

平成21年 6月10日現在

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2007～2008

課題番号：19740350

研究課題名(和文) 強磁場印加による円偏光コヒーレント軟X線の発生

研究課題名(英文) Generation of the circularly polarized x-ray laser by strong magnetic field.

研究代表者

長谷川 登 (HASEGAWA NOBORU)

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：

本研究は、通常は無偏光であるプラズマ軟X線レーザーを円偏光化することを目的としている。高波長分解能分光器及び、専用に開発した強磁場発生装置を従来の軟X線レーザーと組み合わせることにより円偏光化を試みた。結果として、世界で初めてニッケル様イオンを用いたX線レーザーの線幅測定、及び外部磁場によるスペクトル線の波長分離の観測に成功した。また、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ことから、レーザー媒質中での磁場圧縮機構の存在が予想される。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
19年度	1,200,000	0	1,200,000
20年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
年度			
総計	1,700,000	150,000	1,850,000

研究分野：プラズマ物理

科研費の分科・細目：原子・分子・量子エレクトロニクス・プラズマ(4305)

キーワード：プラズマ物理、X線レーザー、偏光制御、強磁場発生、X線分光

1. 研究開始当初の背景

円偏光二色性吸収測定は、物質の三次元構造解析(光学異性体の判別等)の手段として重要視されている。本計測手法は基本的に吸収過程を利用した分光法であるため、多くの物質、特にアミノ酸等に対して強く相互作用する軟X線は、本計測用の光源として原理的に優れていると考えられる。しかしながら、可視光、紫外光(<10 eV)及びX線(>1 keV)

を光源とした円偏光二色性吸収測定は広く行われている事に対して、軟X線領域ではまだその研究が開始されたばかりである。これは、他の波長領域で円偏光の生成に広く用いられている透過型の位相子が、軟X線領域ではその吸収が大きいため使用が困難であることに起因している。近年、放射光施設において偏光アンジュレーターを改良する事により、円偏光軟X線の発生が可能となり、

その利用が開始された。

レーザー生成プラズマを媒質とする軟X線レーザー (XRL、波長 46.9 nm ~ 7.7 nm) は輝度が高く (1 パルス当たりの光子数が 10^{10} 個以上)、空間コヒーレンスに優れており、かつ実験室規模の励起光源により生成が可能である。これを円偏光二色性吸収測定的光源とした場合、計測精度の向上が期待される。軟X線レーザーは現在までに、そのコヒーレンスを利用することで、超電導物質の表面の分極構造の解析等の応用研究に利用されている。しかしながら、高温かつ高密度のプラズマを媒質とするため、偏光の制御、特に円偏光の生成は困難であるとされてきた。本研究では、高輝度の円偏光軟X線を実験室規模の装置で実現するため、位相子を必要としない円偏光軟X線の新しい生成法を提唱した。

2. 研究の目的

本研究では磁気円偏光二色性計測用の光源として、プラズマ軟X線レーザーを強磁場を用いることで円偏光化することを目的としている。円偏光二色性測定に必要な左右の円偏光が、原理的に同時かつ同強度で得られることが、本方式の最大の利点である。

3. 研究の方法

ネオン様又はニッケル様イオンを媒質とする軟X線レーザーは、輝度及び空間コヒーレンスに優れた光源であるが、媒質が高温高密度プラズマ (電子温度 ~ 500eV、電子密度 ~ 10^{20}cm^{-3}) であるため、その偏光状態は不安定であり、またその制御は困難であった。また、可視域のレーザーと比較して屈折率が小さいため、ファラデー効果による位相操作も現実的ではない (波長 14 nm において 90 度の位相回転を行うには、媒質を 10mm とした場合、3000 T 以上の磁場が必要)。本研究では、X線レーザーの原子過程に着目し、X線レーザー媒質に外部磁場を加える事で、X線レーザーの発生過程において存在する円偏光成分を選択的に抽出する。

(1) 円偏光X線レーザーの発生原理

本研究で対象としたX線レーザー遷移はニッケル様イオンの $4p(J=1) - 4d(J=0)$ であり、下準位 ($4p$) は磁気量子数 $m_j = -1, 0, +1$ の3つの準位が縮退しているものを選んでいく。図1はX線レーザー遷移のカストラダイアグラムを示している。 $\Delta m_j = -1$ の遷移線 (σ' 光) では量子化軸の方向に左回りの円偏光、 $\Delta m_j = +1$ の遷移線 (σ 光) では

量子化軸の方向に右回りの円偏光、 $\Delta m = 0$ の遷移線 (π 光) では量子化軸と垂直な方向に直線偏光の輻射が行われる。通常のX線レーザーでは、個々のイオン及び電子の運動に指向性が乏しい為、それぞれのイオンからの輻射を重ね合わせた場合、無偏光となる。媒質の外部から特定方向の磁場を加えた場合、電子の運動に方向性が加えられるため、量子化軸が外部磁場と平行な方向に決定される。量子化軸を決定することで特定の偏光成分のみがX線レーザー媒質中を伝搬する事になる。更に、磁場を加える事により、レーザー遷移の下準位がゼーマン分離するため、高分解能の分光器を用いる事により、それぞれの偏光成分を波長的に分離する事が可能となる。

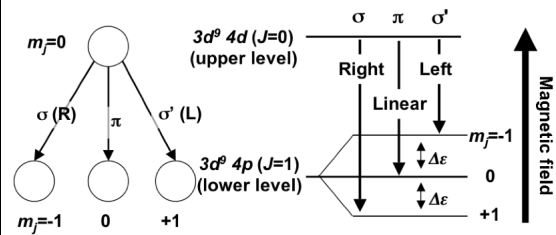


図1 個々のイオンから輻射されるX線レーザーの偏光

実際の円偏光化実験では小型パルス電磁石により磁場をX線レーザー媒質に与えることで、円偏光を選択的に抽出する。X線レーザー媒質と外部磁場を図2の配置とした場合、左右の円偏光を波長的に分離させた状態で同時に発生させることが可能となる。X線レーザーの励起レーザーは、磁場コイルと干渉しないようにターゲット表面に対して 14 度の方向から入射を行なう (斜入射励起方式: GRIP)。実験は、以下に示す (2) ~ (4) の手順で行なった。

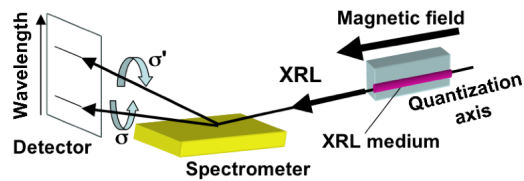


図2 外部磁場による円偏光X線レーザーの分離

(2) 軟X線レーザーの線幅計測

図1における各遷移線のエネルギーシフト量は磁場強度 (B [T]) に比例し、 $\Delta \epsilon = \{J(J+1)\}^{1/2} \mu_B B$ [eV]、と表される。 μ_B はボーア磁子 ($= 5.8 \times 10^{-5}$ [eV/T]) を表す。左右の円偏光を波長的に分離させるためには、 $2 \Delta \epsilon$ ($= 1.6 \times 10^{-4} B$) がX線レーザーの線幅を上回る必要があるため、本研究に必要な磁場強度はX線レーザーの線幅に依存する。X線

レーザーの線幅は極めて狭く、また計測例もネオン様セリウム（波長 18.2 nm、線幅 0.0032 nm）に対してのみであり、ニッケル様イオンを用いた X 線レーザーの線幅計測は報告例がない。必要な磁場強度の算出を行なう為に、高波長分解能分光器(HIREFS)を用いて、ニッケル様モリブデン X 線レーザー（波長 18.9 nm）の線幅計測を行なった。

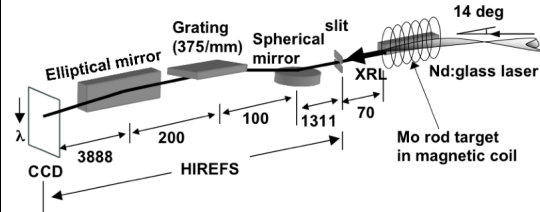


図4 円偏光X線レーザー発生実験配置

(3) パルス強磁場発生装置の開発

本実験に必要な磁場を生成する為に開発したパルス強磁場発生装置の概略を図3に示す。本装置は、(a)磁場発生部分である空心コイル、(b)真空チャンバーへの導入部分である伝送ライン、(c)スイッチング素子である LTSG (Laser Trigger Spark Gap)、(d)コンデンサバンク、(e)充電用の高圧直流電源の5つの部位から構成される。コイル、伝送ライン、コンデンサは、それぞれ特性インピーダンスを 1Ωとして設計を行なった。必要なコンデンサの容量は、コイルの半径の4乗に比例して増大する為、増幅媒質の小さい X 線レーザーでは、磁場発生装置の小型化が可能である。コイルの内径は X 線レーザーの発振に必要な最小限の大きさである 4 mm とし、長さは X 線レーザー媒質と同じ 5 mm とした。コイルの巻数は 10 とし、充電電圧 28 kV の時に磁場強度 40 T が得られるように、コンデンサの静電容量は 330nF とした。発生した磁場の強度は Nd:YAG レーザーに対するファラデー旋光度を計測する事で評価を行なった。

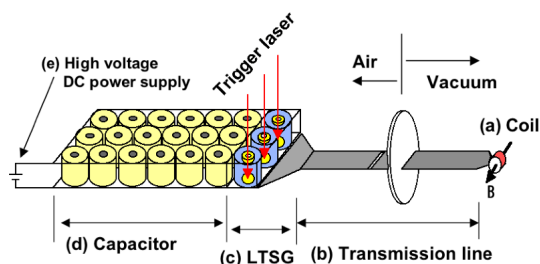


図3 パルス強磁場発生装置

(4) 円偏光 X 線レーザーの発生実験

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(HIREFS)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4に示す。図中の寸法は mm 単位とした。

4. 研究成果

(1) 軟 X 線レーザーの線幅計測

高波長分解能分光器(HIREFS)を用いて、ニッケル様モリブデン X 線レーザー（波長 18.9 nm）の計測を行なった。ニッケル様イオンを用いた X 線レーザーの線幅の計測は世界初であり、多価イオンの原子過程シミュレーションの基準値となりえる結果である。ニッケル様イオン X 線レーザーでは、電子密度が高く、線幅が温度の影響を比較的受け難いため、励起速度係数を決定する際の重要な指標となる。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。HIREFS

(図4を参照)は、スリット位置での X 線の像を検出面に像転送する際に、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る。スリットの幅は 3 μm、波長方向の拡大率は 3.2 であり、検出面での波長分散方向の像の大きさは、3 μm × 3.2 = 9.4 μm となる。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 13 μm であるため、波長分解能は CCD の素子サイズで制限される。波長校正用に取得したカーボンのスペクトルから、検出面における逆線分散は 0.0785 nm/mm と求められた。従って、光学配置から決定される波長分解能は、0.0785 nm/mm × 0.013 mm = 0.001 nm であり、非常に高い分解能 ($\Delta\lambda/\lambda = 5.4 \times 10^{-5}$) が得られた。

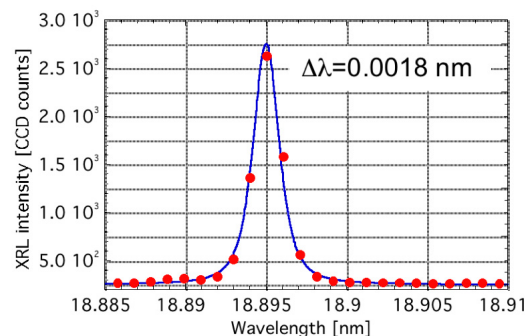


図5 Ni-like Mo XRLスペクトル

図5に計測されたX線レーザーのスペクトルを示す。各点がCCDの信号、実線はフィッティング曲線である。X線レーザーのスペクトルの形状は、イオン温度に依存するドップラー広がり（ガウス分布）と、電子密度に依存するシュタルク広がり（ローレンツ分布）の2種の要素が支配的であるため、これらを畳み込み積分したフォークト関数によりフィッティングを行なった。X線レーザーの線幅は0.0018 nmであり、円偏光化に必要な磁場強度は40 Tである事が判明した。

(2) パルス強磁場発生装置の開発と評価

溶融石英ロッド（直径3 mm、長さ5 mm）を磁場コイル（直径4 mm、長さ5 mm）に挿入し、直線偏光のパルスNd:YAGレーザー（波長532 nm、パルス幅7 ns）を透過させる事で、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を行なった。磁場中に設置された溶融石英中を5 mm通過する波長532 nmの光は、磁場強度が20 Tの場合、約27度の旋光を示す。図6(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（青線）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（緑線）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。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6(b)にヤグレーザーの旋光度から求めた磁場のコイル径方向の空間分布を示す。磁場の強度は計測領域の全域（3 mm）に渡り、17(±

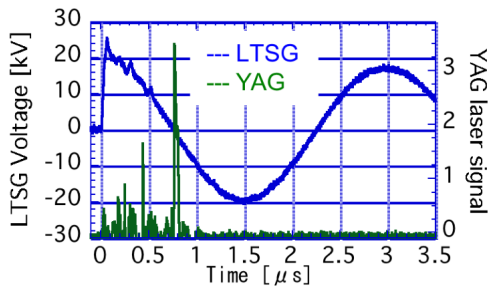


図6(a) LTSG出力端での電圧波形

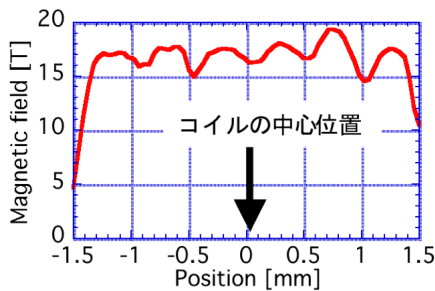


図6(b) 磁場強度の空間分布

2) Tであり、ほぼ均一の磁場が得られた。

設計値（40 T @ 28 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 μm → 75 μm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。

(3) 円偏光X線レーザーの発生実験

ニッケル様モリブデンX線レーザー媒質に15 Tの磁場を加えた場合のX線レーザーのスペクトルを図7に示す。図7に示したスペクトルはそれぞれが、磁場無し、有りの場合の結果を示す。外部磁場によるスペクトル線の明確な分裂が観測されている。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。

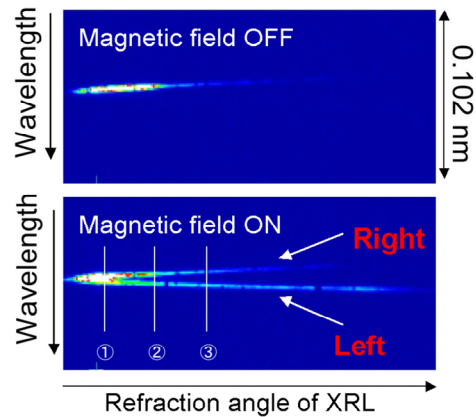


図7 磁場影響下でのNi-like Mo XRL スペクトル

スペクトルの分裂がゼーマン効果のみに起因すると仮定し、プラズマ中の磁場強度を逆算した場合、図7中のスペクトルの①-③位置での磁場強度は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くなる。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、外部から与えた磁場がX線レーザー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、励起レーザーのプリパルスにより生成されたプリプラズマに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。このような現象は、放電励起によるZピンチ現象（衝撃波が発生する）を用いたX線レーザーにおいて、外部から与えた磁場が約10倍に圧縮されるというシミュレーションの報告が出されている。レーザープラズマでは直接の観測例が無い現象であり、本研究により得られた現象を解明する事は、X線レーザーの円偏光化のみならず、磁場圧縮機構が重要である天体プラズマ分野への貢献も期待される。

(4)まとめと今後の展望

軟X線領域における磁気円偏光二色性計測用の光源として、磁場を用いた円偏光X線レーザーの提案とその実証実験を行った。世界で初めてニッケル様イオンを用いたX線レーザーの線幅計測に成功した。本結果は多価イオンの原子過程シミュレーションにおける重要な指標となりえる。更に、磁場によるスペクトル線の分裂の観測に世界で初めて成功した。左右の円偏光軟X線が同時に得られることにより、より精度の高い磁気円偏光二色性計測が可能となると期待される。また、得られた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の圧縮機構の存在が予想される。これは、磁場の圧縮機構が重要である天体プラズマ分野への貢献も期待されると同時に、本方式による円偏光軟X線がより小型の磁場発生装置もしくは分光器により得られる可能性をも示唆している。本研究により得られた現象を解明するため、X線増幅媒質の空間分解計測等を行なう事を予定している。

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 1件)

①Noboru Hasegawa, 他 9名

High-resolution Spectroscopy of the Nickel-like Molybdenum X-ray Laser Toward the Generation of Circularly Polarized X-ray Laser.

Journal of Optical Society of Korea, Vol. 13, p60-64, 2009. 査読あり

[学会発表] (計 4件)

①Noboru Hasegawa

Generation of the circularly polarized x-ray laser using the pulse-power magnet.

11th International Conference on X-ray

Lasers.

2008.08.21.

英国・ベルファスト・クイーンズ大学

②Noboru Hasegawa

High-precision measurement of the spectral width of the nickel-like molybdenum x-ray laser.

14th International Conference on the Physics of Highly Charged Ions.

2008.09.04.

東京都・調布市・電気通信大学

③長谷川登

強磁場によるX線レーザーの偏光制御について

日本物理学会 2008年秋季大会

2008.09.22.

岩手県・盛岡市・岩手大学

④Noboru Hasegawa

High-resolution Spectroscopy of the Nickel-like Molybdenum X-ray Laser Toward the Generation of Circularly Polarized X-ray Laser.

4th Asian Symposium on Intense Laser Science.

2008.11.04.

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]

無し

6. 研究組織

(1) 研究代表者

長谷川 登

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

(2) 研究分担者

無し

(3) 連携研究者

無し