



Title	Experimental study on spectroscopy of laser-produced plasma for laboratory astrophysics and soft X-ray lithography application
Author(s)	劉, 暢
Citation	大阪大学, 2020, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.18910/81884
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

Abstract of Thesis

Name (Liu Chang)

Title

Experimental study on spectroscopy of laser-produced plasma for laboratory astrophysics and soft X-ray lithography application
(実験室宇宙物理学及び軟X線リソグラフィー応用のためのレーザー生成プラズマの分光に関する実験的研究)

Abstract of Thesis

Laboratory spectroscopy is widely used both in basic science and industrial applications. With the developing of the advanced spectroscopy technology, it is possible to observe high resolution spectrum data in full-wave band. In this research we are trying to apply the spectroscopy technology to Laser-plasma experiment. Here we applied the spectroscopy technology in two experiments: Zeeman splitting measurement in High-energy-density magnetized plasma and Plasma parameters / H radical (H*) population measurement in EUV-induced hydrogen plasma.

Generating a strong magnetic field with laser driven capacitor-coil target makes it possible to achieve a strength of 10^2 - 10^3 T on the Earth. 10^2 - 10^3 T is close to the surface of a compact star like a white dwarf. Magnetic field strength is one of the most important parameters for understanding the structure of the compact stars and the strength is inferred from the Zeeman effect seen in the spectra observed with the telescope. However, the Zeeman effect has never been successfully observed in the high energy density laser plasma experiment. Laboratory experiments on the Zeeman effect will give astrophysicists valuable information to deepen the understanding of the universe. Traditional astronomical research relies heavily on observation, modeling, and numerical simulation. High power laser can be a novel astronomical tool that makes it possible to generate magnetic fields strong enough to cause Zeeman effect in the laboratory under controlled conditions. We provide the experimental design and numerical simulations in this study.

Spectrum measurement provides the key parameters in a plasma. Here we trying to explore the atomic process of EUV-induced plasma. An Optical Emission Spectroscopy (OES) system was used to observe the atomic processing in the H₂ / EUV interaction. The hydrogen Balmer line profiles and absolute photon number are measured with the spectrometer which gives a possibility to estimate the key plasma parameter and calculate the hydrogen radical yield. The experimental results are also compared with the theoretical calculation.

The first Chapter is the introduction of the thesis, In the second Chapter we introduce the laser systems and experiment conditions in Institute of Laser Engineering, Osaka University, and the principles of spectroscopy diagnostics. In the third Chapter we discuss the physics behind the experiment phenomena, including the mechanism of generating a strong magnetic with high-power-laser, plasma radiation transmission and atomic procession in NLTE plasmas. In the fourth Chapter we talk about the first application of EUV spectroscopy, the experimental design and modeling result of the Zeeman splitting measurement and some data from the experiment. The fifth Chapter discusses the second application of EUV project which focuses on the EUV-induce hydrogen plasma properties and diagnostics, and potential application in industry. In the last section we summary the results and discuss about the future researches.

論文審査の結果の要旨及び担当者

氏 名 (LIU Chang)		
	(職)	氏 名
論文審査担当者	主 査	教授 藤岡 慎介
	副 査	教授 越野 幹人
	副 査	教授 中井 光男
	副 査	教授 千徳 靖彦
	副 査	助教 MORACE Alessio
	副 査	特任助教 田中 のぞみ

論文審査の結果の要旨

分光はプラズマの物理量を明らかにする本質的かつ重要な計測手段であり、プラズマ物理実験で広く用いられている。スペクトルの輝線の幅と強度比からプラズマの温度と密度を同定することができる。更に、ゼーマン効果によるスペクトルの分離からプラズマ中の磁場強度を求めることが可能である。本論文は大きく分けて二部の構成となっており、パワーレーザーを用いた実験室宇宙物理学及び産業応用における、プラズマ分光を用いた成果について議論している。

第一部では、キロテスラ級の強磁場下にあるイオンのゼーマン効果を測定する実験について考察を行った。ゼーマン効果は天文学における磁場強度の尺度の一つであるが、コンパクト天体近傍に存在するキロテスラからメガテスラ級の磁場に対するゼーマン効果は実験的には観測されておらず、専ら数値シミュレーションに依存している。本研究では、高エネルギー密度プラズマ中を流れる大電流で生成した 0.1 kT レベルの種磁場を、爆縮した円筒状の高エネルギー密度プラズマで圧縮し 10 kT にまで磁場を圧縮する手法を提案した。高エネルギー密度プラズマに対して透明な波長で、且つ天文学として意義のあるシリコンの輝線 (92 eV) に着目し、本手法で達成可能なプラズマの温度、密度、及び分解能で可観測な、ゼーマン分離が得られることを数値計算で示した。また本手法を大阪大学激光 XII 号レーザー施設に導入し、キロテスラ級の磁場によるゼーマン分岐の兆候を捉えた。残念ながら、本観測結果が 10 kT の磁場によるゼーマン分離であると断言するには至っていないが、強磁場によるゼーマン効果を検証する実験手法として今後の発展に繋がる成果である。

パワーレーザーで生成したスズ(Sn)のプラズマを極紫外光 (Extreme Ultra Violet: EUV) の光源として用いる EUV リソグラフィでは、スズ (Sn) の EUV 集光鏡への堆積が最重要課題である。Sn の堆積によって EUV 集光鏡の反射率が低下し、システムの運転コストが増大すると危惧される。不対電子を持つ化学的に活性な水素ラジカル(H*)は、化学反応 $\text{Sn} + 4\text{H}^* \rightarrow \text{SnH}_4$ (常温で気体のスタンナン) の結果として、堆積した Sn の排気に有効である。第二部では、EUV 光によって光電離された水素プラズマから放出されるバルマー系列のスペクトルを測定し、観測時刻と水素ガス圧を変化させながら、電子密度、電子温度、水素ラジカル密度を同定した。実験的観察に基づいて、EUV 照射による水素プラズマ生成のメカニズムを考察した。最初に EUV 光子が水素原子を光電離し、100 eV の運動エネルギーを持つ非熱的電子が放出される。この非熱的電子が、プラズマ境界のシース電場等で閉じ込められ、水素原子および水素イオンと多数回衝突することで衝突電離と電子の熱化が起こる。実験では、EUV 照射によって 5 Pa の水素が電子温度 1 eV で電子密度 $3 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ のプラズマとなり、再結合によって豊富な水素ラジカル ($3.7 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$) が生成されていることを確認した。加えて、EUV 光で生成された水素ラジカルによる Sn 汚染の除去も実証した。

本論文は、分光学を通じて実験室宇宙物理学及びパワーレーザーの産業応用の新たな発展に資する成果であり、博士の学位を与えるのに相応しいと判断した。