

平成21年 5月11日現在

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2007～2008

課題番号：19340174

研究課題名（和文） テラヘルツ帯高出力パルスジャイロトロンの開発

研究課題名（英文） Development of a terahertz range high power pulse gyrotron

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：

核融合研究を進展させる上で、超高温・高密度プラズマ中のイオンの温度を正しく計測することは極めて重要である。本研究では、このための新しい装置を開発する際の計測用光源として、テラヘルツ帯高出力電磁波の発振器であるパルスジャイロトロンを開発を行った。新着想を取り入れた結果、周波数 349 GHz で最大出力約 50 kW、390 GHz で最大出力約 40 kW を得た。これらは、この周波数領域の 2 次高調波発振ジャイロトロンとして世界最高値である。

交付額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	7,700,000	2,310,000	10,010,000
2008年度	4,800,000	1,440,000	6,240,000
年度			
年度			
年度			
総計	12,500,000	3,750,000	16,250,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：プラズマ科学

キーワード：テラヘルツ、ジャイロトロン、協同トムソン散乱、プラズマ計測

1. 研究開始当初の背景

電磁波のうち、新技術の宝庫であるにもかかわらずいまだ未踏領域として残されていたテラヘルツ帯の研究が大きく進展しようとしている。例えば、日本学術振興会にテラヘルツ波による物質・生命の科学と応用に関する研究開発専門委員会が立ち上がり、研究戦略が検討されている。世界的にも、毎年開催される「赤外およびミリ波に関する国際会議」において発表数が増加している。

テラヘルツ帯の研究進展の基本は、光源開発である。ジャイロトロンはテラヘルツ帯に

において kW オーダー以上の連続発振出力が期待できる唯一の発振管であるが、現在のところ、核融合用 MW 級管（最高 170 GHz）の開発に多大の努力が払われている。これに対して福井大学では、ジャイロトロン・テラヘルツ帯電磁波源としての可能性にいち早く着目し、高調波高効率動作を目指した研究により、ジャイロトロンの高周波化と応用の研究に一貫して取り組んできた。この結果、889 GHz の世界最高周波数を記録し(T. Idehara et al., IEEE Trans. Plasma Sci. **PS27** (1999) 340)、最近 1 THz のブレークスルーを実現した(T. Idehara

et al., Int. J. Infrared and Millimeter Waves 27 (2006) 319)。

この成果に基づき、福井大学遠赤外領域開発研究センター（以下 FIR FU）では、100 W から kW 級のテラヘルツ帯連続発振ジャイロトロンの開発と新材料開発・ESR 等を用いた遠赤外領域物性研究・NMR による蛋白質分析さらには新医療技術に応用する研究などが進められている。

テラヘルツ帯ジャイロトロンの応用範囲をさらに広げるには一層の高出力化が必要であるが、テラヘルツ帯で数 10 kW から 100 kW 級の連続発振ジャイロトロンを実現することは容易ではない。しかし、パルス発振であれば、テラヘルツ帯で 100 kW 級のジャイロトロンを実現する可能性が十分あり、かつ学術・応用の両面でその意義は大きい。本研究は、ジャイロトロン自体の可能性を追求すると共に、より広範な分野にジャイロトロンを応用することを期待して開始された。

2. 研究の目的

本研究の最終目的は、400 GHz 帯で 100 kW 級の高出力パルスジャイロトロンを実現し、超高温・高密度の核融合プラズマにおけるイオン温度計測のための協同トムソン散乱装置開発への道を開くことである。このため、本課題の研究期間内で明らかにすべき具体的目標を以下のように設定した。

- (1) 液体ヘリウムを使用しない超伝導マグネットが発生できる磁場強度を考え、2 次高調波で、400 GHz 帯、数 10 kW 級のパルス発振ジャイロトロンを実証する。
- (2) 核融合科学研究所の大型ヘリカル装置 LHD において協同トムソン散乱計測の光源として用いるために必要なジャイロトロンの性能仕様（周波数、出力、パルス幅、繰り返し率等）を明確にする。
- (3) 本研究の結果に基づき、上記(2)項で設定した仕様のジャイロトロン開発のための学術的・技術的課題を明らかにする。

ただし、本報告では主として目標(1)に対して得られた成果を示す。

3. 研究の方法

本研究開始前から、FIR FU では、テラヘルツ帯高出力ジャイロトロン開発の必要性を見越し、既存の電子銃、超伝導マグネットなどを用いるパルスジャイロトロン開発計画が進行していた。研究代表者はこの計画が核融合プラズマの協同トムソン散乱計測用光源に発展する可能性に着目した。そこで、同時期 FIR FU に客員教授として滞在中のロシア、ニジニ・ノブゴロド州立大学 Manuilov 教授に、より高出力実現のための高電流電子

銃の設計への協力を求めた。分担者 Agusu はこの電子銃の仕様に基づいて 2 次高調波発振で 100 kW 級ジャイロトロンの発振が可能であることを示した。本研究は、以上の経緯による実現性の確認と具体的な応用の方向性を設定して実施した。

目標(1)の達成のため、研究を大きく 3 段階に分けた。

(1) 第一段階 ジャイロトロンの短パルス動作と 2 次高調波発振特性を調べること。

このため、既存の 8 T 超伝導マグネットとマグネトロン入射型電子銃 (40 kV, 1A) を用いて、基本波発振 200 GHz 帯、10 kW 級パルスジャイロトロンを設計・製作した。また、より高出力ジャイロトロンの設計に必要な知見を得るため、このジャイロトロンを用いて 400 GHz 帯 2 次高調波モードの発振特性を調べた。

(2) 第二段階 400 GHz、数 10 kW 級のパルスジャイロトロンの設計・製作

このため、ジャイロトロンをより高電流および高ビーム電圧で動作させる改良電子銃を Manuilov 教授の設計に基づいて試作するとともに、この電子銃を用いるジャイロトロンを設計した。2007 年度後半に、Manuilov 教授を短期招聘し、電子銃の設計と共振器系の設計の整合性を確認した。

高ビーム電圧・高ビーム電流で 2 次高調波モードのジャイロトロンが動作するためには、発振モードの慎重な選択が必要である。本研究では、動作モードとして、TE65 および TE85 モードを採用した。これは、電子銃が良好な特性の電子ビームを放出するために必要な電子銃部磁場強度と発振周波数で決まる共振器部磁場（以後、主磁場）強度および両者の比 R 、電子銃の電子放出帯半径と R から決まる共振器部における円筒状電子ビーム半径 R_b と発振モードとの高効率結合条件、そのために設定される共振器半径 R_c の許容範囲と目的発振周波数の整合性などを総合的に考慮した上で、単独発振が期待できるモードを選択した結果である。

実際、図 1 の青線で示すように、TE65 モードおよび TE85 モードは他の 2 次高調波モードに対するモード孤立性が高いことが分かる。さらに重要なことは、図 1 の赤線で示す基本波モードに対する孤立度である。両モー

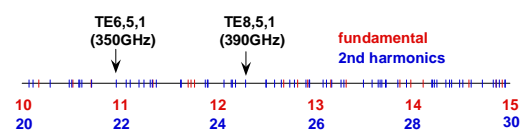


図 1 TE65 モードおよび TE85 モードの孤立度；各縦線はベッセル関数のゼロ点

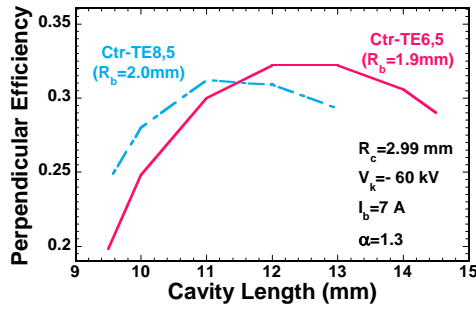


図2 垂直効率の共振器長依存性

ドとも、隣接する基本波から充分離れている。高出力発振においても、2次高調波単独発振が期待できる。なお、このモード選択には第一段階ジャイロトロンから得られた知見が活かされている。

ただし、本設計で採用する R_b に対しては、TE65 モードおよび TE85 モードともに、結合度 C_{BF}

$$C_{BF} = \frac{\chi'_{mn} J_{m\pm s}^2 (\chi'_{mn} R_b / R_c)}{\pi R_c^2 (\chi'_{mn}^2 - m^2) J_m^2 (\chi'_{mn})}$$

の径方向分布の第二ピークに電子ビームが入射されることになる。

第二ピーク入射においても十分な出力が期待できるかどうかを検討した結果を図2に示す。この検討は、共振器長の最適長さの決定にも用いた。図2は共振器長に対する垂直効率 η_{\perp} の変化を示す。ここで垂直効率とは、共振器に入射する電子ビームに伴う磁場に垂直方向の運動エネルギーの流れに対する高周波電力への変換効率である。共振器から取り出される電力 P は

$$P = \frac{\beta_p^2}{2(1-\gamma_0^{-1})} \cdot \frac{I_b V_k}{1+Q_{dif}/Q_{ohm}} \eta_{\perp}$$

で与えられる。各記号は標準的な用法による。図から、共振器長として、12 mm が最適であること、および $R_b = 1.9$ mm の第二ピーク入射でも 80 kW 程度の共振器出力が期待できることが分かる。なお、この計算は B. G. Danly and R. J. Temkin, Phys. of Fluids 29,561 (1985) の非線形ジャイロトロン解析モデルに基づく。本研究で、この解析モデルに基づき数値計算コードを開発した。このコードによる出力の期待値は、高周波電場下で実際に粒子軌道を追うシミュレーションコードによる結果とよく一致する。

(3) 第三段階 第二段階で設計したジャイロトロンの製作と発振特性の確認

第二段階の設計に基づき、新規高出力電子

銃を用いるジャイロトロンを製作し、発振特性を詳細に調べた。この結果は、次項の研究成果で示す。

4. 研究成果

(1) 第一段階のジャイロトロンで、基本波 TE03、周波数 203 GHz の発振を確認した。さらに、周波数約 400 GHz の2次高調波発振が得られること、およびこの2次高調波モードが 35 kV 以上の高ビーム電圧でも単独発振可能であることを確認した。

一方、発振開始電流等の検討から、当初発振が期待された2次高調波 TE55 モードは発振が確認できなかった。このモードは、主磁場をスキャンしたとき、TE03 モードのすぐ高磁場側で発振するはずのものである。この原因は、TE03 モードの軸方向高次モードとの競合により発振が抑制されたためと考えられる。これから、ビーム電圧が高くなると、基本波の軸方向高次モードが発振する可能性が出てくるので、2次高調波で高出力を目指すジャイロトロンにおいては、すぐ弱磁場側に競合する基本波モードがない動作モードを選択することが重要であることが分かった。第二段階ジャイロトロンでは、この知見を設計に取り入れた。研究方法の(2)で示した TE65 モードおよび TE85 モードはこの条件を満たしている。

(2) 第二段階の 400 GHz、数 10 kW 級パルスジャイロトロンの発振特性

研究方法(2)で示した設計に基づいてパルスジャイロトロンを製作し、2次高調波 400 GHz 帯高出力パルスジャイロトロンの実証を目指した。

まず、このジャイロトロンの基礎的な発振特性を調べた後、TE65 モードおよび TE85 モードが2次高調波単独発振することを確認した。発振モードはファブリ・ペロー干渉計による周波数測定から同定した。その後、発振出力のビーム電圧依存性、ビーム電流依存性、補助磁場コイル電流依存性データ等の詳

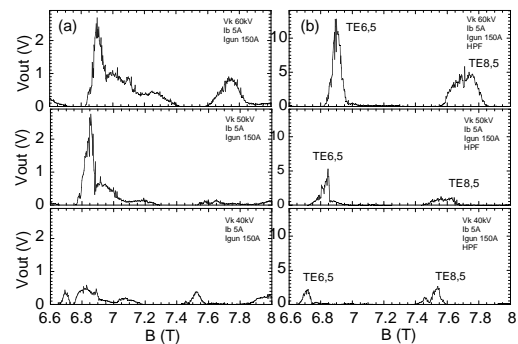


図3 発振強度の主磁場依性 (a) ハイパスフィルター無し。(b) ハイパスフィルター有り。

しい物理データを取得した。さらに高出力化に向けた実験を進め、ビーム電圧約 60 kV、ビーム電流 11 A までの運転に成功した。

以下、この結果を簡潔に示す。図 3 (a) はビーム電流を 5 A に設定し、ビーム電圧を約 40 kV、50 kV、60 kV の 3 段階に変化させたときの発振強度の主磁場依存性を示す。図 3 (b) は検出器の前にカットオフ周波数 303 GHz のハイパスフィルターを挿入した場合の発振強度の主磁場依存性である。ハイパスフィルターを通過する信号は 2 次高調波によるものであり、主磁場強度との対応から、2 つのピークのうち、弱磁場側ピークが TE65 モード、高磁場側ピークが TE85 モードである。両ピークは、相対論効果のために、ビーム電圧と共に高磁場側にシフトする。発振モードは、ファブリ・ペロー干渉計による周波数測定結果 349 GHz および 390 GHz からも確認した。ただし、TE85 モードに対応するピークの弱磁場側では、TE17, 2 モードが発振している可能性がある。TE65 モードの周波数 349 GHz は測定誤差の範囲で、設計周波数と一致している。

両ピークに対応する主磁場において、ハイパスフィルターを挿入しない状態で周波数測定をし、基本波の混入がないこと、すなわち 2 次高調波の単独発振を確認した。2 次高調波の単独発振は、ビーム電圧約 60 kV、ビーム電流 11 A まで確認することができた。

ブルガリア科学アカデミー電子工学研究所 Sabchevski 教授の協力により開発したモード競合計算コードを用いると、TE65 モード、TE85 モード共に、上記パラメーターにおいて単独発振が可能であることが確認された。よって、本研究の結果はジャイロトロン理論的検討からも妥当である。

次に、水負荷を用いて出力を測定した。この測定では、パルス幅 $1\mu\text{s}$ 、繰り返し 10 Hz の設定を基本とした。図 4 は、ビーム電圧を約 57 kV に設定し、ビーム電流を変化させたときに、2 次高調波単独発振として測定された最大出力を示す。このため、測定点毎に周波数を確認した。図の出力値は、水負荷測定

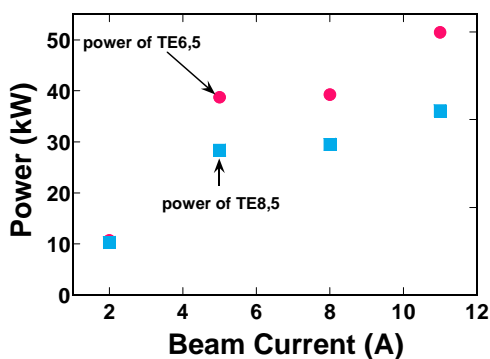


図 4 発振出力のビーム電流依存性

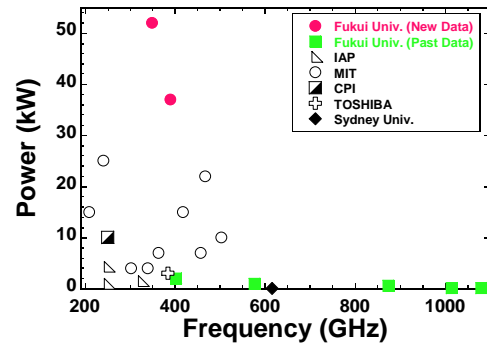


図 5 本研究の結果とこれまでの報告値との比較

値に対してジャイロトロン真空窓や水負荷の反射率等を考慮した補正值である。TE65 モード、TE85 モード共に、ビーム電流 5 A 以上で若干の飽和傾向を示すものの、出力はビーム電流と共に増大する。この結果、ビーム電流 11 A において、TE65 モードで周波数 349 GHz、最大 52 kW、TE85 モードで 390 GHz、最大 37 kW の単独発振出力が得られた。この結果、2 次高調波で 400 GHz 帯、数 10 kW 級パルスジャイロトロンの実証に成功した。

図 5 は 200 GHz 以上の 2 次高調波発振ジャイロトロンで、これまでに報告されている記録を周波数と出力のダイアグラムにプロットしたものである。図中、2 点の赤丸は本研究で得られた値を示す。この図から、本研究の結果は、400 GHz 帯の 2 次高調波ジャイロトロン出力としてこれまでの報告を上回り、世界最高値であることが分かる。

ただし、実験における発振効率、TE65 モードに対してビーム電流 5 A の時が最大で、約 14% である。これは、非線形解析モデルから期待される効率に比べて低い。また、より高ビーム電流では効率がさらに低下する。この理由として、何らかの原因により、電子ビームの特性が電子銃の設計で期待したものより劣化していることが考えられる。

本研究で得られた結果をまとめると、①テラヘルツ帯のジャイロトロンにおいて 2 次高調波で高出力を目指す場合、単独発振のために必要な設計上の重要な知見を得た。②この知見と、開発した数値解析モデルを組み合わせ、2 次高調波で 400 GHz 帯、数 10 kW 級のパルスジャイロトロンを独自に設計した。③400 GHz 帯 2 次高調波ジャイロトロンに用いるために新規設計された電子銃を用いて、ビーム電圧約 60 kV、ビーム電流 11 A までの動作に成功した。④製作したジャイロトロンで、設計モードである TE65 モードおよび TE85 モードの単独発振を確認した。⑤両モードはビーム電圧約 60 kV、ビーム電流 11 A まで単独発振した。⑥TE65 モードで周波数 349 GHz、最大 52 kW、TE85 モードで 390 GHz、最大 37

kW の単独発振出力が得られた。この結果は、400 GHz 帯の 2 次高調波ジャイロトロン出力として世界最高値である。⑦これから 400 GHz 帯、100 kW 級管開発の見通しを得た。今後、本課題の 2 年間の研究期間で得られた知見を元にして、さらなる設計改善、高ビーム電圧での運転により、400 GHz 帯、100 kW 級管の実証につなげてゆく。

(3) 最後に、目標(2)に関連する成果を簡単に示す。①協同トムソン散乱スペクトルの計算コードを開発した。②このコードを用いて、LHDにおいて最近実現している 10^{20} m^{-3} 以上の高密度プラズマを想定し、散乱スペクトル・入射波および散乱波の伝播経路を計算した。また、この結果を参照して、共同トムソン散乱計測に適したポートを選定した。③これから、400 GHz 帯、100 kW 級ジャイロトロンを開発すれば、LHD における協同トムソン散乱実験が可能であると期待できる。また、出力 100 kW で SN 比 5 が得られるという見通しを得た。

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 9 件)

- ① T. Notake, T. Saito, Y. Tatematsu, A. Fujii, S. Ogasawara, V. Manuilov, La Agusu, I. Ogawa and T. Idehara, Development of a Novel High Power Sub-THz Second Harmonic Gyrotron, FIR Center Report, 査読無, FIR FU-95, 2009.
- ② T. NOTAKE, T. SAITO, Y. TATEMATSU, A. FUJII, S. OGASAWARA, La AGUSU, V. N. MANUILOV, I. OGAWA, T. IDEHARA, Achievement of high power sub-terahertz radiations with a second harmonic gyrotron, Plasma Fusion Res., 査読有, Vol.4, 2009,011(3pages).
- ③ V. Bratman, M. Glyavin, T. Idehara, Y. Kalynov, A. Luchinin, V. Manuilov, S. Mitsudo, I. Ogawa, T. Saito, Y. Tatematsu, V. Zapevalov, Review of Sub-Terahertz and Terahertz Gyrodevices at IAP RAS and FIR FU, IEEE Tr. Plasma Sci., 査読有, Vol.37, 2009, pp36-43.
- ④ V. N. Manuilov, T. Idehara, T. Saito, La Agusu, T. Hayashi, and I. Ogawa, Electron gun for powerful short pulse gyrotron with operating magnetic field 8 T, Int. J. Infrared and Milli. Waves, 査読有, Vol.27, 2008, pp.1103-1112.
- ⑤ T. Notake, T. Saito, Y. Tatematsu, S. Kubo, T. Shimozuma, K. Tanaka, M. Nishiura, A. Fujii, La Agusu, I. Ogawa, and T. Idehara, Subterahertz gyrotron development for collective Thomson scattering in LHD, Rev. Sci. Instrum., 査読有, Vol.79, 2008,

10E732(3pages).

- ⑥ 野竹孝志, 斉藤輝雄, 立松芳典, La Agusu他 8 名, LHDにおける協同イオントムソン散乱の為のSub-THz帯大電力パルスジャイロトロン開発, 遠赤外領域開発研究, 査読無, Vol.9, 2008, pp105-118.
- ⑦ T. Notake, T. Saito, Y. Tatematsu他 8 名, Sub-THz Gyrotron Development for Collective Thomson Scattering in LHD, 遠赤外領域開発研究, 査読無, Vol.9, 2008, pp119-126.
- ⑧ T. Saito, T. Nakano, H. Hoshizuki, K. Sakai, Y. Tatematsu, S. Mitsudo, I. Ogawa, T. Idehara, V.E. Zapevalov, Performance Test of CW 300 GHz Gyrotron FU CW I, Int. J. Infrared and Milli. Waves, 査読有, Vol.28, 2007, pp.1063-1078.
- ⑨ Teruo SAITO, Tomoaki NAKANO, Seitaro MITSUDO, Isamu OGWA and Toshitaka IDEHARA, Observation of Simultaneous Oscillation of Multiple Modes in a CW 300 GHz Gyrotron, Plasma Fusion Res., 査読有, Vol.2, 2007, 024(3pages).

[学会発表] (計 16 件)

- ① 野竹孝志, 二次高調波発振を用いた高周波パルスジャイロトロンの開発III, 日本物理学会第 64 回年次大会, 2009 年 3 月, 東京
- ② 藤井彰仁, 二次高調波発振を用いた高周波パルスジャイロトロンの開発 II, 日本物理学会第 64 回年次大会, 2009 年 3 月, 東京
- ③ 野竹孝志, 二次高調波発振を用いた高出力パルスジャイロトロンの発振特性 II, 第 25 回プラズマ・核融合学会年会, 2008 年 12 月, 宇都宮市
- ④ 小笠原慎弥, 二次高調波発振を用いた高出力パルスジャイロトロンの発振特性 II, 2008 年度日本物理学会北陸支部定例学術講演会, 2008 年 11 月, 福井市
- ⑤ 藤井彰仁, 二次高調波発振を用いた高出力パルスジャイロトロンの発振特性 I, 2008 年度日本物理学会北陸支部定例学術講演会, 2008 年 11 月, 福井市
- ⑥ 藤井彰仁, 二次高調波発振を用いた高周波パルスジャイロトロンの開発 I, 日本物理学会 2008 年秋季大会, 2008 年 9 月, 盛岡市
- ⑦ Y. Tatemtsu, Feasibility study of collective Thomson scattering in LHD plasma, 33rd International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves, 2008 年 9 月, Pasadena (USA)
- ⑧ T. Saito, Development of a sub terahertz high power pulse gyrotron for collective Thomson scattering, 33rd International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves, 2008 年 9 月, Pasadena (USA)

- ⑨ 野竹孝志, 協同トムソン散乱計測のためのサブテラヘルツ帯ジャイロトロン開発, 第7回核融合エネルギー連合講演会, 2008年6月, 青森市
- ⑩ T.Notake, Sub-Terahertz Gyrotron Development for Collective Thomson Scattering in LHD, 17th Topical Conference on High-Temperature Plasma Diagnostics, 2008年5月, Albuquerque (USA).
- ⑪ 立松芳典, 400GHzジャイロトロンを用いたLHD協同トムソン散乱の可能性の検討, 日本物理学会第63回年次大会, 2008年3月, 東大阪市
- ⑫ 野竹孝志, 第2高調波共鳴を利用した大電力パルスジャイロトロンの高周波数化, 日本物理学会第63回年次大会, 2008年3月, 東大阪市
- ⑬ 斉藤輝雄, 400 GHz帯高出力パルスジャイロトロンの開発, 第24回プラズマ・核融合学会年回, 2007年11月, 姫路市
- ⑭ 立松芳典, テラヘルツ帯ジャイロトロン用伝送系の開発I, 日本物理学会第62回年次大会, 2007年9月, 札幌市
- ⑮ 野竹孝志, パルスパワー装置を用いた短パルス高出力・高周波ジャイロトロンの開発III, 日本物理学会第62回年次大会, 2007年9月, 札幌市
- ⑯ Teruo Saito, Development of a sub terahertz high power pulse gyrotron, 32nd Int. Conf. on Infrared and Millimeter Waves and 15th Int. Conf. on Terahertz Electronics, 2007年9月, Cadiff (England).

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

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
 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
 出原 敏孝 (IDEHARA TOSHITAKA) (H19年度)
 福井大学・遠赤外領域開発研究センター・特任教授
 研究者番号：80020197
 ラ アグス (LA AGUSU) (H19年度)
 福井大学・遠赤外領域開発研究センター・

研究員

研究者番号：60447703

野竹 孝志 (NOTAKE TAKASHI)

福井大学・遠赤外領域開発研究センター・研究員

研究者番号：70413995

(3) 連携研究者

出原 敏孝 (IDEHARA TOSHITAKA) (H20年度)

福井大学・遠赤外領域開発研究センター・特任教授

研究者番号：80020197

ラ アグス (LA AGUSU) (H20年度)

福井大学・遠赤外領域開発研究センター・研究員

研究者番号：60447703