

次世代半導体リソグラフィ用 レーザー駆動極端紫外 (EUV) 光源の開発



研究ノート

西村博明*

Development of laser-driven extreme ultraviolet (EUV) source
for the next generation semiconductor production

Key Words : Information technology, EUV lithography, EUV source, laser produced plasma

1. はじめに

政治、経済、産業、教育など、我々を取り巻くあらゆる分野でグローバル化は加速し続けている。このような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。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) へと短波長化され、液浸、多重露光などの新しい技術が開発されて、ノード幅 20nm も目前、との情報が世界を駆け巡っている。しかし、これら新技術による製作工程や管理は格段に複雑であり、コスト的に見合うかどうか疑問視する声を聞く。さらに、DRAM のような周期性のある半導体には多重露光技術が適応できても、論理や中央処理装置のような複雑な回路をもつチップの製造では難しい。波長 13.5nm の極端紫外線 (EUV) を光源とする EUV リソグラフィ技術の導入を待ち望む声が日を追って増している。

一口に EUV リソグラフィと言っても、これからお話しする高出力 EUV 光源にとどまらず、レジスト材開発、ステッパー製作と検査、露光光学系、汚染とリアルタイム洗浄などチャレンジングな課題が山積している。こうした中で、世界最大の半導体露光装置メーカーである ASML 社 (オランダ) が提供した EUV 露光装置により 24 時間で 600 枚のウエ

ハ処理が IBM 社により実証された、とのニュースが飛び込んできた。さらに数倍のスループット向上が必要であるものの、関係者を勇気づける画期的な成果と言えよう。

大阪大学レーザーエネルギー学研究中心では、文部科学省リーディングプロジェクト (平成 15-19 年度) を皮切りに、国や産業界の支援を受けながら、産業界と協力し、クリーンで高効率なレーザー駆動方式の EUV 光源開発研究に携わってきた。レーザープラズマ光源開発では、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・シミュレーションからなる 4 つの柱が重要である。レーザー核融合研究を基盤とし、これまで培われてきたプラズマ放射の物理や、計算機コードなどの研究資源が随所に生かされている。

2. EUV 露光装置と光源仕様

EUV 露光システムの基本構成を図 1 に示す。EUV 光は吸収長が極めて短く (~数 10nm)、吸収されやすい性質をもっているため、旧来の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

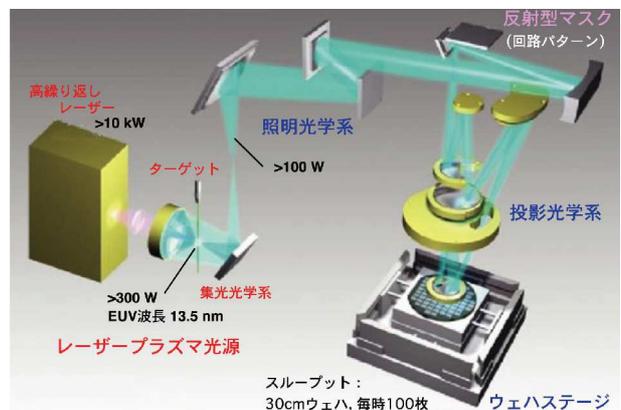


図1 EUV 露光システムの構成。数値は中間焦点 (光源と露光チャンパーとの中継点) での EUV パワーが 100W の場合を例示。EUVA/HP より。



* Hiroaki NISHIMURA

1953年1月生
大阪大学工学部 (1975年)、大阪大学大学院工学研究科博士後期課程中退 (1979年)
現在、大阪大学レーザーエネルギー学研究中心 レーザー駆動光量子制御学部門 教授 工学博士 プラズマ分光、レーザー駆動光量子、レーザー核融合
TEL : 06-6879-8772
FAX : 06-6877-4799
E-mail : nishimu@ile.osaka-u.ac.jp

の縮小像転送には、真空下に設置した多層膜反射光学系が用いられる。EUV光源としては、シンクロトロン放射光に加え、放電プラズマも有望視された時代もあったが、前者はコストとスループットの要求値を満たすことができず、後者は放電電極が熱負荷に耐えられない、などの理由から、レーザー駆動方式のみが残り、世界ではCymer社 (ASML傘下) ならびにギガフォトン社 (日) の2社で開発が継続されている。

レーザー駆動光源では、まず、光源材料からなるターゲットが真空容器内に連続供給され、これに高繰り返しレーザーパルスが照射される。発生したEUVパルスは光源部と露光装置部との中継点に相当する中間焦点に一旦集光され、EUV発生に伴って発生するデブリ (イオンや原子、クラスターなどから成る不要粒子の総称) はこの中間集光点に設けられたガスカートンなどにより遮断される。その後、照明光学系を通して整形されたEUV光はレチクル (反射型マスク) を照らし、反射光が含む回路パターンが投影光学系を通してSiウエハ上に塗布されたレジスト上に結像される。ピーク反射率が65%の多層膜反射鏡が11~13枚使用されるため、通常の露光装置と比べて、光源利用率は、かなり低い。これがEUV光源に対する要求値を高めている要因である。

産業界が要求し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ウエハを毎時100枚のスループットで露光することを前提としている。光源の中心波長13.5nmは産業界が推奨したMo/Si多層膜の反射特性で決まっている。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中間焦点の2~3倍が必要となる。エタンデュ (etendue) とは光源の発光面積と集光立体角の積で定義される保

表1 EUVリソグラフィ用光源の要求仕様

光源の要求仕様

波長	13.5 nm
出力	250 W以上 @中間焦点
Etendue	3.3 mm^2sr
繰り返し周波数	10 kHz以上
装置寿命	30,000 時間以上

存量であり、この値が大きくなるにつれ光の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、ウエハ全体にわたって一様性の高い露光を得るため、高繰り返し高安定のEUVパルス発生が要求される。(注:出力値に関しては、様々な要因で変化するので、一例としたい)。

3. 開発課題と現状

1) EUV光発生の物理

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30年以上も前になされ [1]、多くの関連研究がなされてきた。放射波長は物質固有のエネルギー準位で決まる。スズは波長13.5nm近傍に4d-4f遷移に起因する強い発光スペクトルがある。キセノンやリチウムにも放射遷移はあるが、発光効率が低い、あるいは材料ハンドリングに難がある、などの理由により、最終的にスズが標準材料として選ばれた。しかし、スズは常温で堆積し、光学系の寿命を著しく低下させるので、以下で述べるような特別な対策が必要となる。

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2はパルス幅1.2ns、照射強度 $1 \times 10^{11} \text{W}/\text{cm}^2$ 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、イオン密度、個々の領域における放射能力 (emissivity) Sならびに再吸収効果を考慮した実効放射能力 S' の空間プロファイルである。吸収されたレーザーエ

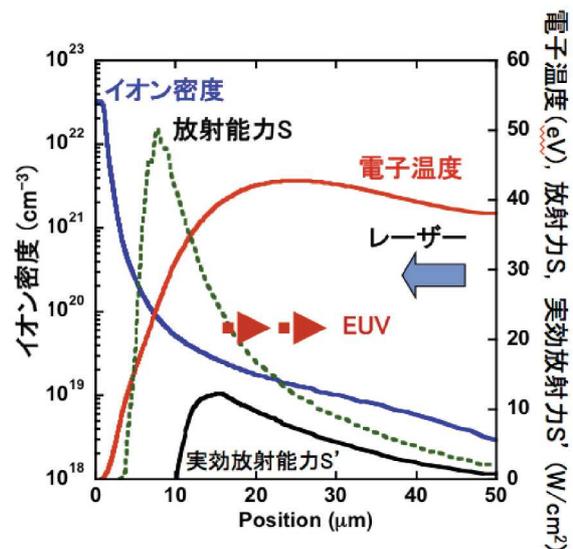


図2 レーザー生成スズプラズマの電子温度、イオン密度、放射能力S、ならびに実効放射能力S'の空間プロファイル

エネルギーは熱電子やプラズマ放射が輸送媒体となって内部に運ばれる。個々の領域における放射能力 S で見ると、電子温度で 20eV 、イオン密度 10^{20}cm^{-3} 近傍が最適のように見えるが、オパシティ (opacity 吸収能力) も高いため、プラズマ外へ放射されない。プラズマ内部での吸収を考慮した実効放射能力 S' の空間プロファイルで考えると、低密度側に形成された電子温度 $\sim 30\text{eV}$ 、イオン密度 $10^{18} \sim 10^{19}\text{cm}^{-3}$ (平均電離度 10) の領域が EUV 放射に重要な役割を果たしていることが分かる。

2) レーザーの最適条件

レーザーから EUV への変換効率の向上は大きな課題である。効率が向上すれば、レーザーの要求仕様を緩和できるので、露光装置のコスト低減とともに EUV リソグラフィの普及が加速される。変換効率を向上させるには、EUV 放射領域に直接エネルギーを注入することが鍵となる。レーザー吸収を増すには、プラズマのスケール長を長くすれば良いが、長すぎると EUV の再吸収を助長してしまう。このようなガイドラインの下、レーザー波長 (注入領域の密度制御)、照射強度 (電子温度)、パルス幅 (スケール長制御) の最適化が図られた。その結果、波長 $10.6\mu\text{m}$ の炭酸ガスレーザー、照射強度 $10^{10}\text{W}/\text{cm}^2$ 、パルス幅 $\sim 10\text{ns}$ が代表的な値である。

3) クリーンな光源とする技術

EUV 出力を増すには、繰り返しレートを要求値の 10 倍程度である 100kHz にまで高めるとともに、放射プラズマ断面積 (図 2 紙面に対して垂直方向) を大きくする必要がある。一方、デブリを抑制するには、EUV 発光に必要な最小限の質量をもったターゲット供給を行うとともに、超電導コイルで発生した強力な磁場を印可し、この中央部でプラズマを発生すれば、磁場にガイドされてイオンは飛散するので、EUV プラズマに曝され続ける捕捉鏡の汚染を大幅に回避できる。

このような要求を同時に満足させる手法として、最小質量スズ液滴を連続的に供給し、それぞれの液滴に YAG レーザーパルス照射して液滴を噴霧状に飛散させ、適度な密度と空間広がりとなったところに炭酸ガスレーザーを照射する方式、「二波長ダブルパルス照射法」が考案された。伝え聞いたところによると、Cymer 社でも同様の方式が採用されているらしい。ターゲットの初期密度を低下させる

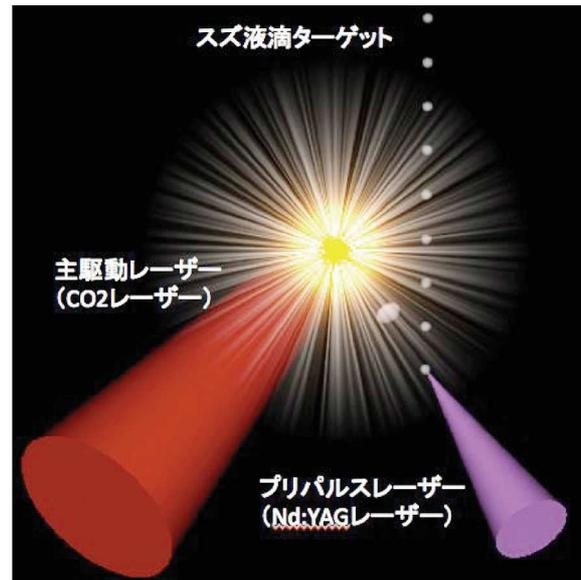


図3 二波長ダブルパルス照射法

重要性の指摘と合わせ、二波長ダブルパルス法はレーザー駆動 EUV 光源における基本特許として本学が保有している。

なお、デブリ中に含まれる中性原子や微粒子については、雰囲気ガスを光励起し化学的に活性化して、EUV 光源稼働中でも定常的に清浄できる工夫がなされている。

4. まとめ

研究開始当初 1% 程度であった効率が、文部科学省リーディングプロジェクト開始 2 年目で 3% の世界記録を達成した [2]。その後、産業界では精力的な研究開発がなされた結果、92W の EUV 出力を変換効率 4.2% で達成するに至っている。理論・シミュレーションの予測では、6-8% の変換効率の達成が予測されているため、実機での変換効率 5-6% を達成するための研究が継続されている。

高出力レーザーにより生成されたプラズマからは、テラヘルツ波から EUV、X 線、さらには数 MeV のエネルギーをもった γ 線が、また、高エネルギーの電子やイオン、中性子も発生できる。これらレーザー駆動光量子放射は、従来の加速器にない特徴をもった光量子放射源としての可能性が期待されている。本ノートで解説した EUV リソグラフィ光源は、レーザー駆動光量子研究における実用化第一号として世に送り出し、その評価を頂きたいと思っている。

謝辞

本ノートで述べた研究成果の一部は、文部科学省リーディングプロジェクト「極端紫外光源開発等次世代半導体製造技術の実用化 (H15-19)」、文部科学省・先端研究施設共用促進事業 (H21～H24)、先端研究基盤共用・プラットフォーム形成事業 (H25～)、ならびにNEDO「課題設定型産業技術開発

費助成事業」戦略的省エネルギー技術革新プログラムの実施に係る共同研究の支援等を得て実施された。

参考文献

- 1) J. D. Meindl et. al., Science **293**, 2044 (2001).
- 2) Y. Shimada, H. Nishimura, et al., Appl. Phys. Lett., 86, p.051501 (2005).

