

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

5. 高周波ジャイロトロンを用いた応用研究

5.6 サブテラヘルツジャイロトロンを用いた X 線検出電子磁気共鳴計測

GOULON José, ROGALEV Andrei, WILHELM Fabrice, GOIJON Gérard, 出原 敏孝¹⁾

European Synchrotron Radiation Facility, B.P. 220, F-38043 GRENOBLE Cedex, France

¹⁾ 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)

欧州放射光施設と福井大学遠赤外領域開発研究センターとの間で、X 線検出電子磁気共鳴およびその励起と検出実験に用いるためのサブテラヘルツ領域ジャイロトロンを最適化する共同研究が進行している。本稿では、この挑戦的課題の科学的意義を簡単に解説し、望ましいサブテラヘルツジャイロトロンの設計のための目標仕様を示す。

Keywords:

X-ray detected electron magnetic resonance, european synchrotron radiation facility, sub-terahertz gyrotron

5.6.1 THz 領域の歳差周波数に至る X 線検出電子磁気共鳴

X 線検出電子磁気共鳴 (X-ray Detected Electron Magnetic Resonance (XDEM)) は、定常バイアス磁場に垂直な高周波磁場によって励起された磁化の共鳴歳差運動を計測するために X 線磁気円二色性 (X-ray Magnetic Circular Dichroism (XMCD)) が用いられる新しい分光法である [1-3]。図 1 に示すように、XDEM は横方向 (TRD) あるいは縦方向 (LOD) 検出の配位で測定できる。X 軸方向に進行している円偏光 (CP) の X 線に対しては、共鳴歳差運動による横磁化成分 $\Delta M_{\perp}$ が励起高周波の周波数で振動する磁気的円二色性信号を引き起こすことが期待される。LOD 配位においては、CP X 線の波数ベクトル k_x は Z 軸に平行であり、XMCD で調べることができるのは、定常磁化成分 ΔM_z である。 ΔM_z は歳差運動に起因する 2 次の摂動であり励起高周波電力に依存する。

欧州放射光施設 (ESRF) で行われた強磁性 YIG 薄膜に対する X 線検出強磁性共鳴 (XD-FRM) の先駆的実験は、この新しい分光法が注目すべき可能性を持っていることを確かにした [1, 2]；

- (i) 強磁性共鳴 (FRM) や常磁性共鳴 (EPR) はある実効的な基底準位にある磁化の歳差運動を表すが、XDEM は元素選択的でありかつ境界選択的である。この方法は、例えば鉄や YIG 中のイットリウムなどのように、物質中の吸収元素に応じて選択された対称性を持つ励起終状態に関連している磁化成分の歳差運動を分離することができる。

- (ii) 拡張された総和則によって、軌道およびスピン成分の歳差運動のダイナミクスの「もつれ状態」を分離することができるに違いない。これはスタンダードな FMR や EPR では不可能である。

このような実験から得られる可能性のある典型的な情報は、歳差運動の開口角 (θ_0) と位相角 (ϕ_0) および縦方向 (T_1) と横方向 (T_2) の緩和時間である。

励起周波数を THz 領域まで高くすると、XDEM は Van Vleck あるいは Kubo-Obata 常磁性における軌道磁化成分を調べるための特徴ある手法になり得る。3d 遷移金属化合物において、軌道磁化成分は結晶場のために部分的にクエンチしていることが知られている。しかし、このことは、希

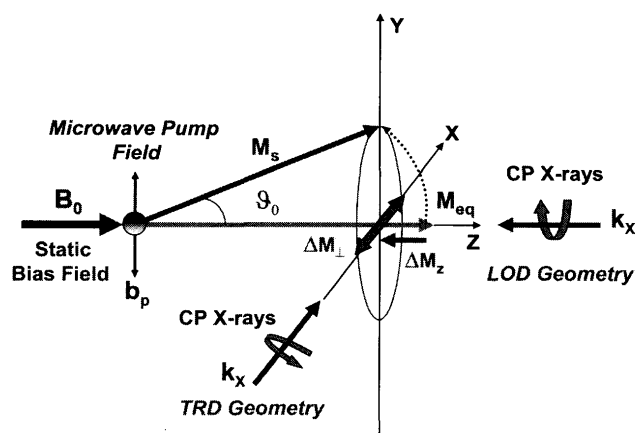


図 1 横方向 (TRD) あるいは縦方向 (LOD) 検出の配位の XDEM 実験の概念図。

5.6 Subterahertz Gyrotron Optimized for X-Ray Detected Electron Magnetic Resonance

GOULON José, ROGALEV Andrei, WILHELM Fabrice, GOIJON Gérard and IDEHARA Toshitaka

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

土類, 5d 遷移金属および相対論効果が顕著になるアクチノイド属のような高Z元素の配位化学には当てはまらない。しかし, 常磁性試料には, XMCD 信号が 15 K 以下の低温かつ 6 T 以上の高磁場でなければ正確に測定できないという困難が常につきまとっている。この磁場では, 共鳴周波数はしばしばサブテラヘルツ領域に入る。それでもなお, この技術的困難は興味深い利さへ転換され得る。なぜなら, 通常大きなゼロ磁場分離の結果としてマイクロ波周波数では EPR が起きない, 整数スピンを持つ常磁性系(非クラース系)に対して, 励起できるからである。

長年, 高磁場磁気共鳴は, 希土類鉄ガーネットにおける弱い Kittel-Kaplan 交換モードの実験的検出からフェリ磁性あるいは反強磁性試料を特徴づけるための強力な手法として知られてきた。もし, 磁氣的に結合している副格子に付随する高周波数の基準モードを調べることができれば, XDFMR 実験は非常に魅力的になり得る。例えば, 異なるサイトにおけるスピンおよび軌道磁化成分の歳差運動は結合するだろう。我々は, マイクロ波周波数領域で検出された XDFMR 信号は低周波(音響)モードに付随するもので, 他の(光学)モードは THz あるいは遠赤外領域のスペクトルとして励起されるだろうと考えている。

X 線で反強磁性共鳴 (AFMR) を検出することは, さらにチャレンジングであろう。どんな XMCD 信号の検出も対称性から不可能であるにもかかわらず, XDEMR 信号は測定可能であるという不可解な状況を思い描くことができる。このような状況は, クエンチしていない軌道磁化成分に付随する強い非等方場が存在すれば期待されることとして, 結合した 2 つのサブラティスの歳差角が異なる場合に生じうる。具合の悪いことに, 多くの試料において, ゼロ磁場 AFMR は THz 領域でのみ観測可能であり(例えば, LaMnO_3 では AFMR は大体 0.5 THz で見られる), 低周波(音響)モードは 5–15 T のオーダの高バイアス磁場下で, 典型的にはサブテラヘルツ領域の周波数で励起されうる。

5.6.2 サブテラヘルツ XDEMR 実験用に最適化されたジャイロトロン

ESRF においては, サブテラヘルツの周波数で振動する微弱な XMCD 信号の捕捉可能な十分ダイナミックレンジの広い X 線検出器がないため, LOD 配位においてのみ, サブテラヘルツ XDEMR スペクトルを記録することを想定することができる。しかし, そのような弱い 2 次効果の検出は非常にチャレンジングであり, ジャイロトロンの運転モードに強い制限が課されることになる。

- (i) ジャイロトン出力の振幅変調は, 通常マグネトロン入射型電子銃のアノード電位を変調することを通して電子のピッチファクタを制御することにより行われている[4]。福井大学において 400 kHz までの高い周波数まで振幅変調が試験されている。もっとも優先順位が高いわけではないが, 速い緩和過程に対応するには, 変調周波数を VHF 領域あるいはラジオ周波数領域まで高くすることが望ましい。

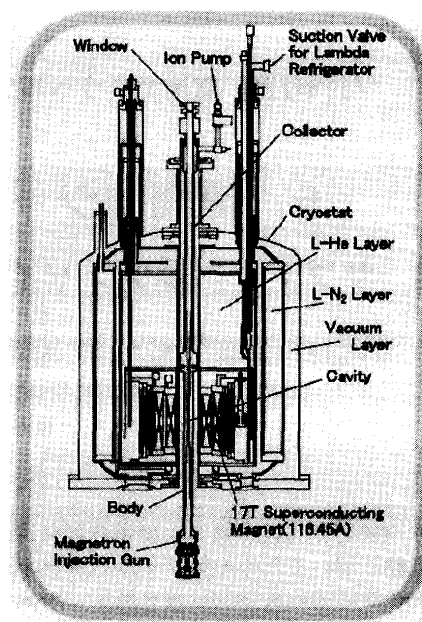


図2 17 T 超伝導マグネットとシールオフ管で構成されるジャイロトン FU IV-A.

- (ii) 周波数変調はジャイロトロンの加速電圧を変調すれば可能であるが, 陰極は低インピーダンスであるからこれは簡単なことではない[5]。約 300 GHz において, この方法で 3–30 MHz の発振周波数シフトが 1–40 kHz の変調周波数で得られている[4]。

17 T 超伝導マグネット, 高電圧マグネトロン入射型 3 極電子銃およびシールオフ管から構成されるジャイロトン FU IV-A の設計から, いくつかのことが想定される(図2)。120–450 GHz の周波数範囲での段階的な周波数同調は, 基本的には基本波 ($s=1$) 電子サイクロトロン共鳴に対して最適化されるが, 第二高調波を用いた 890 GHz に及ぶさらに高い周波数はオプションとして残されている[6]。陰極の損傷なく長期のデータ取り込み期間にわたっての連続動作を保证するため, ジャイロトロンを低いデューティーサイクル (3.33%–8.75%) でパルス運転することが戦略である。35 kHz までの高い繰り返しでパルス運転することが可能かどうかの確認が必要である。さらに試験することは当然であるが, XDFMR 実験に求められるものとして, 1 kW までのピーク出力は現実的な目標であろう。

352.202 MHz の繰り返し周波数をもつ ESRF の蓄積リング中の電子パンチに完全に同期するように, ジャイロトンからの放射の振幅および周波数変調にトリガをかけるため, 多くの努力が払われるだろう。これは, ノイズに隠れた微弱信号を取り出すだけではなく, XDEMR 測定から縦方向 (T_1) と横方向 (T_2) の緩和時間を引き出す可能性を残すために必須である。

現在想定している仕様をさらに明確にするため, ESRF と FIR FU の共同研究プログラムの一部として, 2009 年には ESRF で予備の実験が行われる予定である。17 T 超伝導マグネットを用いてサブテラヘルツ測定のための XDEMR スペクトロメータを建設するため, その次をめざした仕事も始まっている。

参考文献

- [1] J. Goulon, A. Rogalev, F. Wilhelm, N. Jaouen, C. Goulon-Ginet, G. Goujon, J. Ben Youssef and M.V. Indenbom, JETP Letters **82**, 791 (2005).
- [2] J. Goulon, A. Rogalev, F. Wilhelm, Ch. Goulon-Ginet and G. Goujon, J. Synchrotron Rad. **14**, 257 (2007).
- [3] J. Goulon, A. Rogalev, F. Wilhelm, N. Jaouen, C. Goulon-Ginet and Ch. Brouder, Eur. Phys. J. B **53**, 169 (2006).
- [4] T. Idehara, M. Pereyaslavets, N. Nishida and I. Ogawa, Phys. Rev. Lett. **81**, 1973 (1998).
- [5] T. Idehara, La Agusu, H. Mori, I. Ogawa and S. Mitsudo, *Proc. of the joint IRMMW-THz International Conf. held in Cardiff (UK)*, Sept. 2 -7 2007.
- [6] I. Ogawa, T. Idehara, M. Ui, S. Mitsudo and W. Förster, Fusion Eng. Des. **53**, 571 (2001).