

サブミリ波ジャイロトロン開発と応用 Development and applications of sub millimeter wave gyrotrons

立松芳典
Yoshinori Tatematsu

福井大遠赤セ
FIR Univ. of Fukui

1. はじめに

ジャイロトロンは核融合研究を目的として高出力化をめざして開発されてきた。一方、これとは別の方向性としてジャイロトロンの超高周波数化があった。後者の目的で開発されたのがサブミリ波ジャイロトロンである。福井大学遠赤外領域開発研究センターでは、マグネットの磁場強度の増強と、高調波発振を利用することで高周波数化を行い、889 GHz、出力0.1kW、パルス幅1msのジャイロトロン発振を達成した[1]。さらに2005年に、21.5 Tのパルスマグネットを用いて、2次高調波発振で世界で初めてジャイロトロンで1 THz発振のブレイクスルーを達成した[2]。その後ロシアIAP-RASでも1 THzを超える発振に成功した[3]。

サブミリ波ジャイロトロンの開発と応用については、2008年の本学会誌に「高出力テラヘルツ帯ジャイロトロン開発と応用展開」というタイトルの小特集が組まれている[4]。本講演は、この小特集後のサブミリ波ジャイロトロンの開発、応用の進展について述べる。

2. サブミリ波ジャイロトロンの開発

福井大学では2005年頃までは、高周波数化をめざしたジャイロトロン開発を行ってきたが、上記1 THzのブレイクスルーを達成した後は、高周波数化から、個々の応用を目的としたジャイロトロンの開発へと方針展開を図った。応用のためにジャイロトロンに期待される性能として、対象に合った出力レベル及び周波数帯の実現の他

- ・連続発振
- ・周波数の連続可変
- ・周波数の広帯域発振
- ・安定した出力、周波数発振
- ・ガウスビーム出力

などが期待される。このような目的で開発された福井大のジャイロトロンはGyrottron FU CW シリーズ[5-10]、FU CW G シリーズ[11-17]と呼ばれる。

Gyrottron FU CW シリーズの1号機 FU CW I はロシアIAP-RASと福井大の共同で開発された[7]。周波数300 GHz、出力2.3 kWを達成し、新材料創成、セラミック焼結に用いられた。FU CW II, IV, VI, VIIは動的核偏極を用いた核磁気共鳴分光実験の光源として開発された[6,8-10]。この応用のための光源は、感度を最大にチューニングするために周波数を連続的に変化できる機能を有する必要がある。ジャイロトロンの周波数は離散的に変化すると考えられてきたが、軸方向モードの変化を伴うジャイロ後進波管発振を利用することで、周波数を連続的に変化できることがChangによって予想され、出原によって実証された[8]。この後、周波数連続可変ジャイロトロンの開発が世界でも盛んになった[18,19]。

電磁波応用にはガウスビームでの伝送、照射が都合がよい。ジャイロトロン内で、発振した電磁波のガウスビームへの変換に関する研究は、核融合用ジャイロトロンでは純度99%を超えるようなモード変換器の開発が進んでいる。サブミリ波ジャイロトロンでも、最近モード変換器を内蔵するものが開発された。福井大においてはFU CW G シリーズと呼ばれる。FU CW GIは、203 GHz、0.5 kWの基本波発振管であり[11]、その後継機のFU CW GIAでは出力を1.5 kWまで上昇させた。FU CW GII, GIIIは2次高調波発振で周波数395 GHzの電磁波を発振する[12,13]。FU CW GIIIでは0.4 kW出力を達成した。FU CW GIVは2次高調波発振の周波数連続可変機能を有する[17]。FU CW GVは基本波発振で多くの周波数(モード)に対してガウスビーム出力できる[15]。発振周波数は162 GHzから265 GHzの間で10の周波数でガウスビーム出力を実現した。窓の透過率は波の周波数に依存するが、2枚の窓を用いることで、あらゆる周波数の波に対して、透過率をほぼ1にでき、10のすべてのモードに対して~1 kWの出力が得られた。

この他、パルス出力ながら100 kW超の出力を

めざしたパルスジャイロトロンシリーズを開発した[20-28]。このジャイロトロンはLHDにおける協同トムソン散乱計測として用いることが目的である。

3. サブミリ波ジャイロトロンの応用

2008年の小特集「高出力テラヘルツ帯ジャイロトロン開発と応用展開」では、サブミリ波ジャイロトロンの応用の可能性についていくつかの例が記載されている。散乱計測、電子スピン共鳴、動的核偏極を用いた核磁気共鳴、新材料創成、セラミック焼結、素粒子物理、生体照射等である。現在までに、動的核偏極を用いた核磁気共鳴分光実験[29,30]をはじめとしていくつかの応用は実現し、さらに新たなサブミリ波ジャイロトロンの応用課題も生まれている。

素粒子分野へのサブミリ波照射の応用は、ポジトロニウムの超微細構造のエネルギー準位差の直接測定として実現した[31]。ポジトロニウムは電子と陽電子からなる粒子で基底状態では、そのスピンの平行、反平行の2つの状態があり、そのエネルギー準位差は、周波数に換算して203.4 GHz程度である。実験によるこの精密な測定はこれまでも試みられてきたが、それらはゼーマン効果を用いたもので、結果が静磁場の影響を受けている可能性があり、理論の予想値ともわずかに異なっていた。そこで、ゼーマン効果を用いないで電磁波照射によるエネルギー準位差の直接測定を試み、その決定に成功した。使用したジャイロトロンはFU CW GIである。

さらに最近、結晶にサブミリ波を照射することにより、可視光を発する例が報告されている[32,33]。また、サブミリ波を動物に照射し、癌進行の抑制実験[34]や、眼部ばく露に対する安全性の閾値を求めるための実験も行われている他、サブミリ波照射によりヒト細胞の蛋白質の繊維化を促進する報告もされる[35]など、今後生命、生体分野へのサブミリ波照射の応用展開が期待される。さらに、サブミリ波ジャイロトロンを用いたプラズマの散乱計測も近々実現される段階にある。

参考文献

[1] T. Idehara et al., IEEE Trans. Plasma Sci. **27**, 340 (1999).
[2] T. Idehara et al., Int. J. Infrared. Milli. Waves. **27**, 319 (2006).
[3] M. Yu. Glyavin et al., Phys. Rev. Lett. **100**, 015101 (2006).
[4] 齊藤輝雄他 J. Plasma Fusion Res. **84**, 853 (2008).
[5] La Agusu et al., Int. J. Infrared. Milli. Waves. **28**, 315 (2007).

[6] T. Idehara et al., Int. J. Infrared. Milli. Waves. **28**, 433 (2006).
[7] V. E. Zapevalov et al., Radiophys. Quant. Electron. **50**, 420 (2007)
[8] T.-H. Chang et al., J Appl. Phys. **105**, 063304 (2009).
[9] T. Idehara et al., J. Infrared Milli. Terahz Waves **31**, 763 (2010).
[10] T. Idehara et al., J. Infrared Milli. Terahz Waves **31**, 775 (2010).
[11] Y. Tatematsu et al., J. Infrared Milli. Terahz Waves **33**, 292 (2012).
[12] Y. Tatematsu et al., J. Infrared Milli. Terahz Waves **35**, 169 (2014).
[13] Y. Tatematsu et al., J. Infrared Milli. Terahz Waves **35**, 517 (2014).
[14] Y. Tatematsu et al., Phys Plasmas **21**, 083113 (2014).
[15] Y. Tatematsu et al., J. Infrared Milli. Terahz Waves **36**, 697 (2015).
[16] T. Idehara et al., J. Infrared Milli. Terahz Waves **36**, 819 (2015).
[17] Y. Tatematsu et al., 41st IRMMW-THz, H5P.21.13, 2016.
[18] A. C. Torrezen et al., IEEE Trans. Plasma. Sci. **38**, 1150 (2010).
[19] R. J. Temkin, Terahz Sci. Tech. **7**, 1 (2014).
[20] T. Notake et al., Rev. Sci. Instrum. **79**, 732 (2008).
[21] T. Notake et al., Plasma Fusion Res. **4**, 011 (2009).
[22] T. Notake et al., Phys. Rev. Lett. **103**, 225002 (2009).
[23] T. Saito et al., Plasma Fusion Res. **7**, 1206003 (2012).
[24] T. Saito et al., Phys. Plasmas **19**, 063106 (2012).
[25] Y. Yamaguchi et al., Plasma Fus Res. **8**, 1205165 (2013).
[26] Y. Yamaguchi et al., Nuclear Fusion **55**, 13002 (2015).
[27] Y. Yamaguchi et al., J. Instrumentation **10**, C10002, (2015).
[28] T. Saito et al., Plasma Fusion Res. **12**, 1206013 (2017).
[29] Y. Matsuki et al., J. Mag. Res. **225**, 1 (2012).
[30] Y. Matsuki et al., J. Mag. Res. **264**, 107 (2016).
[31] A. Miyazaki et al, Prog. Theo. Exp. Phys. **2015**, 011C01 (2015).
[32] K. Kato et al., Appl. Phys. Lett. **111**, 031108 (2017).
[33] Y. Toda et al., ACS Nano **11**, 12358 (2017).
[34] N. Miyoshi et al., J. Infrared Milli. Terahz Waves **37**, 805 (2016).
[35] S. Yamazaki et al., Scientific Reports **8**, 9990 (2018).