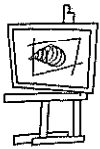


レーザープラズマ放射極端紫外線(EUV)光源の開発研究



研究ノート

西村 博明*

Development of Extreme Ultra Violet Source by Laser-Produced Plasmas

Key Words : information technology, photolithography, radiation source, laser produced plasma

1. はじめに

ユビキタス・ネットワーク社会を支えるキーテクノロジーの一つに、半導体集積回路の超微細化がある。この流れに応えるべく、縮小投影露光システムで用いられる光源はKrFレーザー(波長248nm)からArFレーザー(193nm)へと、その短波長化への歩みを早めている(図1)。現在開発が進められているF2レーザー(157nm)でも線幅60nmが限界とされて

いる一方で、わずか15nmの空間にMOS型トランジスタができることが実証された^[1]。このような動きを背景に、線幅50nm以下の次世代半導体プロセスへ向けた波長13-14nmの極端紫外線(EUV)を光源とした光リソグラフ技術の開発に熾烈な国際競争が繰り広げられている。

大阪大学レーザー核融合研究センターでは、平成15年度より開始される文部科学省リーディングプロジェクトの下で、極端紫外線(EUV)リソグラフィー用レーザープラズマ光源開発研究を推進することとなった。以下で述べるように、EUV光源開発研究には高出力レーザー技術、ターゲット技術、プラズマ計測技術、理論・シミュレーションの4つの研究項目が重要であり、またこれらの要素が互いに深く連携し成果をフィードバックしていく必要がある。このような研究課題やアプローチはレーザー核融合研究と深く関係しているため、これまで培われてきた核融合の物理的理解や、技術的研究資源がレーザープラズマの産業応用に生かされようとしている。これまで進められてきた高速点火核融合^[2]に、新しいレーザープラズマ研究の柱が加わった。

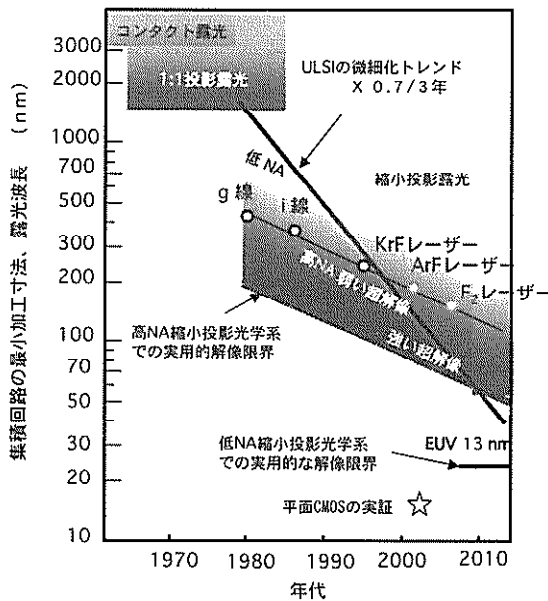


図1 半導体集積回路の微細化とリソグラフィー光源の短波長化の変遷

2. EUVリソグラフ用露光システムと光源開発の課題

EUVリソグラフィー用露光システムの基本構成を図2に示す。EUV光は吸収長が極めて短く、屈折光学系が使えない。そのため、光の伝送ならびにマスクの縮小像転送には反射光学系が用いられ、しかもシステムの構成要素はすべて真空中に設置される。一時期、この光源としてシンクロトロン放射光が有望視されていたが、スループット(単位時間あたりに露光処理可能なSiウエハーの枚数)に対する半導体製造現場からの要請値が高いため、これに応えることのできる光源として、レーザー生成プラ



* Hiroaki NISHIMURA
 1953年1月生
 1979年大阪大学大学院・工学研究科・博士課程中退
 現在、大阪大学・レーザー核融合研究センター・爆縮核融合学部門、教授、工学博士、レーザープラズマ工学
 TEL 06-6879-8772
 FAX 06-6877-4799
 E-Mail nishimu@ile.osaka-u.ac.jp

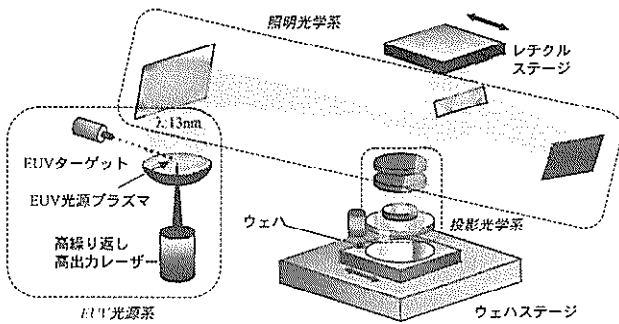


図2 レーザープラズマ放射 EUV 光源と露光システムの構成

ズマ(LPP)あるいは放電プラズマ(DPP)が注目されている。LPP光源の例を図2に示す。まず、EUV集光光学系の中心にターゲットが連続供給される。これに高繰り返しレーザーパルスが照射されてEUV光の高速パルスが発生する。このEUV光は照明光学系を通してレチクル(反射型マスク)を照らし、回路パターンが投影光学系を通して光レジストが塗布されたSiウエハー上に結像される。光源からSiウエハーまでの間にピーク反射率約65%(半値幅0.5nm)をもつ多層膜反射鏡が11~13枚程度介在するため、システム全体の光利用率は低い。これが光源に要求される出力値を高くしている。

露光装置側からEUV光源に要求されている性能仕様をまとめると表1のようになる。ここではEUV光レジスト感度を $5\text{mJ}/\text{cm}^2$ とし、直径30cmのSiウエハーを毎時100枚のスループットで露光することを仮定している。光源の中心波長13.5nmは産業界から推奨されているMo/Si多層膜の反射特性で決まっている。EUV出力は集光光学系で光源から送り出せるできるパワーで定義されており、集光立体角などを考慮すると光源プラズマにおける値はこの2-3倍が必要となる。エタンデュ(etendue)とは

表1 EUV 光源への性能要求

EUV 波長	13.5nm 2%バンド幅
EUV 出力	115 W (@照射光学系の入り口)
Etendue	1 ~ 3.3mm ² sr
繰り返し周波数	7 ~ 10kHz
出力安定性	±0.3% (3σ, 50パルス平均)
装置寿命	>30,000 時間
取り出し立体角	0.03 ~ 0.2sr

光源の発光面積と集光立体角の積で定義される保存量であり、この値が大きくなるにつれウエハーを均一露光するための光利用率が低下するので、一定値以下に抑える必要がある。また、ウエハー全体にわたって一様性の高い露光結果を得るため、高繰り返し高安定のEUVパルス発生が要求される。

3. 研究課題と現状

1) EUV光発生 of 物理と高効率低デブリ化

EUV光源開発研究において重要なのは波長13.5nmのEUV光発生 of 物理を明らかにした上で、制御された最適プラズマを生成することである。EUV光源としてレーザープラズマが有望であるとする提案は20年以上も前になされ^[3]、数多くの関連研究がなされてきたが、その物理はまだ良く理解されていない。レーザープラズマ放射は原子のエネルギー単位で決まるので、物質固有の波長スペクトルを持つ。13.5nm EUV光源として現在有望視されている物質にはSnやXe等がある。Snは13.5nmに4d-4f遷移に起因する強いスペクトル放射(変換効率2%以上)があることが知られているが、デブリ抑制に大きな課題を残している。ここでデブリとはターゲットから放出される微小な飛散粒子やイオンのことで、これらが光学系に堆積し、あるいはその表面層を破壊するので光学系の寿命を著しく低下させる。一方、Xeはデブリ抑制やターゲット回収の点で有利であるが、強い放射をもたらす4d-4f遷移スペクトルは11.4nm近傍に移るため、13.5nmあたりの発光スペクトル強度は相対的に弱い。これは13.5nmの発光に寄与するのがXe¹⁰⁺イオンに対する4d-5p遷移に限定され^[4]、しかも通常の固体ターゲット照射では急峻な密度勾配があるため、最適温度・密度範囲のプラズマ体積が少ないことに原因していると考えられている。従って、EUV放射プラズマの温度・密度を空間的に一様にし、かつその体積を大きくすることが、発光効率を向上させる上での重要な開発指針である。

レーザープラズマシミュレーションコードによりEUV放射プラズマの内部構造が解析されている。図3はパルス幅10ns、照射強度 $1 \times 10^{12} \text{W}/\text{cm}^2$ のYAGレーザー光をSnターゲットに照射したときの電子温度、電子密度、電離度の空間プロファイルである。吸収されたレーザーエネルギーは熱電子とX

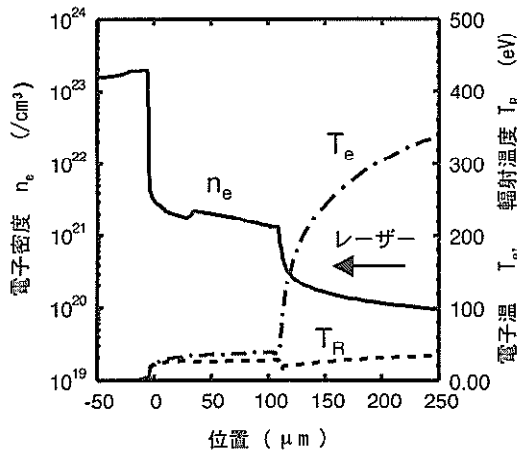


図3 放射流体コードによるEUV放射プラズマのシミュレーション結果。レーザー照射強度は $1 \times 10^{11} \text{W/cm}^2$ である。TRはプラズマが持つ輻射温度を示す。

線が輸送媒体となって高密度側に運ばれ、輸送媒体それぞれの平均自由行程の違いからプラズマ中には2つのアブレーション領域が形成される。低密度側に形成された密度平坦部の温度($\sim 25 \text{eV}$)・電子密度($10^{20} \sim 10^{21} / \text{cc}$)は原子モデルから推定した最適値に近く、EUV放射に重要な役割を果たす領域であると考えられている。

2) 高平均出力レーザー基盤技術の開発

LPP/EUV光源開発において重要となる課題の一つはプラズマ生成用レーザーである。照射光学系の入り口において平均出力100WのEUV光を得るには、プラズマからEUV光への変換効率を1%、集光光学系の効率を50%としてレーザーの平均出力は20kWが必要である。このときの1パルスあたりのエネルギーは1J程度、波長 $1 \mu\text{m}$ 以下、パルス幅1~10ns、繰り返し10kHz以上がおおよその目安となる。LD励起固体レーザーでは10kWを超える出力も得られているようであるが、パルス幅がms程度であり、ビーム品質にも問題を残しているため、高平均出力レーザーシステムの基盤技術の開発が求められている。

3) 新ターゲットの開発

高いEUV発生効率を実現する重要な鍵を握るのはターゲット製作技術である。これまで使用されてきた固体、液体、ガスターゲットに加え、それらの中間の密度状態にある低密度ターゲットを新しい候補として開発研究を進めるとともに、これらを用い

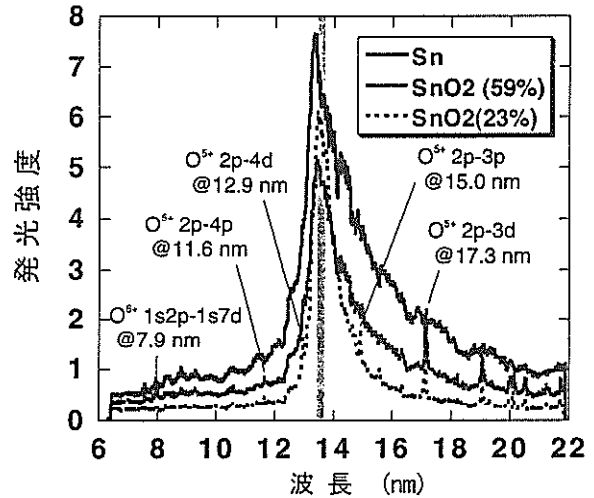


図4 固体Snならびに低密度SnO₂ターゲットからのEUV放射スペクトルの例。

たプラズマ実験を進めている。図4は低密度化したSnO₂ターゲットからの放射スペクトルを固体Snと比較したときの例である。密度の低下に伴い、13.5nm近傍の発光強度を保ったままスペクトル形状は精鋭化している。露光システムにおいて13.5nm以外の放射成分は吸収され、すべて熱損になるため、高繰り返しシステムにおける熱抑制の観点からこの精鋭化は有利である。

4) EUV発生に関する実験・理論データベースの構築

ターゲットの種類や構造、レーザー照射条件を変えてEUV放射に関する実験データベースを整えるためのパラメータマッピング実験が進行中である。並行して、候補となる高Z物質を中心にエネルギー準位や振動子強度などを正確に計算できる原子モデルを構築する。次に、これを放射流体シミュレーションコードに組み込んで実験データにより検証する。このようにして様々な条件のプラズマ発生をシミュレートして理論データベースを構築することにより、高効率なEUV放射スペクトル生成のためのプラズマ条件を与える技術指針を得ようとしている。

4. おわりに

高効率でクリーンなレーザープラズマ放射EUV光源を目指した開発研究の現状を述べた。EUVリソグラフィを利用した半導体デバイスの量産時期は2008-2009年度頃といわれている。本研究プロジェ

クトでは、3年でEUV光源に関する間基盤技術開発と基盤物理の理解を確立し、残り2年でその精度を向上させる計画であり、装置化・システム化を分担する経産省プロジェクトとの強い連携のもとで、我が国独自の基盤技術を開発し、国際競争力の優位性確保に貢献したいと考えている。なお、本研究は当センターを拠点として、九州大、宮崎大、姫路工大、(財)レーザー総研が参加し、さらにシミュレーション研究には岡山大、山梨大、奈良女大、都立大、北里大、核融合研、原研関西研などの協力を得て研究

が進められている。

参 考 文 献

- 1) J.D.Meindl, et al., Science 293, 2044(2001)
- 2) R.Kodama, et al., Nature 412, 798(2001)
- 3) B.Yaakobi, et al., Appl. Phys. Lett. 43, 686 (1983); D. J. Nagel, et al., Appl. Opt. 23, 1429(1984)
- 4) A.Sasaki, J. Plasma and Fusion Research 79, 315(2003)

