

EUV光源ラボ

(EUV Plasma Source Lab.)

研究項目：EUVリソグラフィー用プラズマ光源技術に関する研究
研究期間：平成11年度～15年度

1. 研究の背景

LSI技術のキーテクノロジーであるリソグラフィーにおいては、2010年以降に70nm以下の寸法が転写できることが求められており、それを実現するものとして、EUVを用いた縮小転写技術(EUVL)が最有望技術とされている。EUVLの実用化に向けては、幾つかの重要開発課題の中で、数十W以上のEUVパワーが供給できる強力光源の開発が最重要課題になっている。

最有力のEUV光源であるレーザー生成プラズマからは、デブリ(微粒子や固体碎片)も放出され、このデブリが周辺の高額な光学素子の破損汚染をもたらす問題があったが、米国サンディア研究所で、高圧希ガスをノズルから噴射するガスジェット方式の開発が行われ、デブリの飛躍的低減化が実現され、EUVLへの期待が一挙に高まった。しかし、ガスジェット方式は、使用できる元素が希ガスに限定されるため、レーザーからEUVへのエネルギー変換効率が約0.5%と低い。数年前には、EUV光源は数Wを供給することが求められていたので、ガスジェット方式で十分であったが、最近の設計ではより高いスループットが設定され数十WのEUVパワーが求められるようになり、ガスジェット方式では対応不可能になり、変換効率が高い新光源の開発が求められている。

2. 経過と現状

電総研では、十分に変換率が高く且つデブリが極微細なプラズマ光源として、キャビティ閉じ込め型プラズマ光源を提案している。本方式は、フェムト秒の極短パルスの照射によって必要最小限の質量を固体から剥離し、ターゲットの凹面形状による閉じ込め効果を利用して剥離ガス化した材料を高密度化し、高密度化したガス化材料をナノ秒パルスで加熱して強力なEUV光を発生させる、という3つの過程で構成さ

れ、これにより、デブリの大幅な極微細化と同時に、レーザーからEUV光への高い変換効率の実現も期待できる。

本方式の高度化・実用化のために、レーザー照射システムの開発、キャビティ閉じ込めプラズマの評価、EUV変換効率の評価、デブリの評価と抑制および、流体コードシミュレーションによる最適設計の研究が必要である。キャビティ閉じ込め型では、如何にして十分なキャビティ閉じ込め効果を持たせるかが最重要の技術課題である。昨年度までに、向かい合わせた2枚の平面ターゲット上に2つのプラズマを生成する実験で、ちょうど中間地点でもX線の発光が観測されたことから、プラズマの衝突による密度・温度の上昇が起こり得ることと、数値計算シミュレーションを行って十分な閉じ込め効果が期待できること、の確認を行ったあと、薄板に穿った貫通孔を使った実験を行い、このような単純な構造でも、レーザー光を吸収しX線発光をもたらす高温プラズマが生成できるという、キャビティ閉じ込め型プラズマ光源の原理実証を行った。

11年度は、原理実証実験で生成されたプラズマのパラメーターの詳細解析、X線への変換効率の見積もり、より変換効率の高い材料を選定するためのプラズマ実験、十分な閉じ込め効果を持たせた実験を行うための照射レーザーのアップグレード、を行った。

1) プラズマ密度温度の評価

原理実証実験では、厚さ0.5mmの平板に穿った直径0.3mmの貫通孔の内壁を、パルスエネルギー5mJ程度、パルス幅2ps程度の極短パルスレーザー照射でアブレーションさせた。その貫通孔に波長1 μ m、パルス幅10ナノ秒のYAGレーザーを通過させると、逆制動輻射吸収によりレーザー光が吸収され、アブレーション物質が高温プラズマ化する。ピコ秒パルスによるアブレーションからの遅延時間40ナノ秒程度で、ナノ秒レーザーの吸収は最大になった

が、吸収率はナノ秒レーザーエネルギーに依存し、また、10ナノ秒のパルス内でも、立ち上がりでは大きくピーク以降はほとんど吸収されないという大きな変化が観測された。この逆制動輻射吸収の吸収率の変化から、プラズマの電子密度・温度を評価した。

プラズマが貫通孔内で一様と仮定すると、電子密度は $4 \times 10^{19}/\text{cm}^3$ 前後であった。ナノ秒レーザーのエネルギーが数十mJの時、閉じ込めプラズマで40eV近くの電子温度も実現できることが分かった。

2) X線スペクトル

a) イオン化の度合いを評価するために、発光線の同定が容易な線スペクトルが主になると予想された軽元素であるアルミ(原子番号 $Z=13$)をターゲット材料に用いてスペクトル観測を行った。スペクトル線は3価および4価イオンからのものであり、このことから、電子温度は40eV程度と評価できた。この値は、上に述べた、ナノ秒レーザーの逆制動輻射吸収から求めた電子温度と一致していた。

b) ある程度のX線変換効率を得るためには、ある程度原子番号が大きい材料を用いる方が良いので、鉄($Z=26$)をターゲットとした実験を行った。X線スペクトルはバンドスペクトルが主であった。X線フィルムの感度、回折格子の回折効率のおおよその値が分かっているので、これらを仮定して計算すると、スペクトル幅2%へのX線変換効率は、吸収されたレーザーエネルギーに対して約1%であった。

3. まとめ

貫通孔という極めて単純な構造のターゲットでの「キャビティ閉じこめ型」プラズマ実験で $4 \times 10^{19}/\text{cm}^3$ 前後という高い電子密度が得られた。また、鉄の場合に、2%スペクトル幅でのX線変換効率が1%というかなり高い値が得られた。材料に関しては、銅やより大きな原子番号の材料では、貫通孔実験で用いた鉄よりもさらに大きな変換効率が期待できることが分かった。

今後、キャビティ構造、照射条件、材料などの最適化を行えば、あと一桁の電子密度の増大と、変換効率の数倍化も可能であると期待している。

4. 波及効果

本研究の進展により強力EUV光源の目処がつけば、2010年前後以降に求められる70nm以下の寸法が転写できるリソグラフィー技術の中で最有力候補であるEUVリソグラフィーの実用化が一挙に加速される。リソグラフィー以外にも極めて広範な分野で強力EUV光源が求められるが、本研究の成果は、いろんな分野への応用技術の開拓も促す。

5. 今後の展開

現在はキャビティ型がベストと考えているが、それに固執することなく、より高効率の、より簡易な手法を常に求めながら、研究を進める。EUVリソグラフィー技術においては、高スループットのための強力EUV光源の開発が最重要課題であり、新光源のアイデアのために、我が国の代表として当グループの参加も求められているように、世界の光源研究者が一堂に会する緊急会議の開催が予定されている。当グループは第一人者を自負して、そのような場で積極的に発言し、世界の研究をリードしていくつもりである。

国内的には、EUVリソグラフィーは、技術の確立が緊急に求められており、国研での基礎的研究成果が直ちに民間企業での製品化に結びつく開発体制が必要であるので、民間企業主体のSELETEおよびASETなどの研究体と緊密な連携をとって研究開発を進めていくことになっている次世代半導体技術開発センターのテーマとして取り上げて、研究の加速を行うことが必要である。

当該研究担当者等

ラボ構成員(総数8名)

職員(5名) 古室昌徳*(電子デバイス部)、富江敏尚、松嶋 功、屋代英彦、青田達也(エネルギー部)

職員以外(3名) 神高典明(株)ニコン、倉島優一、小宮山和匡(東京理科大学)

*ラボリーダー 執筆者