

6.7 極端紫外光源の開発

(1) 研究の背景と目的

半導体デバイスの微細化進展に伴ってLSI製造プロセス中のリソグラフィ用光源は、可視光領域から水銀ランプのg線(波長: $\lambda=436\text{nm}$)、I線($\lambda=365\text{nm}$)を経て、KrFエキシマレーザ($\lambda=248\text{nm}$)、ArFレーザ($\lambda=193\text{nm}$)と、より短い波長へ推移してきた。ITRS (International technology roadmap for semiconductor)によれば、2010年に hp (half pitch)回路線幅45nmのLSIを量産可能なリソグラフィ技術の開発が求められている。その候補としてF₂レーザ(波長: $\lambda=157\text{nm}$)やEPL(Electron projection lithography) が研究されてきたが、最近、ArFエキシマレーザの液浸(Immersion) 露光により hp 65nmの解像度が達成され、次世代の hp 45nmノードへの適用が有力視されている。

しかし、液浸露光技術を駆使しても hp 45nmが限界であり、次々世代の量産リソグラフィ工程では、さらに短い波長の極端紫外(EUV: Extreme ultra-violet)光の利用が最有力候補とされ、現在、その実用化研究が活発に実施されている。すなわち、回路線幅が hp 45nm以細(32nm等)の半導体製造プロセスにおいては、従来の微細化技術の限界を打破するために、ArFエキシマレーザの1/10以下の波長である13.5nmのEUV光を利用した露光技術の開発が切望されている。波長13.5nmのEUV光を生成する手段としては、パルスレーザ照射や放電、あるいは両者の複合によってターゲットをプラズマ化することにより、極端紫外(EUV)光を得る方法が最有力である。

EUVリソグラフィは従来のレンズを用いた露光機とは異なり、EUV光を透過する材料がないことから光学系とマスクは全て反射型となる。EUV光源、露光光学系、マスク、レジスト、および、ステージなどEUV露光機の構成要素全てが大気による吸収を避けるため、真空チャンバー内に設置される。EUV光源の開発は、露光システム全体を考えながら進められており、様々なEUV光発生方法が提案されてきた。しかし、EUVリソグラフィ用の実用光源において必要な出力は、表1のとおり、中間集光点において115W以上とされているが、現状はそれより一桁小さい出力でしかEUV光が発生できていない。さらに、EUV光発生時にターゲットからの飛散粒子による光学系の汚染が大きな課題となっている。固体ターゲットを用いる場合、飛散粒子は主にプラズマが冷却されて再凝固した固体粒子であり、その他のターゲットでは、イオン、中性原子、クラスター、周辺機器からのスパッター粒子などの飛散粒子が問題となる。これらは総称して「デブリ」と呼ばれている。

本研究は、より高効率なEUV光の生成と、同時に、光学系汚染の原因となるデブリの低減を図る新しい手法のEUV光源の開発を目的としている。具体的には、固体の錫(Sn) ターゲットの貫通孔内に高強度ナノ秒レーザを集光照射して生成したプラズマへ、さらにパルスレーザのパワーを注入し続けることで高温のプラズマに励起し、放射されるEUV光を貫通孔を通して後方から取り出すことにより、クリーンで高輝度な光源の研究開発を行った。

表6.7.1 次々世代の量産リソグラフィ用EUV光源への要求仕様 (抜粋)

項目	要求仕様
中心波長	13.5nm
EUV出力(中間集光点, 2%バンド幅)	115W以上
繰り返し周波数	7kHz以上
エタンデュ	3.3mm ² str以下

(2) 円錐貫通孔ターゲットによるレーザープラズマ生成とEUV発光の時間分解計測 [6.7-1,2]

本研究で用いる錫(Sn)は、13.5nmに強い発光スペクトルのピークを示す材料である。最初に円錐貫通孔を持つSnターゲット構造を提案し、パルスレーザーを円錐孔ターゲットに照射することによるアブレーションで中心軸に集束して生成する高密度プラズマからのEUV発光強度の時間変化を測定した。その結果、円錐孔ターゲットは平板に比べて発光が強くなることが分かった。さらに、貫通孔出口からターゲット後方へ放射される強度の角度分布を計測し、EUV変換効率を評価してきた。本節では、円錐貫通孔中心軸に集束した高温・高密度プラズマからのEUVを次々世代の半導体リソグラフィ用光源として利用するため、貫通孔ターゲットに繰り返しレーザー照射を試み、計測されたEUV発光強度から光源特性を評価した結果について述べる。

図6.7.1 (a)に示すとおり、プラズマ励起用パルスレーザーには、波長532nm、エネルギー180mJ/pulse、半値幅4nsのNd:YAG(Continuum Surelite III)2倍高調波を用いた。この波長532nmを選択的に反射する多層膜ミラーにより真空チャンバーに入射させ、レンズで200 μ m径に集光照射してレーザープラズマを生成させた。真空チャンバー中心に3°傾けて設置したターゲットには、図6.7.1(b)のように、厚み1.2mm、頂角45°で裏面に直径90 μ mの貫通孔を持つAl合金板の孔表面を蓋するようSn薄膜をスライドガラスにより保持してパルスレーザーを照射し、円錐孔壁面にSnをデポジションした。図6.7.1 (c)のデポジション前後の観察結果からAl板厚の約半分(0.5mm)の円錐壁面にSnがほぼ一様にデポジションした。この錫(Sn)ターゲット構造によるレーザー誘起プラズマの状態を、図6.7.1 (a)に示した高速ストリークカメラにより時間空間分解計測した。さらにアブレーションで生成したブルームが円錐中心軸の前方に集束して運動することから、固体ターゲットを用いたEUV光源で問題となるデブリ飛散の少ない円錐孔後方へ放射されるEUV強度を図6.7.1 (a) の真空チャンバー中に設置した検出器で評価した。

図6.7.2(a)にEUV検出器の構造を示す。レーザープラズマ光源からはEUVの他、X線・可視光など広範囲な放射が起こる。波長12~15nmのEUVを計測するため、①AuミラーでEUVと可視光を反射させると共にX線を透過して除き、②図6.7.2 (b)のように13.5nmの透過率が60%のZrフィルタ(膜厚150nm)により可視光をカット、③図6.7.2 (c)に示す特性を持つMo/Si多層膜付Siフォトダイオードで13.5nm近傍のEUVを検出した。

図6.7.3 (a)に作製した円錐孔Snターゲットの貫通孔後方180°に設置したEUV検出器のフォトダイオードで計測したパルスレーザー繰り返し照射毎の出力結果を示した。図6.7.3 (b)は発生したEUV強度に比例するフォトダイオード出力の時間積分値をレーザー照射の繰り返し回数に対して整理した結果である。

初期は照射回数が増す毎にEUV発光強度が増加し、6回目以降はほぼ一定となった。繰り返し照射実験後、光学顕微鏡により貫通孔を確認したところ、貫通孔径が図6.7.4 (a)の90 μ mから図6.7.4 (b)に示したように約2倍に広がっていた。

図6.7.5に繰り返し照射で孔径が大きくなったターゲットに対してプラズマの可視発光を貫通孔前方から高速ストリークカメラで撮影した結果を示した。右側の拡大した図からプラズマがレーザー照射後4nsで孔中心に到達していることが分かる。

以上の結果から、貫通孔径が小さい時にはプラズマが中心軸上で早期に衝突して、密度が高くなり過ぎるのに対して、繰り返し照射で孔径が大きくなると最適な密度に近づいて、ターゲット後方で計測さ

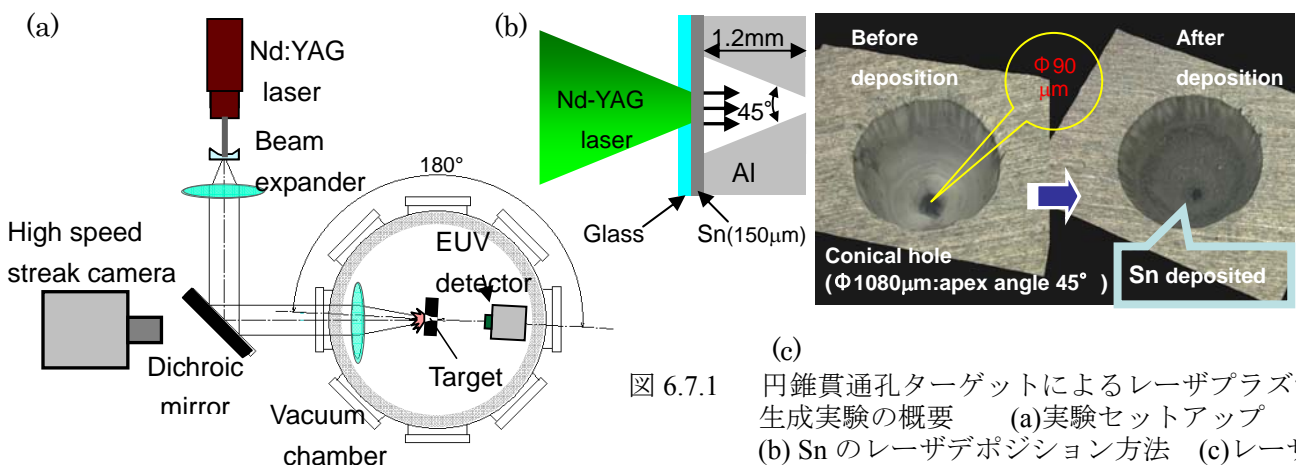


図 6.7.1 円錐貫通孔ターゲットによるレーザープラズマ生成実験の概要 (a)実験セットアップ (b) Sn のレーザーデポジション方法 (c)レーザーデポジション前後のデジタル顕微鏡観察結果

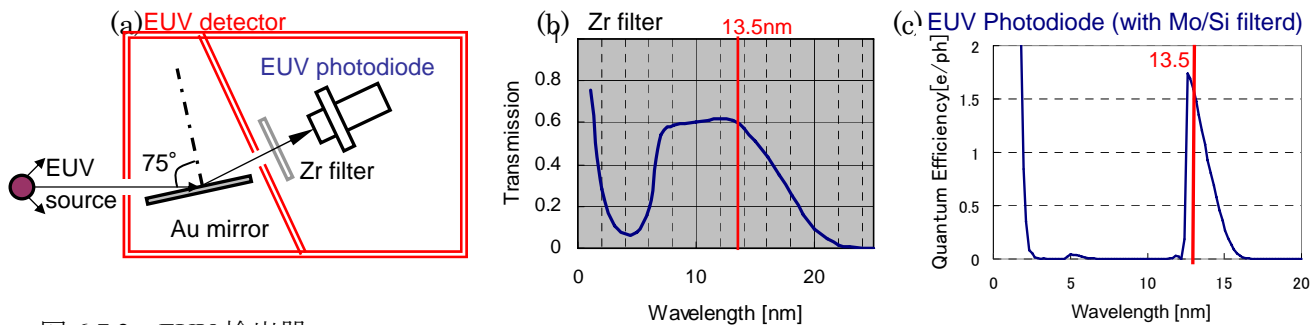


図 6.7.2 EUV 検出器

(a)検出器の構造 (b)Zr フィルタ(膜厚 150nm)透過特性 (c) Mo/Si 膜付フォトダイオードの量子効率

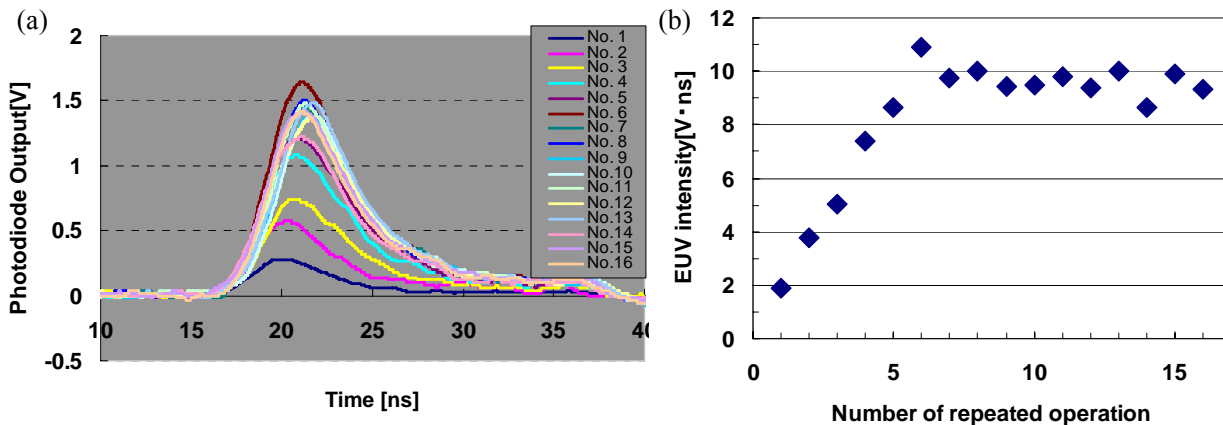


図 6.7.3 繰り返し照射毎の EUV フォトダイオード出力結果

(a)出力の時間変化 (b)EUV 計測強度値の繰り返し回数による変化

れたEUV強度が増大したものと考えられる。すなわち、貫通孔径が小さい時はパルスレーザでアブレーションした分子が中心軸で早期に衝突して前方に吹き出し、レーザ吸収が孔前方で起きるためにEUVが貫通孔後方にまで透過し難い状態になったと考えられる。

一方、貫通孔が大きくなると、最適なタイミングと密度でレーザによりプラズマが励起されてEUVが後方へ放射されるため、その計測強度が増大したものと同推測できる。

高性能EUV光源として、円錐貫通孔ターゲットへのパルスレーザ集光照射で生成するプラズマからのEUVをデブリに汚染されない後方から取り出し、リソグラフィ光源として利用する方式を提案した。円錐プラズマをパルスレーザの集光照射により生成し、EUV光源としての特性を評価し、錫平板ターゲットの場合と比較した結果、円錐孔ターゲットの貫通孔後方へ放射されるEUV強度は平板ターゲットと同程度であったが、レーザの繰り返し照射による放射強度の増大が認められた。

EUV強度が増大したターゲットの円錐が加工されて円筒型に変化していたことから、次に、ストレートな円筒型の貫通孔を持つターゲットを用いて円筒型プラズマを生成させ、放射される極端紫外光の特性の評価を試みた。



図6.7.4 繰り返し照射前後の貫通孔裏面の光学顕微鏡観察結果

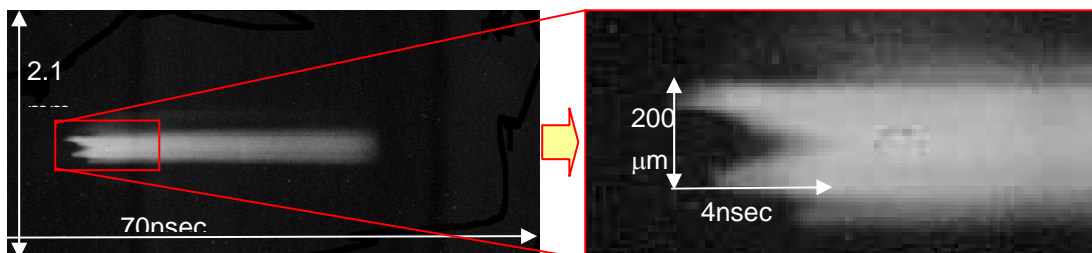


図6.7.5 高速ストリークカメラによるプラズマ可視発光の円錐貫通孔ターゲット前方からの撮影結果とプラズマ発光初期の拡大図

(3) 円筒型貫通孔ターゲットによるレーザプラズマ生成とEUV放射特性の計測 [6.7-3,4]

高性能なレーザ生成プラズマEUV光源を実現する方法として、円錐孔ターゲットの実験結果から、錫(Sn)にストレートな円筒型の貫通孔を持つターゲット構造を新たに提案した。5種類の異なる厚さ(0.3,0.6,0.8,1.0,2.0mm)の錫(Sn)板に直径 $\phi 200\mu\text{m}$ のマイクロドリルを用いて作成した円筒型の貫通孔ターゲットを真空容器の中心に置き、パルスレーザを図6.7.6のように集光照射して、貫通孔内にSn円筒プラズマを生成させた。図6.7.7(a)は、作成した貫通孔を入り口(パルスレーザ入射側)から観察した顕微鏡写真、(b)は貫通孔断面のSEM写真である。

図6.7.8(a)に実験のセットアップを示す。円筒型貫通孔プラズマからのEUV放射と比較するために、平板ターゲットを用いて同様の計測を行った。図6.7.8(b)が平板による実験のセットアップである。真空チャンバー外側は、貫通孔に対する実験と同様のセットアップである。プラズマの生成励起用レーザは、Nd:YAGの2倍高調波(ガウシアン波形[時間半値幅4ns]・波長532nm・エネルギー180mJ/pulse)を用いた。パルスレーザを貫通孔の入り口端面の中心に直径 $80\mu\text{m}$ (N.A.は0.3に相当)で集光照射し、発生したEUV発光強度を図6.7.8(c)に示すパワーメータで計測した。EUV強度の検出にはMo/Si膜コーティングをされた13.5nm近傍の波長12~15nmに量子効率を持つフォトダイオードを使用した。この際、Zrフィルタにより可視光を遮断し、Auミラー2枚を用いてX線を取り除いている。EUVパワーメータは、(a)の貫通孔に対して $180^{\circ}\sim 140^{\circ}$ 、(b)の平板の場合には $15^{\circ}\sim 75^{\circ}$ の角度まで 5° 毎に回転させながら設置し、EUV放射の角度分布を計測した。

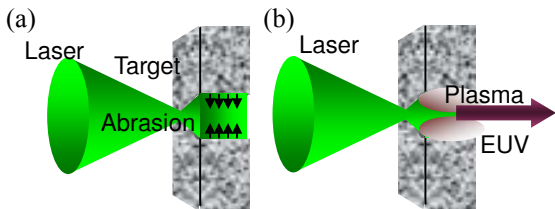


図 6.7.6 貫通孔への集光照射による Sn 円筒

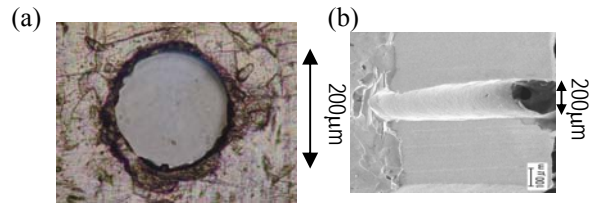


図 6.7.7 実験に用いた貫通孔ターゲット

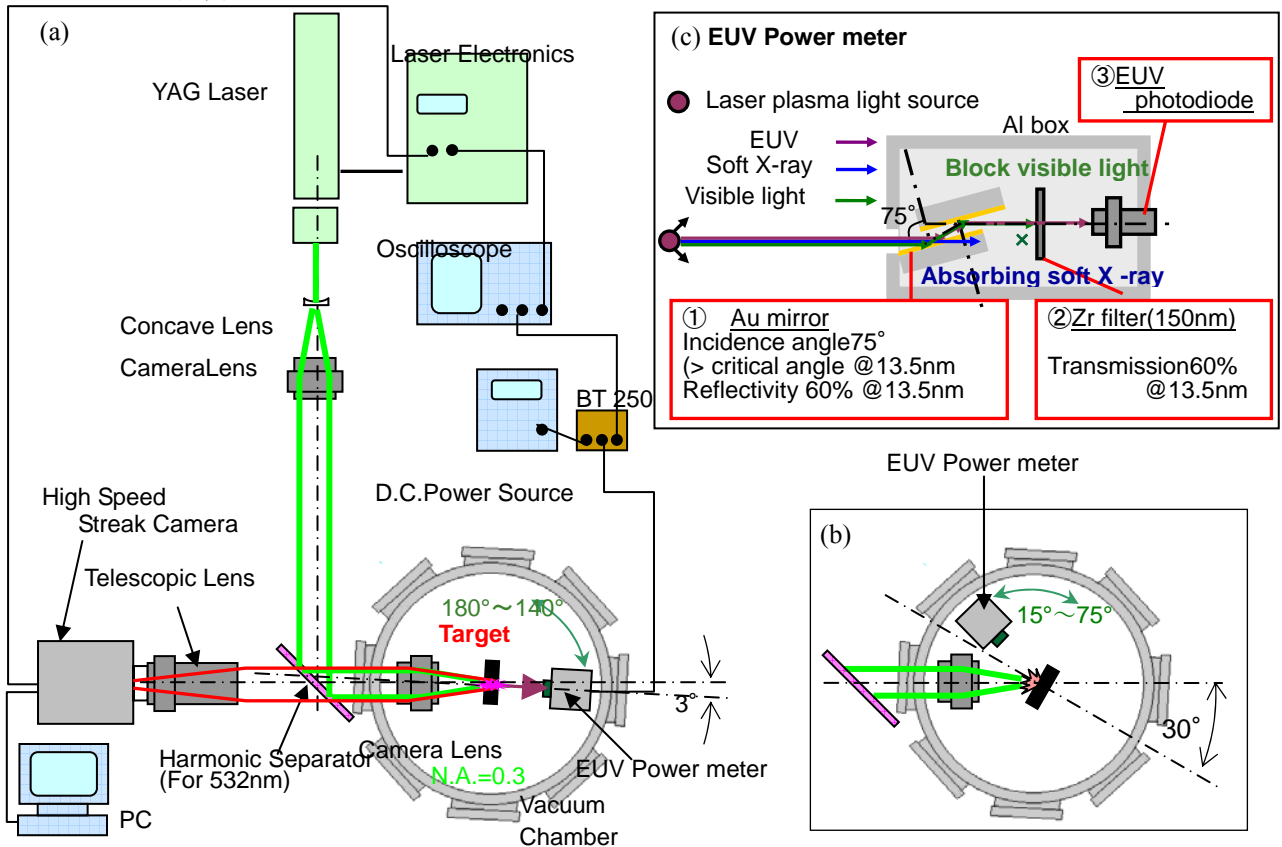


図 6.7.8 実験セットアップ概略図

この際の計測角度には、レーザ入射側に向かう貫通孔軸方向を0°、反対の出口後方に向かう貫通軸方向を180°とした表示を用いている。

貫通孔(厚み0.3,0.6,0.8,1.0,2.0mm、孔直径φ200μm)ターゲットにレーザを照射したデータの中から、厚み0.6mmの貫通孔ターゲットに対してEUVパワーメータを用いて計測した結果を図6.7.9に示す。図6.7.9 (a)はEUVパワーメータの実測データであり、(b)は出力の時間積算値でEUV強度に比例する量と計測角度との関係を示している。ここで、各角度で計測した結果は線形の角度分布関数で近似でき、図6.7.10に示されるとおり、貫通孔の軸に対称な光源を仮定してEUV放射エネルギーを評価すると、EUVエネルギーは8.4[mJ]と評価できる。他の厚みを持つターゲットに対しても同様に実験を行った結果から、EUVエネルギーを同様に見積って表2にまとめた。

表6.7.2に示すとおり、厚み0.6mmのSn板を貫通する孔において生成したレーザプラズマから最も高いEUV出力が得られた。この円筒型貫通孔の場合と比較するために、平板においても図6.7.8(b)のセットアップで同様にEUV放射分布を計測し、EUV放射エネルギーを求めた結果、2.9[mJ]と評価された。ここで、平板における放射角度分布は、平板ターゲットの法線方向を $\theta=0^\circ$ として図6.7.11のとおり余弦($\cos\theta$)分布で近似し、法線方向($\theta=0^\circ$)に対する軸対称分布を仮定してEUV放射エネルギーを求めた。

貫通孔ターゲット(厚み0.6mm)に対する計測結果は、平板ターゲットと比較して、EUVエネルギーで、およそ3倍、出力の時間積算値の最大計測強度では約6倍に増加することが明らかになった。

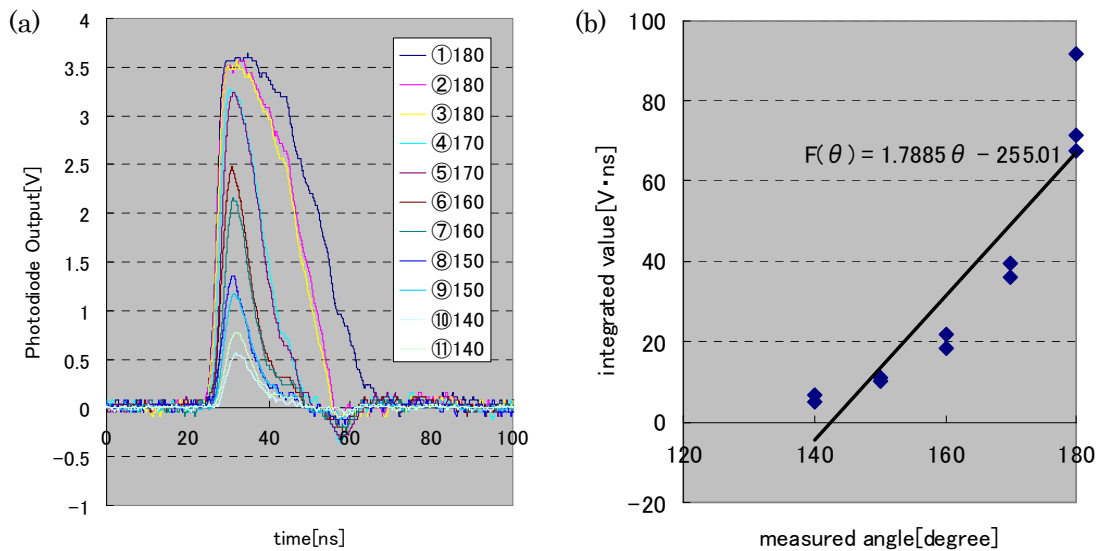


図6.7.9 EUVパワーメータの計測結果 (a)実測データ (b)出力の時間積算値と角度の関係

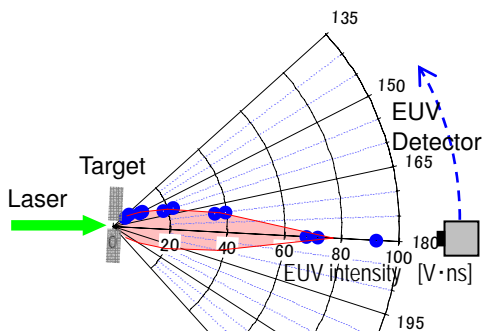


図6.7.10 貫通孔プラズマからのEUV放射計測結果

表6.7.2 EUV放射エネルギーの板厚による違い

Target thickness [mm]	0.3	0.6	0.8	1.0	2.0
EUV total energy [mJ]	0.4	8.4	4.7	5.9	0.05

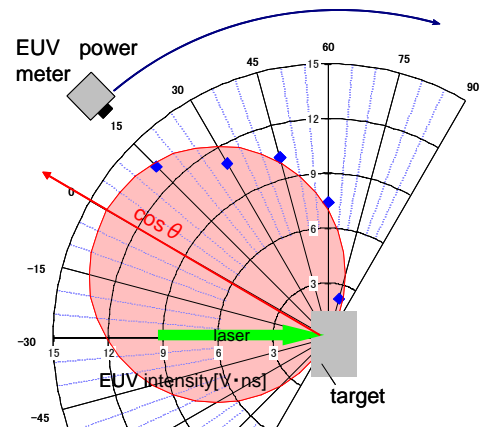


図6.7.11 平板ターゲットで生成したレーザプラズマからの放射計測結果とEUV放射エネルギー導出で仮定した余弦分布

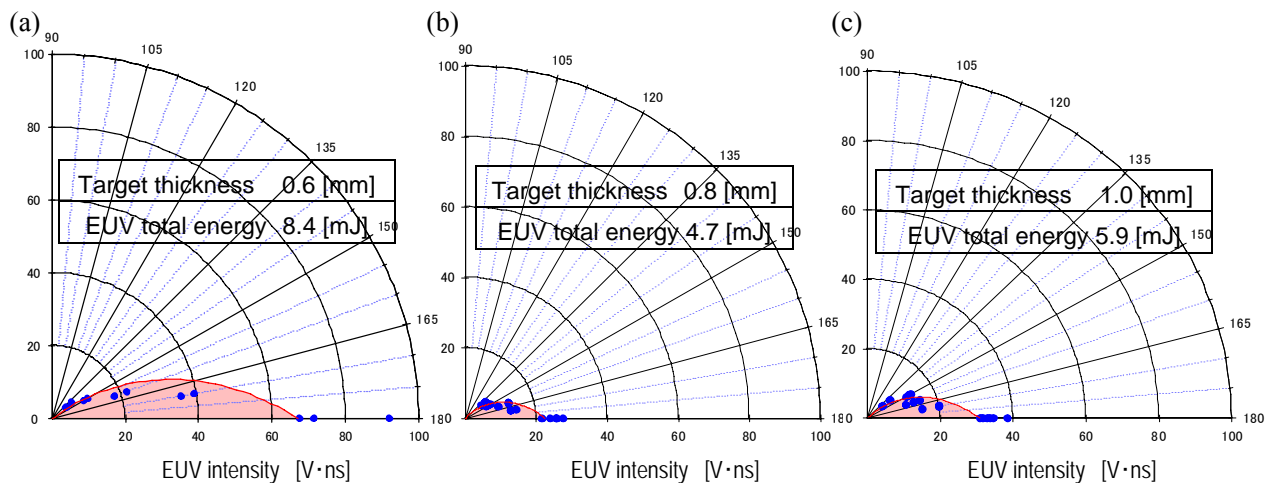


図 6.7.12 円筒型貫通孔プラズマからの EUV 放射計測結果の板厚による違い

図6.7.12に円筒型貫通孔プラズマからのEUV放射計測結果の板厚による違いを示したとおり、貫通孔プラズマから放射されたEUV強度の角度分布を計測した結果は、いずれの板厚においても貫通孔から出口後方に放射されるEUVに指向性があり、貫通孔の軸方向(180°)の輝度が高い。このような放射特性であれば、EUVリソグラフィ光源として集光を省略できるメリットがあるものと考えられる。

次に、厚み0.8mm のターゲットに対し、1つの貫通孔へ繰返しレーザー集光照射を試み、EUV出力を計測した結果を図6.7.13に示す。図6.7.14は、縦軸に図6.7.13のEUVパワーメータ出力の時間積算値をとり、横軸に照射回数をとって、EUV放射強度の繰返しレーザー照射による変化を調べた結果である。図6.7.14より、複数回の照射に対して安定したEUV出力が得られている。このことより、貫通孔ターゲットは、EUVリソグラフィ用光源として繰返し使用できる可能性があるといえる。

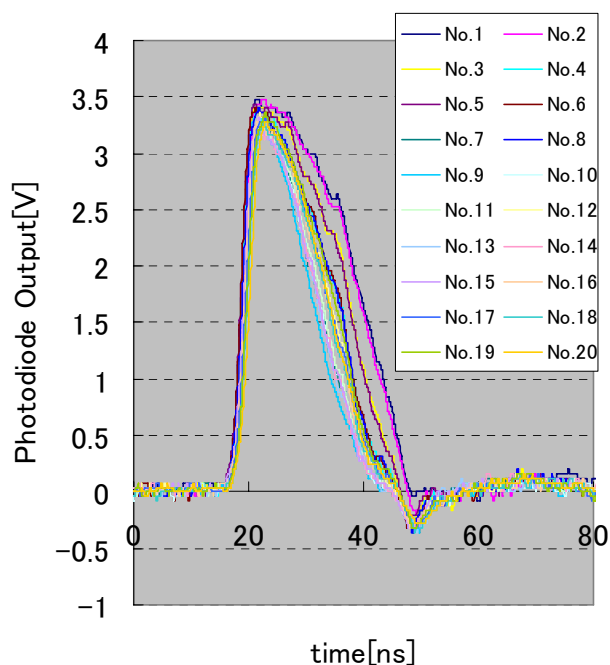


図 6.7.13 貫通孔への繰返しレーザー集光照射による EUV フォトダイオード出力の計測データ (Sn 板厚 : 800 μ m)

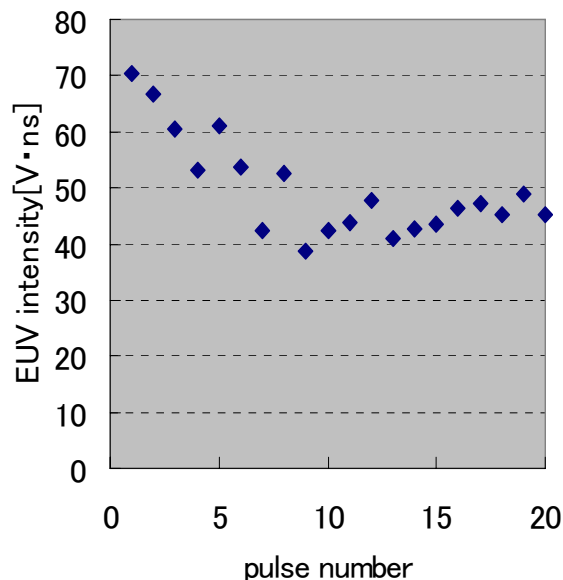


図 6.7.14 貫通孔への繰返しレーザー集光照射による EUV 放射強度 (時間積算値) の計測結果 (板厚 : 800 μ m)

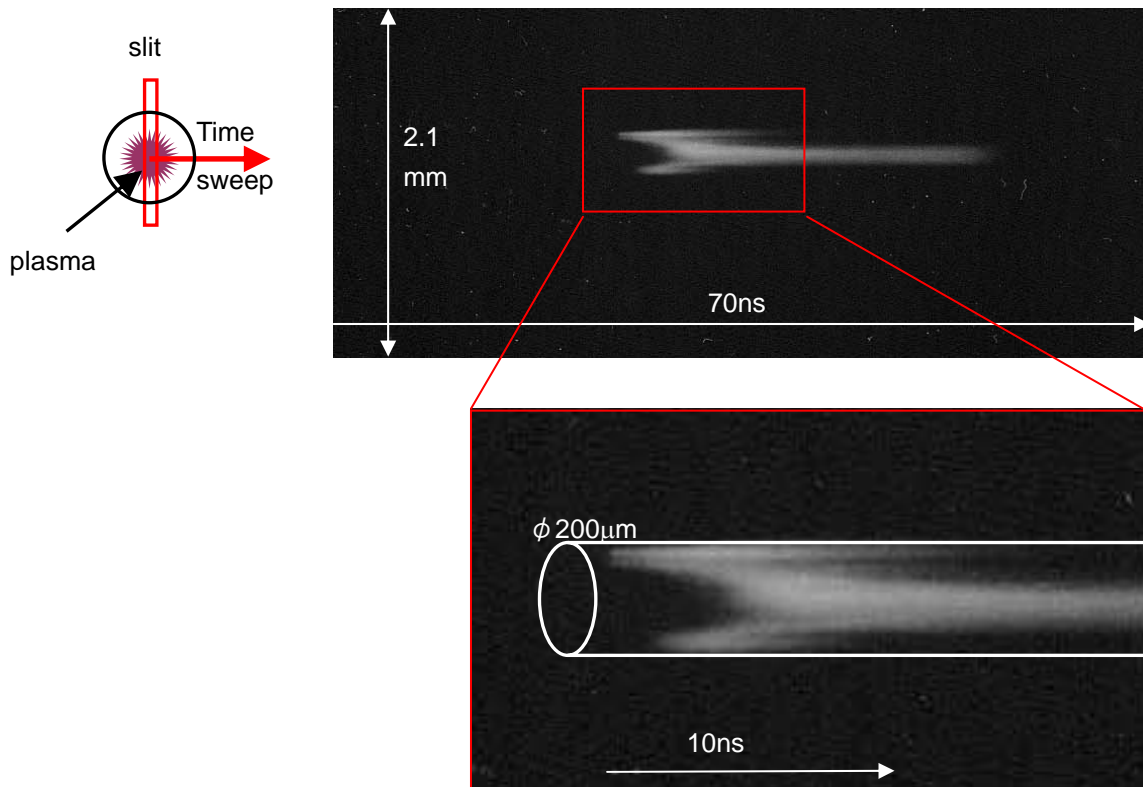


図6.7.15 高速ストリークカメラによるプラズマ可視発光の円筒型貫通孔ターゲット前方からの撮影結果とプラズマ発光初期の拡大図

さらに、円筒型貫通孔ターゲットにレーザをパルス照射し、貫通孔入り口方向から孔内部のプラズマ可視発光を高速カメラでストリーク撮影した結果を図6.7.15に示す。図6.7.15の横軸は時間掃引、縦軸はスリット開口方向の長さである。図6.7.15中に示した拡大した図から、レーザによって貫通孔内壁からアブレーションしたプラズマは、レーザパルスが終了する4nsにおいて中心軸まで到達していないことが分かる。すなわち、図6.7.6(b)のような円筒状の貫通孔の軸方向に長い高温プラズマが発生して結果、そのプラズマから放射されるEUVが、重なり合って貫通孔裏面方向へと放射されることにより高出力が実現されたと考えられる。すなわち、本実験では、最適なタイミングと密度でパルスレーザがプラズマを励起し、EUVが出口方向へ放射されたため、EUV計測強度が増大できたと考えられる。

(4) 総括と今後の展望

次世代半導体デバイス製造のためのリソグラフィ装置で用いる中心波長13.5nmのEUV (Extreme Ultraviolet) 光源は、集光点で115W以上の光パワーが供給できる高輝度と7kHz以上の繰り返しで 10^{10} ショット以上という長寿命が要求されている。特に、1ショット当たり12mJ以上という高いEUVエネルギー出力の実現のために新技術の開発が切望されている。本研究で用いた錫(Sn)は、13.5nm近傍に強い発光スペクトルのピークを示す物質である。本研究を推進する中で、新たに円筒型の貫通孔を持つSnターゲット構造を提案し、パルスレーザの集光照射によるアブレーションで生成する円筒状プラズマからのEUV発光強度の時間変化を測定した結果、平板に比べて発光が強くなることが明らかになった。貫通孔からターゲット後方へ放射されるEUV強度の角度分布を計測して変換効率を評価し、円筒状プラズマからのEUVをリソグラフィ用光源として利用するために貫通孔ターゲットに繰り返しレーザ照射を試みたところ、EUV発光強度の計測結果がほぼ一定値となり、繰り返し使用できる可能性を示した。以上の成果から、高性能EUV光源として、貫通孔へのパルスレーザ集光照射で生成する円筒状プラズマからのEUVを、デブリに汚染されない難い後方から取り出し、リソグラフィ光源として利用する新しい回転ターゲット方式の「レーザプラズマ光源」を提案し、特許出願を行った。以下に、本報告を要約する。[6.7-5]

1. パルスレーザー照射によるアブレーションで円錐と円筒型のプラズマを生成する方法を提案した。円錐孔ターゲットを用いることによって中心軸で高温・高密度な状態を実現できる可能性があり、円錐プラズマ生成で放射されるEUV特性を評価した。EUV強度の正確な計測のために、X線と可視光を除去するフィルタの設置を工夫し、波長12～15nmのみに感度を有するフォトダイオードを用いた検出器を作製した。
2. 本研究で提案した円錐と円筒型の貫通孔ターゲットの利点は、孔形状によりプラズマの発生を空間的に制御でき、デブリの飛散し難い後方に放射されるEUVを利用することで、高輝度でクリーンなEUV光源を実現できることにある。円錐プラズマをパルスレーザーの集光照射により生成し、EUV光源としての特性を評価し、錫平板ターゲットの場合と比較した結果、円錐孔ターゲットの貫通孔後方へ放射されるEUV強度は平板ターゲットと同程度であったが、レーザーの繰り返し照射による放射強度の増大が認められた。
3. EUV強度が増大したターゲットの円錐が加工されて円筒型に変化していたことから、最初からストレートな円筒型の貫通孔を持つターゲットを用いて円筒型プラズマを生成させ、放射される極端紫外光の特性を評価した。その結果、平板ターゲットに比べて高いEUV出力が得られ、さらに、繰り返しレーザーを照射しても強度が低下しないことを確認し、円筒型貫通孔ターゲットの有用性が示された。

以上に記したように、新しい高性能レーザープラズマEUV光源の開発を目的として、円筒型貫通孔ターゲットへのパルスレーザー集光照射で生成するプラズマからのEUVをデブリに汚染されない後方から取り出し、リソグラフィ光源として利用する方式を提案した。さらに、ターゲットを回転させることでEUV光源として実用化できると考え、この成果を特許出願した。今後、よりクリーンで高輝度なEUV光源の開発を目指して、改良を続けていく。

研究発表

- [6.7-1] Takaya YOSHIKAWA, Yuko OTANI, Motohiro NAKANO, Toshihiko KATAOKA, Haruyuki INOUE and Yasushi OSHIKANE, Development of High Performance EUV Light Source by Laser Produced Plasma —Target Design and Evaluation of EUV Conversion Efficiency—, *Extended Abstracts of International 21st Century COE Symposium on Atomistic Fabrication Technology* (Osaka), P37, pp.133-134 (2006)
- [6.7-2] 中野元博、吉川隆弥、大谷祐子、井上晴行、押鐘 寧、片岡俊彦, 高性能レーザープラズマEUV(Extreme-ultraviolet)光源の開発 —繰り返し発光特性の評価—, 2007年度精密工学会春季大会学術講演会 講演論文集, H79, pp.773-774 (2007)
- [6.7-3] Yasuyuki SANDA, Yuko OTANI, Motohiro NAKANO, Haruyuki INOUE, Yasushi OSHIKANE and Toshihiko KATAOKA, Development of High Performance EUV Light Source by Laser Produced Plasma, , *Extended Abstracts of International 21st Century COE Symposium on Atomistic Fabrication Technology* (Osaka), P63, pp.215-216 (2007)
- [6.7-4] 中野元博、大谷祐子、三田泰之、井上晴行、押鐘 寧、片岡俊彦, スズ貫通孔ターゲットを用いたレーザー生成プラズマEUV光源の開発, 2007年秋季 第68回応用物理学会学術講演会 講演予稿集, No.2, 6a-V-10, p.722 (2007)

研究成果による工業所有権の出願

- [6.7-5] 工業所有権の名称:レーザープラズマ光源、発明者:中野元博、片岡俊彦、権利者:国立大学法人大阪大学、工業所有権の種類:特許、番号:特願2007-213321、出願年月日:平成19年8月20日