

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 6 月 6 日現在

機関番号：13401

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2016

課題番号：15K21030

研究課題名(和文) テラヘルツ帯ジャイロトロン対応ラミナー電子ビームの性能評価とエミッタの構造最適化

研究課題名(英文) Performance evaluation of electron beams and structure optimization of thermionic-cathodes in THz gyrotrons

研究代表者

山口 裕資 (Yamaguchi, Yuusuke)

福井大学・遠赤外領域開発研究センター・特命助教

研究者番号：10466675

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：テラヘルツ帯ジャイロトロンの実用化、広範な応用展開に向け、重要課題である電子銃の高性能化に取り組んでいる。本研究では、熱陰極における熱絶縁構造を最適化し、含浸領域(エミッタ)以外の部分からの熱電子の不要放出を抑えて長寿命化を図った。エミッタの経時劣化を防止する為には、エミッタのみを熱絶縁する必要がある。しかし、その場合、電子ビームの速度拡がりが大きくなり、発振効率が大きく低下する恐れもある。熱絶縁構造の異なる電子銃を製作し、性能を比較することで、熱絶縁構造が電子ビーム特性へ与える影響を明らかとした。また、電子銃の運転領域を適切に選ぶことで、発振効率の低下を抑えられる場合がある事もわかった。

研究成果の概要(英文)：The magnetron-injection-guns (MIGs) are a critical component of gyrotrons which are operated in the THz range of frequencies. The emitter is made of porous tungsten impregnated with barium compounds. There are small gaps in order to thermally isolate the emitter from the other elements of the cathode. In this study, two kinds of MIG cathodes with different gap position arrangements were fabricated in order to investigate the effect of those gaps on electron beam characteristics. Each cathode was installed and tested in a 0.2-THz gyrotron. The oscillation characteristics associated with the electron beam properties were evaluated by comparing the observed results and the numerical ones. Although the substantial decreases in the electron beam quality and the output power were numerically predicted in case of the thermal insulation gaps close to the emitter, the reductions were small under the optimized experimental conditions.

研究分野：高周波工学

キーワード：ジャイロトロン テラヘルツ マグネトロン入射型電子銃 ラミナー流 含浸カソード 熱絶縁

1. 研究開始当初の背景

1-1. テラヘルツ領域の波源開発について

テラヘルツ (THz) 領域の電磁波は、可視領域の光と、目に見えない電波との中間領域に位置し、両者の特徴を合わせ持つ。古くから、特に通信、物性研究、生態観察、医療への応用など、その有用性が認識されている。しかし、THz 波の発生と検出に困難が多く、現在まで未開拓の状態が続いており、電磁波利用における谷間として "THz ギャップ" の異名が付されている。

我々は、この THz ギャップを埋めるべく、THz 帯で高出力かつ定常発振の可能な唯一の電子管として期待されるジャイロトロンの研究開発を進めている。近年、福井大学では 1-THz ジャイロトロン実現のブレイクスルーを達成している。更に、高周波数化や高出力化に加え、伝送に有利なガウスビーム出力や周波数調節を可能とするなど、多機能化にも大きな進歩が得られている。今後の実用化においては、長寿命化、ならびに利便性を考慮した自動運転技術の確立が求められる。

1-2. ジャイロトロンの概要と開発の進展

ジャイロトロンは、らせん運動する電子ビームを、円筒状の空洞共振器内に存在する電磁波モードと結合させ、電子-波動間の相互作用 (電子サイクロトロン共鳴メーザー) を利用して電磁波へエネルギー変換する装置である。図 1 に、ジャイロトロンの構造を模式的に示す。電子ビームを生成する電子銃は、電子放出部 (エミッタ) を含む陰極 (カソード) と、電子を引き出す陽極 (アノード)、そして管軸方向へ電子ビームを加速する為の接地電極 (ボディ電極) により構成される。電子ビームの特性は、各電極の配置、形状、印加電圧そして磁場配位により決まる。高効率のジャイロトロン発振を実現する為には、らせん運動における回転成分の割合 (速度ピッチ因子:  $\alpha \equiv v_{\perp} / v_{\parallel}$ ) を大きくし、各電子の速度のばらつき (速度拡がり:  $\Delta \alpha \equiv [\alpha_{\max} - \alpha_{\min}] / \alpha_{\text{average}}$ ) を小さく抑える必要がある。  $\Delta \alpha$  が大きいと、発振効率が低下するだけでなく、電子ビームが磁気ミラー反射して共振器へ正常に入射しなくなる可能性もある。

$\Delta \alpha$  は、電子ビーム内の電荷分布に強く影

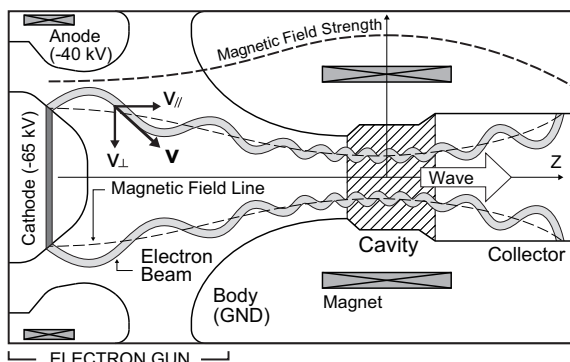


図 1. ジャイロトロンの構造 (模式図)

響を受ける。電荷分布が不均一である場合、電子ビーム内に生ずる電界が個々の電子の速度を不規則に変調し (空間電荷効果)、 $\Delta \alpha$  の増大を招く。高出力・高周波数管では、大電流の電子ビームが大きく磁気圧縮される為、空間電荷効果が大きくなり易い。我々は、各電子軌道が交差せず等間隔に並ぶ層状流 (ラミナー流) を形成する事で、電子ビームの速度拡がり  $\Delta \alpha$  の低減に成功し、ジャイロトロンが発振周波数域の拡大および高出力化に大きく貢献してきた (若手研究 B, 2013-2014 年度, 課題番号: 25820138)。

1-3. ジャイロトロンの長寿命化への課題

ジャイロトロン用カソードの断面構造の例を図 2 に示す。エミッタ (図 2 灰色部分) を、仕事関数が低いバリウム (Ba) を含浸した多孔質タングステンで構成し、それを仕事関数が比較的高いモリブデンで挟んでカソード電極としている。従来、THz 帯 ジャイロトロンで使用されているカソードは、熱電子放出の為に、大部分あるいは全部を 1000 °C 程度へ昇温する構造となっている (図 2a 斜線部)。この構造には、製造工程が単純となる利点がある。また、昇温時に全体が均一に熱膨張するので、エミッタ周辺で静電ポテンシャルの分布が変化する事もなく、電気設計の負担も比較的小さい。

しかし含浸材 Ba は経時変化により、あるいはジャイロトロンの運転に際して発生する管内放電やイオン衝撃等に起因して、周囲へ飛散し付着する。飛散した Ba がエミッタ以外の昇温部 (図 2a の斜線部) 表面へ付着すると、その部分が新たにエミッタとなり、不要な熱電子を放出する。この不要放出は、電子ビームの厚さを増し、電子ビーム特性を著しく低下させる (速度拡がり  $\Delta \alpha$  が増大する)。速度拡がりの増大は電子ビームの磁気ミラー反射を引き起こし、管内放電の原因となる。また、ミラー反射した電子がエミッタへ衝突すると、更なる Ba 飛散を招く悪循環を生ずることとなる。

理想的には、図 2b に示す様に、エミッタのみを熱絶縁して昇温する事が望ましい。この場合、昇温部の体積が小さいので、温度維持に要するヒータ電力が大幅に低減されるだけでなく、放出電流の制御性も格段に向上する。また、含浸材 Ba が周囲へ飛散しても、熱絶縁された低温部からは熱電子が放出されず、ビーム形状の経時劣化の心配が無い。

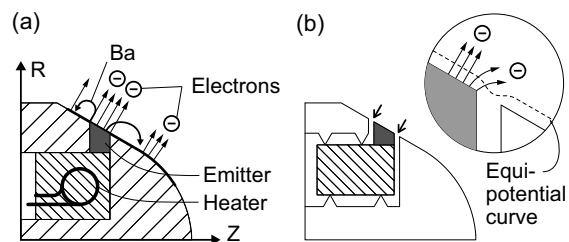


図 2. カソード部、熱絶縁構造の改善と電子ビーム軌道への影響

一方、図 2b のエミッタ周辺部の拡大図に示す様に、熱絶縁間隙がエミッタ端部の静電ポテンシャル分布を歪め、電子ビームのラミネー性の低下と  $\Delta\alpha$  の増大を招く恐れがある。

## 2. 研究の目的

今後のジャイロトロンへの広範な応用展開を見据え、長期間の定常運転に対する耐久性を向上すべく、カソードの長寿命化に取り組む。カソードの経時劣化を低減するには、熱電子を放出するエミッタ部の熱絶縁構造を見直す必要がある。しかし、熱絶縁構造を変更すると、電極の表面形状も変わるため、電子ビーム特性の劣化をまねく可能性がある。本研究では、熱絶縁構造が電子ビーム特性（ラミネー性および速度拡がり）へ与える影響を調べ、熱絶縁構造を最適化する事を目的とした。

## 3. 研究の方法

熱絶縁構造の異なる 2 つの電子銃（図 3）を用い、熱絶縁構造が電子ビーム特性へ与える影響について調べた。具体的には、電子軌道解析コード（EGUN）を利用して、電子ビーム特性を調べる計算機シミュレーションを行った。特に、熱絶縁用間隙がエミッタ部に生ずる静電ポテンシャル分布の歪みに着目し、2 つの電子銃に対して計算された電子ビーム特性を比較した。また、1 つのジャイロトロンへ 2 つの電子銃を交互に搭載して発振試験を行い、それぞれの発振特性を比較した。本実験には、福井大学で開発中の 0.2-GHz 帯ジャイロトロン（FU-CW-GIA）を利用した。

上記の手順で得られた知見に基づいて熱絶縁間隙の配置を見直し、不要放出の危険性を大幅に低減した最適化電子銃を、開発中の多周波数発振ジャイロトロンに適用した。

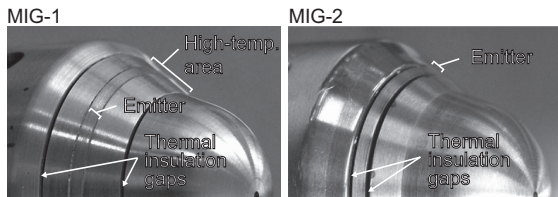


図 3. 熱絶縁構造の異なる 2 つの電子銃  
MIG-1: 熱絶縁間隙をエミッタ部から離して配置  
MIG-2: エミッタのみを熱絶縁

## 4. 研究成果

### 4.1. MIG-1 及び 2 に対する電子ビーム解析

MIG-1 に対する電子ビーム解析の結果を図 4a に示す。MIG-1 は、速度拡がりの小さい高性能電子ビームの生成を優先して設計したものである。エミッタ近傍の電界を一様に保つために、熱絶縁間隙はエミッタから離して配置してある。図 4a 上部に示すとおり、非常にラミネー性の良いビームが形成され、広い運転領域で速度拡がりの低いビームを供給することができる。共振器における電子ビーム特性を図 4a 下部に示す。カソード～アノード間の電圧  $V_{KA}$  を変更する事で、速度

ピッチ因子  $\alpha$  を 1~1.5 程度の範囲で調節可能である。また、速度拡がり  $\Delta\alpha$  が 5% 以下となる極めて良い特性を有している。一方、エミッタ以外の部分も昇温される為、Ba 飛散による電子の不要放出の可能性は残る。

MIG-2 に対する電子ビーム解析の結果を図 4b に示す。熱絶縁間隙の配置を除き、MIG-1 と MIG-2 の電極面形状は全く同じとした。MIG-2 では、エミッタのみが昇温されるため、電子の不要放出の心配は無い。しかし図 4b 上部右側に示す様に、エミッタの端部で静電ポテンシャルの分布が変形するため、 $\Delta\alpha$  の低減が難しくなる。また、エミッタ側面からも電子放出し、ラミネー性の良い電子ビームの形成が困難であることが判明した。共振器における電子ビームの特性を調べると、 $\Delta\alpha$  が 100% を超える可能性がある事がわかった（図 4b 下部）。

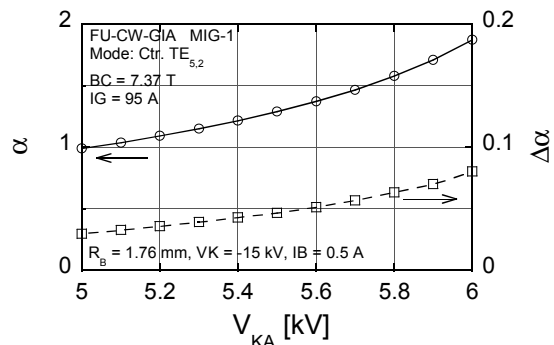
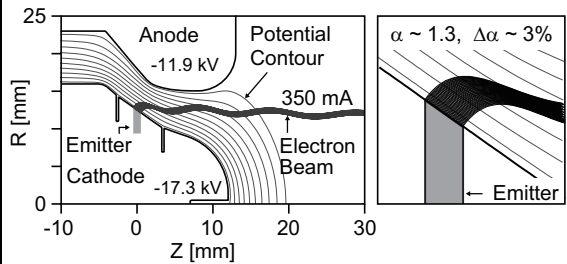


図 4a MIG-1 に対する電子ビーム解析の結果

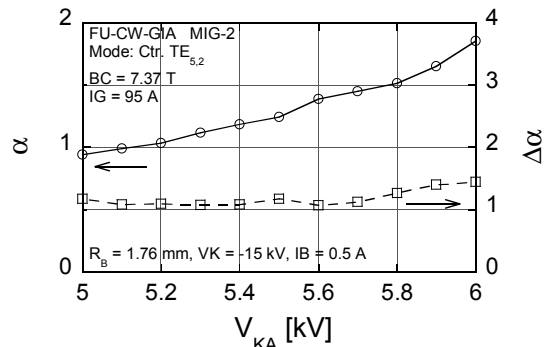
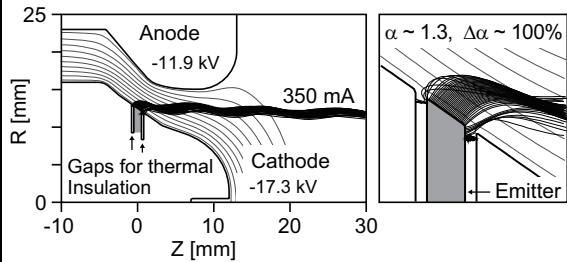


図 4b MIG-2 に対する電子ビーム解析の結果

#### 4.2. FU-CW-GIA を用いた発振実験

MIG-1 と MIG-2 を、0.2 THz ジャイロトロン FU-CW-GI へ搭載し、同じ条件の下で発振実験を行った。図 5 に、出力信号強度およびアノード電流の、カソード～アノード間電圧  $V_{KA}$  依存性を示す。共振器磁場  $B_c = 7.43$  T, 共振器への電子ビームの入射半径  $R_b = 1.76$  mm, カソード電圧  $V_k = -15$  kV, そして電子ビーム電流  $I_b = 0.5$  A は固定した。

$V_{KA}$  を増やすと、速度ピッチ因子  $\alpha$  が増大してジャイロトロンの出力が増大する。ただし  $\alpha$  には最適値があり、ある値を超えると、電子ビームと共振器モードの過相互作用により発振出力は低下へ転ずる。MIG-1 の場合 (図 5a) には、上記の特徴が出力信号の変化に明確に現れている。そして、発振出力が低下へ転ずるまで、アノード電流  $I_A$  は観測されていない。通常、速度拡がりの増大に伴って磁気ミラー反射等が起こらない限り、アノードへの電子の流入は発生しないと考えられる。有限の  $I_A$  の観測は、電子ビームの特性が大きく低下した事を意味している。従って、出力の調節域で  $I_A$  が発生しない MIG-1 は、高品質の電子ビームを生成していると言える。実験時点では、MIG-1 の総運転時間は数週間程度であり、不正放出に起因する電子ビーム性能の低下は観測されていない。

一方、MIG-2 の場合、 $V_{KA}$  の増大に対して発振出力が極大となる前に、 $I_A$  が観測されている (図 5b)。速度拡がりが大きく増大すると発振効率が低下するため、 $V_{KA} = 6.5 \rightarrow 7.5$  kV に見られる出力の上昇率の低下が過相互作用に起因するものか、速度拡がりの増

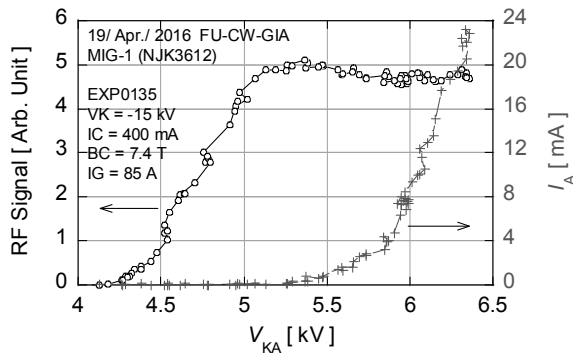


図 5a 出力信号およびアノード電流  $I_A$  の  $V_{KA}$  依存性 (MIG-1)

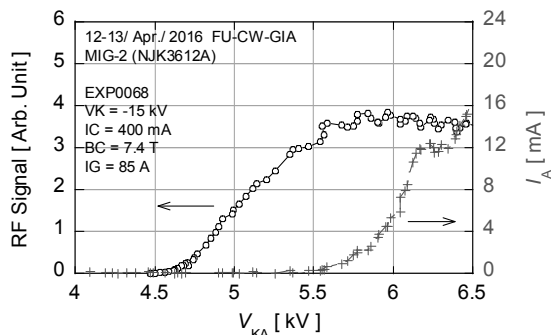


図 5b 出力信号およびアノード電流  $I_A$  の  $V_{KA}$  依存性 (MIG-2)

大に起因するものかを判断することは困難である。更に、MIG-1 の場合には  $V_{KA} \sim 5.5$  kV 程度 ( $\alpha \sim 1.3$ ) の領域で出力が最大となる (設計された特性に非常に近い) が、MIG-2 の場合には同領域の出力が非常に低い。この設計とのずれの原因は、これまで明らかとなっていない。

次に、電子ビーム電圧  $V_k = -14 \sim -19$  kV の範囲で、発振出力の最大値を MIG-1 と MIG-2 で比較した (図 6)。電子ビーム電流  $I_b$  を 0.5 A へ固定、BC と VKA を最適化して、最大出力  $P$  を水負荷により計測した。図 5 では、各  $V_k$  に対する  $P_{MIG-2} / P_{MIG-1}$  の計測値を ● 印でプロットしている。また、電子ビームの速度拡がりに対する発振出力の依存性を調べる為に、福井大学で開発された出力計算コードを用い、異なる  $\Delta\alpha$  に対する出力  $P(\Delta\alpha)$  を求め同図にプロットした。尚、出力計算においてはモード競合を考慮せず、また  $\alpha = 1.3$  を仮定した。MIG-1 の速度拡がりには非常に小さく出力への影響を無視できるとし、出力の計算結果は  $P(\Delta\alpha = 0)$  で規格化した。

図 6 に示す様に、 $V_k$  の広い領域で、MIG-1 よりも MIG-2 を搭載した方がジャイロトロンの出力が低下している。計測された  $P_{MIG-2} / P_{MIG-1}$  の平均値は、計算結果  $P(\Delta\alpha = 120\%) / P(0)$  と同程度である。これは、EGUN を用いた評価  $\Delta\alpha_{MIG-2} \sim 110\%$ ,  $\Delta\alpha_{MIG-1} \sim 5\%$  と、概算として矛盾しない。しかし、 $P_{MIG-2} / P_{MIG-1}$  は  $V_k$  の増加にともなって増大している。これは、 $P_{MIG-1}$  は  $V_k$  に大きく依存せず約 1.5 kW 程度だったのに対し、 $P_{MIG-2}$  が  $V_k$  の増加に伴い増大したためである。この実験結果は、 $V_k$  の高い領域において  $\Delta\alpha_{MIG-2}$  が大きく減少している事を示唆している。現時点では  $\Delta\alpha_{MIG-2}$  の変化の理由は不明であるが、運転パラメタを最適化する事により、MIG-2 を使用した場合でも MIG-1 搭載時と同様の発振効率を得られることが判った。

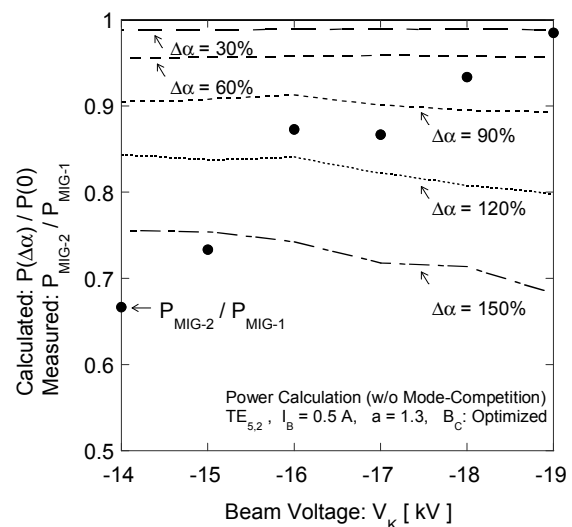


図 6 発振出力の計測結果 (●印で表示) と計算結果 (曲線で表示) の比較

### 4.3. 0.3~0.4 THz 二次高調波 多周波数発振ジャイロトロンの実現に向けた専用電子銃の開発

福井大学では、約 160 ~ 270 GHz の範囲で、発振周波数を約 10 GHz の間隔で段階的に変更可能とする、基本波発振管 (FU-CW-GV) の開発に成功している。本研究では、より高い周波数領域 (約 270 ~ 420 GHz) にて同様の多周波数発振を実現する二次高調波発振管 (FU-CW-GVII) の実現に向け、専用の電子銃を開発した。

多周波数管では、共振器における電子ビームのサイクロトロン周波数を調節し、異なるモードへ選択的に結合させる事で、発振周波数を段階的に変更する (表 1)。電子ビームには、全モードの発振条件において、速度ピッチ因子  $\alpha$  が大きく、速度拡がり  $\Delta\alpha$  の小さい事が求められる。電極設計では、可能な限り多くの発振モードに対して、ラミネーション性が良く  $\Delta\alpha$  の低い電子ビームを生成できる電極形状を探した。加えて、これまでに得られた知見に基づいて、熱絶縁間隙の配置を最適化した。

Mode	Freq. [GHz]	$B_C$ [T]	$R_B$ [mm]	$B_C/B_K$
TE <sub>8,5</sub>	422.6	7.77	0.847	50.2
TE <sub>5,6</sub>	409.1	7.52	0.935	41.2
TE <sub>7,5</sub>	399.9	7.35	0.766	61.4
TE <sub>6,5</sub>	377.0	6.93	0.673	79.4
TE <sub>5,5</sub>	353.7	6.50	1.08	30.8
TE <sub>4,5</sub>	330.0	6.07	0.970	38.3
TE <sub>6,4</sub>	320.4	5.89	0.792	57.4
TE <sub>5,4</sub>	297.7	5.47	0.674	79.3
TE <sub>4,4</sub>	274.5	5.05	1.17	26.5

表 1 共振器モードの候補, 周波数, 共振器磁場強度, 共振器への電子ビーム入射径, 磁気圧縮比

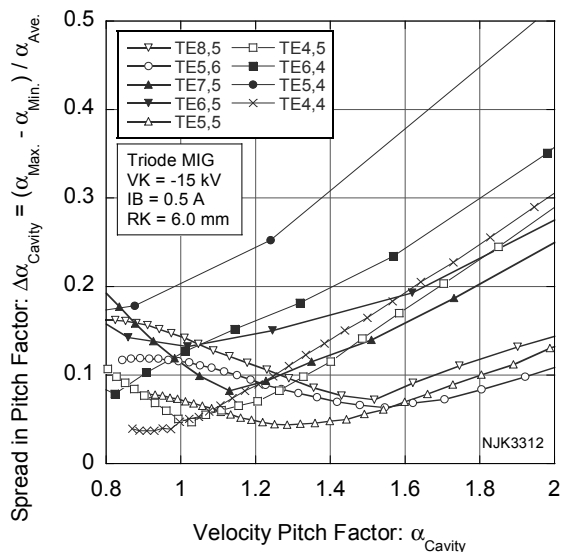


図 7 最適化電子銃の性能

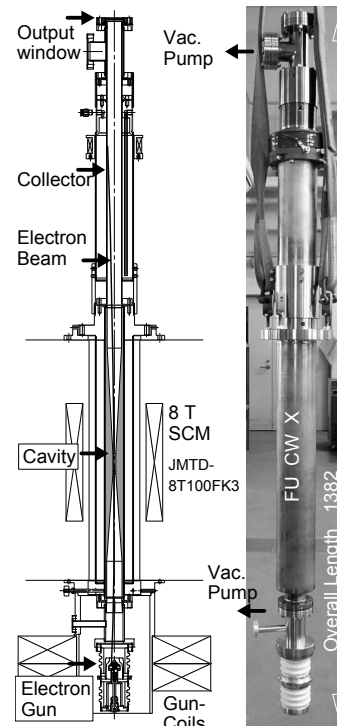


図 8 FU-CW-XB

設計した電子銃の特性を図 7 に示す。電子ビーム電圧を  $V_K = -15$  kV, ビーム電流を  $I_B = 0.5$  A とし,  $\Delta\alpha$  の  $\alpha$  依存性を全ての設計モードに対して評価した。プロット点の違いは, モードの違いを表している。磁場配位は, 電子ビームと各共振器モードの結合強度が最大となる様に最適化した。カソード~アノード間電圧  $V_{KA}$  を変える事で,  $\alpha$  の調節が可能である。図 7 に示される通り  $0.8 \leq \alpha \leq 1.3$  の範囲で  $\Delta\alpha < 30\%$  となっており, 全設計モードに対して良いビーム特性を示している。

製作した電子銃を, 試験用の発振管 (FU-CW-XB, 図 8) へ搭載し, 発振実験を行った。ヘテロダイン検波による周波数測定の結果 (図 9) から判るとおり, 期待された全ての周波数で発振を得ることに成功した。

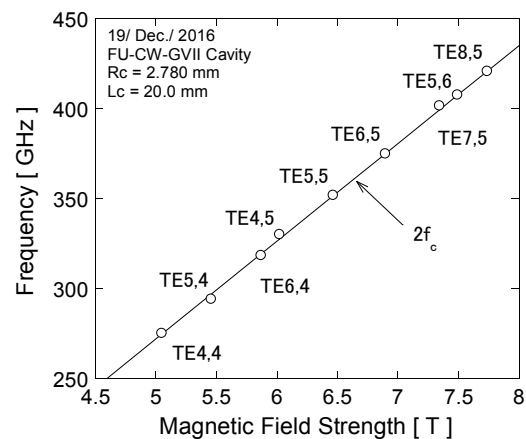


図 9 発振周波数の共振器磁場強度に対する依存性



## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 6 件)

- ① K. Ohkubo, T. Saito, Y. Yamaguchi, Y. Tatematsu et al., “Transmission Characteristics of Hybrid Modes in Corrugated Waveguides Above the Bragg Frequency”, J. Infrared, Milli. Terahertz Waves (2017), DOI: 10.1007/s10762-017-0385-y, 査読有
- ② E. M. Khutoryan, T. Idehara, A. N. Kuleshov, Y. Tatematsu, Y. Yamaguchi et al., “Simultaneous Stabilization of Gyrotron Frequency and Power by PID Double Feedback Control on the Acceleration and Anode Voltages”, J. Infrared, Milli. Terahertz Waves (2017), DOI: 10.1007/s10762-017-0374-1, 査読有
- ③ T. Saito, Y. Yamaguchi, Y. Tatematsu et al., “Development of 300 GHz Band Gyrotron for Collective Thomson Scattering Diagnostics in the Large Helical Device”, Plasma and Fusion Research **12** (2017) 1206013-1-2 DOI:10.1585/pfr.12.1206013, 査読有
- ④ O. Dumbrajs, T. Saito, Y. Tatematsu and Y. Yamaguchi, “Influence of the electron velocity spread and the beam width on the efficiency and mode competition in the high-power pulsed gyrotron for 300 GHz band collective Thomson scattering diagnostics in the large helical device”, Physics of Plasmas **23** (2016) 093109-1-8, DOI:10.1063/1.4962575, 査読有
- ⑤ Y. Tatematsu, Y. Yamaguchi, R. Ichioka et al., “Development of the multifrequency Gyrotron FU CW GV with Gaussian beam output”, J. Infrared, Milli. Terahertz Waves **36** (2015) 697-708, DOI:10.1007/s10762-015-0173-5, 査読有
- ⑥ Y. Yamaguchi, J. Kasa, T. Saito, Y. Tatematsu et al., “High Power 303 GHz Gyrotron for CTS in LHD”, J. Instrumentation **10** (2015) C10002, DOI:10.1088/1748-0221/10/10/C10002, 査読有

[学会発表] (計 28 件)

- ① 山口裕資 他, “二次高調波多周波数発振ジャイロトロンの実現に向けた電子銃設計” 日本物理学会 第 72 回年次大会, 19pC33-1, 大阪大学 豊中キャンパス, 2017/03/19
- ② Y. Yamaguchi et al., “Development of 303-GHz High Power Pulsed Gyrotron”, The 5th International Workshop on Far-Infrared Technologies 2017, 福井大学, 2017/03/07

- ③ 山口裕資 他, “高周波ジャイロトロンにおける熱陰極からの不要放出の抑制” プラズマ・核融合学会 2016 年 年会, 30pP66, 東北大学 青葉山キャンパス, 2016/11/30
- ④ 山口裕資 他, “高周波ジャイロトロンにおける Ba 含浸カソードの熱絶縁と発振特性への影響” 日本物理学会 2016 年 秋季大会, 14aKC-3, 金沢大学 角間キャンパス, 2016/9/14
- ⑤ Y. Yamaguchi et al., “Influence of thermal-insulation structure of thermionic cathode on oscillation efficiency of a sub-THz gyrotron”, 41st Int. Conf. on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves, 2016, H5P.21.12
- ⑥ 山口裕資 他, “高周波ジャイロトロンにおけるエミッタの熱絶縁と電子ビーム特性への影響” プラズマ・核融合学会 2015 年 年会 24aD29P, 名古屋大学 東山キャンパス, 2015/11/24
- ⑦ Y. Yamaguchi et al., “High Power 303 GHz Gyrotron for CTS in LHD”, 17th International Symposium on Laser-Aided Plasma Diagnostics, 2015, C15(HT)
- ⑧ Y. Yamaguchi et al., “Magnetron Injection Gun for a Multi-Frequency Gyrotron”, 40th Int. Conf. on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves, 2015, WS-28
- ⑨ Y. Tatematsu, Y. Yamaguchi et al., “Advancement of oscillation efficiency by improvement of electron beam quality in Gyrotron FU CW GIA”, 40th Int. Conf. on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves, 2015, TS-13

[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

山口 裕資 (YAMAGUCHI Yuusuke)  
福井大学・遠赤外領域開発研究センター・  
特命助教, 研究者番号: 10466675

### (2) 研究協力者

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

### (3) 研究協力者

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