

補助事業番号 2017M-159

補助事業名 平成29年度 材料・物性研究のためのプラズマ励起型X線レーザーの開発
補助事業

補助事業者名 広島大学大学院工学研究科 難波慎一

1 研究の概要

X線レーザーは究極のレーザーとも呼ばれており、物理・化学はもとより、医学、生命化学、薬学などの分野で革命的な研究手段を提供できる。本事業ではプラズマ励起型の軟X線レーザーを独自の手法で開発した。開発するX線レーザーは応用研究に供する装置となり得る、発振波長15.5 nm、出力1 nJ以上とし、これを目標値として事業を実施した。さらにこのレーザーをX線シュバルツシルト凹凸面鏡ペアを用いることにより、250 nm以下の空間領域に集光することを行った。その結果、X線レーザー集光サイズ223 nmを達成することに成功した。

2 研究の目的と背景

X線レーザーはX線顕微鏡、X線光電子分光法、X線リソグラフィ、X線ホログラフィといった多くの科学技術分野で応用されている。プラズマ励起型X線レーザーは、レーザー生成プラズマ中の多価イオンの誘導放出現象を利用して発振するため、極めて高い出力エネルギーを有する励起用レーザーシステムが必要であった。そのため、大学の研究室でも運用、維持可能な小型で高繰り返しX線レーザーの開発がこれまで進められてきた。理化学研究所や豊田工業大学は再結合プラズマ法による軟X線レーザー開発を精力的に行った。彼らは高出力のNd:YAGレーザーをアルミ平板ターゲットに照射することによって生成される高密度アルミニウムプラズマに存在するリチウム様アルミニウムイオンの3d-4f線（波長: 15.5 nm）に着目し、この遷移の軟X線レーザー発振に成功した。用いたレーザーシステムは比較的小型であったがX線レーザーの出力は十分ではなく、幅広い研究領域への応用に供するには利得係数の大幅な改善が求められていた。

本事業では、プラズマ励起レーザーの特性を最適化することにより、再結合プラズマ法によるリチウム様アルミニウムイオン軟X線レーザー発振の利得係数を向上させることを目的とした装置の開発実験をまず行った。次に、一組の凹凸面の多層膜反射鏡からなるシュバルツシルト光学系を設計・製作し、開発した軟X線レーザーをナノ集光することを行った。具体的な数値目標としてはX線レーザーの特性として発振波長15.5 nm、出力1 nJ以上、集光サイズとしては250 nm以下として事業を実施した。本事業で開発する汎用性のある小型ナノ集光X線源が実現すれば材料・物性研究分野で強力な診断・解析ツールとなり得る。

3 研究内容

(1) プラズマ励起型X線レーザーの開発 (<https://www.plasmasciencelab.com/>)

Li用アルミニウムの多価イオンを利得媒質とする軟X線レーザー（波長15.5 nm）の発振は約20年前に観測されたが、装置は大型であるにも関わらず得られる利得係数は小さく、X

線レーザーとしての出力は材料・物性分野への応用研究に供するレベルにはなかった。

本研究では利得媒質発生用の励起用YAGレーザーのパルス幅を変更することにより、数ジュールという小型励起レーザー装置（図1）でもX線レーザーが発振し、さらに利得係数が大幅に改善することを明らかにした（図2）。具体的にはX線分光計測から利得係数の値が従来の $g=3.2 / \text{cm}$ から $g=8 / \text{cm}$ 以上となることが分かった。またSi検出器を用いることにX線出力とパルス幅を評価したところ、開発したX線レーザーはパルス幅が半値全幅で9.4 ns、出力は 20 nJ/pulseとこれまでの数nJから大幅に向上させることに成功した。

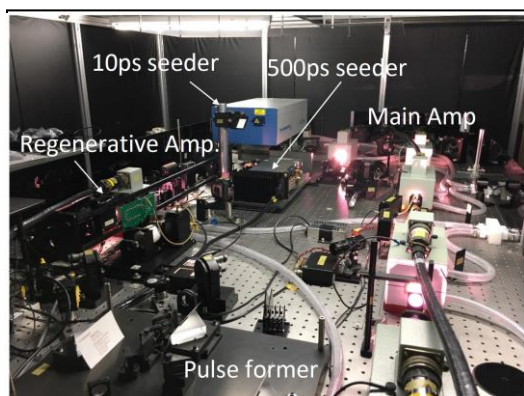


図 1 小型 YAG レーザーシステム

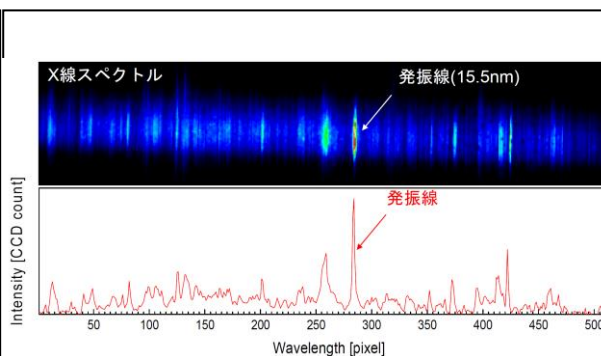


図2 観測されたX線スペクトル. 波長 15.5 nm において強い発振線が確認できる.

(2) 軟X線レーザーの特性と集光性能に関する調査 (<https://www.plasmasciencelab.com/>)

本事業ではシュバルツシルト光学系を用いたX線レーザーのナノ集光を試みるため、まずはX線集光光学系の設計・製作を行った（図3-4）。倍率はメーカー検査結果より1/224であった。ナノ集光が実現できているか調べるために、X線レーザーの光源サイズをピンホールカ

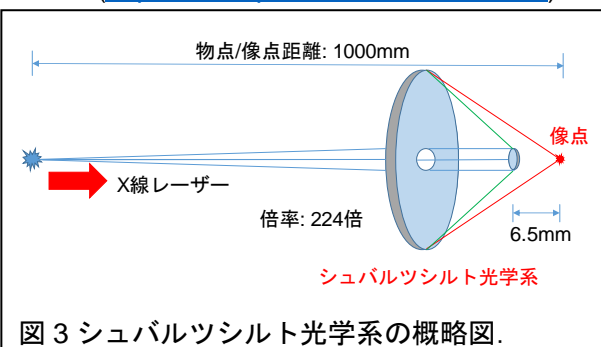


図 3 シュバルツシルト光学系の概略図.



図 4 製作した多層膜シュバルツシルト集光ミラー写真. 左側が入射側, 右側が出射側.

メラと波長選別フィルタを用いて計測した。その結果、光源サイズは約25ミクロン（全幅で50ミクロン）と評価でき、シュバルツバルト光学系の倍率を考慮すると本光学系を用いることによりX線レーザーを全幅で230 nmの空間領域に集光できることが示された（図5）。この値は本事業で目標とした集光サイズ223 nmを下回っており、事業目的が達成できた

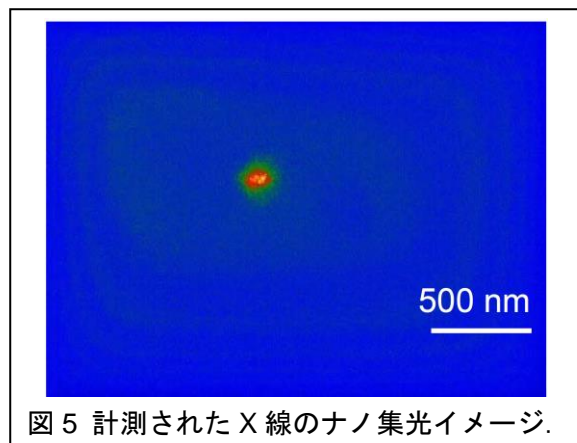


図5 計測されたX線のナノ集光イメージ。

4 本研究が実社会にどう活かされるかー展望

X線は非破壊で物質の内部構造を検査することができる。今やX線を用いたレントゲン撮影は当たり前の体内診断のツールとして認識されている。このX線が高輝度化、短パルス化することができれば、ナノメートルスケールの空間分解能で物質を観測することが可能となる。また、通常は赤外や可視域の波長域にあるレーザーをX線領域まで拡張することができれば、そのコヒーレンスを活かした診断法の確立にも繋がる。

本事業を実施することによりプラズマ励起型の軟X線レーザー（発振波長15.5 nm）を開発し、ナノ集光することに成功した。この光源技術をさらに汎用性のあるものにする事で、様々な科学分野の分析ツールとして今後使われるようになるであろう。特に、長寿社会を迎えている我が国においては、革新的な新薬開発や遺伝子レベルでの治療に対する研究手段を提供できるものと考えている。社会における波及効果は計り知れない。

5 教歴・研究歴の流れにおける今回研究の位置づけ

申請者はこれまで20年以上にわたって高輝度X線源の開発に関する研究を行ってきた。かつては極めて大きなプラズマ発生用レーザーを用いていたが、これを小型化することにより安価で汎用性の高いX線源が実現できると考え、独自の手法を考案して実績を積み重ねてきた。本事業では小型化とX線の高輝度化に特化した研究課題であり、掲げた数値目標を達成できた現在は、X線源装置を市販化する上での最終段階に来ていると考えている。

6 本研究にかかわる知財・発表論文等

○国内学会発表

1. “リチウム様アルミイオンにおける再結合型軟X線レーザーの発生”，難波慎一，久保暢明，佐藤祐太，長谷川登，岸本牧，錦野将元，レーザー学会学術講演会，2018年1月24-26日，京都市
2. “再結合プラズマ法によるリチウム様アルミニウムイオンの軟Xレーザー発振”，難波慎一，久保暢明，岸本牧，長谷川登，錦野将元，核融合科学研究所研究会（原子分子過程研究と受動・能動分光計測の高度化のシナジー効果によるプラズマ科学の展開）2018

年 12 月 19-20 日, 岐阜県土岐市

○国際会議発表

1. “Recombination plasma soft X-ray laser by Li-like Aluminum ion”, N. Kubo, Y. Sato, M. Kishimoto, N. Hasegawa, M. Nishikino, S. Namba, Plasma Conference 2017, Oct. 20-27 (2017), Himeji, Japan
2. “Li-like aluminum plasma soft X-ray laser by means of recombination scheme”, S. Namba, N. Kubo, C. John, M. Kishimoto, N. Hasegawa and M. Nishikino, International Conference on X-ray Laser 2018, Oct. 8-13 (2018), Prague.
3. “Observation of gain coefficient of 15.5 nm Li-like Al soft X-ray laser in a recombination plasma pumped by a compact YAG laser, S. Namba, C. John, N. Kubo, M. Kishimoto, Y. Matsumoto, T. Morishita, N. Kakunaka, N. Hasegawa and M. Nishikino, International Conference on Inertial Fusion Sciences and Applications, Sep. 22-27 (2019) 大阪 (発表予定)

○プロシーディングス

1. Li-like aluminum plasma soft X-ray laser by means of recombination scheme, S. Namba, N. Kubo, C. John, M. Kishimoto, N. Hasegawa and M. Nishikino, J. Phys. Conf. Ser. (accepted).

7 補助事業に係る成果物

(1)補助事業により作成したもの

該当なし

(2)(1)以外で当事業において作成したもの

該当なし

8 事業内容についての問い合わせ先

所属機関名: 広島大学大学院工学研究科

(ヒロシマダイガクダイガクインコウガクケンキュウカ)

住 所: 〒739-8527

広島県東広島市鏡山1-4-1

担 当 者 教授 難波慎一(ナンバシンイチ)

E - m a i l: namba@hiroshima-u.ac.jp

U R L: <https://www.plasmasciencelab.com/>