

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 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：2013～2014

課題番号：25820138

研究課題名(和文) テラヘルツ帯ジャイロトロンの高出力・高効率化を実現する低分散ラミナー電子流の形成

研究課題名(英文) Formation of Laminar Electron Flows for High-Power 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) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)： テラヘルツ帯ジャイロトロンの高出力化・高効率化には、共振器へ入射する電子ビームのラミナー性を改善し、速度分散を低減する必要がある。本研究では、ラミナー電子ビームを生成する電子銃の設計手法を構築した。

数値計算により、ラミナー性を改善する特徴的な静電ポテンシャル分布を見出し、電子銃設計に適用した。その結果、300 GHz 帯パルスジャイロトロンの高出力化(最高出力 246 kW, 効率 27%)に成功した。また、非常に広い動作領域で低速度分散を維持できるラミナー流の特徴を生かし、162 GHz から 265 GHz までの 10 の周波数で発振可能な多周波数ジャイロトロンの開発に寄与した。

研究成果の概要(英文)： In gyrotrons, formation of a laminar flow is essential to realizing a high-quality electron beam with a small velocity-spread. The electron-optical system was investigated to adjust each electron trajectory in magnetron injection guns (MIGs). It is found that increase in the laminarity is possible with a properly arranged potential profile between the cathode and anode. In the well-laminated beam, the axial pitch of each gyro-motion is modified such that all trajectories have almost the same gyration phase in a plane perpendicular to the magnetic field line.

The above considerations result in the optimum MIG designs for a 300 GHz pulsed tube and a step-frequency-tunable (162 - 265 GHz) tube. The 300 GHz tube showed a maximum power output of 246 kW with an efficiency of 27%, which satisfies the demand on CTS diagnostic in LHD. The step-frequency tunable tube was successfully operated at designed 10 different frequencies with powers of the order of 1 kW.

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 多周波数発振

1. 研究開始当初の背景

テラヘルツ (THz) 帯の電磁波は、広範な科学・技術・産業分野での応用が期待されているものの、波源開発が遅れている。ジャイロトロンは、この周波数帯で高出力かつ連続発振可能な唯一の電子管として、世界的に開発研究が進められている。近年、福井大学において世界初の 1 THz 発振が観測され (T. Idehara *et al.*, Int. J. Infrared and Milli. Waves, **27**, 319-331, 2006), 実用化へ向けた高出力化、および高効率化が課題となっている。

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) を含むカソードと、電子を引き出すアノード、そして管軸方向へ電子ビームを加速するボディ電極により構成される。電子ビームの特性は、各電極の配置と形状により決まる。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 (速度分散: $\Delta\alpha \equiv [\alpha_{\max} - \alpha_{\min}] / \alpha_{\text{average}}$) を小さく抑える必要がある。 $\Delta\alpha$ が大きいと、発振効率が低くなるだけでなく、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。特に、ジャイロトロンの安定動作領域を拡大し、また制御性を確保する上で、磁気ミラー反射の回避は必須である。

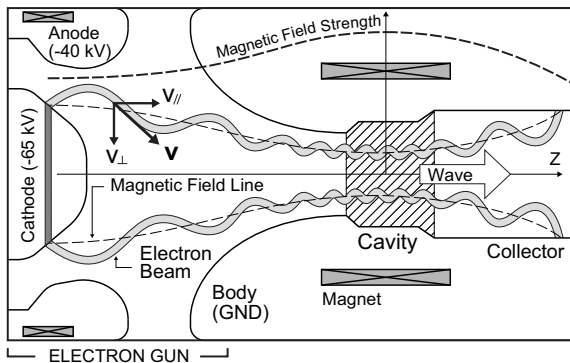


図 1. ジャイロトロンの構造 (模式図)

$\Delta\alpha$ は、電子ビーム内の電荷分布に強く影響を受ける。電荷分布が不均一である場合、ビーム内に発生す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。ビーム内の電荷分布を均一化し、空間電荷効果を抑制するには、各電子軌道が交差せず等間隔に並ぶ層状流 (ラミナー流) を形成する必要がある。

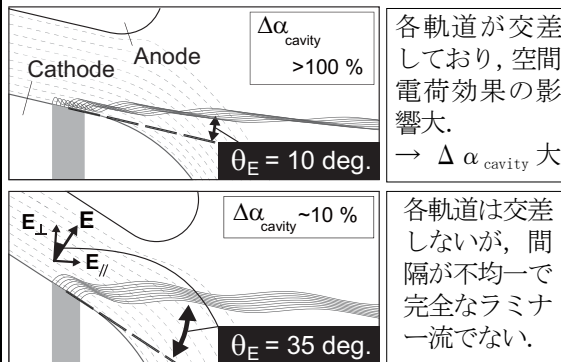


図 2. ラミナー性と $\Delta\alpha$ の θ_E 依存性

ところが、らせん運動する電子ビームを生成するための電極の基本的な構造上、ラミナー流の形成は容易でない。具体的な要因は、電流放出時に有限の初期 α を確保する必要性から、エミッタ面と磁力線の成す角 θ_E を 90 度にできない事にある。その結果、各々の電子軌道が、エミッタ面上で軸方向に異なる出発点を持ち、各軌道が交差しやすくなる (図 2 上部)。ラミナー流の形成には、 θ_E を増やす事が有効である (V. N. Manuilov *et al.*, Int. J. Infrared and Milli. Waves, **29**, 1103, 2008)。しかし、 θ_E の増大は初期 α を低下させるので、ラミナー性の向上と高 α の両立は困難である。更に、 θ_E を調節する手法のみでは、各電子軌道の間隔の均一化に限界があり、ゆえに $\Delta\alpha$ の低減にも限界がある (図 2 下部)。

2. 研究の目的

本研究の目的は、ラミナー電子ビームの形成に必要な電極の構造を調べ、電子銃の設計技法を構築する事である。先行研究 (Y. Yamaguchi *et al.*, Phys. Plasmas **19**, 113113, 2012) により、ラミナー性は θ_E のみに依らず、カソード~アノード間の電位分布にも影響を受ける事が判明している。本研究では、ラミナー性とカソード~アノード間の電位分布の関係を調べ、ラミナー流の形成機構を明らかとする。そして、 θ_E の調節のみでは得る事のできない、高 α 領域での高ラミナー電子ビームの生成、並びに $\Delta\alpha$ の極小化を実現する電極形状の雛型を作成する。新たに、次に示すジャイロトロンに最適な電子銃を設計・製作する。それぞれの発振実験を行い、期待される性能が得られる事を確認する。

- 300 GHz, 200 kW 高出力管
- 162 ~ 265 GHz 多周波数発振管

3. 研究の方法

(1) ラミナー電子流の形成機構の考察

電子銃によって生成される電子ビームの数値シミュレーションを行い、ラミナー性の向上に必要なカソード~アノード間の電位

分布を求める。計算には、各電極の形状、磁場配位、空間電荷効果を取り入れる事のできる汎用コード (EGUN) を使用する。様々な電極形状に対し、アノード～カソード間の電位分布とラミナー性を調べ、互いの物理的関係を調べる。特に、ラミナー性の高い状況と低い状況を作成して上記の諸量を比較して、互いの関係を明らかとする。ラミナー電子流を生成する電極形状において、必要な電位分布の調節に支配的となる部分を調べ、電極構造の雛型を作成する。

(2) 300 GHz, 200 kW 高出力パルスジャイロトロン用電子銃の製作および発振実験

このジャイロトロンは、核融合プラズマ実験における協同トムソン散乱計測用の光源として、福井大学で開発中である。高精度計測の実現に向け、特に高出力化が課題となっている。本研究では、200 kW を超える目標出力の達成に必要な電子銃 (最大カソード電圧 = -65 kV, 最大ビーム電流 = 10 A, $\alpha = 1.2$, $\Delta\alpha \leq 5\%$) を設計・製作する。上述の手順 (1) で作成した雛型を基点とし、各電極の形状を最適化する。特に、大電流域での空間電荷効果の抑制が重要である。

電子銃は構成部品の数が多い事、各部品の形状が複雑である事から、一定以上の切削・組立誤差の発生を許容しなければならない。電極形状の最適化に際しては、各部の形状変化 (基準形状 \pm 数 100 μm のずれ) に対し、電子ビームの特性が大きく変動しない (基準形状で $\Delta\alpha$ が極小値をとる) 形状を探す。

製作した電子銃をジャイロトロンへ組み込み発振実験を行い、計算される特性が得られるかどうかを調べる。具体的には、発振出力は電子ビーム電圧、電流、及びカソード～アノード間の電圧に対して、広い運転領域で定性的に正の相関を持つはずである。また定量的には、30% 程度の効率で出力 200 kW 以上の発振が期待される。加えて、広い運転領域において、電子ビームの磁気ミラー反射が発生しない事を確認する。これは、管内構造物の損傷無く安定発振を実現するうえで、重要な指標である。

(3) 162 ~ 265 GHz 多周波数発振ジャイロトロン用の電子銃開発

同じく、福井大学で開発中の多周波数発振管に必要な電子銃を開発する。この管は、共振器磁場を 5.9 ~ 9.7 T の広範囲で変えて電子ビームのサイクロトロン周波数を調節し、周波数の異なる (265 GHz ~ 162 GHz) 10 の共振器モードで発振させるものである。表 1 に、共振器モードと対応する周波数、共振器の磁場強度 B_C 、電子ビームの最適入射半径 R_B 、磁気圧縮比 B_C / B_K を示す。電子ビームの最適入射半径 R_B は、モードによって異なるので、モードを変更する為には、磁場強度のみならず磁気圧縮比も大きく変えなければならない ($B_C / B_K = 37 \sim 65$)。この

Mode	F [GHz]	B_C [T]	R_B [mm]	B_C / B_K
TE _{10,6}	265.0	9.71	1.93	42.0
TE _{9,6}	253.6	9.29	1.81	47.7
TE _{8,6}	242.1	8.86	1.69	54.7
TE _{7,6}	230.4	8.44	1.55	65.0
TE _{9,5}	224.7	8.23	2.05	37.2
TE _{8,5}	213.4	7.82	1.91	42.8
TE _{7,5}	202.0	7.39	1.77	49.9
TE _{6,5}	190.5	6.97	1.61	60.3
TE _{7,4}	173.2	6.35	2.07	36.5
TE _{6,4}	161.9	5.94	1.89	43.7

表 1. 多周波数発振ジャイロトロンの特性

大きな変化に耐えて低い $\Delta\alpha$ を維持する為には、ラミナー性の形成が非常に重要となる。電子銃設計では、全ての共振器モードに対し、最大カソード電圧 = -20 kV, 最大ビーム電流 = 1 A, $\alpha = 1.3$, $\Delta\alpha \leq 5\%$ を満足する性能を目指す。

製作した電子銃を多周波数発振管へ組み込み、発振実験を行う。まず、全ての設計周波数で安定発振するかどうかを調べる。そして、300 GHz 高出力パルスジャイロトロンと同様に、発振出力の電子ビームパラメータ依存性を調べる。

4. 研究成果

(1) ラミナー電子流の形成機構の解明

以下に、ラミナー電子流の形成機構についての考察をまとめる。図 3 に、電子軌道解析コード EGUN を用いて得られた、電子ビームシミュレーションの結果を示す。図 3(a) と 3(b) は共に、カソードとアノードの形状で決まる静電ポテンシャルの分布と、エミッタから放出される電子ビームの軌道を表している。電子が磁力線に沿ってサイクロトロン運動する為には、軌道の R-Z 平面への写像は、正弦曲線に似たものとなる。共振器における α は、共に 1.3 である。図 3(a) は、エミッ

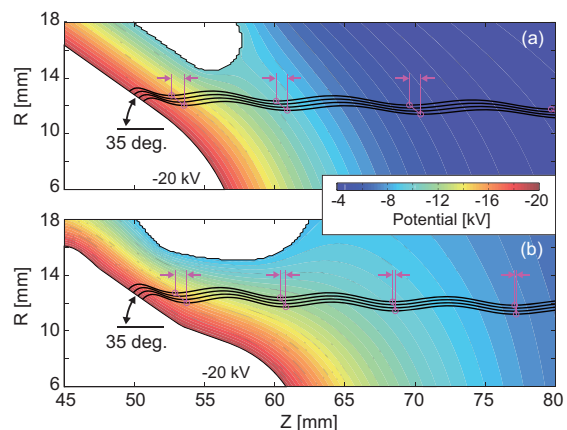


図 3. 電極形状とラミナー性の違い

タ面と磁力線の成す角 θ_E の調節のみによって得られる電子ビームの典型的な例である。この場合、ビーム素片の軌道を代表する各曲線の間隔が一定でなく（ラミナー性が低く）、ビーム内に電荷の粗密が残り、空間電荷効果の影響を無視できない。結局、共振器内で $\Delta\alpha$ は 10% 以上となる。一方、図 3(b) の場合、電子ビームの進行とともにラミナー性に改善がみられ、共振器における $\Delta\alpha$ は 5% 未満に低減されている。図 3(a) と 3(b) でラミナー性の違いを比較する為に、R 方向最も外側の軌道と最も内側の軌道で、それぞれサイクロトロン運動の同位相上にある点が Z 軸方向にどれだけずれているかを、矢印 (\rightarrow | \leftarrow) で表示した。図 3(a) の場合では位相のずれがほぼ一定であるのに対し、図 3(b) の場合ではビームの進行とともに位相のずれが減少し、磁力線に垂直な面内で各軌道の位相が揃っていく事がわかる。

この様な位相差の変化は、各軌道上の電子が Z 軸方向に異なる速度を持つ事に起因している事が判った。図 3(b) の電極が作る電位分布を模式的に描くと図 4 の様になる。電子の軸方向の速さは、電位の勾配を下る事で変化する。重要なのは、図 4 に示す様に、R 方向外側と内側で、電位勾配の変化が異なっている事である。R 方向外側の軌道上にある電子は、エミッタからの出発後まもなく、急峻な勾配により短い時間で大きく加速される。一方、内側の軌道上にある電子は、比較的緩やかな勾配により徐々に加速される。エミッタの構造上、R 方向外側の軌道の電子は、内側の軌道の電子よりも Z 軸方向の後方から出発するが、上記の加速度の違いにより、同時に出発しても内側軌道の電子に追い付かせることができる。図 4 に示す $T = t_7$ の位置で、外側軌道上の電子が内側軌道の電子に追い付いている。この状態が、図 3(b) における位相のずれが零の状態 (\rightarrow | \leftarrow) に対応する。そして、 $T = t_7$ において、エミッタ電位 (ϕ_0) に対する電位差 ($\phi_0 - \phi_1$) が各軌道で等しいならば、各軌道上の電子は同じ速度を持つ事になる。従って、 $T = t_7$ 以降 ($t = t_7, t_8, t_9, \dots$)、電子ビーム内で電位勾配を一定に保つことが出来れば、各軌道上の

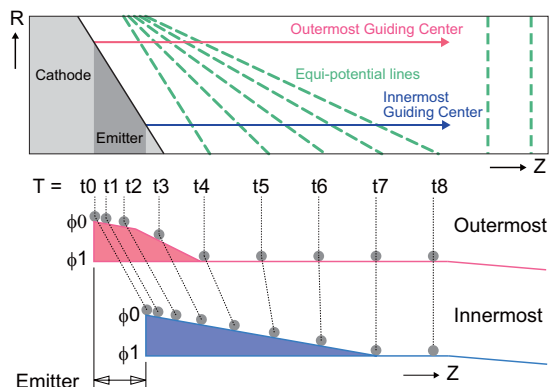


図 4. 電位分布と電子の軸方向加速の違い

電子が追い付いた状態（位相のずれが零の状態）が維持される。上記の様に各軌道上の電子の速度を制御すれば、ビーム内の電荷分布の一様性が改善される。その結果、 $\Delta\alpha$ を極限まで低減する事が可能となる。

図 3(b) および図 4 の電位分布の形成には、図 3(b) に示すカソードとアノードの形状が必要となる。特徴は、電子放出後、下流域 ($53 \text{ mm} < Z < 65 \text{ mm}$) でカソード面とアノード面を磁力線に沿う方向に傾斜させている事である。その結果、等電位線が電子ビーム内で磁力線方向に曲がり、R 方向内側と外側の軌道で、Z 軸方向の電位勾配が異なる領域が生まれる。この領域が、図 4 における $T = t_2 \sim t_7$ に対応する。 $T = t_7$ の位置で各軌道上の電子が追い付いた状態（位相のずれが零の状態）を作るためには、カソードとアノードの Z 軸方向の長さを調節する必要がある。軸方向の長さの最適値は、エミッタ面と磁力線の成す角 θ_E に依存する。図 3(b) は、 $\theta_E = 35 \text{ deg.}$ に対して最適化したものである。この電極構造を維持しつつ、電子銃全体をある程度拡大・縮小しても、ラミナー性を改善する機能が保たれる事を確認した。よって、図 3(b) の電極構造を雛型とし、以後の電子銃設計を行うこととした。

(2) 300 GHz 高出力パルスジャイロトロン用電子銃の開発と 200 kW 超出力の達成

設計した電子銃の特性を図 5 に示す。カソード電圧 V_K を -65 kV とし、いくつかのビーム電流 $I_B = 0, 10, 15 \text{ A}$ に対して、 α と $\Delta\alpha$ のカソード～アノード間電圧 V_{KA} 依存性を評価した。電子ビーム電流 $I_B > 10 \text{ A}$ に対し、 $\Delta\alpha$ を 5% 程度以下に抑えつつ、 α を 1.0 ~ 1.2 程度の範囲で調節可能となっている。特性評価の計算には、EGUN に加え別コード (EPOS) も使用し、二つの結果を比較した (福井大学 遠赤外領域開発研究センター 招聘教授: V. N. Manuilov 氏との共同研究)。EGUN と EPOS の計算結果は非常に良く一致しており、シミュレーションモデルの妥当性を示している。

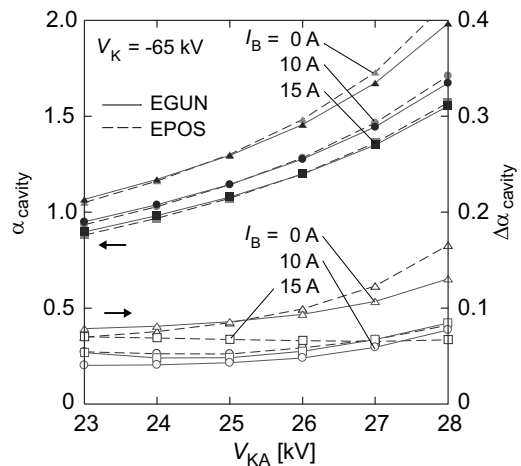


図 5. 300 GHz, 200 kW 高出力管用の電子銃の特性

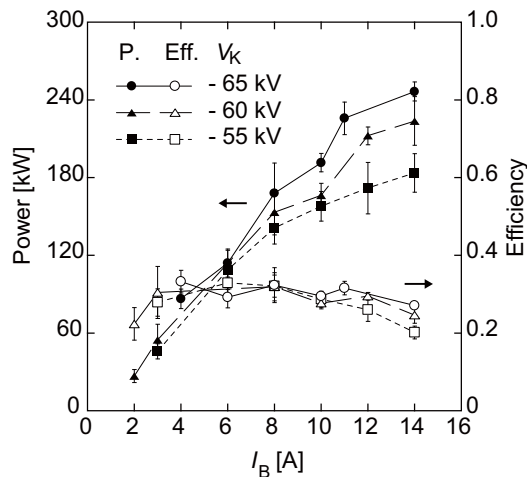


図6. 300 GHz, 200 kW 高出力管, 電子ビーム電圧・電流に対する出力と効率の変化

製作した電子銃をジャイロトロンへ組み込み、動作実験を行った。設計共振器モード (TE_{14,2}) がモード競合無く発振する事、周波数スペクトルの帯域幅が十分に狭い事を確認したうえで、安定に高出力発振が得られる運転領域を探した。出力のカソード～アノード間電圧 V_{KA} 依存性は、理論的に予測された特性を示し、 $\alpha \sim 1.2$ に相当する設定で最大出力を示した。また、出力は電子ビームと共振器の同軸性にも依存し、高出力を得る為にはマグネットに対する管配置の調節が必要であった。管配置を精密調整した結果、電子ビーム電圧 $V_K = -65$ kV, 電流 $I_B = 11$ A の入力により、最大 246 kW の出力を実現した (図6)。出力は I_B に対し単調に増大しており、 I_B の増加により更なる高出力化が期待される (現時点では電源装置の性能限界により、 V_K, I_B が制限される)。尚、図5に示す全運転領域において電子ビームの磁気ミラー反射は観測されておらず、安定な発振が得られている。最大出力に対する効率は約 27% であり、これは低周波数帯の核融合プラズマ加熱用高出力管に比肩する。

(3) 162 ~ 265 GHz 多周波数発振ジャイロトロン用電子銃の開発と発振試験

設計した電子銃の特性を図7に示す。カソード電圧を $V_K = -20$ kV, ビーム電流を $I_B = 0.5$ A とし、 $\Delta\alpha$ の α 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。300 GHz の高出力管用の電子銃と同様、カソード～アノード間電圧 V_{KA} を変える事で、 α の調節が可能である。図に示される通り $1.0 \leq \alpha \leq 1.5$ の範囲において $\Delta\alpha < 5\%$ となっており、全設計モードに対して非常に良いビーム特性を示している。

製作した電子銃を、多周波数発振管へ取り付け、発振特性を調べる実験を行った。初めに、ヘテロダイン検波による周波数測定を行

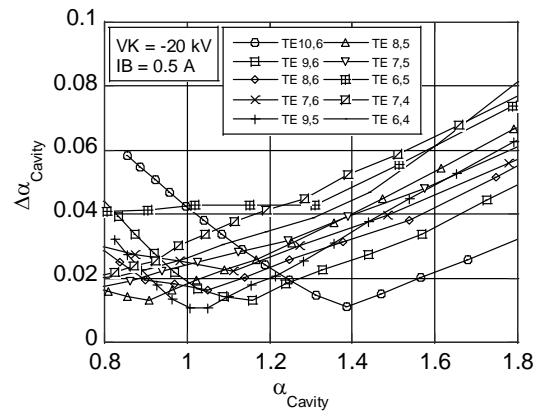


図7. 多周波数発振管用の電子銃の特性

った結果、設計された全ての周波数で発振を観測した。周波数の測定値は、表1に示す有効桁数で設計値と一致した。続いて、共振器磁場の变化に対する出力の変化を調べた (図8)。図8では、計測値を実線で、計算値を破線で表示している。表示波形は、全て最大値で規格化したものである。また、計測された出力の最大値を、各グラフの上部に記載した。計算値は、各共振器モードが競合無く単独で発振すると仮定して求めたものである。発振の得られる共振器磁場の範囲、また磁場変化に対する出力変化の波形が実験と計算で良く一致している。この結果は、モード競合が発生していない事、期待された電子ビーム性能が得られている事を示している。同様に、出力のカソード～アノード間電圧 V_{KA} 依存性も理論予測と良く一致し、設計 $\alpha \sim 1.3$ に相当する設定で最大出力となる事がわかった。広い動作領域において、電子ビームの磁気ミラー反射は発生せず、全てのモードで最大 1 kW 程度の出力を観測した。

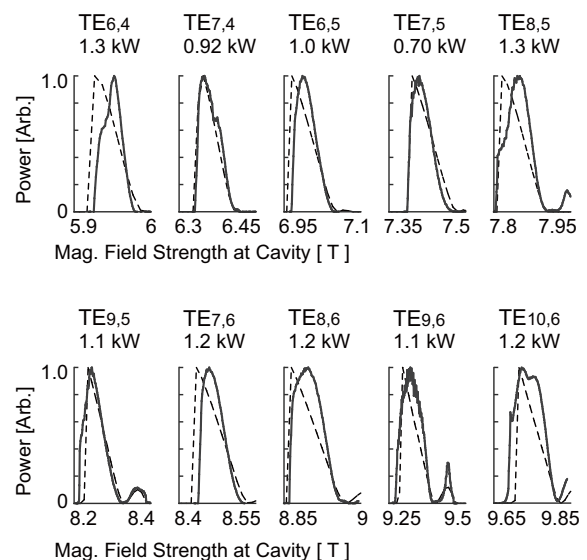


図8. 多周波数発振管の特性評価実験の結果。共振器磁場の变化に対する発振モードと出力の変化。

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 6 件)

- ① Y. Yamaguchi, T. Saito, Y. Tatematsu et al., “High-power pulsed gyrotron for 300-GHz-band collective Thomson scattering diagnostics in the Large Helical Device”, *Nuclear Fusion* **55**, 013002-1-10 (2015), 査読有, DOI:10.1088/0029-5515/55/1/013002
- ② Y. Tatematsu, Y. Yamaguchi, T. Kawase et al., “Analysis of oscillation characteristics and optimal conditions for high power operation of Gyrotron FU CW GIII”, *Physics of Plasmas* **21**, 083113-1-6 (2014), 査読有, DOI: 10.1063/1.4893417
- ③ Y. Tatematsu, Y. Yamaguchi, T. Idehara et al., “Characteristics of the mode converter of Gyrotron FU CW GII radiating Gaussian beams in both the fundamental and second harmonic frequency bands”, *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves* **35**, 517-524 (2014), 査読有, DOI: 10.1007/s10762-014-0072-1
- ④ Y. Tatematsu, Y. Yamaguchi, T. Idehara et al., “Development of second harmonic gyrotrons, Gyrotron FU CW GII and Gyrotron FU CW GIII, equipped with internal mode converters”, *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves* **35**, 169 - 178 (2014), 査読有, DOI: 10.1007/s10762-014-0048-1
- ⑤ R. Ikeda, Y. Yamaguchi, Y. Tatematsu et al., “Broadband Continuously Frequency Tunable Gyrotron for 600 MHz DNP-NMR Spectroscopy”, *Plasma and Fusion Research* **9**, 1206058-1 - 3 (2014), 査読有, DOI: 10.1585/pfr.9.1206058
- ⑥ Y. Yamaguchi, T. Saito, Y. Tatematsu et al., “Experiment for Over 200 kW Oscillation of a 295 GHz Pulse Gyrotron”, *Plasma and Fusion Research* **8**, 1205165-1 - 3 (2013), 査読有, DOI: 10.1585/pfr.8.1205165

[学会発表] (計 22 件)

- ① 山口 裕資 他, “多周波発振ジャイロトロン対応マグネトロン入射型電子銃の開発”, 日本物理学会 第 70 回年次大会, 早稲田大学, 2015/03/24
- ② Y. Yamaguchi et al., “Evaluation of Electron Beam Properties in Sub-THz Gyrotron Experiments”, *Plasma* 2014, 朱鷺メッセ:新潟コンベンションセンター, 2014/11/18

- ③ 山口 裕資 他, “LHD 協同トムソン散乱計測への適用を目指した 300 GHz 高出力パルスジャイロトロンの設計”, 第 10 回核融合エネルギー連合講演会, つくば国際会議場, 2014/06/19
- ④ 山口 裕資 他, “300 GHz 高出力パルスジャイロトロンの開発 III”, 日本物理学会 第 69 回年次大会, 東海大学 湘南キャンパス, 2014/03/27
- ⑤ Y. Yamaguchi et al., “Development of a 400 GHz Band Frequency-Tunable Second-Harmonic Gyro-BWO”, *The 5th International Workshop on Far-Infrared Technologies* 2014, 福井大学, 2014/03/15
- ⑥ 山口 裕資 他, “マグネトロン入射型電子銃におけるラミナー電子流の形成機構”, プラズマ・核融合学会 第 30 回年会, 東京工業大学 大岡山キャンパス, 2013/12/03
- ⑦ 山口 裕資 他, “サブテラヘルツ帯ジャイロトロンの広範な応用へ向けた周波数連続可変性の付加”, 第 23 回日本赤外線学会研究発表会, 防衛大学校, 2013/10/31
- ⑧ Y. Yamaguchi et al., “Experimental Verification of a Self-Consistent Calculation for Continuous Frequency-Tune with a 400 GHz Band Second Harmonic Gyro-BWO”, *38th Int. Conf. on Infrared, Milli. Terahertz Waves*, Mainz, Germany, 2013/09/02
- ⑨ Y. Yamaguchi et al., “Application of a Potential Profile for Controlling the Beam Laminarity in a Magnetron Injection Gun”, *38th Int. Conf. on Infrared, Milli. Terahertz Waves*, Mainz, Germany, 2013/09/02

[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