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15T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、偏光素子フリーで、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の原理 図1に円偏光発生の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、 $m_i=0, \pm 1$) 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→1 (又は 0→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: $\Delta m_i = 0$)、 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の 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 利点が有る。また、得られる波長はほぼ単色 となるが、1 μ J/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(△ ε)は磁場強度(B[T])とボーア磁子 (μB: 5.8 ×10⁻⁵[eV/T])を用いて、 $\Delta \epsilon = \{J(J+1)\}^{1/2}$ $\mu B[eV]$ 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 (λ/Δ λ =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100µm、幅5mm) を4mm φの棒に巻き付ける事で作成した。コ イルの内径4 mm (、長さを5 mm 、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^{~0.1MHz})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3 mm、長さ5 mm)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 レーザーはウォラストンプリズム 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(±2) T であり、 ほぼ均一の磁場が得られた。設計値(40 T @ 28 kV, 29 T @ 20kV) 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 μ m->75μmに変更)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 $(4mm \phi \rightarrow 2mm \phi)$ 事が可能であれば、現状でも40Tを達成する 事が可能である。





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

質を生成する。励起レーザーは波長 1053nm の Nd:glass レーザーであり、パルス幅7 ps のプリパルスと 7 ps のメインパルス (パル スの間隔は1.1 ns)からなり、総エネルギー は約 10 J である。励起レーザーの入射角は ターゲット表面に対して 14 度であり、集光 プロファイルは幅 70 μm、長さ5 mm であっ た。本研究に用いた高分解能分光器は、球面 鏡と楕円鏡を組み合わせる事で収差を補正 し、高い分解能を得る事が可能であり、検出 面における逆線分散は 785 mÅ/mm である。 スリットの幅は 3µm、波長方向の拡大率は 3.2、検出器として用いた背面照射型 CCD カ メラの素子サイズは13µmであるので、波長 分解能は CCD の素子サイズで制限される。光 学配置から決定される最小分解能は、785 x 0.013 = 10.2 mÅであり、分解能は非常に高 $\forall (\Delta \lambda / \lambda = 5.4 \times 10^{-5})_{\circ}$



図6. 円偏光軟X線発生装置



ニッケル様モリブデン軟X線レーザー媒質 に15Tの磁場を加えた場合の実験結果を図7 に示す。左図は磁場無し、有りの場合の軟X 線レーザーのスペクトルを示す。右図は①~ ③の位置におけるスペクトルの断面図を示 す。磁場の有無によるスペクトル線の明確な 変化が観測された。短波長側が右回りの円偏 光、長波長側が左回りの円偏光成分であると 考えられる。しかし、スペクトルの分裂量が 全てゼーマン効果に起因すると仮定した場 合、プラズマ中の磁場強度は、スペクトルの 各位置で①41 T、②122 T、③179 T となり、 これらは外部から与えた磁場(15 T)と比較 して非常に大きい。また、X線レーザー媒質 はターゲット垂直方向に対して急峻な密度 勾配を持ち、高い電子密度領域(ターゲット 近傍)から発生したX線レーザーは屈折の影 響により、屈折角が大きくなる。故に、実験 結果は、電子密度が高くなるに従い、磁場強 度が増大している事を示唆している。これら の原因としては、外部から与えられた磁場が

X線利得媒質内で圧縮を受けている可能性 が考えられる。一般に固体ターゲットを用い たレーザープラズマでは、励起レーザー(メ インパルス)が入射する際に、プラズマ内の レーザー吸収領域において衝撃波が生じる。 この衝撃波によりプラズマが圧縮される事 で、プラズマ中に存在している磁場も圧縮を 受ける事が予想される[7]。磁場がプラズマ と共に圧縮されるためには、磁力線の「Froze in」と呼ばれる条件を満たす、すなわち磁力 線の拡散時間 $t_c = \sigma \mu L^2$ [s] (σ :電気伝導度、 μ:透磁率、L:プラズマのスケール長)より もプラズマが早く移動する必要が有る。電 気伝導度はプラズマの電子温度に依存して おり、今回の場合は、プリパルスの照射条 件(~50 eV)では約 0.2 ns、メインパルスの照 射条件 (~300 eV) では約 3.3 ns となり、メ インパルスの照射時にのみ磁場の圧縮が起 こり得る。これを検証するために、現在、 同程度の波長域において「Froze in」を満 たさない条件との比較実験を進行中である。 Nd:YAG レーザー (パルス幅 7ns) を LiF タ ーゲットに照射して得られたスペクトルを 図 8 に示す。Li の 1s-3p (グラフ左上の拡 大図)は、J=1/2->3/2(11.39046nm)、1/2-> 1/2(11.39057nm)から構成されており、磁場 を掛ける事で縮退が解消した場合には、そ れぞれが4本、2本のσ光が分光器で観測 される事になる (π光は分光器の方向では 観測されない)。磁場の無い状態で観測され た 1s-3p 線の線幅は約 60m Å であり、20 T 程度の磁場を掛けることでスペクトル線の 変化は(磁場の圧縮がない場合でも)観測 可能であると期待される。この計測により、 磁場中のX線レーザースペクトルにおいて 観測されたスペクトルの大きな分離の要因 を明らかにする予定である。



図8.Nd:YAG 励起のLiF からのスペクトル

(3) まとめと今後の予定

軟X線領域における磁気円偏光二色性計 測システムとして、磁場を用いた円偏光軟X 線レーザーの発生及び計測システムの提案 とその実証実験を行なった。得られた軟X線 レーザースペクトルの分離量は、外部から与 えた磁場強度と比較して非常に大きく、X線 利得媒質内における磁場圧縮機構の存在が 予想される。本研究により得られた現象を解 明するため、磁場の圧縮が起こり得ないと予 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

③<u>Noboru Hasegawa</u>、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
④<u>Noboru Hasegawa</u>、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<u>長谷川登</u>、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

⑥<u>Noboru Hasegawa</u>,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