

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 24 日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究(A)

研究期間：2011～2014

課題番号：23244112

研究課題名(和文)フェムト秒レーザーを組み込んだ能動的誘起蛍光分光システムの開発

研究課題名(英文)Active Laser-induced Fluorescence Method using Femtosecond Laser

研究代表者

田中 雅慶(Tanaka, Masayoshi)

九州大学・総合理工学研究科(研究院)・教授

研究者番号：90163576

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 36,800,000円

研究成果の概要(和文)：フェムト秒レーザーを用いて、電子の励起状態を制御する能動的レーザー誘起蛍光分光法の開発を行った。レーザー誘起蛍光法は非常に精度の高い実験手法であるが、その適用の可否は、対象となる励起原子の存在に左右されるため、実験条件に大きく影響されるのが現状である。この弱点を克服するため、フェムト秒レーザーの高強度電場によって励起原子を自ら生成する能動的レーザー誘起蛍光分光法の開発を目指した。フェムト秒レーザーとプラズマの相互作用は非共鳴非線形相互作用であるが、実験によってその存在を確認し、波長可変半導体レーザーを同時入射することにより、生成された励起原子を誘起蛍光分光出来ることを示した。

研究成果の概要(英文)：Recently, femtosecond laser systems have been realized, which makes us possible to utilize the high intensity laser field to improve conventional laser-induced fluorescence(LIF) systems. By using high intensity laser field, we are possible to control or create the excited atoms to be measured. So far, LIF method is a powerful diagnostic method, however it strongly depends on the presence of target atoms, and therefore depends on the experimental conditions. We proposed a new active LIF system which controls the excitation state of target atoms by femtosecond laser. We have experimentally confirmed that the excited atoms are created through non-resonant interaction of femtosecond laser light with the atoms. It has been also demonstrated that the created atoms can be measured by LIF system indicating realization of active LIF system.

研究分野：プラズマ科学

キーワード：レーザー誘起蛍光法 プラズマ 非線形相互作用 フェムト秒レーザー

1. 研究開始当初の背景

(1) 狭帯域半導体レーザーが実用化されるにおよび、レーザー誘起蛍光分光法(LIF)は飛躍的に変化を遂げた。スペクトル幅は10KHz程度のものが容易に得られ、従来のレーザーでは観ることができなかった分布関数の局所的な構造を測定出来るようになった。その結果、分布関数の形状を正確に測定して、平均速度などの巨視的な物理量を実験的に決定できるようになった。狭帯域波長可変半導体レーザーを用いた誘起蛍光分光法は新しい光源を用いることにより、次世代プラズマ物理研究の基本的かつ強力な測定法になったと言える。

(2) しかしながら、レーザー誘起蛍光法を実際のプラズマに適用するためには、対象とする励起原子の存在が必要条件で、LIF法の適用可能性は結果的に個別の実験条件に強く依存するという弱点があった。

(3) 本研究はこの弱点を克服するため、レーザーによって励起原子を自ら生成する能動的な誘起蛍光分光法の構築を目指した。励起原子を生成するには、最近実用化されたフェムト秒レーザーの高強度電場による非共鳴過程を利用する。従来の方法では、数桁の精度で波長を制御し、共鳴過程を利用しなければならなかったが、本研究の方法では非共鳴で励起原子を生成するので、従来に比べはるかに簡単な手続きでLIFシステムを構成できることになる。

2. 研究の目的

(1) 本研究は、フェムト秒レーザー電場の動重力に基づく非線形共鳴過程によって励起原子を生成できることを確認することを第1の目的とした。非線形共鳴過程が利用できれば、従来に比べはるかに簡単な方法によって、励起原子を生成できるため、実験条件に左右されない能動的誘起蛍光分光システムを構成できる。そのため、テストプラズマを生成してフェムト秒レーザーとプラズマの相互作用を実験的に調べた。

(2) さらに、生成された励起原子に高精度レーザー誘起蛍光(LIF)分光法を同時適用し、励起原子を生成しながら同時にLIF計測を行うことができる能動的LIFシステムの構築を目指した。

3. 研究の方法

(1) テストプラズマ装置を製作し、RF電源によりプラズマを生成した。テストプラズマにフェムト秒レーザーを入射し、その際に放出されるプラズマからの線スペクトルの変化から励起原子の生成を調べた。

(2) プラズマは電子衝突によって自発光して

おり、レーザーによる励起原子生成を正確に評価するためには、自発光成分を正確に差し引く必要がある。そのため、フェムト秒レーザーを遮光する機構を導入し、フェムト秒レーザーを入射した時の発光スペクトルと遮光した時のスペクトルを光学系の変更一切行わずに測定できるように工夫し、フェムト秒レーザーの有無によるプラズマの自発光スペクトルを正確に評価した。自発光成分を正確に差し引くことによって、フェムト秒レーザーによって生成された励起原子の数密度変化を評価することができた。

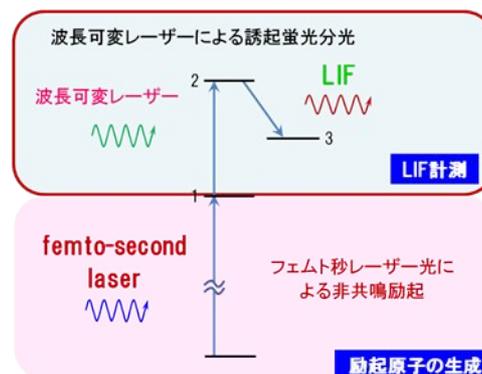


図1 フェムト秒レーザーを用いた能動的誘起蛍光法概念図

(3) またフェムト秒レーザーで生成された励起原子を、高精度レーザー誘起蛍光法で計測するため、波長可変半導体レーザーを同時入射し、LIF分光を行った。LIFスペクトルは、フェムト秒レーザー入射によって増加することを確認した。これは、フェムト秒レーザーによって励起原子が増加したことに対応している。以上により、フェムト秒レーザーの高強度場を利用した能動的な誘起蛍光分光システム構成できることを実験的に示した

4. 研究成果

(1) テストプラズマシステムの製作
フェムト秒レーザー入射に伴う線スペクトル変化を調べるため、直径30mmの放電管を用意した。放電管は石英ガラスでできており、その直上にプラズマからの発光を集光するレンズ系をおいた。集光された光をCCD分光器に入射し測定して可視光域のスペクトル変化を記録した。CCD分光器は測定結果を加算平均することができるので、等価的に長時間露光したことと等価になる。その結果、データのばらつきをおさえた正確な測定を可能にした。作成した光学系を以下に示す。

(2) フェムト秒レーザー入射による励起原子の生成

フェムト秒レーザーによる励起原子生成を確認するため、フェムト秒レーザー入射時

のスペクトルとレーザー入射しない時のスペクトルと比較した。線スペクトルの放射強度は対応する励起原子の数密度に比例しており、スペクトル強度変化を測定することで、レーザーによる励起原子の生成を評価できる。

プラズマはもともと電子衝突励起による自発光をしており、レーザーによる励起原子

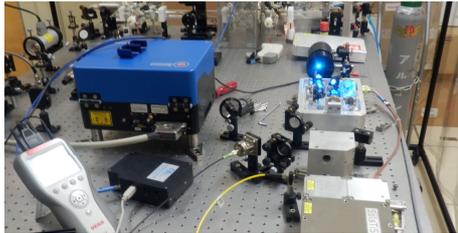


図 2. テストプラズマと光学測定系

生成の評価を行うためには、自発光成分を正確に差し引く必要がある。

自発光成分を正確に評価するため、フェムト秒レーザーを遮光して、電子衝突によるプラズマの線スペクトル放射をしらべた。数回の測定により、その結果を加算平均してスペクトルの平均値を正確に求めた。次に、フェムト秒レーザーを入射して、まったく同じ光学系、同じ露光時間条件で測定し、その結果からプラズマの自発光成分を差し引いた。実験はアルゴンプラズマを用いた。その結果、可視光領域に、アルゴンの 11-13eV の励起準位に対応した線スペクトルの増加が観測された。

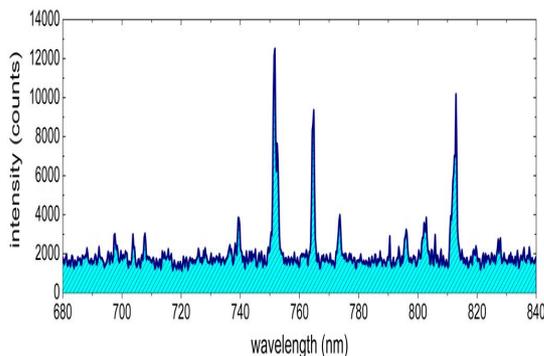


図 3 フェムト秒入射時の発光スペクトルの変化

(3) LIF 同時入射

フェムト秒レーザーによって生成された励起原子を高精度 LIF 分光法によって測定可能かどうかを実験的に確認した。フェムト秒レーザーと波長可変半導体レーザーを同時入射し、LIF 計測を行った。プラズマの発光スペクトルはフェムト秒レーザー入射に伴って増加することが確認されて

いるが、フェムト秒レーザーと波長可変半導体レーザーの同時入射によって得られたスペクトルも有意に増加していることが確認された。この結果は、フェムト秒レーザーによって生成された励起原子が LIF 分光法によって測定可能であること、即ち、フェムト秒レーザー励起による能動的誘起蛍光分光システムの構成が可能であることを示している。この手法は、実験条件の制約をほとんど受けないので、次世代のプラズマ物理研究の強力なツールとなるものと思われる。

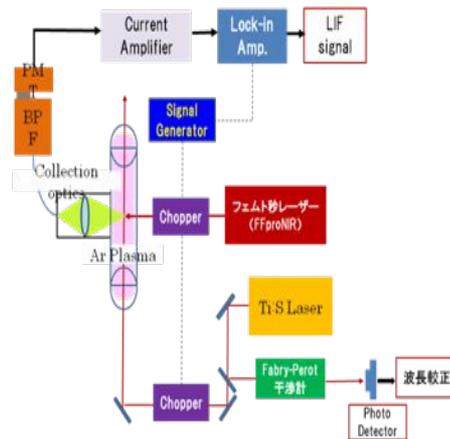


図 4 . フェムト秒レーザーを用いた能動的誘起蛍光分光システム

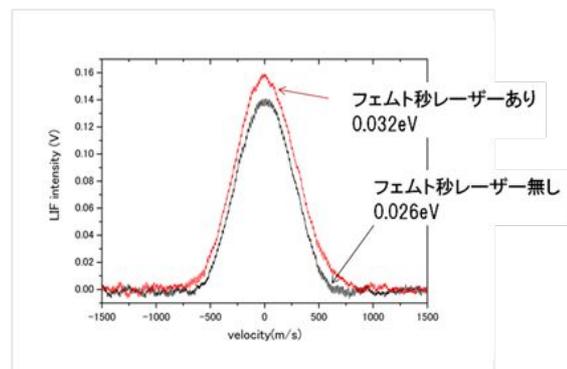


図 5 . フェムト秒レーザーと波長可変半導体レーザーの同時入射による能動的誘起蛍光法のスペクトル。

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 7 件 審査有)

1. K. Terasaka, S. Yoshimura, K. Ogiwara, M. Aramaki, M. Y. Tanaka: “Observation of Ion Stream Line Detachment and Onset of Azimuthal Rotation in a Diverging Magnetic Field”, IEEE Trans. on Plasma

Science **39** No.11, pp. 2470 (2011) DOI: 10.1109/TPS.2011.2113194

2. S. Yoshimura, K. Terasaka, E. Tanaka, M. Aramaki, M. Y. Tanaka: “Probability Density Functions of Floating Potential Fluctuations Due to Local Electron Flux Intermittency in a Linear ECR Plasma”, JPS Conf. Proc. **1**, 015030-1-4(2014)
3. K. Terasaka, M. Y. Tanaka, S. Yoshimura, M. Aramaki, Y. Sakamoto, F. Kawazu, K. Furuta, N. Takatsuka, M. Masuda and R. Nakano: “Flow structure formation in an ion-unmagnetized plasma: HYPER-II experiments”, J. Plasma Physics (2014) DOI:10.1017/S0022377814000695
4. S. Eto, T. Matsuo, T. Matsumura, T. Fujii, M. Y. Tanaka: “Quantitative estimation of carbonation and chloride penetration in reinforced concrete by laser-induced breakdown spectroscopy”, Spectrochimica Acta Part B **101** pp.245-253(2014) DOI: 10.1016/j.sab.2014.09.004
5. K. Terasaka, S. Yoshimura, Y. Kato, K. Furuta, M. Aramaki, T. Morisaki, and M. Y. Tanaka: “High-impedance wire grid method to study spatiotemporal behavior of hot electron clump generated in a plasma”, Review of Scientific Instruments **85**, 113503-1-4(2014) DOI:10.1063/1.4901096
6. S. Yoshimura, K. Terasaka, E. Tanaka, M. Aramaki, and M. Y. Tanaka: “Localized Intermittent Electron Flux in an ECR Plasma”, IEEE Trans. on Plasma Science, vol.42 pp.2554-2555(2014)
7. S. Yoshimura, K. Terasaka, E. Tanaka, M. Aramaki, A. Okamoto, K. Nagaoka, and M. Y. Tanaka: “Exploration of spontaneous vortex formation and intermittent behavior in ECR plasmas: The HYPER-I experiments”, J. Plasma Physics vol.81 (2015) 345810204, DOI:710.1017/S0022377814001147

〔学会発表〕(計 12 件)

1. K. Terasaka, S. Yoshimura, M. Aramaki, H. Katanami, M. Y. Tanaka: “Experimental Studies on Ion Stream Line Detachment and Onset of Azimuthal Rotation in a Diverging Magnetic Field”, Plasma Conference 2011 年 10 月 24 日 金沢市)

2. K. Terasaka, S. Yoshimura, M. Aramaki, M.Y. Tanaka: “Experimental Study on flow structure formation associated with ion stream line detachment in a diverging magnetic field” 2012 年 07 月 02 日 (Stockholm, Sweden)
3. 森 淳一郎、久井裕貴、寺坂健一郎、山崎美由梨、荒巻光利、吉村信次、田中雅慶: “フェムト秒レーザーとプラズマの相互作用” (日本物理学会 2012 年秋季大会、2012 年 9 月 20 日 横浜国立大)
4. S. Yoshimura, K. Terasaka, M. Aramaki, and M. Y. Tanaka: “Statistics of Field-Aligned Intermittent Electron Flux in a Linear ECR Plasma”, (Annual Meeting of the APS Division of Plasma Physics, 2012 年 11 月 2 日 米国 プロビデンス)
5. 森 淳一郎、久井裕貴、寺坂健一郎、山崎美由梨、荒巻光利、吉村信次、田中雅慶: “フェムト秒レーザーとプラズマの相互作用” (プラズマ・核融合学会 第 29 回年会 2012 年 11 月 28 日 春日市)
6. 寺坂健一郎: “コンディショナルアベリッジングを用いた ECR プラズマ中の間欠的電子流速の評価” (プラズマ・核融合学会 第 29 回年会 2012 年 11 月 28 日 春日市)
7. 田中雅慶: “散逸が決めるプラズマの渦構造”: 第 68 回日本物理学会年会 (2013 年 3 月 28 日 広島大学)
8. 田中雅慶、荒巻光利、寺坂健一郎、吉村信次: “光科学の導入による新しいプラズマ物理研究” (電気学会研究会、2013 年 9 月 5 日 長崎大学)
9. 田中瑛貴、吉村信次、荒巻光利、寺坂健一郎、田中雅慶: “ECR プラズマ中の高エネルギー電子放出現象の 2 次元発光分光計測” (日本物理学会 2013 年秋季大会、2013 年 9 月 27 日 徳島大学)
10. K. Terasaka, S. Yoshimura, Y. Sakamoto, M. Aramaki, M.Y. Tanaka: “Ion Flow Field of a Rotating Plasma in a Diverging Magnetic Field” (American

Physical Society, Nov.2, 2013
Providence, USA)

11. 荒巻光利、野々部和樹、田部井翔太、戸田泰則、吉村信次、森崎友宏、後藤基志、寺坂健一郎、田中雅慶、西澤典彦：“位相空間変調器を用いた波長可変光渦光源の開発と吸収分光法への応用（日本物理学会 2008 年秋季大会、2013 年 12 月 3-6 日 東京工業大学）
12. K. Terasaka, S. Yoshimura, F. Kawazu, K. Furuta, R. Nakano, M.Y. Tanaka: “Plasma Dynamo Experiment in the HYPER-II Device” (Plasma Conference 2014, 2014 年 10 月 19 日 新潟市)

〔その他〕

研究室ホームページを立ち上げ、研究内容や成果を積極的に発信した。

<http://plasma.kyushu-u.ac.jp/>

〔受賞〕

寺坂健一郎

第 29 回プラズマ・核融合学会年会（2012）において、研究分担者 寺坂健一郎が若手発表所発表賞を受賞した。

論文題目

「コンディショナルアベレージングを用いた ECR プラズマ中の間欠的電子流速の評価」

6. 研究組織

(1) 研究代表者

田中雅慶 (TANAKA MASAYOSI)

九州大学・総合理工学研究院・教授

研究者番号：90163576

(2) 研究分担者

荒巻充利 (ARAMAKI MITSUTOSHI)

日本大学・生産工学部・准教授

研究者番号：50335072

吉村信次 YOSHIMURA SHINJI)

核融合科学研究所

助教

研究者番号：50311204

寺坂健一郎 (TERASAKA KENICHIRO)

九州大学・総合理工学研究院・助教

研究者番号：50597127

(3) 研究協力者

伊藤優太 (Ito Yuta)

九州大学・総合理工学研究院

先端エネルギー理工学専攻修士課程

大野英治 (Ohno Eiji)

九州大学・総合理工学研究院

先端エネルギー理工学専攻修士課程

杉原拓実 (Sugihara takumi)

九州大学・総合理工学研究院

先端エネルギー理工学専攻修士課程

加藤祥行 (Kato Yoshiyuki)

九州大学・総合理工学研究院

先端エネルギー理工学専攻修士課程

酒井洋輔 (Sakei Yosuk)

九州大学・総合理工学研究院

先端エネルギー理工学専攻修士課程

森淳一郎 (Mori Junichiro)

九州大学・総合理工学研究院

先端エネルギー理工学専攻修士課程

本村大成 (Motomura Taisei)

九州大学・総合理工学研究院

先端エネルギー理工学専攻博士課程

田中瑛貴 (Tanaka Eiki)

九州大学・総合理工学研究院

先端エネルギー理工学専攻修士課程

久井裕貴 (Hisai Yosuk)

九州大学・総合理工学研究院

先端エネルギー理工学専攻修士課程

服部光洋 (Hattori Mitsuhiro)

九州大学・総合理工学研究院

先端エネルギー理工学専攻修士課程

川頭文弥 (kawazu Fumiya)

九州大学・総合理工学研究院

先端エネルギー理工学専攻修士課程