

平成21年 6月 1日現在

研究種目：基盤研究（C）  
 研究期間：2007～2008  
 課題番号：19560282  
 研究課題名（和文） 高速ガス流を利用した放電プラズマ光源用デブリシールド法の開発  
 研究課題名（英文） Development of High-speed Gas Flow Debris Shielding Technology for Discharge Produced Plasma Light Source

研究代表者  
 渡邊 正人（WATANABE MASATO）  
 東京工業大学・大学院総合理工学研究科・助教  
 研究者番号：20251663

## 研究成果の概要：

気体放電を用いたEUV光源の効果的なデブリシールド法として、超音速ノズルおよびディフューザから構成される超音速ガス流方式を提案し、その有用性を実験的に検証することを目的として研究を実施した。真空環境下での安定した超音速流の発生法と、ディフューザによる効率的なガス回収法を検討するために、レーザ誘起蛍光法によりカーテン流の可視化計測を実施した。また、レーザトリガ型放電電極の基礎実験を実施した。

## 交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	1,900,000	570,000	2,470,000
2008年度	1,600,000	480,000	2,080,000
年度			
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：電気電子工学 ・ 電力工学・電力変換・電気機器

キーワード：放電プラズマ，EUV，流体力学，デブリ

## 1. 研究開始当初の背景

近年の半導体の高集積化にともない、半導体製造プロセスにおける集積回路パターンの微細化が急速に進展している。このため、回路パターンの転写に使われる光リソグラフィ装置の光源の短波長化が急務となっている。特に、現在使用されている紫外光レーザを用いたリソグラフィ装置による基盤の線幅の加工は限界に近づいてきており、次世代のリソグラフィ装置用の光源開発に一刻の猶予もない。このような状況下、波長13～14nmのEUV光は、考えられている光源の

中でも最有力候補で、早期実用化に向けて、急ピッチで開発が進められている。

EUV光の発生源となるプラズマには、レーザ生成プラズマや放電生成プラズマが有力候補として研究が進められている。このうち放電生成プラズマは、電気エネルギーを直接プラズマに注入できるため、効率の観点で有利と考えられている。しかし、放電生成プラズマを用いたEUV光源では、高温のプラズマが電極および放電管壁に近接、あるいは接触しているため、放電とともに電極や放電管壁が溶融し、EUV光の放射にともなって

微粒子が飛散し、集光ミラーへ衝突しミラー表面での堆積や損傷が起こる。このため、飛散微粒子(デブリ)のシールド技術の開発が重要な研究課題となっている。

## 2. 研究の目的

EUV光源の効果的なデブリシールド法として、超音速ノズルおよびディフューザから構成される超音速ガス流方式を提案し、その有用性を実験的に検証することを研究目的とする。特に、真空環境下での安定した超音速流の発生法と、ディフューザによる効率的なガス回収法を、プラズマ工学と流体工学の観点から詳細に検討し、2年間の研究期間内でEUV光源への適用に向けた原理実証を目指す。

## 3. 研究の方法

(1) 超音速ガス流方式によるデブリシールド法の概略を図1に示す。放電管内のピンチプラズマから放射されたEUV光が集光ミラーへ伝播する途中に、ヘリウムガスによる超音速ガス流を発生させ、電極部からのデブリをシールドする。また、ディフューザによりヘリウムガスを回収し、放射光伝播部を高真空に保つ。

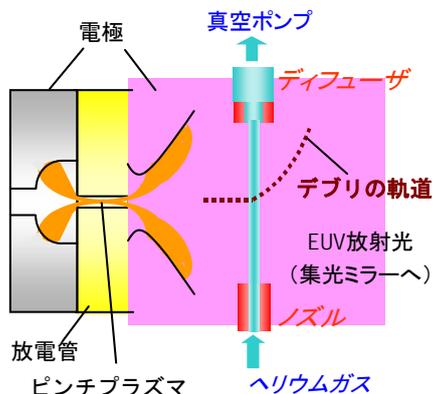


図1 超音速流によるデブリシールド法の概略

- (2) ノズルとディフューザで構成される超音速ガス流システムを真空容器内に装着し、安定な超音速ガス流が生成されていることを確認するために、超音速ガスの流れを可視化するため、超音速ガス流であるヘリウムガスを観測対象としたレーザー誘起蛍光法を適用する。観測ポイントとしては、
- ①ノズルからの流れが薄いシート状になっているか
  - ②ディフューザに入るまでノズル流が拡散していないか
  - ③放射光が通過する範囲内でノズル流が一

様であるかについて、ノズルの貯気槽圧やノズル形状を変えて観測し最適条件を決定する。

(3) デブリシールド法を適用するための放電光源として、レーザトリガ型放電光源を開発する。概略を図2に示す。電極間距離やレーザ照射強度を変えた場合のEUV光の放射特性を明らかにする。

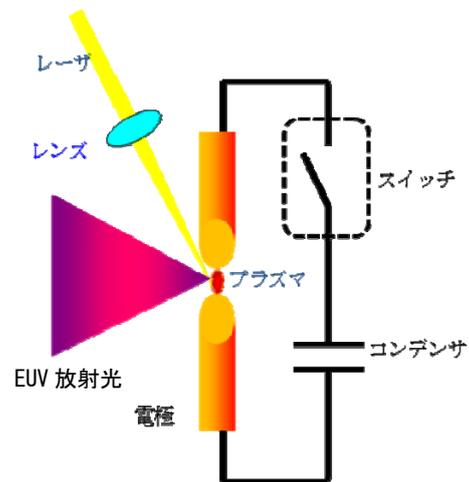


図2 レーザトリガ型放電電極の概略

## 4. 研究成果

(1) 東京工業大学・大学院総合理工学研究科・創造エネルギー専攻内に設置されている既存の高真空排気システムを付属する真空チャンバ内に、超音速ガス流システムを装着し、まず安定な超音速ガス流が生成されていることを確認するために、超音速ガスの流れをレーザー誘起蛍光法により観測した。レーザー誘起蛍光法のために、ヘリウムに一定濃度のアセトンを添加し、アセトンからの蛍光の観測を試みた。図3は、レーザー誘起蛍光法の計測系の概略図である。誘起用レーザーには

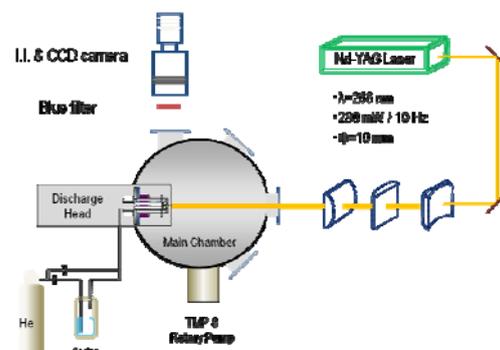


図3 LIF計測系概略図

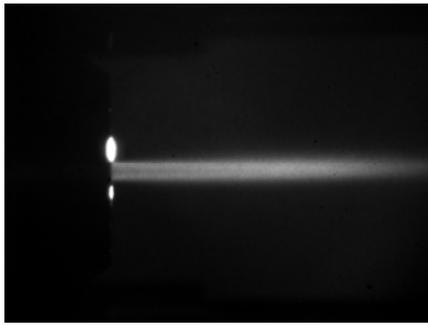


図4  $\phi 2\text{mm}$  の円管から噴出する He 流  
(流量 500sccm, Air)

Nd-YAG レーザ (Quanta System 社製・H700) の4倍高調波 (波長 266nm) を用いた。蛍光観測には、ブルーフィルタを介して高速カメラ (Andor 社製・DH734 型) にて撮影した。結果として、大気圧下では図4に示すようにシート状に噴出するヘリウム流の観測に成功した。しかしながら、真空下ではノズルから噴出直後に流れが拡散してしまい、シート状の流れを観測することができなかった。

(2) 超音速ノズルに対向した位置に単独の真空排気系を持つディフューザを設置しノズルからヘリウム流を噴出させたときの真空チャンバ内の圧力値の変動を計測した。ディフューザによるヘリウムガスの回収を期待したが、ディフューザの形状によらずノズルから噴出直後にヘリウム流が拡散してしまい、ディフューザの効果を得られなかった。

(3) これは、今回用いた真空排気系の排気能力の限界のため必要量のヘリウムを流せなかったことが一因であるので、より排気能力の高い真空ポンプを設置し排気系を再構築する必要がある。

(4) ヘリウム流の生成に成功した後は、長時間連続運転するために超音速ガス流を循環型にすることが必須である。構造としては、図5に示すようにディフューザで回収したガスを、再度圧縮機で昇圧し、ノズルの貯気槽に導くことになる。このプロセスの実現のためには、ノズル/ディフューザ部での超音速ガス流の流量、圧力変動を計測し、循環用システム的设计を行う必要がある。

(5) デブリシールド法を適用するための放電光源として、レーザトリガ型放電光源を開発した。概略は図2に示した通りである。充電電圧を 20kV、電極間距離を 6mm、レーザ照射強度を 52mJ とし、陰極形状を変えた場合について EUV 放射光を計測した。なお、錫は陽極に埋め込み、錫表面にトリガ用のレーザ

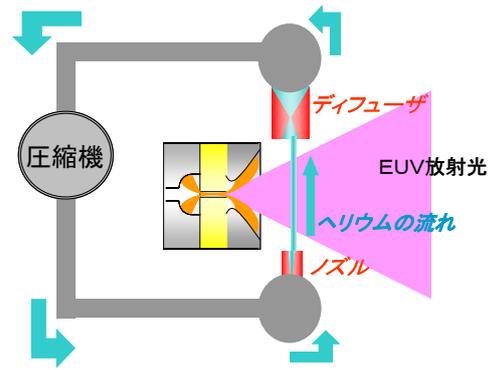


図5 ヘリウム流の循環

光を集光して照射した。図6は、陰極が(a)半球状および(b)鋭角状の場合の計測結果である。EUV放射は、半球状の陰極では観測されず、鋭角状にしたときのみ観測された。これは、陰極形状を鋭角状にすることで、放電電流がごく狭い領域に流れ、結果としてレーザ照射後に生成された錫プラズマが EUV 光の放射に必要な程度まで高密度になるためと考えられる。

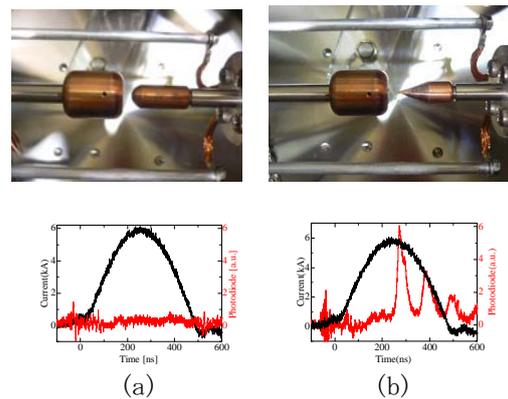


図6 EUV放射の計測

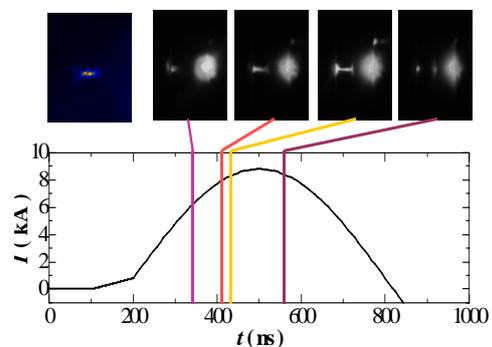


図7 プラズマからの発光の時間分解計測

(6) 高速度カメラ (Hadland 社製・Imacon468, 露光時間 10ns) を用いて, ピンチ過程のプラズマからの発光の時間分解写真を撮影した。結果を対応する電流変化とともに図 7 に示す。なお, 電極間距離は 8mm, 照射レーザー強度は 104mJ である。レーザー照射後 400ns 後に, 電極間でプラズマがピンチしている様子が観測された。これは, EUV 放射が発生している時刻と一致している。これより電極間でのプラズマピンチの結果として EUV 放射が発生していることが確認できる。

## 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 2 件)

① M. Watanabe, J. Yamada, Q. Zhu, E. Hotta, Development of Extreme Ultraviolet Radiation Source Using Laser Triggered Vacuum Spark Discharge Plasma, DENSE Z-PINCHES, Vol. 1088, pp.188-191, 2009, 査読無

② M. Watanabe, N. Kishi, N. Iizuka, T. Orishimo, J. Fei, A. Okino, E. Hotta, Optical Observation of Gas Jet Z-pinch Discharge Produced Extreme Ultraviolet Light Source, Proc. of 2007 IEEE Pulsed Power Conf., pp.1679-1682, 2007, 査読無.

[学会発表] (計 5 件)

① M. Watanabe, J. Yamada, Q. Zhu, E. Hotta, Development of Extreme Ultraviolet Radiation Source Using Laser Triggered Vacuum Spark Discharge Plasma, American Institute of Physics, 2008 年 8 月 20 日, 米国・バージニア州

② M. Watanabe, N. Kishi, J. Yamada, O. Sakuchi, J. Fei, Q. Zhu, A. Okino, E. Hotta, Experimental Study of Xenon and Tin Discharge Produced Plasma EUV Light Source, The 35th International Conference on Plasma Science, 2008 年 6 月 16 日, ドイツ・カールスルーエ市

③ 渡辺正人, 岸望, 山田淳三郎, 堀田栄喜, レーザトリガ型 EUV 放電光源の開発, 平成 20 年電気学会全国大会, 2008 年 3 月 20 日, 福岡県福岡市

④ Masato Watanabe, Nozomu Kishi, Eiki Hotta, Characteristics of extreme ultraviolet radiation from laser triggered vacuum spark discharge plasma,

2007 年 11 月 14 日, 米国・フロリダ州

⑤ M. Watanabe, N. Kishi, N. Iizuka, T. Orishimo, J. Fei, A. Okino, E. Hotta, Optical Observation of Gas Jet Z-pinch Discharge Produced Extreme Ultraviolet Light Source, Pulsed Power Plasma Science 2007, 2007 年 6 月 22 日, 米国・ニューメキシコ州

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

渡辺 正人 (WATANABE MASATO)

東京工業大学・大学院総合理工学研究科・助教

研究者番号：20251663

### (2) 研究分担者

堀田 栄喜 (HOTTA EIKI)

東京工業大学・大学院総合理工学研究科・教授

研究者番号：70114890

### (3) 連携研究者

なし