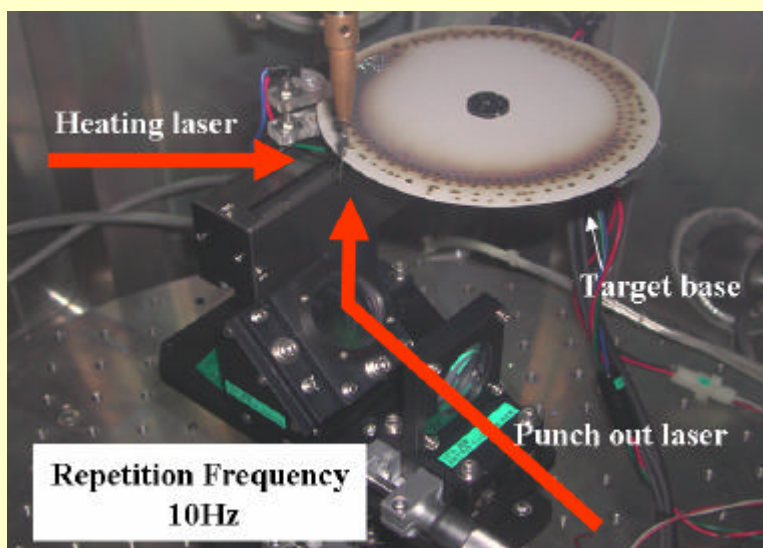


スズパンチアウト法を用いた極端紫外（EUV）光源開発

レーザー加工計測研究チーム

山浦道照、島田義則



パンチアウト法によるスズ円盤ターゲット連続照射実験装置



ディスク状パンチアウトターゲット基板およびパンチアウト後の螺旋状ショット

研究の目的： 当研究所は、スズターゲットからの低デブリ化および高速供給方式を目指した“パンチアウト法”を提案している。本研究の目的は、スズターゲットを用いたパンチアウト法による EUV 光源開発の実用化への可能性を評価することである。

今後の応用・発展： 炭酸ガスレーザーを用いたパンチアウト後のスズプラズマからの EUV 放射光の高効率化を目指す。

連絡先： TEL 06-6879-8737 FAX 06-6878-1568

E-mail myamaura@ile.osaka-u.ac.jp

スズパンチアウト法を用いた極端紫外 (EUV) 光源開発

レーザー加工計測研究チーム

山浦 道照、島田 義則

1. はじめに

近年の高度情報化社会に伴い、パソコン、携帯電話、家庭内電気製品などに多数の半導体集積回路が組み込まれている。これらの集積回路の更なる高性能化を目指して、半導体チップ上の線幅は、ムーアの法則に従い微細化されている。波長 13.5 nm 極端紫外光 (以下、EUV) リソグラフィは、次世代リソグラフィとして、線幅 50 nm 以下の超微細加工可能な技術である。2010 年の実用化を目指して、欧米の研究機関を中心として、光源、マスク、レジスト、集光系ミラーなどの部門別に精力的に研究開発されている。日本でも平成 15 年度から 19 年度までの 5 年間、文部科学省のリーディングプロジェクトの一環として、大阪大学レーザーエネルギー学研究中心を中心に EUV リソグラフィ用光源開発の研究が始まった^{1,2}。

EUV 光源に要求される出力は、中間集光点 (2 次光源) で 115 W である。EUV 光は、ほとんどの物質によって激しく吸収されるので、透過型ミラーは使用できず、すべて反射型ミラーを用いる。Mo/Si 多層膜反射型ミラーは、13.5 nm の 2% バンド幅内で反射率 65~70% を有する。しかし、この反射率の値は、通常のミラーのそれと比較して低く、捕集立体角の制限、EUV 光の透過率など併せて考慮すると、多層膜ミラーで反射、集光する前の 1 次光源での高出力化、EUV 光変換効率の向上が必要不可欠な課題である。

スズ固体をターゲットにして、このターゲットにレーザー光を照射すると、スズプラズマが生成される。スズプラズマの発光は、13.5 nm 近傍に鋭いピーク値をもち、高い EUV 光変換効率を得られることは明らかとなっていた。しかし、高い変換効率を得るための最適なレーザー条件 (照射強度、波長など) は明らかになっておらず、プロジェクト開始時は、変換効率向上のための詳細な物理は明らかとなっていなかった。

当研究所は大阪大学レーザーエネルギー学研究中心との共同研究において、EUV 変換効率向上のための物理現象を明らかにして、スズプラズマを用いた世界最高記録 3% の EUV 光変換効率を平成 15 年度に達成した³。さらに、スズプラズマからの変換効率向上のための最適レーザー照射強度、レーザー波長に関する実験データベース^{4,5}を平成 16 年度に構築、EUV リソグラフィ関連企業へ提供した。

EUV 光源には、高効率、クリーンかつ高速供給可能なターゲットが必要不可欠である。スズターゲットを用いると他の EUV 光を放射するターゲット (リチウム、キセノン) と比べて取り扱いが容易かつ高効率は得やすいが、固体であり大量のデブリが発生する。そのため、デブリ抑制、さらにターゲットの高速供給化が大きな課題である。

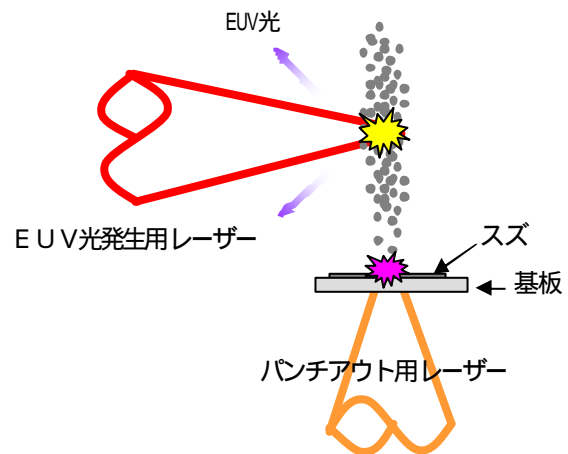


図1 パンチアウト法イメージ図

我々は、デブリ抑制に加え、高速供給可能な新手法としてパンチアウト方式を考案した⁶。図1にその概念図を示す。パンチアウト法とは、ガラスなどの透明な基板の上にスズもしくは低密度フォームなどを薄くコートしたターゲットを用いて、基板側からレーザー光を

照射して、基板とスズの境界層にプラズマを生成させる。生成されたプラズマの膨張と基板との反作用によって、コート層のみを高速で供給する方式である。フォーム層の密度やコート厚を制御することにより、最少質量ターゲットとなる。

平成17年度は、パンチアウト法によって、スズターゲットからEUV光を取り出せることを世界で初めて実証した⁷。平成18年度は、スズパンチアウト法を用いたEUV光源の実用化を目指して、スズパンチアウト法の基礎特性(飛翔状態、速度、距離、密度、EUV光放射)を、レーザー光散乱計測、EUV光プローブ計測よりそれぞれ詳細に評価したので報告する。また、パンチアウト法によるスズ回転ディスクターゲットを用いた連続供給の評価も行ったので併せて報告する。

2. レーザー光散乱計測によるパンチアウトターゲットの飛翔状態観測

2-1 実験装置図および実験方法

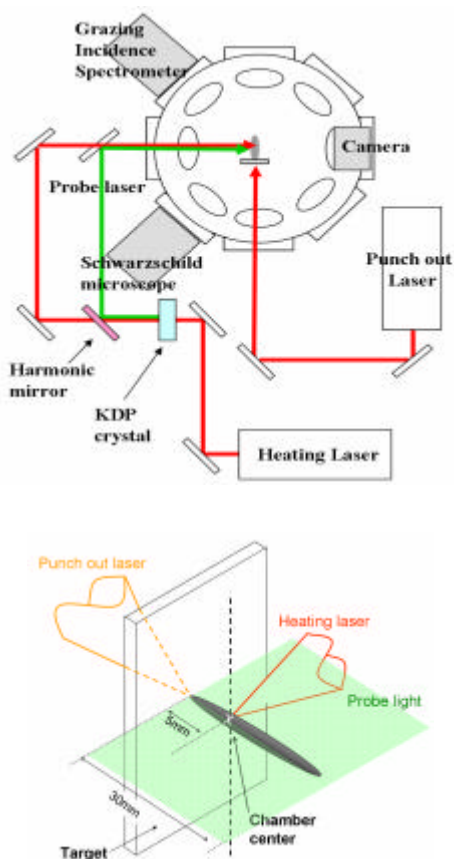


図2 実験装置図(上)およびターゲットに対する散乱用プローブ光の入射法(下)

図2に実験装置図およびターゲットに対する散乱用プローブ光の入射法を示す。パンチアウト用ターゲットは、ガラス基板にスズを蒸着した薄膜(厚み13 μm)および、スズドットターゲット(ドット径500-600 μm , 厚み2 μm ,もしくは9 μm)を用いた。

パンチアウト用のレーザーは、Nd:YAGレーザー(波長1064nm,パルス幅13ns)を用いた。EUV光発生用レーザーは、Nd:YAGレーザー(波長1064nm,パルス幅9ns)を用いた。レーザー光散乱用プローブ光は、Nd:YAGレーザーの光(1064nm)をKDP結晶で波長変換した2倍高調波光(波長532nm)を用いた。プローブ光は、円筒レンズ($f=150\text{mm}$)を用いて、図2(下)に示すように、ターゲットの端面から、30mmの領域にシート状に集光照射した。パンチアウト法により、飛翔したターゲットがプローブ光によって散乱され、その時の散乱光像が集光レンズ($f=200\text{mm}$)を介してデジタルカメラに記録される。この時の時間分解能は、9ns、空間分解能は20 μm である。パンチアウト後のターゲット飛翔密度は、EUV光をプローブ光として、シュバルツシルト型顕微鏡および背面照射型CCDカメラを用いて計測した。EUV光放射スペクトルは、斜入射分光器および背面照射型CCDカメラで記録した。

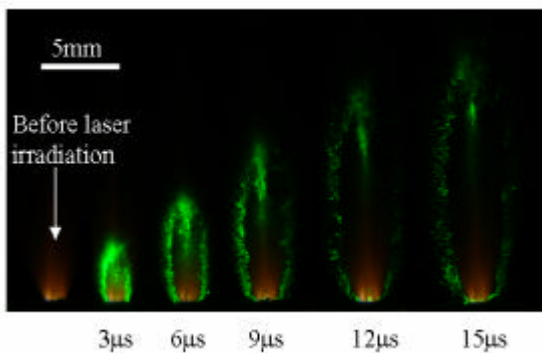
2-2 実験結果および考察

図3(a)にスズ薄膜13 μm の光散乱画像を示す。パンチアウト用レーザーは、画像の下から上に向かって照射した。レーザー光散乱用プローブ光は、画像の左側から右側に向かって照射した。横軸は、パンチアウト用レーザー照射からEUV光発生用レーザーの照射時間差である。パンチアウトされたスズ薄膜ターゲットは、パンチアウト用レーザーの光軸に沿ってジェット状に飛翔されている像が観測された。また、パンチアウト用レーザーの光軸に対して、時間の経過と共に横方向に大きく広がる。これは、パンチアウト用レーザーのビーム強度パターンがガウシアン分布であるため、レーザー照射された薄膜の中心部は温度が高く、生成さ

れた粒子の速度も速くなり、中心部ではジェット状に飛翔したと考えられる。周辺部は、中心部と比べてレーザー強度が弱く、薄膜の温度が低いいため、生成された粒子の速度も遅くなり、横方向に大きな拡がりを見せたと考えられる。

図3 (b)にスズドット(厚み9 μm)のレーザー光散乱画像を示す。その結果、パンチアウトされたスズドットターゲットは、ターゲット端面から約20mmに亘りジェット状に飛翔している。時間の経過と共に横方向の拡がりも抑制されている。これは、ドットターゲットの径とパンチアウト用のレーザースポット径をほぼ同等、もしくはそれ以上にしたので、レーザー照射されたスズドットが一様な温度となり、生成された粒子の速度も等しくなったため、横方向の拡がりが抑制されたジェット状の飛翔像が観測されたと考えられる。なお、飛翔速度は、スズ薄膜、ドットターゲット共に、高速供給に必要とされる飛翔速度50 m/sよりも速く、0.5~1 km/sであった。

(a)



(b)

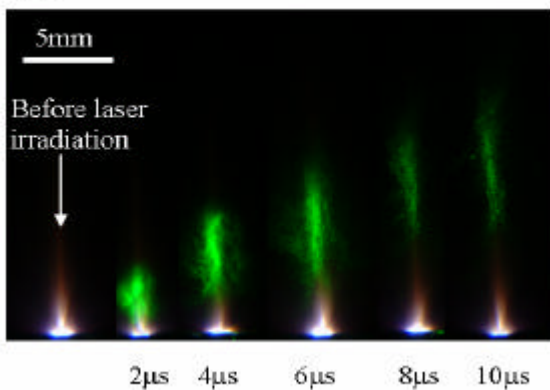


図3 レーザー光散乱画像 (a)スズ薄膜ターゲット(厚み13 μm) (b)スズドットターゲット(厚み9 μm)

3. パンチアウト後の飛翔ターゲットの面密度計測

3-1 実験計測用装置図および実験方法

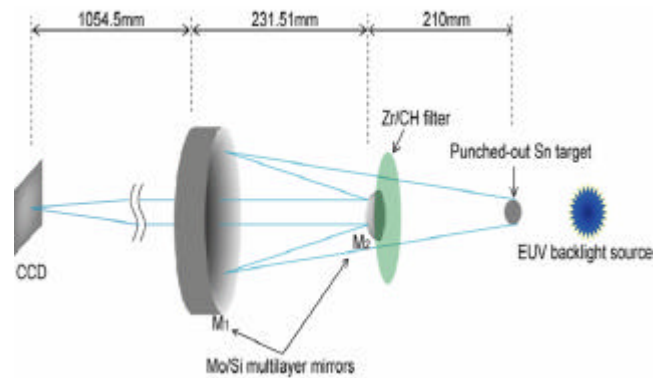


図4 シュバルツシルト型顕微鏡構成図⁸

EUV光をプローブ光として、シュバルツシルト型顕微鏡および背面照射型CCDカメラを用いて、パンチアウト後のターゲット飛翔密度を評価した。EUV光は、スズ固体ターゲットにNd:YAGレーザーを照射することで発生させ、この光をプローブ光とした。

図4にシュバルツシルト型顕微鏡の構成図を示す。シュバルツシルト型顕微鏡は、2枚の同心球面鏡 M_1, M_2 からなる直入射型光学系である。 M_1 は、凹面鏡、 M_2 は凸面鏡で構成され、両ミラー共にMo/Si多層膜が蒸着されている。Zr/CHフィルターを可視光除去用に取り付けた。空間分解能は、試験用メッシュ電極の影像をCCDカメラに結像させ、EUV強度の25-75%の立ち上がりで評価すると約18 μm である。

EUVバックライト法は、ターゲット(飛翔物)の透過率を計測することで、ターゲットの面密度が算出できる。式(1)にその関係式を示す。

$$T = \exp(-\mu L) \quad (1)$$

ここで、 T はEUV光の透過率、 m は質量吸収係数、 r は線密度、 L はターゲットの厚みである。スズの質量吸収係数は、EUVに対する温度依存性が弱いので、常温固体スズの値を用いた。

3-2 実験結果および考察

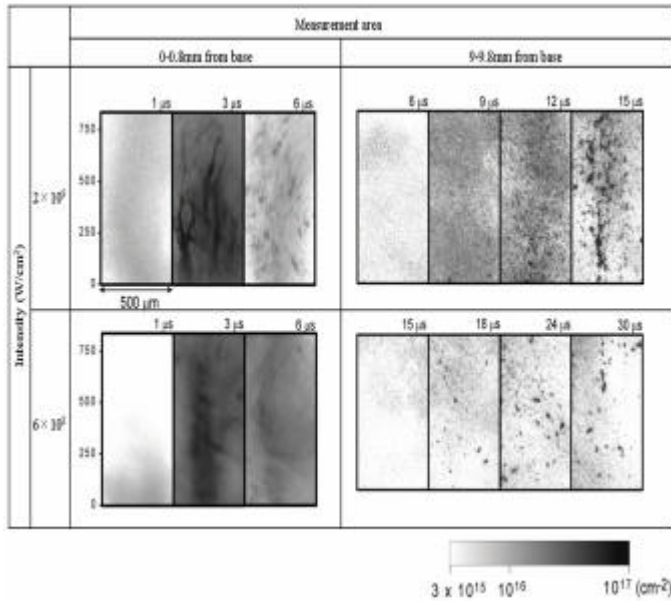


図5 パンチアウト後のスズターゲットの密度分布

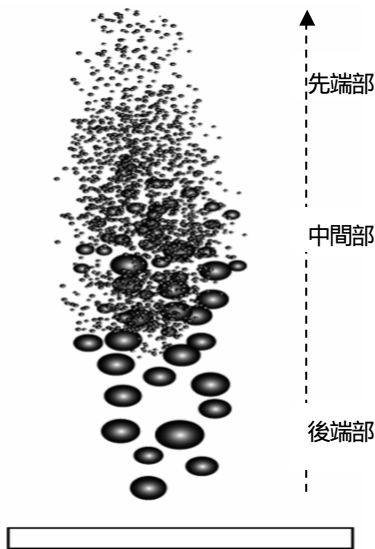


図6 パンチアウト後のスズターゲット飛翔モデル

図5にパンチアウト後のスズターゲットの密度分布を示す。ターゲットはスズドット(厚み9 μm)を用いた。横軸上側の時間は、パンチアウト用レーザーの照射とEUVプローブ光との時間差である。パンチアウト用レーザーの照射強度 $6 \times 10^8 \text{ W/cm}^2$ 、時間差15 μs 、ターゲット基板端面から9-9.8 mmの範囲では、観測領域の大部分がレーザー照射強度 $2 \times 10^9 \text{ W/cm}^2$ と比較して低密度であり、15 μs 以降、粒子が散々と飛翔して

る状態が観測された。一方、パンチアウト用レーザーの照射強度 $2 \times 10^9 \text{ W/cm}^2$ 、時間差3 μs 、ターゲット基板端面から0-0.8 mmの範囲では、ターゲットがフィラメント状に飛翔している。基板端面9-9.8 mmの範囲では、時間の経過と共に粒の大きな粒子が観測された。時間差12 μs の密度分布から、密度の高い領域での厚みは400 μm 程度であり、飛翔ターゲットを円柱と仮定すると、その密度は約 $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ と算出された。

図5の結果を基にして、図6にパンチアウト後のスズターゲットの飛翔モデルイメージ図を示す。飛翔ターゲット先端部は、密度の薄いガス状態、中間部は、比較的均一な密度状態、後端部は、大きな粒子状態で飛翔していると考えられる。このため、パンチアウト法により、効率良くEUV光を取り出すためには、比較的均一な密度状態である中間部に、EUV光発生用レーザーを照射することである。

4. パンチアウト法を用いたEUV光発生

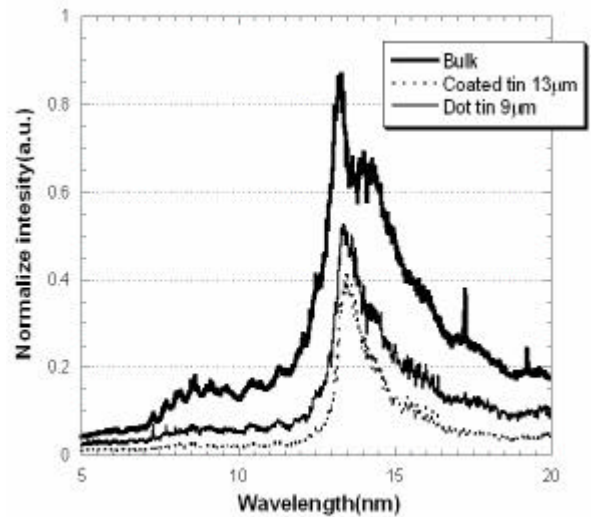


図7 異なるスズターゲットからのEUV光放射スペクトルの比較

パンチアウト後の飛翔スズターゲットに、Nd:YAGレーザー(波長1064 nm, パルス幅9 ns, レーザースポット径300 μm ,)を $4 \times 10^{10} \text{ W/cm}^2$ の強度で照射し、パンチアウト後のスズターゲットEUV放射光スペクトルの評価を行った。図7にその放射光スペクトルを示す。使

用したターゲットは、スズ薄膜ターゲット（厚さ 13 μm ）、スズドットターゲット（厚さ 9 μm ）、比較のためにスズ固体（バルク）ターゲットを用いた。レーザー光は、ターゲット端面から 5 mm の位置に照射した。縦軸は、レーザーのエネルギー値で規格化した値である。スズバルクターゲットの EUV 放射量を 100% に対して、スズドットターゲットで最大 70%、スズ薄膜ターゲットで最大 60% であった。パンチアウト後のスズ薄膜、もしくはドットターゲット共に、EUV 光放射スペクトル強度は、スズバルクターゲットと比較して低い値であった。

シュバルツシルト型顕微鏡を用いた計測から、パンチアウト後の 10 mm の位置でのスズ密度は、約 10^{18}cm^{-3} であり、5 mm の位置でのスズ密度は約 10^{19}cm^{-3} と算出される。EUV 光発生用レーザーである Nd:YAG レーザー（ $\lambda = 1064 \text{nm}$ ）は、遮断密度が 10^{21}cm^{-3} 程度である。このため、パンチアウト法によって供給されたスズの密度が Nd:YAG レーザーの遮断密度より大幅に低密度化されたことで、Nd:YAG レーザーのエネルギーが十分スズターゲットに吸収されず、エネルギー損失が生じた。その結果、EUV 光変換効率は、スズバルクターゲットと比較して低下したと考えられる。

今後、パンチアウト法によって供給される低密度スズターゲットの EUV 光変換効率の向上には、遮断密度が 10^{19}cm^{-3} 程度の炭酸ガスレーザー（ $\lambda = 10.6 \mu\text{m}$ ）を用いることが有望であると予測される。

5. パンチアウト法を用いた連続供給スズターゲットからの EUV 光放射特性

パンチアウトターゲットを高速で供給するための基礎実験として、EUV 光発生用レーザーを 10 Hz で動作させ、取り出した EUV 光を評価した。ターゲット基板の機構は、DC モーターとそのモーターを直線状に駆動させるリニアモーターの 2 軸駆動とした。EUV 光発生用レーザーは、ターゲット基板から 5 mm の位置にパンチアウト用レーザーと同期させ、繰り返し周波数 10 Hz で照射した。ターゲットは、ガラス DISK 基板にスズ薄

膜（厚み = 10 μm ）を蒸着した 2 層ターゲットを用いた。スズプラズマの発光は、ビデオカメラで撮影記録した。EUV 放射光スペクトルは斜入射分光器および背面照射型 CCD カメラで観測した。図 8 にスズプラズマの可視発光画像を示す。この画像は、ビデオカメラで撮影した動画中の一枚である。EUV 光発生レーザー 10 Hz 照射の間、図 8 と同様の錫プラズマ発光が観測できた。このため、パンチアウト法によるスズターゲットは安定に供給されていると考えられる。図 9 に EUV 光放射スペクトルを示す。この EUV 光放射スペクトルは、EUV 光発生レーザー 10 Hz 照射時の中の 1 パルスで発生取り出したものである。10 Hz 連続動作時でも、EUV 光放射スペクトルは単発動作時と同様、13.5 nm 近傍にピーク値をもつスズプラズマの典型的な EUV 光放射スペクトルが得られた。パンチアウト法により、EUV 光発生用レーザー 10 Hz 動作で安定にターゲットが供給できることを実証した。

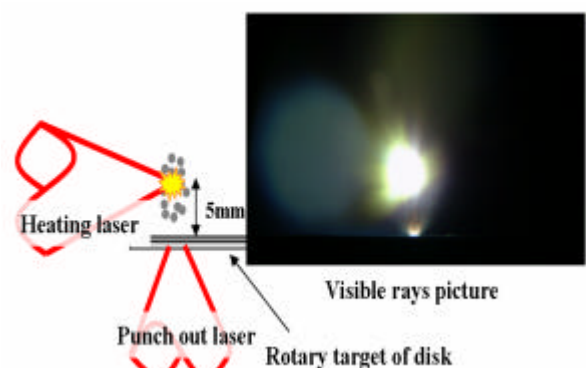


図 8 パンチアウト後のスズプラズマ可視発光画像

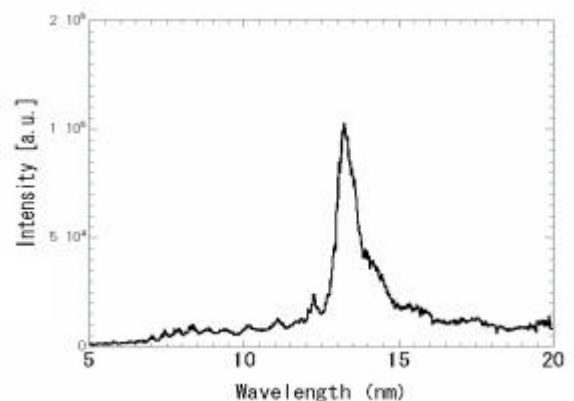


図 9 10 Hz 連続供給時のスズターゲットからの EUV 光放射スペクトル

6. まとめ

スズパンチアウト法を用いた EUV 光源開発実用化への可能性を評価する目的で、パンチアウト法の基礎特性を評価した。また、スズ回転円盤ターゲットを用いたパンチアウト法による連続供給の評価も行った。その結果以下のことが明らかとなった。

レーザー光散乱計測から、パンチアウト後、スズ薄膜ターゲットの飛翔像は、横方向に大きく拡がりながら飛翔するが、スズドットターゲットの飛翔像は、横方向の拡がり方が抑制され、ジェット状に飛翔することを観測した。飛翔速度は、スズ薄膜、ドットターゲット共に、高速供給に必要とされる飛翔速度 50 m/s よりも速く、0.5~1 km/s であった。

EUV 光プローブ計測より、パンチアウト後、飛翔したスズドットターゲット (厚さ 9 μm) の基板端面から 9-9.8 mm の範囲での密度は、約 $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ と算出された。この時、パンチアウト用レーザーの照射強度 $2 \times 10^9 \text{ W/cm}^2$ 、時間差 1.2 μs である。

EUV 発生用レーザーを照射して、パンチアウト後のスズターゲットの EUV 光放射スペクトルを評価した。スズバルクターゲットの EUV 放射量を 100% に対して、スズドットターゲットで最大 70%、スズ薄膜ターゲットで最大 60% であった。

パンチアウトターゲットを高速で供給するための基礎実験として、EUV 光発生用レーザーを 10 Hz で動作させ、発生した EUV 光を評価した。その結果、10 Hz 連続動作時でも、EUV 光放射スペクトルは単発動作と同様、13.5 nm 近傍にピーク値をもつスズプラズマの典型的な EUV 光放射スペクトルが得られた。ゆえに、パンチアウト法の寄与により、EUV 光発生用レーザー 10 Hz 動作に対して安定にターゲットが供給できることを実証した。

謝辞

本研究は、文部科学省リーディングプロジェクト「極端紫外 (EUV) 光源開発等の先進半導体製造技術の実用化」のもと、大阪大学レーザーエネルギー学研究中心との共同研究である。本研究の遂行にあたり、多大な協力をして頂いた大阪大学工学研究科博士前期課程 2 年、枇榔智也氏、近畿大学理工学部 4 年、前田真佑氏に感謝する。

参考文献

- [1] 村上、岡崎 プラズマ・核融合学会誌 Vol.79 No.3 222(2003)
- [2] 岡崎信次 レーザー研究 Vol.32 No.12 745 (2004)
- [3] 西村他 プラズマ・核融合学会誌 Vol.80 No.4 325 (2004)
- [4] M.Yamaura, et al Proceedings. of SPIE **5448** 1159 (2004) (invited paper)
- [5] M.Yamaura, et al Appl. Phys. Lett. **86** 181107 (2005)
- [6] 内田他 「X線発生方法、X線発生装置」特許出願 2004-267078
- [7] 藤岡他 「次世代リソグラフィ光源としての最少質量 EUV 放射プラズマの開発」プラズマ・核融合学会誌 Vol.82 609 (2006)
- [8] Y.Tao, et al Rev.Sci.Instrum **75**, 5173 (2004)