

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 6 月 5 日現在

機関番号：13401

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2009～2011

課題番号：21360167

研究課題名（和文）203GHz 帯ジャイロ BWO の開発とポジトロニウムのエネルギー準位差の精密測定

研究課題名（英文）Development of 203 GHz band Gyro BWO and accurate measurement of energy difference between two states of positronium

研究代表者

出原 敏孝 (IDEHARA TOSHITAKA)

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

研究成果の概要（和文）：203 GHz 帯の周波数可変光源ジャイロ後進波管（Gyro BWO）の開発を行い、これを用いて、東京大学素粒子物理国際研究センターとの共同研究により、ポジトロニウムのエネルギー準位差(HFS)を精密に決定するための世界初の実験を行った。問題点として残されている理論値と実験値の違いに最終的な決着をつける実験を行うため、ガウシアンビーム出力のジャイロトロン装置(Gyrotron FU CW GI)を開発し、これを光源とする実験の計画を策定した。

研究成果の概要（英文）：Development of 203 GHz band frequency tunable Gyro BWO and its application to the first experiment on accurate measurement of energy difference between two states of positronium under collaboration with International Center for Elementary Particle Physics of University of Tokyo. In order to solve the problem on the difference between theoretical and experimental results of HFS measurement, we have developed a new gyrotron device (Gyrotron FU CW GI) with a Gaussian beam output and made a planning of the experimental set-up for this study.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	10,600,000	3,180,000	13,780,000
2010年度	2,500,000	750,000	3,250,000
2011年度	1,200,000	360,000	1,560,000
年度			
年度			
総計	14,300,000	4,290,000	18,590,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・電子デバイス電子機器

キーワード：ジャイロ BWO, ポジトロニウム, エネルギー準位差

1. 研究開始当初の背景

テラヘルツ領域は 21 世紀が必要とする新技術の宝庫であり、「テラヘルツギャップ」の状況を返上して、早急に開発を進めることが求められている。この要求に応えるため、われわれは、新たな原理である電子の相対論効果に基づく「サイクロトロンメーザー作用」を用いた高出力テラヘルツ光源 - 「ジャイロトロン」の開発を行っている。ジャイロトロンは、電子のサイクロトロン周波数及びそ

の高調波での共鳴現象を用いるので、従来の電子管とは異なり、高磁場と高次高調波により、動作周波数を高めることができ、テラヘルツ領域までの高周波化が可能となる。われわれは、これまでに、パルス動作するジャイロトロン (Gyrotron FU Series) と連続(CW)動作するジャイロトロン (Gyrotron FU CW Series) を開発し、20T に至る高磁場と二次高調波を用いてテラヘルツのブレイクスルーを達成し、新たな世界最高周波数記録の樹

立に成功した。また、他の光源では、なし得なかったテラヘルツ領域で100Wを超える高出力を達成した。この利点を活かして、最近、CW テラヘルツジャイロトロンを応用した高出力テラヘルツ技術として、動的核偏極(DNP)によるNMRの感度向上技術等の開発研究に着手した。

2. 研究の目的

本研究では、周波数を連続的に変化させることのできる高出力テラヘルツ光源である Gyro-BWO を開発し、これを活用して、有効な高出力光源がないために、これまでなし得なかったポジトロニウムのエネルギー準位差(HFS)の直接測定を行うことにより、HFSを高い精度(約1ppm)で測定し、理論値とのずれを解明するための光源として応用し、理論値と実験値の相違に関する永年の問題に決着をつけるための実験を行う。

3. 研究の方法

(1) これまでに行ってきた高出力テラヘルツ技術開発の一つであるポジトロニウムのエネルギー準位の精密計測のための光源として、203 GHz 帯の周波数可変ジャイロ後進波管(Gyro-BWO)の開発を行い、CW動作で出力2.75 kW、周波数可変範囲13 GHz(6.4%)を達成する。

(2) その出力をポジトロニウムに照射することにより、これまで他の光源ではなし得なかったポジトロニウムのエネルギー準位差の直接測定を行い、問題点として残されている理論値と実験値の違いに最終的な決着をつける実験を行う。

(3) このため、東京大学素粒子物理国際共同研究センターと協力して、ポジトロニウムのエネルギー準位差の直接測定に最適化した Gyro-BWO の開発を行、ポジトロニウムへの照射実験を行う。

4. 研究成果

1. 周波数連続可変 203GHz 帯 Gyro-BWO を設計するにあたり、既存の電子銃駆動用高電圧電源装置(陰極電源: 30kV, 0.5A, CW, 及び陽極電源: 20kV, 50 mA, CW) 及び無冷媒超伝導マグネット装置(最高磁場:10 T, 室温ボア径:100mm, 磁場一様性:直径10mmの球内での磁場変化 0.1%以下)を有効に活用することを前提として、Gyro-BWO 管の最適化設計を行った。

1-1) **設計の基本方針と設計の検討:** 上記の既存設備を活用して開発する Gyro-BWO の設計を行った。動作モードとして、シンプルな基本モードである TE02 モードを採用し、競合モードである TE22 及び TE12 モードの抑制をするための方法を考案した。電子ビーム

のメインパラメーターである速度比(速度の磁場に垂直な成分の平行成分に対する比)及び速度広がり、通常のマグネトロン入射型電子銃(MIG)で可能な標準的な値に設定した。

1-2) **高性能モードコンバーターの設計と製作:** 動作モードである TE02 モードを高効率で動作させるため、競合モードである TE22 及び TE12 モードを抑制するモードコンバーターの設計を行った。

2. 既存の無冷媒超伝導マグネットに設計・製作した Gyro-BWO 管を設置し、装置全体を完成した。

設計に基づき、203GHz 帯 Gyro-BWO の製作を行い、デマウント型の装置を完成し、真空テストを行った後、8T ヘリウムフリー超伝導マグネットへの設置を完了した。既存の高電圧電源を用いて、出力 2.75kW、周波数可変幅 6.4%を達成することを目指して、動作試験を開始した。

3. 周波数と出力振幅の高安定化:

ポジトロニウムの超微細構造(HFS)の直接測定のためには、周波数の高安定化に加えて、出力振幅の高安定化が必要である。電子ビームのエネルギー及び速度分布を制御することにより両者の安定化を達成した。現有の Gyrotron FU CW V を用いて、ポジトロニウムの HFS の直接測定の予備実験を行い、誘導放出によるエネルギー準位間の遷移の世界初の観測に成功した。電子ビーム電流の制御により、ジャイロトロンの出力安定化を達成する試験を行った。この実績を応用して、Gyro-BWO の出力安定化を達成した。

4. Gyro-BWO の出力を照射することにより、これまで他の光源ではなし得なかったポジトロニウムのエネルギー準位差の直接測定を行い、問題点として残されている理論値と実験値の違いに最終的な決着を着ける実験を行うための検討を行った。

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 21 件)

- 1) Toshitaka Idehara, Jagadish C. Mudiganti, La Agusu, Tomohiro Kanemaki, Isamu Ogawa, Toshimichi Fujiwara, Yoh Matsuki, Keisuke Ueda, Development of a compact sub-THz gyrotron FU CW CI for application to high power THz technologies, J. Infrared, Milli Terahz Waves, 33 (2012) 724-744. 査読有り
- 2) Y.Tatematsu, Y.Yamaguchi, T.Idehara, T.Ozeki, R.Ikeda, T.Kanemaki, I.Ogawa, T.Saito,

Development of a kW Level-200 GHz Gyrotron on FU CW GI with an Internal Quasi-optical Mode Converter, *J. Infrared, Milli Terahz Waves*, 33 (2012) 292-305. 査読有り

3) Kevin J. Pike, Thomas F. Kemp, Hiroki Takahashi, Robert Day, Andrew P. Howes, Eugeny V. Kryukov, James F. MacDonald, Alana E.C. Collis, David R. Bolton, Richard J. Wyde, Marcella Orwick, Kosuke Kosuga, Andrew J. Clark, Toshitaka Idehara, Anthony Watts, Graham M. Smith, Mark E. Newton, Ray Dupree, Mark E. Smith, A spectrometer designed for 6.7 and 14.1 T DNP-enhanced solid-state MAS NMR using quasi-optical microwave transmission, *Journal of Magnetic Resonance* 215 (2012) 1-9 査読有り

4) F. Horii, T. Idehara, Y. Fujii, I. Ogawa, A. Horii, G. Entzminger, F.D. Doty, Development of DNP-Enhanced High-Resolution Solid-State NMR System for the Characterization of the Surface Structure of Polymer Materials, *J. Infrared, Milli Terahz Waves*, 33 (2012) 756-765 査読有り

5) Y. Yamaguchi, Y. Tatematsu, T. Saito, R. Ikeda, J.D. Mudiganti, I. Ogawa, T. Idehara, Formation of Laminar Electron Flow for a High-Power Sub-THz Gyrotron, *Plasma and Fusion Research* 7 (2012) 1205004-1~3(2012) 査読有り

6) S. Asai, T. Yamazaki, A. Miyazaki, T. Suehara, T. Namba, T. Kobayashi, H. Saito, T. Idehara, I. Ogawa, S. Sabchevski, Direct Measurement of Positronium Hyperfine Structure: < A New Horizon of Precision Spectroscopy Using Gyrotrons <, *J. Infrared, Milli Terahz Waves*, 33 (2012) 766-776 査読有り

7) T. Idehara, S.P. Sabchevski, Development and Applications of High Frequency Gyrotrons in FIR FU Covering the sub-THz to THz Range, *J. Infrared, Milli Terahz Waves*, 33 (2012) 667-694 査読有り

8) A. Rogalev, J. Goulon, G. Goujon, F. Wilhelm, I. Ogawa, T. Idehara, X-Ray Detected Magnetic Resonance at sub-THz frequencies using a high power gyrotron source, *J. Infrared, Milli Terahz Waves*, 33 (2012) 777-793 査読有り

9) Akira Miyazaki, Takayuki Yamazaki, Taikan Suehara, Toshio Namba, Shoji Asai, Hruo Saito, Hruo Saito, Toshitaka Idehara, Isamu Ogawa, Yuichi Urushizaki, Svilen Sabchevski, New Experiment for the First Direct Measurement of Positronium Hyperfine Splitting with sub-THz Light, *Materials Science Forum* Vol. 666 (2011) pp 133-137. 査読有り

10) Nai-Ching Chen, Tsun-Hsu Chang, Ching-

Pin. Yuan, Toshitaka Idehara, Isamu Ogawa Theoretical investigation of a high efficiency and broadband sub-terahertz gyrotron, *Journal of Applied Physics*, 107 (2010) 161501. 査読有り

11) T. Idehara, K. Kosuga, La Agusu, I. Ogawa, H. Takahashi, M.E. Smith and R. Dupree, Gyrotron FU CW VII for 300 MHz and 600 MHz DNP-NMR Spectroscopy, *J. Infrared, Milli Terahz Waves*, 31 (2010) 763-774. 査読有り

12) M.Yu Glyavin, T. Idehara, N. Manuilov, T. Saito, Studies of Continuous-Wave Submillimeter-Wave Gyrotrons for Spectroscopy and Diagnostics of Various Media, *Radiophysics and Quantum Electronics*, 52 (2009) 500-510. 査読有り

13) Yoh Matsuki, Toshitaka Idehara, Toshimichi Fujiwara et al. Dynamic nuclear polarization experiments at 14.1 T for solid-state NMR, *Physical Chemistry Chemical Physics* 12 (2010) 5799-5803. 査読有り

14) Toshitaka Idehara, Kosuke Kosuga, Toshimichi Fujiwara et al., Continuously Frequency Tunable High Power Sub-THz Radiation Source—Gyrotron FU CW VI for 600 MHz DNP-NMR Spectroscopy, 31 (2010) 775-790 査読有り.

15) V. Manuilov, M. Glyavin, T. Idehara, et al. Electron Optical System of the Sub-terahertz Coaxial Gyrotron with Continuous Frequency Tuning, *J. Infrared, Milli Terahz Waves*, 31 (2010) 912-918. 査読有り

16) Svilen Petrov Sabchevski, Toshitaka Idehara, Design of a Compact Sub-Terahertz Gyrotron for Spectroscopic Applications, *J. Infrared, Milli Terahz Waves*, 31 (2010) 934-948. 査読有り

17) Olgierd Dumbrajs, Toshitaka Idehara, Frequency Tunable Gyrotron FU CW VA for Measuring Hyperfine Split of Positronium, *J. Infrared, Milli Terahz Waves*, 31 (2010) 1265-1270. 査読有り

Tsun-Hsu Chang, Toshitaka Idehara, Isamu Ogawa, La Agusu, and S. Kobayashi, Frequency tunable gyrotron using backward-wave components, *Journal of Applied Physics* 105 (2009) 063304. 査読有り

他3件

[学会発表] (計 35 件)

1) Toshitaka Idehara, Development and applications of high frequency harmonic gyrotrons -Cooperative research works with institutions in the world-, The 4th International Workshop on Far Infrared technologies, 2010.3.7,

Fukui, Japan.

2) R. Dupree, K.J. Pike, T.H. Kemp, H. Takahashi, R. Day, A.P. Howes, E.V. Kryukov, J.F. MacDonald, A.E.C. Collis, D.V. Bolton, R.J. Wylde, M. Orwick, K. Kosuga, A.J. Klark, T.Idehara, A. Watts, G.M. Smith, M.E. Newton, M.E. Smith, A DNP-enhanced Solid-State MAS NMR Spectrometer designed for operation at 6.7 and 14.1 T using quasi-optical microwave transmission, The 4th International Workshop on Far Infrared technologies, 2010.3.8, Fukui, Japan.

3) T. Fujiwara, Y. Matsui, K. Ueda, T.Idehara, R. Ikeda, K. Kosuga, I.Ogawa, S. Nakamura, M. Toda, T. Anai, Application of Continuously Frequency-Tunable Sub-MMW Gyrotron to Dynamic Nuclear Polarization for NMR Spectroscopy at 14.1 T and 30K, The 4th International Workshop on Far Infrared technologies, 2010.3.8, Fukui, Japan.

4) T. Yamazaki, A. Miyazaki, T. Suehara, T. Namba, S. Asai, T. Kobayashi, H. Saito, T.Idehara, I.Ogawa, S. Sabchevski, Direct Measurement of the Hyperfine Structure of the Ground State Positronium using High Power Sub-THz Radiation, The 4th International Workshop on Far Infrared technologies, 2010.3.8, Fukui, Japan.

5) K. Hirakawa, Y. Sakasegawa, H. Tanaka, T.Idehara, Physics of Bloch oscillation in semiconductor superlattices under intense sub-terahertz radiation from a gyrotron, The 4th International Workshop on Far Infrared technologies, 2010.3.8, Fukui, Japan.

6) R.Ikeda, Y.Tatematsu, T.Idehara, Y.Yamaguchi, J.C.Mudiganti, T.Ozeki, T.Kanemaki, I.Ogawa, T.Saito, A table-top 200 GHz gyrotron FU CW CII with an internal mode converter, The 4th International Workshop on Far Infrared technologies, 2010.3.8, Fukui, Japan.

7) Y.Tatematsu, Y.Yamaguchi, T.Idehara, T.Ozeki, T.Kawase, H.Kato, J.Aiba, R.Ikeda, T.Kanemaki, I.Ogawa, T.Saito, Development of gyrotrons with an internal mode converter, Gyrotron FU CW G-series, The 4th International Workshop on Far Infrared technologies, 2010.3.8, Fukui, Japan.

8) J.C. Mudiganti, T.Idehara, Y.Tatematsu, T.Saito, I.Ogawa, CAD of Magnetron Injection Guns for Sub-Terahertz Gyrotrons, International Photonics Conference 2011 (IPC 2011) 2011.12.9, Tainan, Taiwan.

9) J.C. Mudiganti, T.Idehara, Y.Tatematsu, T.Saito, I.Ogawa, A Sub-Terahertz Wave Compact Gyrotron for Spectroscopic Application, International Photonics Conference 2011 (IPC 2011) 2011.12.9, Tainan, Taiwan.

10) Toshitaka Idehara, High power THz radiation

sources developed in FIR FU and their applications, ROC Centennial Workshop on THz Science and Technology, 2011.12.12, Hsinchu, Taiwan

11) Toshitaka Idehara, High power THz technologies using THz gyrotrons as radiation sources, International Photonics Conference 2011 (IPC 2011) 2011.12.9, Tainan, Taiwan..

12) S. Asai, T. Suehara, G. Akimoto, A. Miyazaki, T. Yamazaki, T. Namba, T. Kobayashi, H. Saito, T. Idehara, I. Ogawa, Y. Urushizaki, Svelin Sabchevski, Measurement of hyperfine split of positronium atoms using sub-THz gyrotron, The 3rd International Workshop on Far Infrared Technologies 2010, 2010.3.16, Fukui, Japan.

13) T.Idehara, T.Saito, I.Ogawa, S.Mitsudo, Y. Tatematsu, R. Ikeda, J. Mudiganti, K. Kosuga, THz Gyrotron FU CW Series for high power THz technologies," (Invited Key note), The 35th International Conference on Infrared, Millimeter and THz Waves, Rome, Italy, 2010. 9. 9.

14) Toshitaka Idehara, High power THz technology using high frequency gyrotrons (Invited) The 3rd Korea-Japan Joint Workshop on THz Technology, Busan, Korea, 2010.12.17

15) T.Idehara, T.Saito, I.Ogawa, S.Mitsudo, Y. Tatematsu, Development of high frequency gyrotrons and application to high power THz technologies (Invited), International Symposium "Terahertz Radiation: Generation and Application, Novosibirsk, Russia, 2010.7.28

16) T. Idehara, T. Saito, I. Ogawa, S. Mitsudo, Y. Tatematsu, HIGH POWER THz TECHNOLOGIES OPENED BY HIGH POWER RADIATION SOURCES – GYROTRONS, 2010 International Kharkov Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves, Kharkov, Ukraine, 2010.06.22

他 19 件

6. 研究組織

(1) 研究代表者

出原敏孝 (IDEHARA TOSHITAKA)

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

(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