

平成 22 年 3 月 31 日現在

研究種目：若手研究（B）
 研究期間：2008～2009
 課題番号：20760025
 研究課題名（和文）スズドロップレットを用いたレーザー生成プラズマ EUV 光源からのデブリ挙動計測
 研究課題名（英文）Diagnostics of debris from laser-produced plasma with tin droplet target for EUV light source
 研究代表者
 中村 大輔（NAKAMURA DAISUKE）
 九州大学・システム情報科学研究所・助教
 研究者番号：40444864

研究成果の概要（和文）：実用 EUV 光源として注目されているスズドロップレットをターゲットとしたレーザー生成プラズマに対して画像 LIF 分光計測と高時間分解シャドウグラフィメーキングにより放出デブリの挙動計測を行なった。レーザー照射後のターゲット挙動や放出されるイオンや中性原子等の空間分布を詳細に解明した。

研究成果の概要（英文）：The ablation dynamics of tin micro-droplet target irradiated by double pulses was investigated for extreme ultraviolet lithography source. Debris from Sn droplet target was visualized by the laser-induced fluorescence imaging and shadowgraph imaging.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,900,000	570,000	2,470,000
2009年度	1,400,000	420,000	1,820,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,300,000	990,000	4,290,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：応用物理学・工学基礎

キーワード：EUV，レーザー生成プラズマ，ドロップレット，LIF

1. 研究開始当初の背景

2013年以降のLSI製造技術を担う次世代リソグラフィ用光源となる波長13.5nmの極端紫外光源の実用化に向けた研究が世界規模で行われている。現在は、スズ（Sn）をターゲットとしたSnプラズマから最も効率よく13.5nmのEUV光が得られ、そのプラズマの生成にレーザーを利用する方式（LPP：Laser Produced-Plasma）が有力とされている。その際の課題として、13.5nm光への変換効率の向上と、プラズマから発生する各種粒

子（デブリ）による光学素子の劣化対策による素子の長寿命化がある。特に、デブリ対策は重要事項であるが、必要最小な質量制限ドロップレットターゲットを利用することでデブリの抑制が期待できることがわかってきた。そこで、ドロップレットターゲットを用いたLPPにおけるEUV光特性やデブリ特性など条件の最適化を図る必要があるが、これまでドロップレットターゲットのデブリ特性は、十分に解明されていないのが現状であった。

2. 研究の目的

本研究では次世代リソグラフィ光源である EUV 光の発生において、スズドロップレットを用いたレーザー生成プラズマの特性を解明することを目的として研究を行なった。具体的には、

ドロップレットターゲットのアブレーションダイナミクス

ドロップレットから放出されるイオン、中性原子の動的挙動

ダブルパルス照射時のアブレーションダイナミクス

を調査解明することである。

3. 研究の方法

図 1 にアブレーションダイナミクス計測のための実験装置図を示す。本研究にて作製したスズドロップレットターゲットを直径約 $10\ \mu\text{m}$ のポリアミドファイバーの側面に付着させ、そこにプレパルスとして Nd:YAG レーザー、メインパルスとして CO_2 レーザーを照射させた。中性原子デブリだけでなく照射されたターゲットの挙動についても詳細に調査を行なうために、画像 LIF 分光計測システムに加えて、高時間分解カメラを用いたシャドウグラフィメーキングシステムを導入した。照射されたドロップレットターゲットに関しては、レーザーダイオードを光源とした高速時間分解 ICCD カメラによってシャドウグラフィが連続的に計測される。この LIF イメージングとシャドウグラフィはパルスジェネレーターにより同期して動作させた。イオンデブリに関してはターゲットの周囲にイオン電流を測定するためのファラデーカップを設置した。

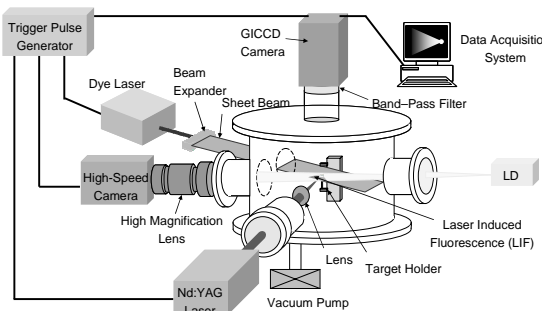


図 1 デブリ計測の実験装置図

4. 研究成果

4.1. プレパルスによるドロップレットターゲットのアブレーションダイナミクス

図 2 に各レーザー出力におけるドロップレットターゲットのシャドウグラフィを示す。このときドロップレットターゲットのサイズは $30\ \mu\text{m}$ 、レーザーのスポットサイズは約 $40\ \mu\text{m}$ であり、ICCD カメラのゲート幅は $100\ \text{ns}$

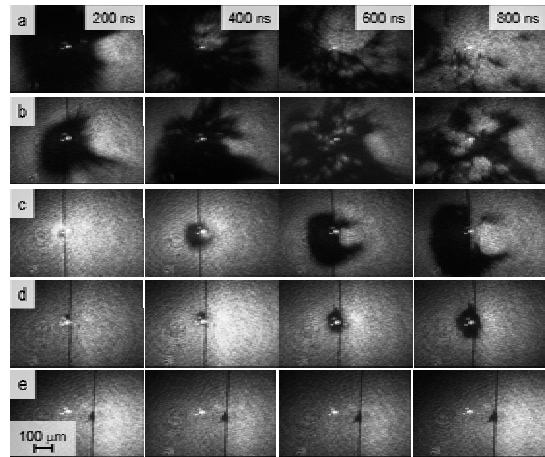


図 2 レーザー照射後のドロップレットのシャドウグラフィ。照射レーザー出力はそれぞれ (a) 1.1×10^{12} , (b) 4.8×10^{11} , (c) 1.6×10^{11} , (d) 3.4×10^9 W/cm^2 , (e) 2.1×10^8 W/cm^2 。

であった。図からわかるように高密度粒子群が膨張しながら飛散している様子が計測された。この膨張する速度は出力に応じて大きくなっていることがわかる。出力 1.1×10^{12} W/cm^2 では経過時間 $200\ \text{ns}$ において観測領域以上に高密度粒子が膨張しているのが確認できる。また、その高密度粒子のシャドウは中央から押し広げられてドーナツ状に広がっているように見える。一方、 3.4×10^9 W/cm^2 では、経過時間 $800\ \text{ns}$ において $100\ \mu\text{m}$ 程度まで広がっている。さらに低い出力となる 10^8 W/cm^2 ではドロップレットターゲットはもはや膨張せず、ファイバーからは外れて落下するか、ファイバーに付着したままの状況のものもあった。ダブルパルス照射ではプレパルスによりドロップレットを膨張させる必要があるが、各レーザー出力におけるターゲットの膨張過程を明らかにすることができた。

実用 EUV 光源では繰り返し周波数 $100\ \text{kHz}$ での運転を想定しているため、 $1\ \mu\text{s}$ 程度以内でターゲット直径を $10 \sim 20$ 倍程度に膨張させることが望ましい。そのため、本研究では最適プレパルスの出力を 2×10^{11} W/cm^2 とした。したがって、以降の実験結果ではプレパルスの出力はいずれもこの値にて実験を行なった。

次に、この高密度粒子に関して詳細に調査するためにレーザー照射後の長い時間帯までシャドウグラフィを計測した。図 3 にレーザー照射後のドロップレットターゲットのシャドウグラフィを示す。レーザー照射直後に強いプラズマ発光が確認され、その後、照射されたターゲットは膨張しながら高密度粒子群となり、画像の右側へシフトしていることがわかる。これは、レーザー照射によりターゲット表面に発生したプラズマのエネルギーによるものと考えられ、このときのシフト

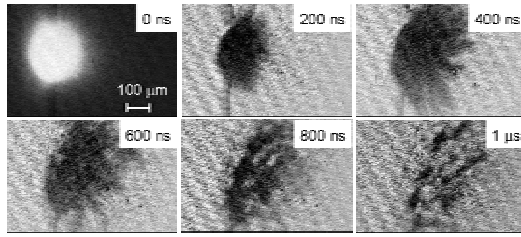


図3 ドロプレットターゲットの時間分解
シャドウグラフ

速度は約 500 m/s と見積もられた。また、レーザー照射後 800 ns ~ 1 μs では高密度粒子群の影が薄れて小さな影が現れていることがわかる。この後方へ飛散している粒状の影に関してターゲット後方 15 mm の位置に設置したウィットネスプレートで捕集を試みたところ、融解した Sn ターゲットがプレート表面に付着していた。したがって、照射されたターゲットの一部は、蒸発しきれずに液体デブリの状態の後方へ飛散していると考えられる。さらに、ウィットネスプレート上の堆積物のサイズと厚さを原子間力顕微鏡にて計測し、体積を算出したところ、飛散している粒子が球体と見なしたとき直径は約 1 ~ 6 μm と見積もられた。飛散している微小粒子全てがウィットネスプレートに捕集されたわけではないが、捕集された粒子痕の総数から初期ターゲットに占める微小粒子の割合は約 1 ~ 5 % と見積もられた。以上の結果から、ドロプレットターゲットに対する Nd:YAG レーザーのプレパルス照射では、ターゲットはプラズマ化、ガス化した状態とともに、一部は蒸発せずに融解した状態で飛散しているものもあると推測される。

4. 2. 中性原子の動的挙動

図 4 にドロプレットターゲットから発生する中性原子の時間分解放出分布を示す。レーザー光は画像の左側から入射されており、レーザー照射前のターゲットは各画像の中心に位置している。この結果より中性原子の発生が確認され、その分布は各ショットにばらつきはあるものの、ターゲットを中心として空間的に全方向へ広がっていることが

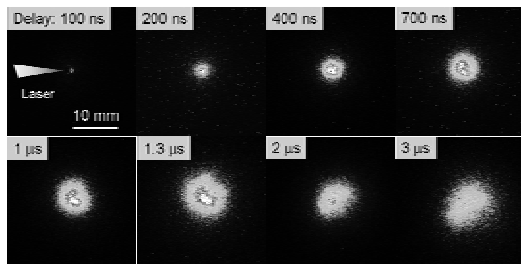


図4 ドロプレットターゲットから発生する
中性原子の時間分解画像

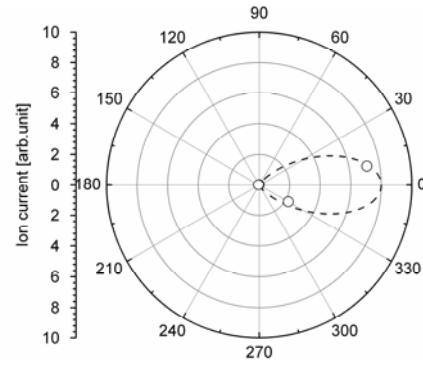


図5 プレパルスにより放出するイオンの角度
分布

わかった。経過時間 400 ns の画像を用いて中性原子の飛散速度を算出したところ、最大で約 20 km/s と見積もられた。

4. 3. 放出イオンの動的挙動

次に、プレパルスによるイオン放出特性についてファラデーカップを用いて計測した。4 つのファラデーカップをプレパルス光軸に対してそれぞれ 15, 25, 105, 155 度の角度でターゲットから 120 mm 離れた位置に設置してイオンの計測を行なった。図 5 にそれぞれのファラデーカップより得られた信号から算出された放出イオンの角度分布を示す。プレパルスは 0 度の方向から入射されている。この結果より、発生するイオンの大部分はレーザー光入射方向へ向かって放出していることがわかる。図中の波線は $\cos^6 \theta$ のフィッティング曲線であり、入射方向へ放出するイオンは約 6 keV の平均エネルギーを持つと見積もられる。これは、ジェットターゲットから放出されるイオンの角度分布と非常に類似していることがわかった。

4. 4. レーザー照射位置依存性

実用 EUV 光源では 10-100 kHz の高繰り返しで供給されるターゲットに対してレーザー光を中心に正確に照射する必要があるため、ターゲットとレーザー光の位置制御が非常に重要な要素となる。そこで、プレパルス照射されたドロプレットターゲットに関して、レーザー光の照射位置依存性を調査した。実験では図 6 (a) に示すようにターゲットを上下方向へ () 60 μm, () 30 μm, () 15 μm, () 0 μm, () -15 μm と位置をずらしてレーザー照射を行ない、シャドウグラフにより高密度粒子群の放出分布を計測した。図 6 (b) にそれぞれの照射位置の経過時間 300 ns におけるシャドウグラフを示す。レーザー出力は 2×10^{11} W/cm²、ビームスポット 40 μm にて行なった。図 6 (b) () では高密度粒子は上下方向へシフトしていないのに対して、図 6 (b) () () (v) では照射位

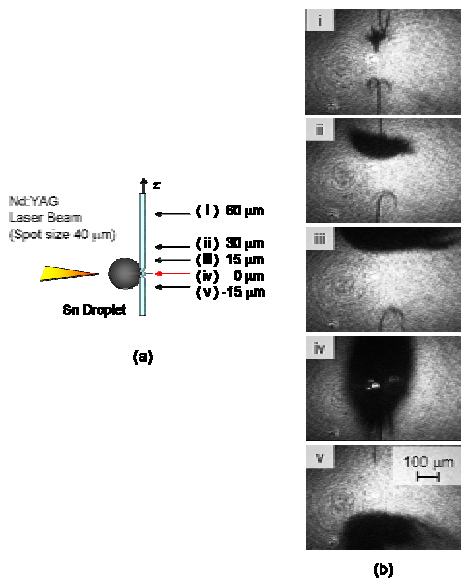


図6 (a)レーザー照射位置の概略図と(b)経過時間 300 ns におけるシャドウグラフ画像。

置のズレに対応して高密度粒子が上下方向へシフトしていることがわかる。また、図6 (b) ()ではレーザー光がもはやターゲットに照射されておらず、ファイバーのみが切れてターゲットはほとんど膨張されない結果となった。したがって、レーザー光の照射位置は高密度粒子の放出分布に大きく依存するため、ダブルパルス照射方式を利用した高繰り返し運転ではターゲットとレーザーの位置制御が重要な問題となることを示している。ビームスポットが大きければ多少の位置ズレは許容できるであろうが、ターゲットに照射されず通り抜ける光はターゲット膨張に寄与しない無駄な光となるためレーザー光から EUV 光への変換効率を低下させることとなる。プレパルスのエネルギー全てがターゲットに供給されることが理想であり、そのためにも位置制御が重要であることがわかった。

4.5. 液体ドロップレットターゲットからの中性原子放出特性

実用 EUV 光源では 10-100kHz のレーザー繰り返し運転を想定しているため、レーザー照射に合わせてターゲットを高速供給するた

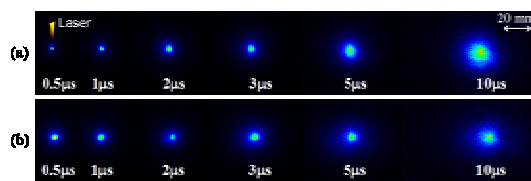


図7 ドロップレットターゲットから発生する中性原子の時間分解画像。(a)固体ドロップレット、(b)液体ドロップレット。

めに液体ドロップレットが有望視されている。そこで、固体と液体のドロップレットターゲットを用意し、それぞれのアブレーション挙動を計測した。図7 (a)(b)に固体ドロップレットと液体ドロップレットに対してレーザー照射した際に放出される中性原子の時間分解画像を示す。図からわかるように液体ドロップレットにおいても、固体ドロップレットと同様にプレパルスによって中性原子が全方位に放出されることを確認した。したがって、固体ドロップレットにおける挙動結果は、実用液体ドロップレットターゲットにおいても同様に適用されることがわかった。

4.6. ダブルパルス照射時のデブリ挙動

ダブルパルスの概念としては、プレパルスによってターゲットを膨張させ、メインパルスレーザーによって効率的に EUV 光を発生させるものであり、Nd:YAG レーザーをプレパルスに用いた場合、図3のようにターゲットが膨張することとなる。メインパルスには、これまでの研究で優位性が実証された CO₂ レーザーを用いることとした。メインパルス用の CO₂ レーザーは半値幅 50 ns のパルスの後に約 1 μs のテイルをもつ波形で、 1.6×10^9 W/cm² の出力にて照射した。プレパルス用の Nd:YAG レーザーと CO₂ レーザーのなす角度は 45 度の角度で照射され、CO₂ レーザーの光軸に垂直な方向からシャドウグラフを計測した。プレパルスとメインパルスのディレイは 800 ns とした。この時間は、プレパルスを照射されたドロップレットの粒子雲が CO₂ レーザーのビームスポットである約 500 μm 近くまで広がるのに要する時間として設定した。図8にダブルパルス照射時のシャドウグラフを示す。ディレイ 0 ns でプレパルスが画像左奥手から照射されたことによるプラズマ発光が確認され、ターゲットは膨張しながら後方へシフトしていることがわかる。ディレイ 800 ns においてメインパルスが照射され、膨張している粒子雲全体からプラズマ発光が確認された。その後、時間経過に伴って粒子雲が減少していることがわかる。したがって、ダブルパルス照射によってマイクロサイズのドロップレットを効率的にプラズマ化できる

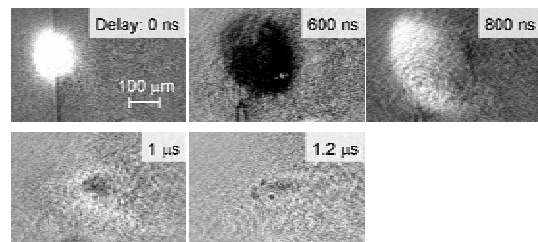


図8 ダブルパルス照射時のドロップレットターゲットの時間分解シャドウグラフ

可能性が示された。プレパルスとメインパルスのディレイやプレパルスの照射強度の最適化することでデブリの少ないEUV光源が期待できる。しかし、注意しなければならない点として、図4や図7に示されるような中性原子の放出がある。プレパルス照射後、中性原子は全方位に高速で飛散するため、ディレイ800 nsでメインパルスが照射された時点において放出された中性原子の一部は、メインパルスのスポットサイズ以上に広がっていることになる。したがって、ダブルパルス照射でも中性原子の一部は発生してしまうことになり、この中性原子の対策が必要となる。

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9件)

- ① D. Nakamura, T. Akiyama, K. Okazaki, A. Takahashi, T. Okada, “Ablation Dynamics of Tin Micro-Droplet Irradiated by Double Pulse Laser used for Extreme Ultraviolet Lithography Source”, Journal of Physics D: Applied Physics, 査読有, Vol.41, 245210 (2008)
- D. Nakamura, K. Tamaru, T. Akiyama, A. Takahashi, T. Okada, “Investigation of Debris Dynamics from Laser-Produced Tin Plasma for EUV Lithography Light Source”, Applied Physics A, 査読有, Vol.92, 767-772 (2008)

〔学会発表〕(計12件)

D. Nakamura, K. Okazaki, T. Akiyama, K. Toya, A. Takahashi, T. Okada, T. Yanagida, Y. Ueno, Y. Sasaki, T. Suganuma, M. Nakano, H. Komori, A. Sumitani, A. Endo, “Diagnostics of Ablation Dynamics of Tin micro-Droplet for EUV Lithography Light Source”, CLEO Pacific Rim 2009 (2009.9)

K. Okazaki, D. Nakamura, T. Akiyama, K. Toya, A. Takahashi, T. Okada, “Dynamics of debris from laser-irradiated Sn droplet for EUV lithography light source”, SPIE Photonics West (2009.1)

中村大輔, 秋山智哉, 岡崎功太, 高橋昭彦, 岡田龍雄, “ダブルパルス照射におけるスズドロップレットターゲットのアブレーション挙動計測”, 応用物理学会学術講演会 (2008.9)

〔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

中村 大輔 (NAKAMURA DAISUKE)
九州大学・システム情報科学研究院・助教
研究者番号：40444864