23656237

研究課題名（和文）有限電荷効果を抑制したテラヘルツ帯ジャイロトロン用小型大電流電子銃の開発

研究課題名（英文）Development of a small size, large current electron gun for terahertz band gyrotron suppressing space charge effect

研究代表者

斉藤 輝雄（SAITO TERUO）

福井大学・遠赤外領域開発研究センター・教授

研究者番号：80143163

研究成果の概要（和文）：本研究では、テラヘルツ帯高出力発振管ジャイロトロンにおいて、2次高調波では0.4 THz帯、100 kW級、基本波では0.3 THz帯、200 kW級のジャイロトロンを実現するための有限電荷効果を抑制した小型大電流電子銃を設計する定量的手法を確立した。この手法による運転条件の最適化により、周波数389 GHz、出力83 kWの2次高調波単独発振出力を得ることに成功した。ついで、300 GHz帯基本波ジャイロトロン用電子銃を製作し、200 kW以上の発振に成功した。

研究成果の概要（英文）：A quantitative design method of a small size, large current electron gun has been established that realizes high power gyrotrons of 100 kW level second harmonic oscillation in the 0.4 THz band and 200 kW level fundamental harmonic oscillation in the 0.3 THz band. Single mode second harmonic oscillation of 83 kW at 389 GHz has been successfully demonstrated with optimization of the operation conditions using this method. An electron gun for 300 GHz band fundamental harmonic gyrotron was fabricated and over 200 kW oscillation has proved successful.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	3,000,000	900,000	3,900,000

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：ジャイロトロン、テラヘルツ、電子銃、国際研究者交流、有限電荷効果の抑制、2次高調波単独発振、ロシア

1. 研究開始当初の背景

ジャイロトロンは、テラヘルツ帯においてキロワットオーダーの連続出力が期待できる唯一の発振管である。ジャイロトロンでは、電界と磁界がほぼ直交するマグネトロン入射型電子銃(MIG)から、10 Tを超える強磁場部にある空洞共振器に電子が入射され、磁気ミラー効果で増大した磁力線に垂直方向の運動エネルギーが、サイクロトロンメーザー作用により電磁波に変換される。

福井大学における世界で初めての1 THzを

超える発振の成功を受け、テラヘルツ帯ジャイロトロンは広範な応用が期待されている（プラズマ・核融合学会誌 84, No. 12 (2008)、T. Idehara et al., 34th IRMMW - THz 2009, W3D01 招待講演など）。応用展開を一気に加速するには、ジャイロトロンの小型化が必須である。このカギは有限電荷効果を抑制して電子銃を小型化することである。

この結果実現する100 kW級の画期的高出力からkW級の完全連続発振可能なテラヘルツ帯ジャイロトロンは、核融合プラズマ計

測・動的核偏極法によるタンパク質など生体高分子や材料表面解析法の実用化・テラヘルツ帯電子スピン共鳴・物質表面改質による新機能材料開発・新規ガン治療法開発など、幅広い分野における新技術の開拓につながる。

2. 研究の目的

本研究の目的は、テラヘルツ帯において画期的高出力を実現する発振管「ジャイロトロン」用の小型大電流電子銃を開発し、出力飽和の原因になる有限電荷効果を抑制し、2次高調波では0.4 THz帯、100 kW級のジャイロトロン、基本波では0.3 THz帯、200 kW級のジャイロトロンを実現するための定量的電子銃設計手法を確立し、さらに本研究の成果をジャイロトロンの小型化に結びつけることである。

研究代表者は科学研究費基盤(B)により、電子銃設計の専門家 Manuilov 教授の設計による電子銃を使用して核融合プラズマ計測用ジャイロトロン開発を進め、0.35 THzで50 kWを超える世界最高出力を得た(T. Notake et al., Phys. Rev. Lett. **103**, 225002 (2009))。本研究では、この電子銃設計時に得た有限電荷効果を抑制する新しいアイデアに基づき、小型大電流電子銃を実際のジャイロトロン製作を通して性能を実証しつつ開発し、小型高出力テラヘルツ帯光源実現への道を切り拓く。

3. 研究の方法

(1) 目標達成のためのアイデア

ジャイロトロン用電子銃MIGは、同軸配位を持つ。コーン状の陰極上にある円環帯から放出された電子は、陰極に対向するように配置された陽極との間の静電場による加速を受けると同時に、磁力線の回りにヘリカル軌道を描きながら空洞共振器に入射する。このとき磁力線に垂直方向の速度 v_{\perp} と平行方向の速度 v_{\parallel} の比 $\alpha = v_{\perp}/v_{\parallel}$ (ピッチ因子)が増大する。ピッチ因子を大きくすることが高出力に直結する。これまでは、陰極表面における加速電界の磁力線に垂直方向成分 E_{\perp} を大きくすることが重視されていた。しかしこの場合は、電子軌道が交差して、局所的に高電子密度領域が生じ、有限電荷効果による静電気力が電子軌道の拡散と速度分散を引き起こす。さらにビーム不安定性が生じる原因にもなる。これが許容電流密度を制限し、電子銃の小型化を妨げていた。特に、高磁場で電子ビームが圧縮される高周波ジャイロトロンにおいて、この問題が顕在化する。

よって、電子銃小型化のポイントは電子軌道の交差を防ぐこと(ラミナー電子流の形成)である。Manuilov教授との共同研究から、陰極から放出された直後の電子軌道制御が重要であり、陰極表面(電界はこの面に垂直)

と磁力線のなす角度 ϕ がラミナー電子流形成の制御パラメータであることが分かった。初期的な計算によると、 $\phi > 22^{\circ}$ がラミナー流の生成条件である。一方、単純に ϕ を大きくすると E_{\perp} が小さくなり、初期 v_{\perp} が低下してピッチ因子が減少する。よって、陰極および陽極の形状と位置の最適化により、初期 v_{\perp} を低下させない電極設計、すなわち最適電位分布の形成がもう一つのポイントである。

(2) 研究組織と役割分担

研究組織と役割分担を図1に示す。斉藤が全体をまとめ、立松は研究協力者山口の協力を得て、電子銃を設計した。特性試験に当たっては、福井大学工学研究科に在籍の山田が協力した。共同研究を行っている Manuilov 教授には電子銃設計の専門家としての助言を得た。各研究協力者の所属を下に示す。
V. Manuilov、ロシア、ニジニノブゴロド州立大学教授：小型大電流電子銃設計への協力
山口裕資、遠赤外領域開発研究センター機関研究員：電子銃設計とジャイロトロン実験
山田尚輝、福井大学工学研究科博士前期課程：ジャイロトロン実験と特性解析

本研究において山口の協力は非常に重要であった。電子銃の詳細な設計計算とともに、

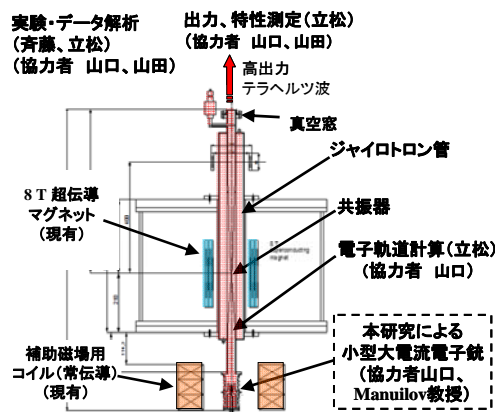


図1 研究組織と役割分担

後で示す電子銃設計上の新しい知見をもたらしたのも山口である。

本研究は2年計画であり、初年度の23年度は、電子銃における有限電荷効果を抑制する手法の開発とその妥当性評価、この結果を取り入れた電子銃設計を以下の順に進めた。

まず、電子銃から放出される電子ビームにおける有限電荷効果を定量的に評価する手法を独自に開発した。次に、この評価法を既に開発済みの電子銃設計コードに適用し、既設2次高調波ジャイロトロンの電子銃特性を最適化できる運転パラメータを算出した。この段階でニジニノブゴロド州立大学マヌイロフ教授を研究協力者として招へいし、この算出手法の正しさを検討した。特に、有限電

荷効果の定量的評価手法の有効性を確認した。

24年度はこの設計に基づく電子銃を製作し、別途開発の0.3 THz帯基本波ジャイロトロンに装着した。さらに、発振実験を通して、電子銃の特性を評価することとした。

4. 研究成果

特に、有限電荷効果の定量的評価手法の有効性を確認した。この成果を基本波発振0.3 THz帯、200 kW級のジャイロトロンに用いる電子銃の設計に適用し、加速電圧65 kV、電子電流10 Aにて、ピッチ因子1.2以上、速度広がり3%程度の低分散電子ビームを生成できる電子銃の設計に成功した。

この電子銃を製作し、別途製作された0.3 THz帯のジャイロトロンに装着して特性試験を実施した。この結果、200 kW以上の発振に成功した。これは、陰極表面の電界分布を最適化して、大電流時の特性劣化を防ぐ設計の妥当性を示す。以上より、テラヘルツ帯ジャイロトロン用小型大電流電子銃の高性能設計手法を確立することに成功した。

以下に、小型大電流電子銃の設計と、この電子銃を用いたサブテラヘルツ帯高出力ジャイロトロンの特性試験の結果を示す。

(1) 小型大電流電子銃特性の設計と新たな知見

図2は、0.3 THz帯の基本波発振高出力ジャイロトロン用に設計された電子銃の特性計算を示す。陰極および陽極それぞれの形状と配置、磁力線と陰極表面とのなす角度等を最適化したときの、共振器入り口における電子ビームのピッチ因子とピッチ因子の広がり、陰極-陽極間電圧に対してプロットされている。目標運転パラメータであるビーム電流10 A、陰極電圧65 kVにおいて、ピッチ因子1.2以上1.5程度までピッチ因子の広がりが5%以下に出来ている。また、ビーム電流20 A程度まで良好な電子ビーム特性が得られると期待できる。これは、ジャイロトロン

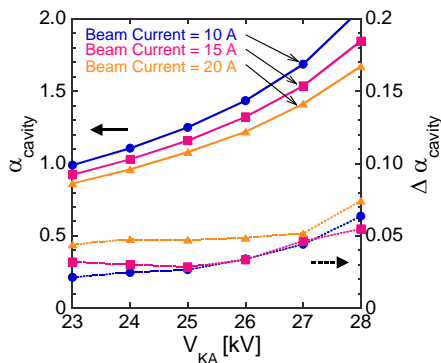


図2 共振器入り口における電子ビームのピッチ因子とピッチ因子の広がり陰極-陽極間電圧依存性

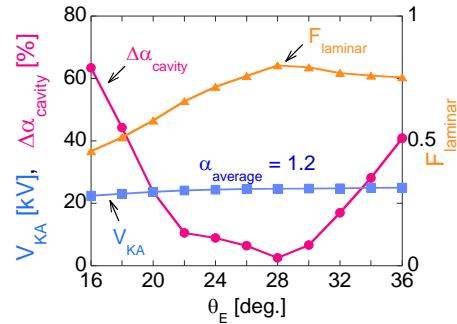


図3 ピッチ因子の広がりとラミナー性指標およびピッチ因子を一定値1.2に保つために必要な陰極-陽極間電圧の陰極表面と磁力線との角度依存性

の発振出力を出来るだけ大きくするという観点から、非常に重要なことである。

図3は、本研究において得られた新しい知見を示す。これまで、マグネトロン入射型電子銃において、ラミナー電子ビームを得る基準として、陰極表面と磁力線との角度を22度以上にすることが採用されていた。図3は、確かにこの角度が大きい方が電子ビームのラミナー性が向上し、ピッチ因子の広がりも小さくなることを示している。しかし、角度が一定値以上になると、逆にラミナー性が低下し、ピッチ因子の広がりも大きくなることわがわかる。これは、電子ビームのラミナー性は、単に陰極表面と磁力線との角度のみで決まるのではなく、電子ビームが通過する空間の電位分布が、その特性に大きく影響する結果である。特に、陰極-陽極間の電位分布の最適化が、重要である。これらの知見に加えて、電子ビームのラミナー性の定量的評価法が論文(1)および(4)で報告されている。

(2) サブテラヘルツ帯高出力ジャイロトロンの特性試験

この設計に基づく電子銃を製作し、別途開発の0.3 THz帯基本波ジャイロトロンに装着し、発振実験を実施した。図4にその結果を示す。図4は、ジャイロトロンのビーム電流

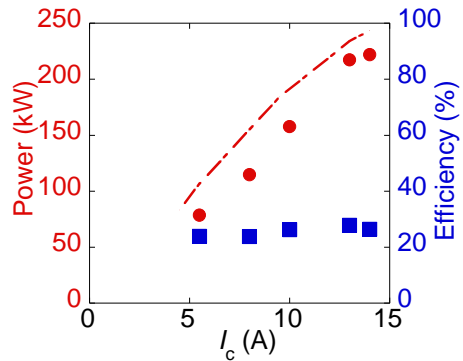


図4 陰極電圧60 kVの時のビーム電流に対する出力および発振効率の変化。一点鎖線は出力の計算値を示す。

に対する出力の変化をプロットしたものである。また、発振効率も示されている。この実験で、出力はジャイロトロン真空窓フランジに接続されたテーパ管及び90度マイターバンドを介して水負荷で計測された。出力のプロット値は、ビーム電流毎に主磁場強度、陽極電圧等の運転パラメータを最適化して得られた最高値である。一点鎖線は、各運転パラメータに対して計算される電子ビームのピッチ因子を用いて、ジャイロトロン出力計算をした結果である。実験値は計算値より若干小さいが、ほぼ期待される出力が得られていることがわかる。また、ビーム電流14 Aまで、出力の顕著な飽和が見られず、最大で220 kWを超える出力が得られた。このことは、間接的ではあるが、本研究で設計製作した電子銃が高品位の電子ビームを生成していることを裏付けている。

以上のことから、本研究において目標とした、ジャイロトン用の小型大電流電子銃を開発し、出力飽和の原因になる有限電荷効果を抑制して、2次高調波では0.4 THz帯、100 kW級のジャイロトン、基本波では0.3 THz帯、200 kW級のジャイロトンを実現するための電子銃設計手法を確立することが出来た。さらに、本研究で確立された設計手法が、0.4 THz帯のコンパクトジャイロトン用電子銃の設計にも応用され、ジャイロトンの小型化に結び付いている。

以上をもって、本研究の目標を達成した。

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5件)

(1) Yuusuke Yamaguchi, Yoshinori Tatetsu, Teruo Saito, Ryosuke Ikeda, Jagadish C. Mudiganti, Isamu Ogawa and Toshitaka Idehara “Formation of a laminar electron flow for 300 GHz high-power pulsed gyrotron,” Phys. Plasmas **19**, 113113 (2012) 6 pages, <http://dx.doi.org/10.1063/1.4768959>

(2) Teruo Saito, Yoshinori Tatetsu, Yuusuke Yamaguchi, Shinji Ikeuchi, Shinya Ogasawara, Naoki Yamada, Ryosuke Ikeda, Isamu Ogawa, Toshitaka 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,” Phys. Rev. Lett. **109**, 155001 (2012) 5 pages, DOI: 10.1103/PhysRevLett.109.155001

(3) Teruo Saito, Naoki Yamada, Shinji Ikeuchi,

Shinya Ogasawara, Yoshinori Tatetsu, Ryosuke Ikeda, Isamu Ogawa, Toshitaka Idehara, Vladimir N. Manuilov, Takashi Shimozuma, Shin Kubo, Masaki Nishiura, Kenji Tanaka, and Kazuo Kawahata, “Generation of High Power Sub-THz Radiation from a Gyrotron with Second Harmonic Oscillation,” Phys. Plasmas **19**, 063106 (2012), <http://dx.doi.org/10.1063/1.4729316>

(4) Yuusuke YAMAGUCHI, Yoshinori TATEMATSU, Teruo SAITO, Ryosuke IKEDA, Jagadish C. MUDIGANTI, Isamu OGAWA and Toshitaka IDEHARA, “Formation of Laminar Electron Flow for a High-Power Sub-THz Gyrotron,” Plasma Fusion Res. **7**, 1206003 (2012) 3 pages, DOI: 10.1585/pfr.7.1205004

(5) Teruo SAITO, Shinya OGASAWARA, Naoki YAMADA, Shinji IKEUCHI, Yoshinori TATEMATSU, Ryosuke IKEDA, Isamu OGAWA and Vladimir N. MANUILOV, “New Power Records of Sub-Terahertz Gyrotron with Second-Harmonic Oscillation,” Plasma Fusion Res. **7**, 1206003 (2012) 3 pages, DOI: 10.1585/pfr.7.1206003

[学会発表] (計17件)

① 斉藤輝雄、サブテラヘルツ帯2次高調波ジャイロトロンの高出力発振と非線形モード間相互作用、日本物理学会 第68回年次大会、28pEC-1、2013年3月28日、東広島市

② 山口裕資、立松芳典、斉藤輝雄、池田亮介、小川勇、出原敏孝、テラヘルツ帯ジャイロトロンの高性能化へ向けた電子銃設計、日本物理学会 第68回年次大会、28pEC-2、2013年3月28日、東広島市

③ 池内真司、山口裕資、斉藤輝雄、立松芳典、池田亮介、小川勇、出原敏孝、300 GHz帯高出力パルスジャイロトロンの開発II、日本物理学会 第68回年次大会、28pEC-3、2013年3月28日、東広島市

④ 山口裕資、池内真司、斉藤輝雄、立松芳典、池田亮介、小川勇、出原敏孝、300 GHz、100 kW級パルスジャイロトロンの開発、第29回プラズマ・核融合学会年会、29pB03、2012年11月29日、春日市

⑤ Teruo Saito, Naoki Yamada, Shinji Ikeuchi, Shinya Ogasawara, Yuusuke Yamaguchi, Yoshinori Tatetsu, Ryosuke Ikeda, and Isamu Ogawa, “Mode Competition and Cooperation in High Power Sub-THz Gyrotrons,” 37th

International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves, Tue-A-3-4, 2012年09月25日, Wollongong (Australia)

⑥ Y. Yamaguchi, T. Saito, Y. Tatematsu, S. Ikeuchi, N. Yamada, R. Ikeda, Ogawa and T. Idehara, "Development of a High-Power 295 GHz Fundamental-Harmonic Gyrotron," 37th International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves, Tue-A-3-5, 2012年9月25日, Wollongong (Australia)

⑦山口裕資、池内真司、斉藤輝雄、立松芳典、山田尚輝、池田亮介、小川勇、出原敏孝、300 GHz 高出力パルスジャイロトロンの開発、日本物理学会2012年秋季大会、18aFJ-1、2012年9月18日、横浜市

⑧池内真司、斉藤輝雄、立松芳典、小笠原慎弥、山田尚輝、山口裕資、池田亮介、小川勇、出原敏孝、サブテラヘルツ帯高出力パルスジャイロトロンモード間相互作用、日本物理学会2012年秋季大会、18aFJ-2、2012年9月18日、横浜市

⑨山口裕資、立松芳典、斉藤輝雄、池田亮介、J. C. Mudianti、小川勇、出原敏孝、マグネトロン入射型電子銃によるラミナー電子流の形成、日本物理学会第67回年次大会、25pYE-6、2012年3月25日、神戸市

⑩ Y. Yamaguchi, Y. Tatematsu, T. Saito, R. Ikeda, J. C. Mudiganti, I. Ogawa, T. Idehara, "Formation of laminar electron flow for 300 GHz high-power pulsed gyrotron," The 4th International Workshop on Far Infrared Technologies (招待講演), 9a-7, 2012年3月9日、福井市

⑪斉藤輝雄、立松芳典、山田尚輝、池田亮介、山口裕資、小川勇、出原敏孝、V. N. Manuilov、小笠原慎弥、下妻隆、久保伸、西浦正樹、田中謙治、川端一男、LHDにおける共同トムソン散乱への適用を目指したサブテラヘルツ帯ジャイロトロンによる高出力発振の実証、Plasma Conference 2011 (招待講演)、24E06、2011年11月24日、金沢市

⑫山口裕資、立松芳典、斉藤輝雄、山田尚輝、池田亮介、Jagadish C. Mudiganti、小川勇、出原敏孝、300 GHz 高出力パルスジャイロトロンの実現に向けた電子銃開発、Plasma Conference 2011、22P141-P、2011年11月22日、金沢市

⑬山田尚輝、斉藤輝雄、立松芳典、池内真司、山口裕資、池田亮介、小川勇、出原敏孝、

小笠原慎弥、久保伸、下妻隆、田中謙治、西浦正樹、V. N. Manuilov、サブテラヘルツ帯の高出力パルスジャイロトロン開発、Plasma Conference 2011、22P140-P、2011年11月22日、金沢市

⑭ T. Saito, Y. Tatematsu, N. Yamada, S. Ogasawara, T. Idehara, S. Kubo, T. Shimozuma, K. Tanaka, M. Nishiura, K. Kawahata, V. N. Manuilov, "Development of high power sub terahertz power source with a gyrotron for application to CTS measurement," 15th International Symposium on Laser-Aided Plasma Diagnostics, T11, 2011年10月11日, Jeju, Korea.

⑮ Y. Yamaguchi, Y. Tatematsu, N. Yamada, T. Saito, R. Ikeda, J. C. Mudiganti, I. Ogawa, T. Idehara, "Design of MIG for 300 GHz High-Power Pulsed Gyrotron," 36th International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves, Tu5.1, 2011年10月4日, Houston, USA.

⑯ T. Saito, Y. Tatematsu, N. Yamada, S. Ogasawara, Y. Yamaguchi, T. Idehara, V. N. Manuilov, "High Power Sub-THz Radiation from a Gyrotron with Second Harmonic Oscillation," 36th International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves, W3A.5, 2011年10月3日, Houston, USA.

⑰ T. Saito, Y. Tatematsu, N. Yamada, S. Ogasawara, R. Ikeda, I. Ogawa, T. Idehara, V. N. Manuilov, "Development of high power gyrotrons in the sub terahertz region for application to CTS Measurement," 8th International Workshop on Strong Microwaves and Terahertz Waves: Sources and Applications (招待講演), S5, 2011年7月14日, Nizhny Novgorod, Russia

[その他]
ホームページ等
<http://fir.u-fukui.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

斉藤 輝雄 (SAITO TERUO)
福井大学・遠赤外領域開発研究センター・教授
研究者番号：80143163

(2) 研究分担者

立松 芳典 (TATEMATSU YOSHINORI)
福井大学・遠赤外領域開発研究センター・准教授
研究者番号：50261756