

## 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 5月29日現在

機関番号：24506

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2009年度～2011年度

課題番号：21560752

研究課題名（和文）高効率レーザープラズマ光源と微細加工・組織制御への応用に関する研究

研究課題名（英文） Study on highly efficient laser-plasma light source and its applications for microfabrication and textural control of materials

研究代表者 望月 孝晏

(MOCHIZUKI TAKAYASU)

兵庫県立大学 高度産業科学技術研究所 特任教授

研究者番号：80101278

研究成果の概要（和文）：Li 蒸着 GMB ターゲットに同軸・対向ビームダブルパルス照射をおこなないプラズマの膨張を時間分解 EUV カメラで観測した。Li ターゲット均等加熱には対向ビーム照射がより有効であることが確認された。回転ドラム式 Xe クライオターゲットから発生する 5-17nm 波長域の軟 X 線変換効率は最大で 25%/2π sr を達成した。Ar ガスによるスパッタリング減衰・軟 X 線吸収の実効的なパラメータはそれぞれ  $\sigma_1=2.2 \times 10^{-20} \text{m}^2$  と  $\sigma_2=1.5 \times 10^{-22} \text{m}^2$  であった。スパッタリングの減衰は光学系への到達デブリの減衰と近似的に一致することが結論付けられ、得られた実効的な断面積は軟 X 線光源の実用化に役立つ実用物理量であることが判った。

研究成果の概要（英文）：Plasma expansions on micro-balloon lithium targets irradiated with coaxial double pulses and counter-streamed simultaneous two-pulses were observed by a time-resolved EUV camera. The counter-streamed pulses were confirmed to be more effective for uniform heating of the target. A soft X-ray conversion efficiency in a wavelength range of 5-17 nm in a cryogenic xenon rotating target was 25 %/2π sr at the maximum. An attenuation coefficient of sputtering by the debris and an absorption coefficient of soft x-rays at 13.5 nm by argon gas were derived to be  $2.2 \times 10^{-20} \text{m}^2$  and  $1.8 \times 10^{-22} \text{m}^2$ , respectively. The attenuation coefficient of sputtering is concluded to be equivalent to the effective collision cross section. These parameters provide a useful design tool for realizing a practical soft x-ray source.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,700,000	510,000	2,210,000
2010年度	1,500,000	450,000	1,950,000
2011年度	300,000	90,000	390,000
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：材料工学 材料加工・処理

キーワード：レーザープラズマ・極端紫外光(EUV 光)・プラズマデブリ・アルゴンガスバップ  
アー

### 1. 研究開始当初の背景

(1) 放射光にて研究開発された材料プロセス技術はユニークな性能を発露している反面、生産現場での実用化のためには放射光に代わる比較的小型の独立な軟 X 線光源が求められている。

(2) 本研究グループは、軟 X 線を長時間発生可能な回転ドラム式 Xe クライオターゲットを開発し、EUV 変換効率のレーザー強度・波長・ダブルパルス効果などを研究し、変換効率の向上を目指してきた。Li ターゲットにおいては、 $\text{Li}^{2+}$  イオンの 2p 励起状態から 1s-2p ライマンアルファ遷移による 13.5nm 帯域の EUV 放射による変換率を向上させるために、レーザーで加熱された完全電離 ( $\text{Li}^{+3}$ ) して膨張するプラズマを冷たい壁に衝突させて、これを急冷することにより励起  $\text{Li}^{2+}$  を生成し、EUV 変換効率を向上される強制再結合放射の方式を考案した。

### 2. 研究の目的

(1) レーザー生成プラズマ軟 X 線を応用利用するために、得られる軟 X 線出力の向上を図り、長時間運転できるようにするために集光系の損傷の原因となるプラズマデブリの抑制をおこなう。

(2) レーザープラズマ光源を微細加工・組成制御への応用に役立てるため、研究調査をする。

### 3. 研究の方法

(1) Li プラズマの実効 EUV 変換効率を向上する方法を探るために、直径数百  $\mu\text{m}$   $\Phi$  のガラスマイクロバルーン (GMB) に蒸着した Li ターゲットに同軸ダブルパルス法、あるいは対向 2 ビーム照射方を用いて照射し、時間分解 EUV カメラによって膨張プラズマの時間分解測定をおこなった。

(2) 回転ドラム式 Xe クライオターゲットから発生する軟 X 線を集光して利用するために Ru ミラーを用いて、集光特性を測定した。

(3) デブリによる集光光学系のスパッタリングを抑制するために、Ar を用いたガスバッファを行い、デブリスパッタリングの抑制効果と軟 X 線の減衰を測定した。

(4)  $\alpha$ -Si を低温結晶化させるために、Xe クライオターゲットを用いて軟 X 線の直接照射を行い、炉アニールによる結晶化閾値の変化を評価した。

### 4. 研究成果

(1) Li ターゲットの同軸ダブルパルス法では、シングルショットに比較して EUV 光量が全体的に 2-3 倍に増加し、高速イオン量が 1/3 に減少することがわかった。しかしながらプラズマの発光像の観察ではダブルパルスを用いてもターゲットの均一加熱は困難であることがわかった。対向ビーム照射法では、EUV 分布はそれぞれのレーザー入射方向に強い分布を示した。高速イオンの分布はレーザーに直交した横方向に強い分布を示し、EUV 光と分離される結果となった。ターゲット均等加熱には対向ビーム照射がより有効であることが確認された。

(2) Xe 軟 X 線の変換効率は 5-17nm で最大 25%/ $2\pi\text{Sr}$  を達成し、曲線半径 26mm の円筒の Ru ミラーを用いた集光によって最大で 1mm  $\Phi$  あたり 1.3mJ/cm<sup>2</sup> の集光強度を得た。

(3) Ar ガスをチャンバー内に一様に封入してデブリスパッタリングの抑制効果と軟 X 線の減衰をそれぞれ QCM と X 線カロリメータで測定した結果、Ar ガスによるスパッタリング減衰・軟 X 線吸収の実効的なパラメータはそれぞれ  $\sigma_1=2.2 \times 10^{-20}\text{m}^2$  と  $\sigma_2=1.5 \times 10^{-22}\text{m}^2$  であった。スパッタリングの減衰は光学系への到達デブリの減衰と近似的に一致することが結論付けられ、得られた実効的な断面積は軟 X 線光源の実用化に役立つ実用物理量であることが判った。

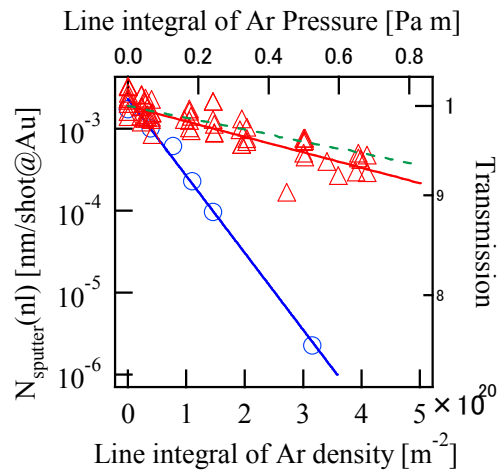


図1 Ar ガスバッファによるスパッタと軟 X 線透過率 (○; スパッタ、△; 軟 X 線)

(4)  $\alpha$ -Si にレーザー生成 Xe プラズマ軟 X 線を直接照射した結果、照射後のサンプルに炉アニールをして結晶化する閾値温度が 500°C から 400 度まで下がった。

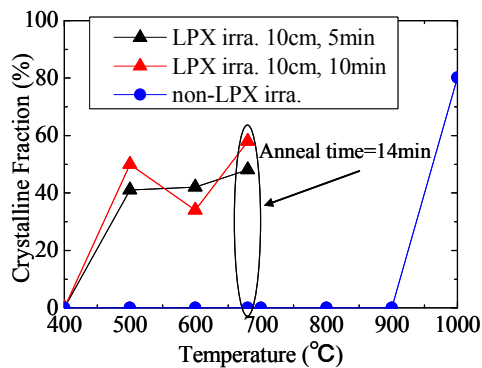


図2 LPX照射による炉アニール閾値温度変化

#### 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3件)

Tomoaki Inoue, Takayasu Mochizuki, Kazuya Masuda, Sho Amano, Tsuguhisa Sekioka, and Kazuhiro Kanda

Effective collision cross section of xenon plasma debris in argon buffer gas

Journal of Physics B

査読あり

Vol. 45

2012

115401-1-5

Doi: [10.1088/0953-4075/45/11/115401](https://doi.org/10.1088/0953-4075/45/11/115401)

Tomoaki Inoue, Takayasu Mochizuki, Shuji Miyamoto, Sho Amano and Takeo Watanabe

Soft x-ray conversion efficiencies in laser-produced xenon and tin plasmas in a 5-17-nm wavelength range

Japanese Journal of Applied Physics

査読あり

Vol. 50

2011

098001-1-1

DOI: [10.1143/JJAP.50.098001](https://doi.org/10.1143/JJAP.50.098001)

Influence of Laser Plasma Soft X-Ray Irradiation on Crystallization of a-Si Film by Infrared Annealing

Naoto Matsuo, Nobuya Isoda, Akira Heya, Sho Amano, Shuji Miyamoto, Takayasu Mochizuki, and Naoya Kawamoto

Material Transactions

査読あり

Vol. 51, No. 8

2010

1490-1493

<http://www.jim.or.jp/journal/e/pdf3/51/08/1490.pdf>

〔学会発表〕(計3件)

井上 智章、望月 孝晏、天野 壮、神田 一浩  
アルゴンバッファによるプラズマデブリ抑制

第59回応用物理学関係連合講演会

2012/3/18

早稲田大学 早稲田キャンパス

井上智章、天野壮、望月孝晏

滞留ガスジェットによるプラズマデブリ低減の研究

第71回応用物理学会学術講演会

2010/9/15

長崎大学 文教キャンパス

天野壮、井上智章、脇坂勇輝、

原田哲男

プラズマデブリ耐久X線ミラーの研究

第71回応用物理学会学術講演会

2010/9/15

長崎大学 文教キャンパス

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

○出願状況 (計0件)

名称:

発明者:

権利者:

種類:

番号:

出願年月日:

国内外の別:

○取得状況 (計◇件)

名称:

発明者:

権利者:

種類:

番号:

取得年月日:

国内外の別:

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

望月 孝晏 (MOCHIZUKI TAKAYASU)  
兵庫県立大学・高度産業科学技術研究  
所・特任教授  
研究者番号：80101278

(2) 研究分担者

宮本 修治 (MIYAMOTO SHUJI)  
兵庫県立大学・高度産業科学技術研究  
所・教授  
研究者番号：90135757

内海 裕一 (UTSUMI UICHI)  
兵庫県立大学・高度産業科学技術研究  
所・教授  
研究者番号：80326298

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

(3) 連携研究者

( )

研究者番号：