

令和 5 年 6 月 13 日現在

機関番号：24506

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2022

課題番号：17K05122

研究課題名(和文) 固体希ガスを用いたレーザープラズマによるX線レーザーの研究

研究課題名(英文) Study on X-ray laser in laser produced plasma of solid rare gas

研究代表者

天野 壮 (AMANO, SHO)

兵庫県立大学・高度産業科学技術研究所・助教

研究者番号：50271200

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：固体希ガスを用いたレーザープラズマによる小型X線レーザーの可能性を探るため、そのプラズマX線の発光強度を増強する方法を研究した。プラズマを急激に冷却して強い再結合状態にして強度を上げるため、プラズマを冷却板やターゲット溝構造によって空間的に閉じ込めた。その結果、固体アルゴンの50nm帯の発光において、通常の平面ターゲットと比べて2-3倍の強度増強が達成できた。この再結合発光増強効果は固体クリプトンや固体キセノン、固体窒素においても同様に確かめられ、本方法が有効であることが実証された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

産業実用できる小型のX線源として、固体希ガスタargetによるレーザープラズマX線源の開発を行ってきた。今回、本研究によって、その発光強度を増強できて、よりスループットの高い光源となり応用の範囲が広がる。さらに、本研究は固体希ガスをターゲットとしたテーブルトップの小型X線レーザーの実現に繋がる成果でもある。現在、X線レーザーは加速器ベースの巨大なものか、レーザープラズマ方式では研究室レベルのものしかない、産業実用化可能な光源が望まれている。

研究成果の概要(英文)：In study of a compact X-ray laser using laser plasma from solid rare-gas targets, we succeeded in enhancement of the plasma X-ray intensities. We confined spatially the laser-plasma using a tamper or a groove target to chill it rapidly and force ions to recombine and increase their emission intensities. As results, we achieved twice or three times enhancement of emission intensities around 50 nm in the solid Ar target comparing to a conventional plane target. We also observed such enhancement in solid Kr, Xe and N2 targets.

研究分野：レーザー工学

キーワード：レーザープラズマ X線 VUV 強度増強 固体希ガス 強制冷却

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

X線(真空紫外光を含む)は、その光子エネルギーが分子のイオン化エネルギーより高いため物質と強く反応し、物理・化学・バイオ等幅広い研究分野で有用であり多くの産業展開が期待される。しかしながら、汎用的なX線源としては巨大で高価な「加速器放射光施設」くらいしかない。そのため、これに代わるコンパクトで使い易いスタンドアロンのX線源として、我々はレーザープラズマX線源の開発を行ってきた。我々のレーザープラズマX線源の特徴は、ターゲット材に冷却固化した希ガスを用いるというものである。これによりプラズマデブリの低減化に成功して長寿命・高繰り返し連続運転が可能となり、生産スループットを上げられる産業実用的なX線源となった。

本X線源は、①平成23-26年度までの科研費助成(挑戦的萌芽研究 No.23654204)により具現化した。この装置によりAr, Kr, Xeの希ガスの固体膜が生成連続供給出来るようになり、市販のYAG ロッドレーザーの10Hzまでの繰り返しパルス照射に対応して、連続プラズマ生成による3~10nm軟X線の連続発生に成功した[文献1]。さらに、この研究成果を基に、次に②平成26-28年度までの科研費助成(基盤研究C No.26390113)により、固体Arターゲットによる「水の窓」3nm帯連続発生軟X線源の研究を行った。その結果、固体Arターゲットは「水の窓」軟X線を高効率で発生できる事が明らかになった[文献2]。

2. 研究の目的

以上①②の研究を通して、固体希ガスタargetによるレーザープラズマX線源は連続運転に向いているだけでなく発光効率が高い、即ち高平均出力が得られるユニークな光源という事が判ってきた。そこで、さらなる高効率化を図って、現在インコヒーレントなX線をコヒーレント化して、さらに高出力化出来ないかという発想に至った。即ち、固体希ガスのレーザープラズマによるX線レーザー化である。そのため、固体希ガスを用いたレーザープラズマによるX線発生効率のさらなる高効率化、高出力化及びX線レーザー化への可能性について調べる事とした。

電子再結合励起X線レーザーにおいては、そのプラズマを急激に冷却して強い再結合状態にして反転分布を作る必要がある。そのためのプラズマを空間的・時間的に制御して冷却する方法を研究し、X線発生効率の増大を図った。

3. 研究の方法

固体希ガスのレーザープラズマを空間的・時間的に制御する次の方法を試した。

1) 空間的制御；

①プラズマ近傍に冷却板を置き、これにプラズマを衝突させて強制的に冷却させる方法。

図1(左)に示すのが、これまでのターゲット構造である。ターゲット板はクライスタットによって20Kまで冷却され、この表面にターゲットガスを吹き付けて固体層を作る。その厚さは500 μm に設定されて、このターゲット層に強度 $\sim 10^{10}\text{W}/\text{cm}^2$ のレーザーを集光してプラズマ化して、X線発光を得ていた。ここで使用したレーザーは1 μm のNd:YAG Qスイッチレーザーで、パルスエネルギーは1J、パルス幅10nsであった。今回は、図1(右)の様に、プラズマの正面に銅でできた冷却板を置いた。レーザー透過用の $\phi 4\text{mm}$ の穴が空いており、負電圧がかけられる様になっている。発生したプラズマX線は図2に示す様に、90度方向に設置された真空紫外分光器(VUV)で30-200nmのスペクトルを測定した。

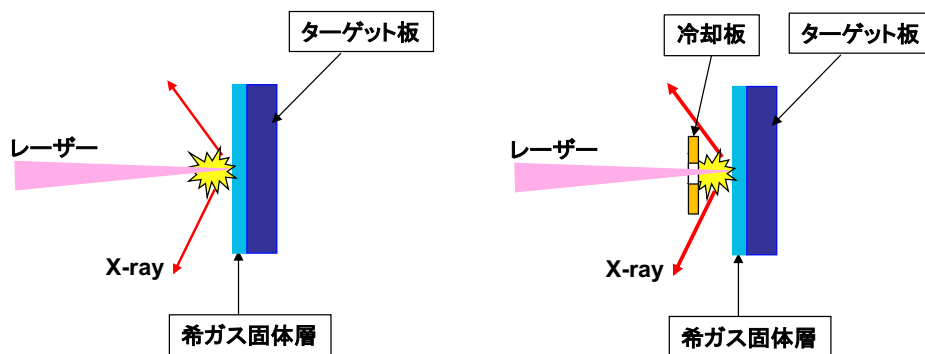


図1 プラズマターゲット装置 冷却板の無い従来装置(左)、冷却板有りの新装置(右)

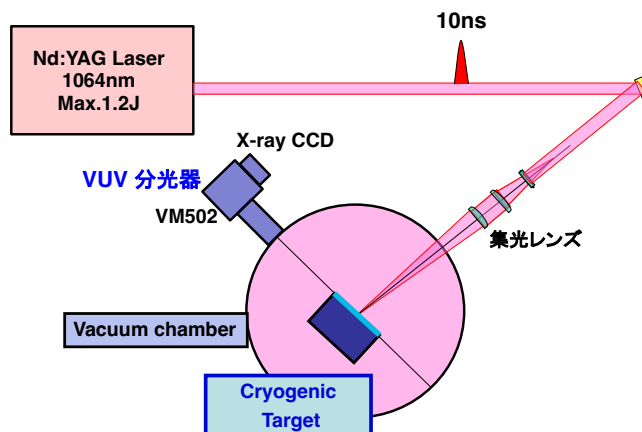


図2 レーザープラズマ X 線実験配置図

②ターゲット固体層に V 溝構造を作る。その一边にレーザーを点集光してプラズマを生成、そのプラズマを対向するもう一边の固体層に衝突させて冷却する方法。上と同じレーザー条件で、この時の発光スペクトル (30-200 nm) を同様に測定した。

2) 時間的制御; 立ち下りの急峻なナノ秒レーザーパルスにより、自由膨張により急激に断熱冷却させる方法。使用した Nd:YAG Q スイッチレーザーの通常のパルス時間波形は図3 (左) の通り (NM: ノーマルモード)。この Q スイッチの時間タイミングを調整する事により、図3 (右) の様な立ち下がりの急なパルス列を作る事ができた (SPM: ショートパルスモード)。パルスエネルギーは 1 J に揃えて、両モードでプラズマ X 線強度の違いを分光器で調べた。

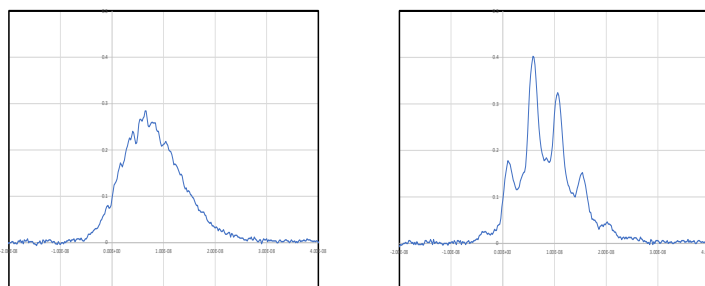


図3 レーザーパルス波形; NM(左)、SPM(右)

4. 研究成果

先ず Ar,Kr,Xe の希ガスを凍らせた通常のターゲット構造で (図1 (左))、研究すべき X 線波長を探索した。その結果、Ar46nm を詳しく調べることにした。図4 が本実験配置で測定された固体 Ar からの発光スペクトルで、46nm に強いピークが確認できた。Ar ガスの X 線レーザーに関しては、過去にこの波長が Ar ガスパフターゲットで数 100~数 J という巨大レーザーで励起してゲイン測定した例[文献3~5]があるのも、この波長を選んだ理由である。

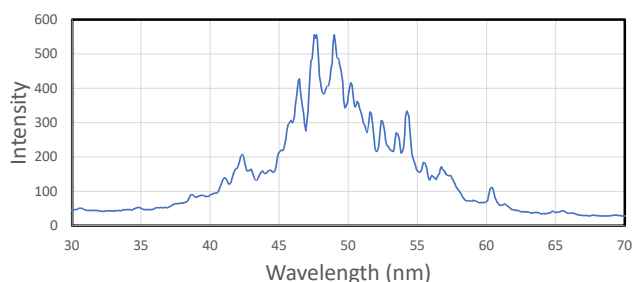


図4 固体 Ar からのレーザープラズマ発光スペクトル

1) 穴あき銅板による空間閉じ込め冷却効果

図5に銅冷却板（タンパー）を置いて、プラズマを閉じ込めた時のプラズマ X 線 46nm ピーク強度変化を、タンパーに印加した負電圧をパラメータとして記した。尚、図の左軸上のプロットはタンパーがない時のデータで比較のために記した。この結果より、タンパーを置くことで X 線強度が上がり、-10V まで印加電圧と共に増加するが、それ以降は飽和した事がわかる。負電圧をかけたのは、タンパーから積極的に電子をプラズマイオンに供給して再結合を促進しようという狙いであった。レーザー透過用の貫通穴からのプラズマイオンの漏れは約2割程度と計算された。従って、この図5の結果の1.3倍の増加が理論的に得られるが、いずれにして2倍程度の増加が得られた。本実験に置いて、銅タンパーはプラズマ発生点から17mmと距離があったため、この距離を縮めるため、次のターゲット溝構造を着想した。

2) V溝構造による空間閉じ込め冷却効果

ターゲットV溝構造における発光スペクトルを分光器でモニターしながらレーザー集光点、レーザー強度、レーザーエネルギー依存性、ターゲット層状態依存性を調査した。その結果、通常の平面ターゲットにおけるスペクトルと比べて形状が変化して強度が増強されたスペクトルが得られた。特にArの46nmピーク発光においては3倍の強度増強が達成できた。この再結合発光増強効果はKrやXe、N₂においても同様に確かめられた。

3) レーザーパルス列による断熱冷却効果

図6はNM;ノーマルモードとSPM;ショートパルスモードにおけるピーク発光強度の結果である。Qスイッチレーザーパルス列のSMPを用いてAr46nmピーク発光において強度の増加を確認した。しかし、図6からわかる通り、この増加はピークパワーの増加によるものとしか言えず、立ち下がりの急峻さによる効果は見取れない。やはり、ピコ秒オーダーの立ち下がりが必要だと考える。このため、よりプラズマを急速冷却させるための高速立ち下がりレーザーパルス生成法を考案して、誘導ブリリアン散乱法やプラズマシャッタ法の研究も開始した。

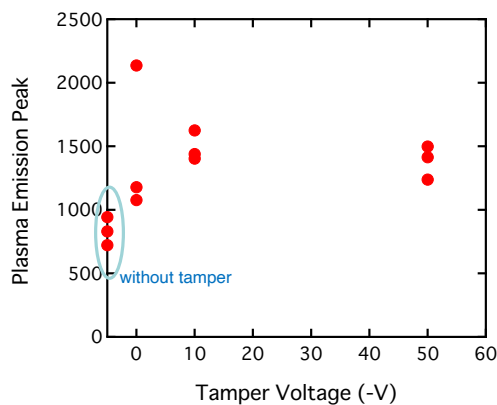


図5 冷却板によるプラズマ発光強度変化

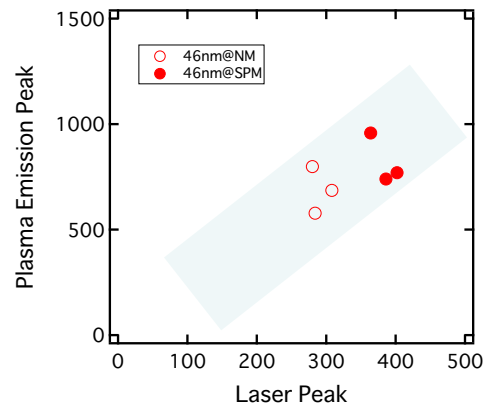


図6 パルス波形による発光強度変化

上記2)と3)を組み合わせて、レーザーをライン集光してプラズマ長依存性を調べたが、まだ反転分布生成までには至っていない。ライン集光する事によりレーザー強度が低下したのが原因である。今後レーザーエネルギーの増強が課題である。しかしながら、本研究によるプラズマの空間的・時間的制御法が有効であることは実証でき、将来の軟X線(VUV)レーザー化につながる成果である。

参考文献

- [1] S.Amano, Rev.Sci.Instrum, **85**, 063104(2014).
- [2] S.Amano, Appl.Phys.Exp. **9**, 076201(2016).
- [3] H.Fiedorowicz et al., Phy. Rev. Lett., **76**, 415-418(1996).
- [4] H.Fiedorowicz et al., Opt. Lett., **26**,1403-1405(2001).
- [5] P.Lu et al., Jpn. J. Phys., **41**, L133-L135(2002).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Amano Sho	4. 巻 57
2. 論文標題 Water-window soft X-ray source using cryogenic Ar laser plasma	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 126201 ~ 126201
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7567/JJAP.57.126201	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Amano Sho	4. 巻 57
2. 論文標題 Laser plasma vacuum ultraviolet light source using solid rare-gas targets	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 086201 ~ 086201
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7567/JJAP.57.086201	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 2件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 Amano Sho
2. 発表標題 Laser-plasma-source for soft X-ray microscope
3. 学会等名 6th International Congress on Microscopy and Spectroscopy (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Amano Sho
2. 発表標題 Cryogenic-Ar Laser-plasma-source
3. 学会等名 International Conference on Plasma Science and Technology (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 天野 壮
2. 発表標題 高効率・高平均出力レーザープラズマ「水の窓」軟X線源
3. 学会等名 Plasma Conference 2017
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 天野 壮
2. 発表標題 ワット級出力の「水の窓」軟X線源
3. 学会等名 第65回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 VICTOR M. PETROVA	4. 発行年 2021年
2. 出版社 NOVA SCIENCE PUBLICATIONS, INC.	5. 総ページ数 239
3. 書名 ADVANCES IN ENGINEERING RESEARCH VOL.40	

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------