

小特集 高出力テラヘルツ帯ジャイロトロン開発と応用展開

3. ジャイロトロンの高周波化の研究

3.3 ジャイロトロン FU CW シリーズの開発

出原 敏孝, 小川 勇, 斉藤 輝雄, 立松 芳典, 光藤 誠太郎

福井大学遠赤外領域開発研究センター

(原稿受付: 2008年10月7日)

ジャイロトロンの実用化により, サブテラヘルツからテラヘルツ帯の高出力光源が利用できるようになりつつある. 5章に示されるように, テラヘルツ帯高出力光源は, プラズマ計測はもちろん, その他きわめて広い分野における応用の可能性がある. この応用において, 連続発振 (CW) ジャイロトロンの開発・実用化はきわめて重要である. 福井大学遠赤外領域開発研究センターでは, サブテラヘルツからテラヘルツ帯の開発を進めている. 本節では, 開発中のジャイロトロン仕様・特性および今後の開発の方向性を示す.

Keywords:

gyrotron, continuous (CW) oscillation, subterahertz, terahertz, high harmonic oscillation, DNP-NMR

3.3.1 はじめに

セラミックス焼結等の電磁波加熱分野では, 周波数 2.45 GHz のマグネトロンが広く用いられてきた. 一方, 電磁波焼結では周波数を上げるにより強い非熱的効果が期待されるため, 最近では 20–30 GHz のジャイロトロンを用いることが一般的になりつつある [1, 2]. しかし, もう一段周波数の高いジャイロトロンは, より強い非熱的効果や短波長性を生かした高集束性が期待されるにもかかわらず, 実用的に使用し得る電磁波源としては実現していない. 数 10 W から kW レベルの出力をもつサブミリ波/テラヘルツ帯連続発振 (CW) ジャイロトロンが実現すれば, 4 章および 5 章で示されるように, 広い分野への応用が期待される. このため, 福井大学遠赤外領域開発研究センター (FIR FU) では, サブミリ波/テラヘルツ帯 CW ジャイロトロン FU CW シリーズの開発プロジェクトを開始した. 表 1 に開発中の FU CW シリーズジャイロトロン仕様・出力と応用目的を示す.

FU CW I は周波数 300 GHz, 設計出力 3.5 kW の連続発振ジャイロトロンである [3, 4]. このジャイロトロンはセラミックス焼結・材料プロセッシング装置用の光源として開発

された. FU CW II は周波数 394.6 GHz, 出力 50 W で, DNP-NMR (動的核偏極核磁気共鳴) 効果を用いるタンパク質構造解析装置の光源用に開発されている [5]. FU CW III は数 10 W で周波数が 1 THz を超える連続発振ジャイロトロンをめざしている [6]. このジャイロトロンにより, 高出力テラヘルツ技術開発が進められる. FU CW IV は周波数の可変性に特徴のあるジャイロトロンで, 高分子材料の表面解析を行うための 200 MHz DNP-NMR のための光源として用いられている. 以後, 各ジャイロトロンの特徴・性能を示す.

3.3.2 FU CW I の開発

FU CW I は 5 章に示すサブミリ波材料プロセッシング装置の電磁波源として, ロシア科学アカデミー応用物理学研究所と共同で開発された. 設計にあたっては, 計算機シミュレーションによる最適化が行われている [7]. このジャイロトロン仕様を 表 2 に示す. 周波数 300 GHz は 20–30 GHz 帯ジャイロトロンより一桁高く, さらに強い非熱的効

表 2 FU CW I の仕様.

発振周波数	300 ± 2 GHz
発振出力	3.5 kW (nominal)
ビーム電圧	16 ± 1 kV
ビーム電流	1.1 ± 0.1 A
出力窓半径	80 mm
出力窓材	BN
発振モード	TE _{22,8}
出力モード	ガウスビーム

表 1 開発中の FU CW Series ジャイロトロン.

名称	周波数, 出力	使用目的
FU CW I	300 GHz, 3.5 kW	セラミックス焼結, 医療応用
FU CW II	394.6 GHz, 50 W	600 MHz DNP-NMR による蛋白質構造解析
FU CW III	1 THz, 0.1 kW	高出力テラヘルツ技術開発
FU CW IV	135 GHz, 60 W	200 MHz DNP-NMR, 周波数可変

3.3 Development of Gyrotron FU CW Series

IDEHARA Toshitaka, OGAWA Isamu, SAITO Teruo, TATEMATSU Yoshinori and MITSUDO Seitaro

corresponding author's e-mail: idehara@fir.u-fukui.ac.jp

果が期待される。また、材料の表面改質にも応用可能である。さらに、新医療技術開発、サブミリ波 ESR（電子スピン共鳴）等の物性研究などにも応用可能である。300 GHz 帯でキロワットオーダーの出力をもつジャイロトロンは開発されたことがあるが[8]、FU CW I は実際に応用目的に使用可能な初めてのジャイロトロンである。このジャイロトロンは液体ヘリウムフリー 12 T の超伝導マグネットに装着され、基本波で発振する。15 kV という比較的低いカソード電圧で運転できることが特徴である。

もう少し細かく仕様を示すと、カソード電圧 16 ± 1 kV、ビーム電流 1.1 ± 0.1 A に対して設計定格出力 3.5 kW である。カソード材質には LaB₆ が用いられている。カソードの電子放出帯半径は 21.5 mm である。電子銃は 3 極管構造を持っているが、当初設計ではアノードをボディー電位に設定するので、準ダイオード管として動作する。空胴は半径 8.39 mm、前後のテーパ部を除いた直線部長さは 15 mm である。動作モードは TE_{22,8} で空胴入りの電子ビームの入射半径は TE_{22,8} co-rotating モードに最適結合する 3.71 mm である。TE_{22,8} モードの共振周波数は 300 GHz よりわずかに低い。壁面のオーミックロスも考慮した共振空胴としての Q 値は約 6000 である。TE_{22,8} という高次モードの選択により、空胴壁面の電力損失密度は 0.3 kW/cm² 以下となっている。FUCWI が装着される 12 T マグネットの室温ボア径は 100 mm であり、空胴部の外径は 90 mm である。ブラソフ型の放射器と 4 枚のミラーからなるモード変換器がジャイロトロンに内蔵されている。出力はガウシアンビームとして、直径 80 mm の真空窓を通して水平方向に放射される。真空窓の材質は窒化硼素である。最終ミラーの角度はジャイロトン外部から変えることができ、出力ビームの放射方向が調整できるようになっている。

FU CW I は先進的な設計がなされており、材料プロセッシング装置への適用前に動作特性を充分把握する必要がある。まず、発振モードを同定するため、発振周波数を測定した。ジャイロトンからの出力の一部を導波管で伝送

し、ハーモニックミキサーに結合する。ハーモニックミキサーには高安定の発振器出力を印加して、その通培周波数との差周波出力（IF 出力）の周波数をスペクトラムアナライザーで測定する。これから、ジャイロトロンが発振周波数が高精度で測定できる。この測定で得られた周波数から、ビーム電圧 12 kV に対して TE_{22,8} モードが想定される空胴磁場強度付近において、確かに設計どおり TE_{22,8} モードで発振していることがわかった。しかし、ビーム電圧を高くすると、空胴部磁場とカソード電圧の領域によりモード競合が発生し、複数モードの同時発振が観測された。このとき、複数の方向へ電力が放射される。このジャイロトロンが発振特性を詳しく計測することは、高周波ジャイロトロン物理の側面からも非常に興味深い[9]。その後の試験において、ビーム電圧ごとに磁場強度を精度よく調整することにより、TE_{22,8} モードが単一発振することを確認している[10]。

次に、発振出力を測定した。測定には水負荷を用い、真空窓の直後に設置した。図 1 はビーム電圧を定格値 15 kV に設定したときのビーム電流に対する出力の変化を示す。空胴部磁場強度は TE_{22,8} モードが発振する値に合わせている。ビーム電流に対して出力はほぼ直線的に増大し、定格電流 1 A までは、出力の飽和や減少は見られず、最大連続出力 1.75 kW を得た。しかし、この値は設計値 3.5 kW より低い。一方、ビーム電流一定の条件下でビーム電圧に対する出力の変化を調べると、ビーム電圧が約 8 kV で発振を開始し、電圧とともに出力が増大する。しかし、ビーム電圧が約 12 kV で出力が飽和する傾向が見られた。また、ビーム電圧を低いところから上げる方向で変化させる場合と、高いところから下げる方向で変化させる場合で、若干出力が異なるヒステリシスが見られる。この出力飽和のため、設計計算による定格出力 3.5 kW に到達していない[10]。

赤外線カメラを用いて、出力ビームの品質を調べた。図 2 はこの結果を示す。吸収体として真空窓から 1.4 m の位

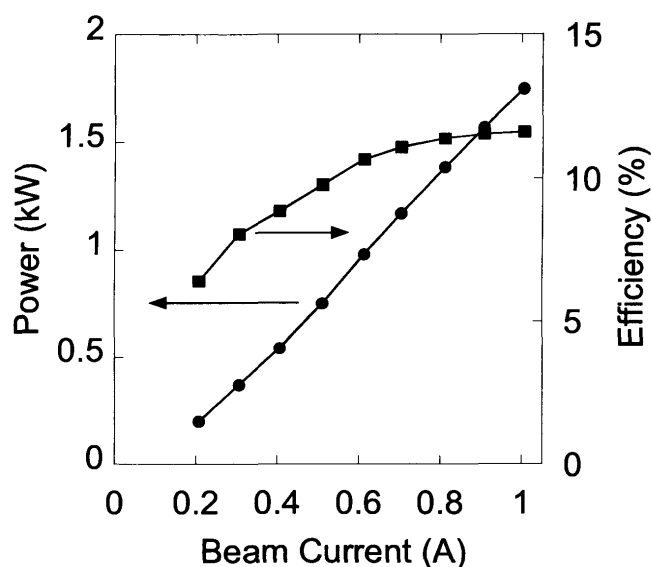


図 1 出力と発振効率のビーム電流依存性。

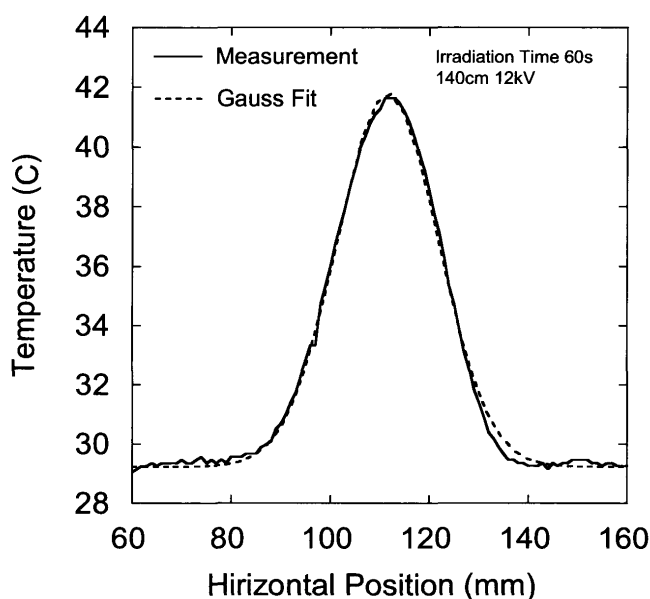


図 2 放射パターン測定の実例。

置に厚さ 1 mm の塩化ビニール板を設置し、反対側から赤外線カメラを用いて塩化ビニール板上の温度上昇分布を計測した。塩化ビニールは熱伝導係数が非常に小さく、簡単な解析から図の測定時間程度では、温度上昇分布はほとんど放射電力分布を反映していると考えてよい。同様の計測を吸収体の設置位置を変えて行ったところ、真空窓直後では空間的な高次モードによると思われるビーム形状のゆがみが見られるが、数 10 cm 以遠では、ほぼ基本ガウスモードで伝播していることが確認された。よって、放射電力分布はほぼガウスianであり、サイドローブは非常に低レベルであることが確認できた。

上に述べたように、FU CW I の出力は設計値に到達していない。現在、詳細に発振特性を調べている。特に、ビーム電圧を上げるとアノード電流が大きくなり、運転条件を制約することがわかった。そこで、アノード回路に高抵抗を挿入して、アノード電流を制限したところ出力が上昇した。現在の最高出力は 15 kV, 1 A において 2.3 kW である。この値は依然設計値より低い、設計値の約 70% まで到達している。現在、さらに出力向上の努力を継続することと並行して、セラミックス焼結や材料プロセッシングの実験も開始している。

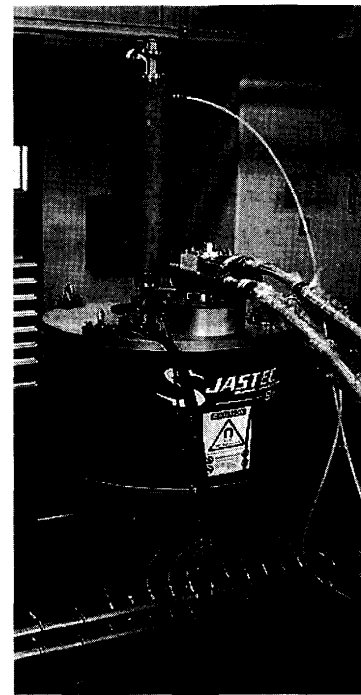


図3 Gyrotron FU CW II の外観。

3.3.3 FU CW II の開発

Gyrotron FU CW Series の 2 号機, Gyrotron FU CW II は、動的核偏極 (Dynamic Nuclear Polarization (DNP)) を利用した核磁気共鳴 (NMR) の感度向上を実現するための光源として、特別に設計・製作された[5]。

NMR は、物質の磁気的特性を調べるために便利な方法であるが、NMR の磁気分極が小さく、このため感度が低いのが唯一の欠点である。NMR と電子スピン共鳴 (ESR) の間に磁気的な結合を利用して、ESR の大きい磁気分極を NMR へ移すことができれば、この状況を改善して NMR の感度を ESR の感度並に高めることができる。高感度の NMR は、複雑な構造を持つ蛋白質分子の解析に活用することができる。

このためには、強力なサブテラヘルツ波を照射して、ESR を飽和させることにより、ESR の大きい磁気分極を NMR へ移す必要がある。Gyrotron FU CW II は、600 MHz proton NMR に DNP を施すための高出力サブテラヘルツ光源として設計された。出力周波数は、600 MHz NMR に対応する ESR の周波数 394.6 GHz に設定されている。

図 3 は、Gyrotron FU CW II の外観を、図 4 は、断面図を示している。最大磁場強度 8 T の無冷媒超伝導マグネットが用いられ、その中心軸上にジャイロトロン管が設置されている。

図 5 に、動作試験結果の一例を示す。ジャイロトロンからの放射パワーが磁場の関数としてプロットされている。磁場強度が 7.05 T から 7.3 T まで変化するとき、2 次高調波による発振が三つの共振器モード (TE_{45} , TE_{26} , TE_{06}) に対して起こり、基本波による発振が一つの共振器モード (TE_{23}) に対して起きる。しかも、2 次高調波による出力は、基本波の出力から完全に分離されており、2 次高調波

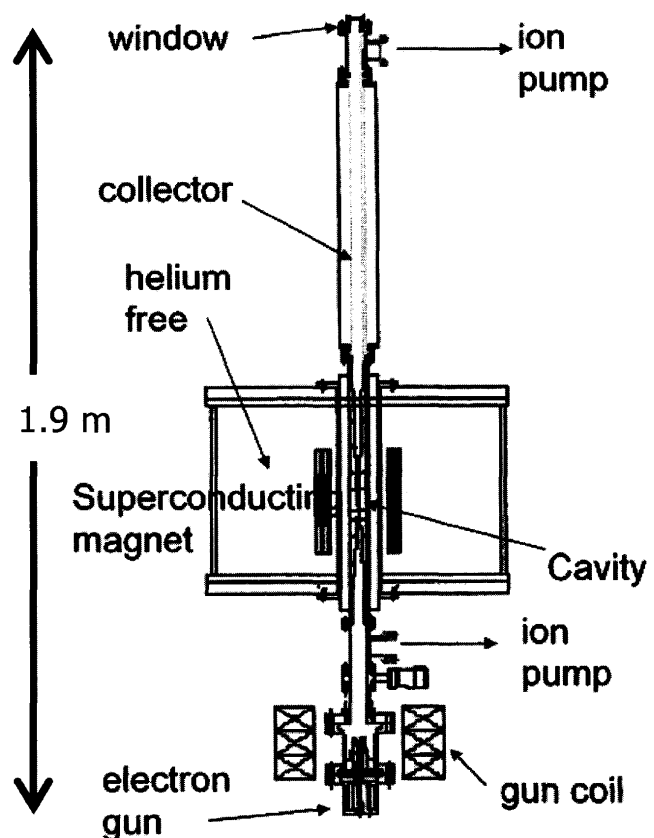


図4 Gyrotron FU CW II の断面図。

による動作が単独で起きていることがわかる。したがって、これらの 2 次高調波による出力を、テラヘルツ技術開発のための光源として、直接利用することができる。Gyrotron FU CW Series に含まれる高調波ジャイロトロンは、高次高調波における単独動作を活用することにより、開発さ

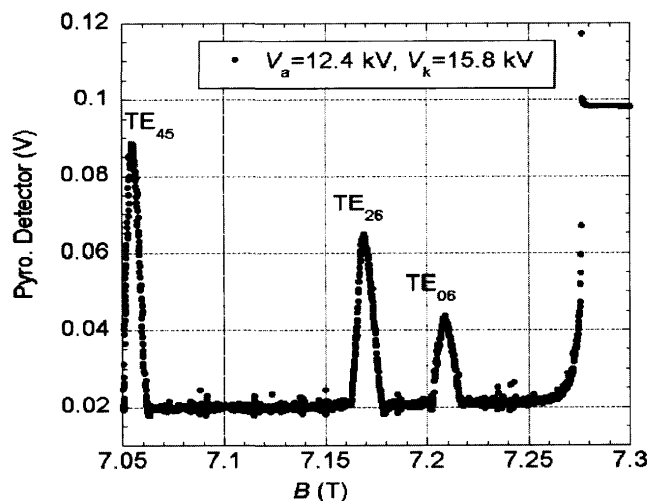


図5 Gyrotron FU CW II の出力の磁場依存性。磁場強度 7.21 T での出力周波数は、394.6 GHz であり、600 MHz DNP-NMR の光源として用いることができる。

れている。

シンセサイザーを局部発振器とし、高調波ミキサーを用いたヘテロダイン検波による周波数測定を行うと、TE06 モードによる発振の周波数は 394.5 GHz であった。このモードは 600 MHz proton NMR の感度向上のための DNP 用光源として直接利用することができる。周波数スペクトルの測定は、スペクトルの半値幅が 10 kHz 以下、周波数揺動も 10 kHz 以下の周波数安定化光源であることを証明している。水負荷による出力測定の結果、連続動作モードで約 40 W の出力が得られ、導波管で NMR 装置に結合した段階で、約 15 W である。これは DNP 用光源に要求される出力を充分満たしている。

現在、大阪大学蛋白質研究所に搬入し、600 MHz proton NMR 装置に設置して、DNP-NMR の実験を開始している。

3.3.4 FU CW III の開発

Gyrotron FU CW Series の 3 号機、Gyrotron FU CW III は、20 T 超伝導マグネットを用いて、基本波による発振で 500 GHz まで、2 次高調波による発振で 1 THz まで周波数可変の連続動作する光源として開発された。基本的な設計は、21 T パルスマグネットを用いて、1 ms のパルス動作でテラヘルツのブレイクスルーに成功したジャイロトロンの設計を踏襲している[11]。

図 6 は、Gyrotron FU CW III の外観を示している。また、図 7 上図に、ジャイロトロンの動作試験の結果を、同下図に各共振器モードの発振開始電流を示す。磁場が 3 T から 17 T まで変化するとき、多くの共振器モードの発振が起きる[6]。下図の発振開始電流の計算値との比較から、予想されるほとんどすべての共振器モードが実際に励起されていることがわかる。

また、2 次高調波による発振の検証をハイパスフィルタを用いて、基本波による発振を取り除くことにより行った。磁場強度が 3 T から 20 T まで変化するとき、2 次高調波での発振が検出され、最高周波 1080 GHz までの周波数

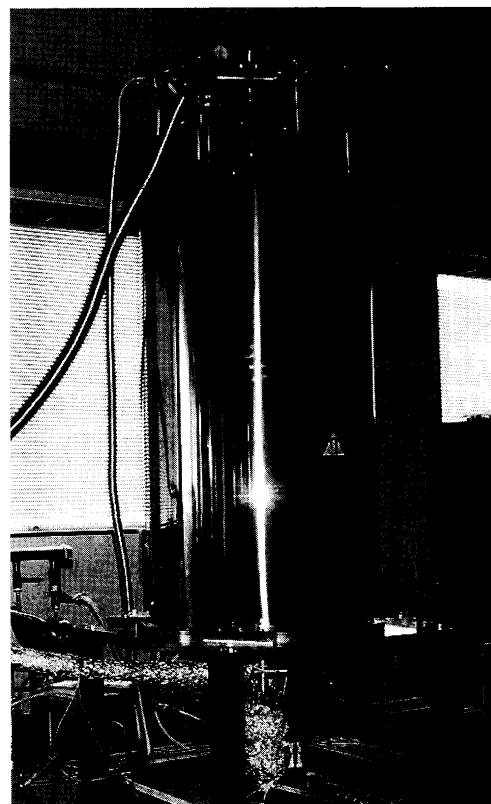


図6 Gyrotron FU CW III の外観。

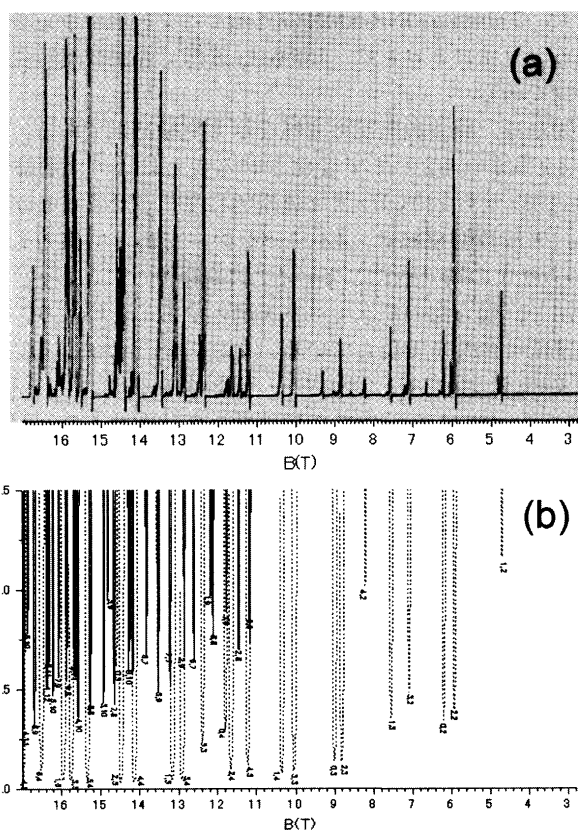


図7 基本波による出力の測定結果(a)と各共振器モードの発振開始電流の計算結果(b)。図(a)の縦軸は検出器の信号強度である。

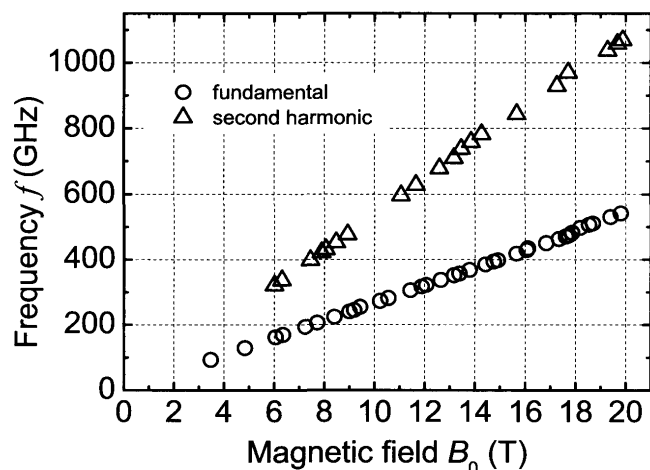


図8 基本波と2次高調波による発振周波数の磁場依存性。

可変が達成された。図8に基本波および2次高調波による発振の周波数を磁場の関数として示している。水負荷で測定した基本波の出力は、CW動作で80 Wから400 W、予想される2次高調波の出力は、数10 Wである。

3.3.5 FU CW IVの開発

DNP-NMRへの応用を始め、高出力テラヘルツ分光ヘジャイロトロンを利用する場合には、周波数を正確に設定する必要がある。このため、周波数の連続可変が求められる。Gyrotron FU CW Seriesの4号機、Gyrotron FU CW IVは、200 MHz DNP-NMRの光源として利用が予定されているジャイロトロンで、135 GHz近傍で周波数連続変化が可能である。

図9は、周波数連続可変性を示す実験結果である。磁場を4.9 Tから5.2 Tまで変化させることにより、周波数を134 GHzから140 GHzまで連続的に変化させることができる。周波数変化幅は、4.4パーセントである。出力も1 Wから60 Wの間で変化している。共振器モードとして、 $TE_{12}^{(1)}$ を用い、軸方向の高次モードを励起することにより、周波数連続可変性を実現している。また、4.8 Tから4.9 Tまでの変化に対して、 $TE_{41}^{(1)}$ モードを用いることにより、131 GHzから132 GHzまで周波数を変化させることができる。

200 MHz DNP-NMRの光源として、131.5 GHzの出力が必要である。共振器モードとして、 $TE_{41}^{(1)}$ を用い、磁場強度の設定により、容易にこの周波数を得ることが可能である。現在、このジャイロトロンを高分子材料の表面解析を行うための200 MHz DNP-NMRのための光源として用いている。

600 MHz DNP-NMRの光源として、394.6 GHz近傍で周波数連続可変の達成も重要な課題である[12]。

3.3.6 まとめと今後のテラヘルツ帯CWジャイロトロンの開発計画

高出力テラヘルツ帯電磁波源を用いる応用研究が進展している。このためには、この帯域の高出力光源、特にCW光源が必要である。本節では、その例として福井大学遠赤外領域開発研究センターで開発中のテラヘルツ帯CWジャ

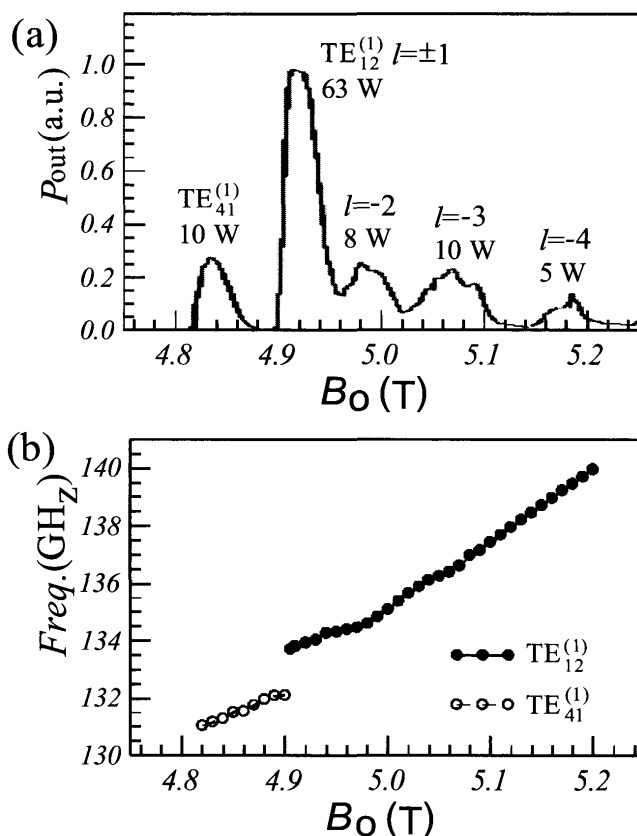


図9 磁場 B_0 が4.8 Tから5.2 Tまで変化するときの出力(a)と周波数(b)の変化を示す実験結果。

表3 今後開発予定のFU CW series ジャイロトロン。

名称	周波数, 出力	使用目的
FU IIA	200 GHz, 200W	600 MHz DNP-NMR
	400GHz, 50 W	300 MHz DNP-NMR
FU CW V	203.4 GHz, 100 W	ポジトロニウムのエネルギー準位測定
FU CW VI	395 GHz, 100 W	600 MHz DNP-NMR, 周波数可変
FU CW VII	200 GHz, 200 W	ESR エコー実験
FU CW VIII	1 THz まで周波数可変, 30W - 200 W	X-Ray Detected Magnetic Resonance (XDMR) 実験

イロトロン FUCW seriesの例を示した。各ジャイロトロンの実用化により、応用研究の発展が期待される。

福井大学では、さらに多くの応用のため、FU CW IVに次ぐジャイロトロンを開発中あるいは開発計画に載せている。表3はこれらをまとめたものである。今後、これらのジャイロトロンが具体化すれば、高出力テラヘルツ技術開発が一層進展すると期待される。

福井大学の他には、米国MITでもテラヘルツ帯ジャイロトロンが開発され、DNP-NMRへの応用研究等が進行中である。いくつか論文が出ているが、代表的なものを挙げておく[13-15]。

参考文献

- [1] Yu V. Bykov, K I. Rybakov and V.E. Semenov, J. Phys. D: Appl. Phys. 34, R55 (2001).

- [2] H. Hoshizuki, S. Mitsudo, T. Saji, K. Matsuura, T. Idehara, M. Glyavin *et al.*, *Int. J. Infrared Millim. Waves* **26**, 1531 (2005).
- [3] V.E. Zapevalov, V.K. Lygin, O.V. Malygin *et al.*, *Conf. Digest of 29th IRMMW & 12th THz 149* (2004).
- [4] T. Saito, T. Idehara, S. Mitsudo *et al.*, *Conf. Digest of 31th IRMMW & 14th THz 24* (2006).
- [5] T. Idehara, I. Ogawa, La Agusu, T. Kanemaki, S. Mitsudo, T. Saito, T. Fujiwara and H. Takahashi, *Int. J. Infrared Millim. Waves* **28**, 433 (2007).
- [6] La Agusu, T. Idehara, H. Mori, T. Saito, I. Ogawa and S. Mitsudo, *Int. J. Infrared Millim. Waves* **28**, 315 (2007).
- [7] V.E. Zapevalov, V.K. Lygin, O.V. Malygin, M.A. Moiseev, V.I. Khizhnyak, V.P. Karpov, E.M. Tai, T. Idehara, S. Mitsudo, I. Ogawa and T. Saito, *Radiophys. Quantum Electron.* **50**, 420 (2007).
- [8] N.I. Zaytsev, T.P. Pankratova, M.I. Petelin and V.A. Flyagin, *Radio Eng. Electronic Phys.* **19**, 103 (1974).
- [9] T. Saito, T. Nakano, S. Mitsudo, I. Ogawa and T. Idehara, *Plasma Fusion Res.* **2**, 024 (2007).
- [10] T. Saito, T. Nakano, H. Hoshizuki, K. Sakai, Y. Tatematsu, S. Mitsudo, I. Ogawa, T. Idehara and V.E. Zapevalov, *Int. J. Infrared Millim. Waves* **28**, 1063 (2007).
- [11] O. Watanabe, H. Tsuchita, H. Mori, La Agusu, S. Mitsudo, I. Ogawa, T. Saito and T. Idehara, *Plasma Fusion Res.* **2**, S1043 (2007).
- [12] M. Glyavin, V. Khizhnyak, A. Luchinin and T. Idehara, *Int. J. Infrared Millim. Waves* **29**, 641 (2008).
- [13] M.K. Hornstein, B.S. Bajai, R.G. Griffin, K.E. Kreischer, I. Mastovsky, M.A. Shapiro, J.R. Sirigiri and R.J. Temkin, *IEEE Trans. Electron Devices* **52**, 798 (2005).
- [14] M.K. Hornstein, B.S. Bajai, R.G. Griffin and R.J. Temkin, *IEEE Trans. Plasma Sci.* **34**, 524 (2006).
- [15] M.K. Hornstein, B.S. Bajai, R.G. Griffin and R.J. Temkin, *IEEE Trans. Plasma Sci.* **35**, 27 (2007).