

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12日現在

機関番号：82110
 研究種目：若手研究(B)
 研究期間：2010～2011
 課題番号：22740267
 研究課題名（和文）真空紫外線～軟X線領域における磁気円偏光二色性計測システムの開発
 研究課題名（英文）Development of the circular dichroism measurement system in the wavelength of VUV to soft x-ray region
 研究代表者
 長谷川 登 (HASEGAWA NOBORU)
 独立行政法人日本原子力研究開発機構・量子ビーム応用研究部門・研究職
 研究者番号：50360409

研究成果の概要（和文）：プラズマ軟X線源とパルス強磁場を組み合わせる事により、偏光子を用いる事なく円偏光二色性計測に必要な左右の円偏光を同時に発生させる事を試みた。磁場強度 15 T 中でニッケル様モリブデンX線レーザー（波長 13.9 nm）を発生させる事により、スペクトル線の波長分離（円偏光の分離）に成功した。波長分離量が、外部磁場から予想される量と比較して非常に大きい事から、レーザー媒質中での磁場圧縮機構の存在が予想される。

研究成果の概要（英文）：We proposed the method of generation of the circularly polarized x-ray laser using the Zeeman splitting. External magnetic field of 15 T was applied to the gain medium plasma to separate the degenerated lines of nickel-like molybdenum x-ray laser. The splitting of the x-ray laser line was clearly obtained, and the strength of the magnetic field estimated from the quantity of the x-ray laser line splitting was quite higher compared with that of the external magnetic field. It implies that there might be alternative mechanism for enhancement of the magnetic field in the gain medium plasma.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	2,200,000	660,000	2,860,000
2011年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,800,000	840,000	3,640,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学・原子・分子・量子エレクトロニクス

キーワード：円偏光真空紫外線、強磁場発生、プラズマ軟X線光源

1. 研究開始当初の背景

磁気円偏光二色性計測は、分子の立体構造の判定に広く用いられている。特に、真空紫外線～軟X線領域は強い光吸収（共鳴）を持つために、その解析評価に大きな期待がある。例えば、タンパク質を構成するアミノ酸は、この波長域において強い二色性を示すものがあり、タンパク質の構造同定への応用が期待されている[1]。現在、この円偏光二色性測

定は、偏光素子や光源の得やすい、可視光、紫外光 (<8 eV) 及びX線 (>1 keV) で広く行われている。真空紫外線～軟X線では、近年、偏光アンジュレータを使用した円偏光生成とその利用が開始されたが[2]、放射光施設等の大規模設備を必要としていることなどから、まだ一般利用される段階まで来ていない。そこで、本申請者は、レーザープラズマ放射源と強磁場を組み合わせることで、簡便

かつ、高時間・空間分解能を有する、位相子を必要としない、新しい円偏光二色性計測手法の開発を提唱している。

2. 研究の目的

本申請は、真空紫外から軟X線領域（波長 140 nm ~ 20 nm）における簡便な磁気円偏光二色性計測手法を、レーザープラズマ放射源と超高速パルスパワー強磁場との組み合わせで実現することを提案し、実験実証して行くことを目的としている。この波長領域では、多くの共鳴準位があり、感度の高い円偏光二色性評価が可能であると期待されているものの、左、右双方の円偏光光源が得られにくいことから、研究が遅れている領域である。本申請では、偏光子の使用が困難なこの波長領域で、ゼーマン効果による線スペクトルの円偏光分離を利用した、偏光子フリーで、明るい、高時間、空間分解能をもった真空紫外～軟X線領域円偏光二色性測定を行うものである。

3. 研究の方法

(1) 外部磁場による円偏光発生原理

図1に円偏光発生アイデアの概略を示す。良く知られているようにレーザープラズマは、そのオパシティの高さから、輝度の高い真空紫外～軟X線源として利用できる。また、適当な原子と励起強度を調整する事により、多くの輝線スペクトルの集合を発生させることができる。一方、このような線スペクトルは、外部磁場を加えれば、磁気副準位（例えば、全角運動量 $J=1$ の場合、 $m_j=0, \pm 1$ ）の縮退が解消し、遷移線は分裂する（ゼーマン効果）。この中で、 $J=0 \rightarrow 1$ （又は $0 \rightarrow 1$ ）となる遷移（例えば、ニッケル様イオンの $3d^9 4p (J=1) - 3d^9 4d (J=0)$ ）では、分裂した成分は、それぞれ直線偏光（ π 光： $\Delta m_j=0$ ）、左右の円偏光（ σ 光： $\Delta m_j = \pm 1$ ）になる。量子化軸に対して観測方向を選ぶ事で π 、 σ 光の分離は容易であり、左右円偏光の発生は原理的に可能となる（図1では σ 光のみが観測され、分離量は磁場強度に依存する）。

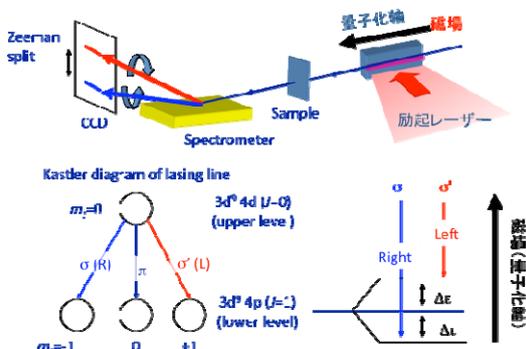


図 1. レーザープラズマ光源による円偏光発生概略図

(2) 円偏光化に必要な磁場強度

この方式が適応可能と考えられる遷移線は、真空紫外～軟X線領域において、レーザー発振が可能な遷移線も含めて多数存在している。レーザー遷移線では増幅により線幅の狭窄化が発生する為、必要な磁場強度が通常の遷移線の半分以下に低減されるという利点がある。また、得られる波長はほぼ単色となるが、 $1 \mu\text{J}/\text{shot}$ 以上の高い出力と指向性のある光が得られる[3]。ここで、ゼーマン分離量が線幅を超えるために必要な磁場強度を見積もってみる。エネルギーシフト ($\Delta \epsilon$) は磁場強度 (B [T]) とボーア磁子 ($\mu_B: 5.8 \times 10^{-5} [\text{eV/T}]$) を用いて、 $\Delta \epsilon = \{J(J+1)\}^{1/2} \mu_B B$ [eV] 程度と表せる。軟X線レーザーの線幅は極めて狭く、我々の過去の計測例[4]から Ni-like Mo による軟X線レーザー（波長 18.9nm）において 18m Å 以下 ($\lambda/\Delta \lambda = 9500$) である事が判明している。この線幅を元に、他の波長において必要な磁場強度を見積もった。図2は、ネオン様、ニッケル様イオンを媒質とするレーザー線 ($J=0 \rightarrow 1$) の波長と、必要な磁場強度の関係を示している。磁場強度 36 T が得られれば、波長 20 nm 程度まで円偏光の分離が可能となる。本研究では、レーザープラズマのスポット径程度の範囲（数 mm 以下）で磁場を発生させれば良く、高繰り返し可能なレーザートリガースイッチを用いたパルスパワー技術により達成を目指した。以上に述べたように、左右の円偏光成分をゼーマン分離して計測することができれば、観測光軸は各円偏光で共通となり、視野差も生じない。従って、円偏光二色性を多くの波長で同時に評価できるシステムを構築できる。更には、レーザープラズマ放射源の持つ短パルス性、点光源性により、高い時間・空間分解能を持たせることが可能なシステムとなる。

本研究では、パルス電磁石の製作とその評価を行い、これを用いて軟X線レーザーの円偏光化実験を行った。

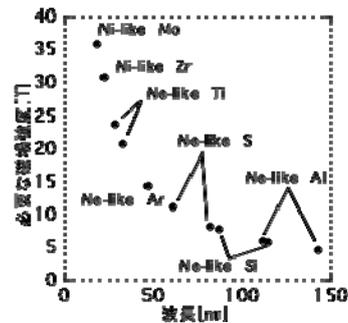


図 2. 円偏光化に必要な磁場強度

4. 研究成果

(1) パルス電磁石の製作と磁場強度の評価

実験に必要な磁場を生成する為に開発したパルス電磁石の概略を図3に示す。本装置は、①磁場発生部分である空心コイル、②真空チャンバーへの導入部分である伝送ライン、③スイッチング素子である LTSG(Laser Trigger Spark Gap)、④コンデンサバンク、⑤充電用の高圧直流電源から構成される。コイル、伝送ライン、コンデンサーは、それぞれ特性インピーダンスを約 1Ω として設計を行なった。コイルは、カプトンシートで包み込む事で絶縁した銅板(厚さ $100\mu\text{m}$ 、幅 5mm)を $4\text{mm}\phi$ の棒に巻き付ける事で作成した。コイルの内径 $4\text{mm}\phi$ 、長さを 5mm 、巻き数 10 とし、コンデンサーは、逆起電力に対する耐性の高いセラミックコンデンサーを採用し、静電容量は合計 330 nF とした。スイッチング素子とコンデンサバンクは4系統の並列構造とし、スイッチのインピーダンスが最小となるようにした。充電時(D.C.)にはコイル状接続線を通じて各ブロックの(+)極は導通しているが、放電時(高周波 $\sim 0.1\text{MHz}$)にはこのコイルのインピーダンスは 10Ω 以上となるため、各ブロックは独立して働くことが可能である。

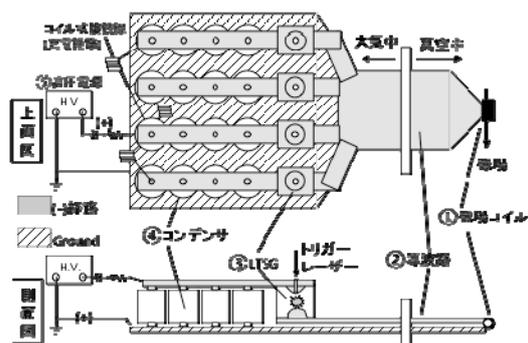


図3. パルス電磁石概略図

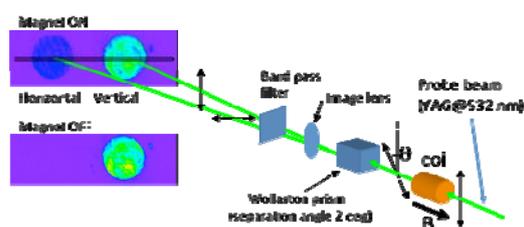


図4. 磁場強度の時間空間分解計測

発生した磁場の評価は、ファラデー効果を利用した磁場強度の時間空間分解計測により行なった(図4)。磁場コイル内に挿入した溶融石英ロッド(直径 3mm 、長さ 5mm)を通過する直線偏光のパルス Nd:YAG レーザー(波長 532 nm 、パルス幅 7 ns)は、磁場強度が 20 T の場合、約 27 度の旋光を示す。旋光した YAG レーザーはウオラストンプリズムにより各偏光成分に分解され、CCD 上にコイルの像を結ぶ事で磁場の2次元検出が可能と

なる。図5(a)に充電電圧 20 kV における LTSG 直後(伝送ラインとの接続部)の出力電圧波形(赤線)及び、コイル近傍に設置したフォトダイオードに入力した Nd:YAG レーザーによる出力信号(青線)を示す。時間原点は、LTSG のスイッチングレーザーが入射された時間である。各計測における Nd:YAG レーザーのコイルへの入射時間は、磁場強度が最大になる時間(電圧が初めに 0 になる時間)とした。図5(b)に磁場のコイル径方向の空間分布の計測結果を示す。磁場の強度は計測領域の全域(3 mm)に渡り、 $22.6(\pm 2)\text{ T}$ であり、ほぼ均一の磁場が得られた。設計値($40\text{ T @ }28\text{ kV}$, $29\text{ T @ }20\text{ kV}$)と比較して得られた磁場強度が減少しているのは、コイルの絶縁体の厚みが当初の設計値よりも増大した($25\mu\text{m} \rightarrow 75\mu\text{m}$)事によるコイルのインピーダンスの増加が原因であると考えられる。コイルの絶縁部分の改良は今後の検討課題であるが、ターゲットの形状を工夫する(軸励起方式軟 X 線レーザーで用いられているキャピラリーターゲット[5]を使う)事でコイルの内径を小さくする($4\text{mm}\phi \rightarrow 2\text{mm}\phi$)事が可能であれば、現状でも 40 T を達成する事が可能である。

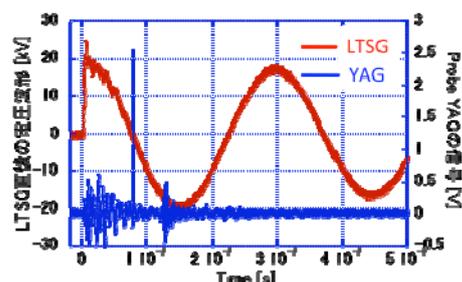


図5. (a) LTSG 出力端での電圧波形

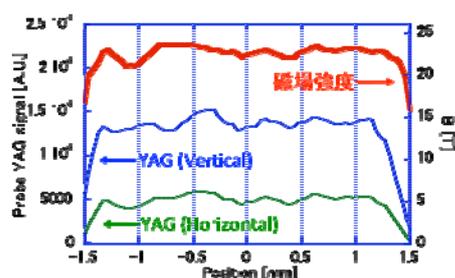


図5. (b) 磁場強度の空間分布

(2) 円偏光軟 X 線レーザー発生実験

斜入射励起方式の X 線レーザー、パルス強磁場発生装置、高波長分解能分光器を組み合わせる事で、円偏光 X 線レーザーの発生実験を行なった。実験配置を図6に示す。図中の寸法は mm 単位とした。モリブデンターゲットは空心コイルの中心に設置し、励起レーザーは斜入射励起方式[6]によりターゲットに入射し、X線利得媒

想されるナノ秒レーザー励起プラズマからの発光線との比較を行う予定である。本現象を解明する事は必要な磁場強度の低減を意味しており、より簡便な円偏光軟X線源の実現が期待される。

参考文献

- [1] M. Tanaka et. al., Phys. Scr. T115, 873-876 (2005).
- [2] 中川和道, Spring-8利用者情報/2005年9月, p351.
- [3] M. Nishikino, et. al., Phys. Rev. A, **68**, 061802 (2003).
- [4] N. Hasegawa, et. al, Journal of Optical Society of Korea, **13**, No. 1, p60 (2009).
- [5] B. Cros, et. al., Phy. Rev. A, **73**, pp. 033801, (2006).
- [6] R. Keenan, et. al, Proc. SPIE **5197**, 213, (2003).
- [7] A. S. Sandhu, et. al, Phy. Rev. Lett. **89**, 225002-1, (2002).

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2件) 査読有り

①Noboru Hasegawa, 他 14 名
Observation of the laser-induced surface dynamics by the single-shot x-ray laser interferometer
Proc. of SPIE, 2011, 81400G-1
DOI: 10.1117/12.893442

②Noboru Hasegawa, 他 17 名
The method of spatial and temporal synchronization of x-ray laser and optical pulse for the pump and probe experiment
Springer Proceedings in Physics 136, Proc. of X-Ray Lasers 2010, pp. 353-358 (2010).

[学会発表] (計6件)

①Noboru Hasegawa, 他 10 名
軟X線反射イメージングによるフェムト秒レーザーアブレーション過程の局所フルエンス依存性の観察
日本物理学会第67回年次大会
2012年3月26日
関西学院大学

②Noboru Hasegawa, 他 12 名
Observation of the laser-induced surface dynamics using the single-shot soft x-ray laser probe
Plasma Conference 2011
2011年11月22日

石川県金沢市

③Noboru Hasegawa, 他 14 名
Observation of the laser-induced surface dynamics by the single-shot x-ray laser interferometer
SPIE Optics + Photonics 2011
2011年8月23日
米国サンディエゴ

④Noboru Hasegawa, 他 8 名
Development of the x-ray interferometer and the method of temporal synchronization of x-ray and optical pulse
Laser-Driven Relativistic Plasmas Applied to Science, Energy, Industry, and Medicine
2011年5月30日
京都府木津川市

⑤長谷川登, 他 6 名
パルス強磁場によるプラズマ軟X線レーザーの偏光制御について
レーザー学会学術講演会第31回年次大会
2011年1月10日
東京都調布市

⑥Noboru Hasegawa, 他 17 名
The method of spatial and temporal synchronization of x-ray laser and optical pulse for the pump and probe experiment
International Conference of x-ray lasers
2010年5月30日
韓国・光州・科学技術院

[図書] (計0件)

[産業財産権]

○出願状況 (計0件)

○取得状況 (計0件)

[その他]

ホームページ等
特になし。

6. 研究組織

(1) 研究代表者
長谷川 登 (HASEGAWA NOBORU)
独立行政法人日本原子力研究開発機構・
量子ビーム応用研究部門・研究職
研究者番号: 50360409