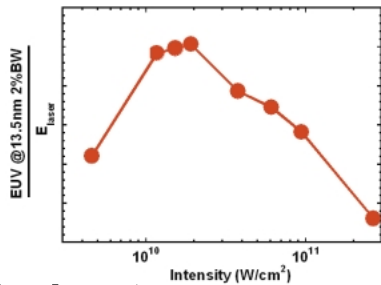
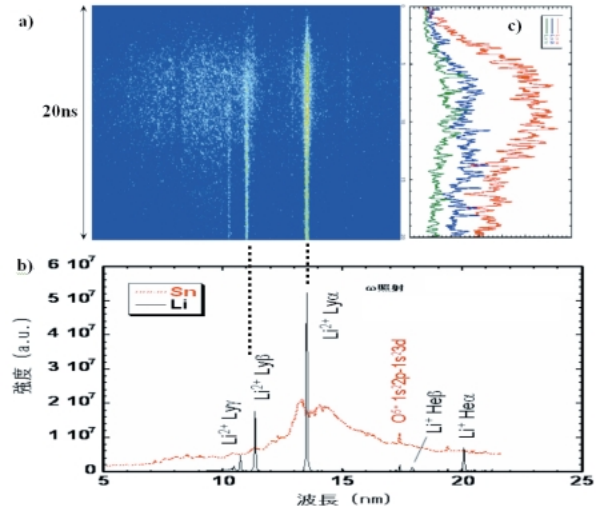


## CONTENTS 【EUV特集】

- リチウムターゲットを用いた極端紫外(EUV)光源研究
- 時間依存の原子過程を含んだ
- 極端紫外(EUV)光源放射流体シミュレーション
- 実用化に向けて開発が進むEUVリソグラフィ
- 『光と蔭』今年のノーベル科学賞決定に際して



【図2】レーザー強度に対する変換効率(レーザーエネルギーから13.5nm 2%バンド幅に入るEUVエネルギー)



【図1】a)リチウムプラズマの時間分解分光計測(ストリーク像) b)発光スペクトル c)ライマンアルファ線(赤)、ライマンベータ線(青)、およびライマンガーマ線(緑)の発光時間プロフィール

## リチウムターゲットを用いた極端紫外(EUV)光源研究

### ■次世代リソグラフィ光源に新ターゲットーリチウムー

レーザープラズマからの高強度放射光は幅広い応用が期待されている。その中で、極端紫外(EUV)の研究が次世代リソグラフィの光源として注目されている。次世代リソグラフィの光源として必要なEUVパワーは、100 W以上(波長13.5 nm、2%バンド幅)であり、これを満足させるためには高効率の光源が不可欠である。

当研究所と阪大レーザー研は、主に錫ターゲットを用いて実験とシミュレーションの両面からEUV光源開発を行ってきた(「レーザークロス」No.150, 199, 203, 205)。しかし、2004年11月に宮崎で行われたEUVLシンポジウム国際会議でCymer社(USA)がリチウムもターゲットの候補になりうることを発表した。これを受け当方でもリチウムターゲットの実験を行った。

### ■リチウムプラズマからのEUVスペクトル計測

リチウム金属平板をレーザーで照射し、その発光スペクトルを計測した。図1 a)にリチウムプラズマの時間分解分光計測ストリーク像を示す。縦軸が時間(上から下に時間が経過する)、横軸が発光スペクトル(左側が短波長、右側が長波長側)である。図b)に時間積分スペクトルを示す。黒線がリチウムからの発光スペクトル、赤線が錫からの発光スペクトルである。リチウムプラズマから放射されるライマンアルファ線はEUV光源に必要な13.5nmの波長に一致し、その輝度は非常に高い。ま

## レーザービーム伝送研究チーム 島田義則

た、リソグラフィに必要でないアウトバンド領域の放射エネルギーが錫ターゲットなどに比べて少ないことが分かる。

### ■EUVの時間発展

図c)は図a)のストリーク像のライマンアルファ(赤)、ライマンベータ(青)、ライマンガーマ(緑)各線での発光時間プロフィールである。レーザーパルス幅は7nsである。ライマンアルファ線が発光し、その後発光は飽和傾向になり、そして低下する。発光後半部分では再結合過程が支配的となり、発光がレーザーパルス幅以上に持続する。

### ■キセノンプラズマと同程度の変換効率達成

図2にレーザー強度に対する変換効率(レーザーエネルギーから13.5nm 2%バンド幅に入るEUVエネルギー)を示す。最適レーザー強度は $\sim 10^{10}$  W/cm<sup>2</sup>程度である。また、変換率はキセノンターゲットと同程度の1%前後を示した。また、ライマンベータ線とライマンガーマ線との強度比から求めた温度や自由-束縛放射から求めた温度は20~25 eV程度であった。錫ターゲットの最適温度に比べて低い。EUV放射に最適なプラズマの電子温度が低いことは、リチウムイオン、中性粒子(デブリ)の持つエネルギーが低く、ミラーの損傷が低減できる。

また、ミラーにリチウムのデブリが付着してもミラーを400程度に加熱することによりリチウムを蒸散させることができるなどの報告があり、リチウムターゲットの利点は大きい。

次ページへつづく▶

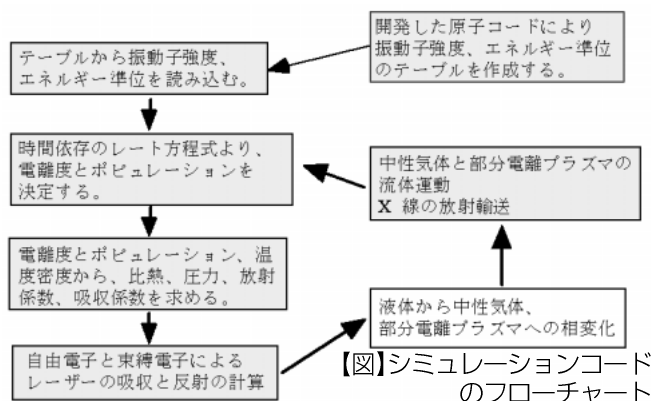
■今後の研究課題

変換効率はキセノンターゲットで得られた1%程度を達成できた。さらに発行量を稼ぐためにはライマンアルファ線幅を広げることや初期密度を制御することが重要な課題である。当研究所、阪大レーザー研が提案したパンチアウトターゲット

(特許)などを用い、初期密度を制御したリチウムターゲット実験を行い変換効率の向上を目指すとともに、スペクトル線幅測定やデブリ計測、低減策などを行いリチウム新ターゲットの可能性を追求していく。

# 時間依存の原子過程を含んだ 極端紫外(EUV)光源放射流体シミュレーション

理論・シミュレーショングループ 古河裕之



■文部科学省リーディングプロジェクトにおけるEUV光源開発の現状

EUV光源の実用化においては、大きく分けて4つの課題がある。  
 1) 高いEUV光出力を達成する。  
 2) 長寿命(半年程度以上)の光源を開発する。  
 3) ターゲットの高速供給技術を開発する。  
 4) 低コスト化を図る。  
 大阪大学レーザーエネルギー学研究中心を中心とした文部科学省リーディングプロジェクトでは、ターゲット材料として錫を第一候補とし、レーザープラズマEUV光源の実用化に向けて研究を進めている。またリチウムをターゲット材料として用いた研究にも進展が見られ、注目されつつある。錫、リチウム、キセノンともに実用化に向けては解決すべき課題が残されており、それはそれぞれの材料により異なっている。

■錫ターゲットを用いた場合の課題

EUV光を高効率で発生させるために最適化したパラメータのレーザーを固体または液体の錫に照射すると、10 keV程度以上の高エネルギー粒子(デブリ)が発生する。レーザー技術総合研究所、大阪大学レーザーエネルギー学研究中心、EUVA(極端紫外線露光システム技術開発機構)等の精力的な研究により、高エネルギー粒子発生メカニズムは、ほぼ明らかになってきた。これは、日本が世界に先駆けて行った研究であり、日本としての大きな成果である。高エネルギーの荷電粒子に関しては、磁場を用いた制御に関する研究が精力的に進められ、成果を収めつつある。

しかし、中性粒子は電磁場で制御できないため、その影響を低減することは荷電粒子の場合に比べ非常に困難である。中性の錫は金属であり、ミラーに付着しミラーの反射率を著しく低下させる。また上記と同程度のパラメータのレーザーを固体

または液体の錫に照射した場合、生成されるプラズマの電子温度は数十eV程度であり、このようなプラズマでは、レーザー照射が終了した後、放射冷却により温度が下がり、放射性再結合等により価数の低いイオンや中性粒子が生成されることが予想される。これはEUV光源実用機開発に関して非常に大きな問題であり、イオンの電離過程・再結合過程に関し詳細な解析が必要である。従来は、電離平衡を仮定した放射流体シミュレーションにより解析されてきたが、EUV錫プラズマは必ずしも電離平衡が成り立たず、時間依存の原子過程を含んだ放射流体シミュレーションが必要となる。

レーザー技術総合研究所および大阪大学レーザーエネルギー学研究中心等で研究が進められている「パンチアウトターゲット」が実用化されれば、錫に関して生成される中性粒子の数は大幅に低減されることが予想されるが、この場合でも完全にゼロにすることはできないので、時間依存の原子過程を含んだ放射流体シミュレーションを行いつつ、ターゲット条件の最適化を図ることが重要である。

■リチウムターゲットを用いた場合の課題

リチウムの場合、2価のイオンの1s-2p遷移のエネルギーが13.5 nmの波長に相当するが、スペクトル幅が非常に狭く、十分な発光パワーが得られないのではないかと従来は懸念されていた。しかし、ドップラー幅等を考慮するとスペクトル幅が断然広くなり、十分な発光パワーが得られる可能性が出てきた。当研究所で行われた実験でも、錫と比較し得る発光パワーを得るところまで来ている。

リチウムをターゲットとして用いた場合、再結合フェーズで多くのEUV光を発生していることを示唆するような実験結果も表れている。錫と同様にEUVリチウムプラズマも必ずしも電離平衡が成り立っておらず、再結合過程を正確に評価するには、時間依存の原子過程を含んだ放射流体シミュレーションが必要となる。また2価のリチウムイオンの1s-2p遷移は振動子強度が非常に大きく、放射電離・励起の影響も非常に大きい。これらも正確に取り入れる必要がある。

リチウムターゲットの場合、ミラーが高温になった場合に、一度ミラーに付着したリチウムが蒸発し、付着率が大幅に低減する可能性があることを示唆する実験がある。またスペクトル幅が錫よりはるかに狭く、高いスペクトル効率が得られる等、錫よりも有利な点もあり、積極的に研究を推進すべき材料の一つであるとも言える。

## ■キセノンターゲットを用いた場合の課題

キセノンは不活性気体であり、低エネルギーのキセノンがミラーに付着しミラーの反射率を著しく低下させる可能性はほとんどない。しかし、キセノンは融点と沸点の温度差が4度ほどしかなく、液体キセノンターゲットの表面近傍は多くの中性キ

セノン雰囲気ガスに囲まれていることが予想される。よって、Xeプラズマからの高エネルギー粒子は、多くの中性キセノン雰囲気ガスと電荷交換をしながら、再結合、放射冷却を伴い膨張すると考えられる。電荷交換の問題は錫やリチウムの場合には見られない問題で、その低減が大きな課題となる。

# 実用化に向けて開発が進むEUVリソグラフィ

技術研究組合 超先端電子技術開発機構 西山岩男  
EUVプロセス技術開発室(ASET)

## ■実用化に向けて

EUVリソグラフィ(EUVL)は液浸リソグラフィの次の複数世代を担う、究極の量産リソグラフィ技術として位置付けられ、その開発が世界的に急ピッチで進められている。来年にはNA0.25のフルフィールド露光機(機:プロセス開発機)が投入される見込みであり、その2~3年後には量産機が投入される。プロセス開発もSEMATECH-North(米)、MEDEA+(欧)、ASET(日)などで進められており、日本ではASETの研究開発を受けて、2006年度からは次期SELETEで本格的なプロセス開発が始まることが決定された。

しかし一方、EUVLには依然として大きな技術課題が残っていることも事実であり、実用化までにはそれらを確実に解決していく必要がある。ここでは、昨年のEUVLシンポジウムで

とめられた EUV Lithographyのcritical issue (表1)を参照して、技術課題ごとに最近の技術開発の進展を概観する。

表1. Critical Issues for Commercial Introduction of EUV Lithography in 2009  
Top 3 Critical Issues

1. Availability of defect free masks
2. Lifetime of source components and collector
3. Resist resolution, sensitivity and LER

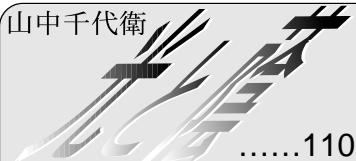
Remaining Critical Issues

- \* Reticle protection during storage, handling and use
- \* Source Power
- \* Projection and illuminator optics quality and lifetime

## ■マスクブランクスの欠陥低減が大きく進展

多層膜マスクブランクスの欠陥低減は、EUVLの開発当初が

山中千代衛



## 今年のノーベル科学賞決定に際して

スウェーデン王立科学アカデミーは十月の初めに物理、化学、医学生理学の受賞者を発表した。

物理学賞にはHarvard大学のRoy J. Glauber(80歳)「光学コヒーレンスの量子論への貢献」とそれに関連したNational Bureau of StandardのJohn. L. Hall(71歳)とMax Planck Institut für Quanten OptikのTheodor W. Hänsch(63歳)による「レーザーをもとにした光周波数コム技術など精密分光開発への貢献」が選ばれた。

Glauberは1963年ミクロな現象を扱う量子力学を光子に適用し、コヒーレントな状態を理論的に扱い量子光学の領域を開拓した。HallとHänschはピコ秒パルスレーザー光によりとびとびの周波数をもつ光のコムを作り、これを周波数目盛として利用する技術を開発した。従来の原子時計として使われたCsの放出・吸収放射の周波数9GHzより格段に精度が高くとれる。授賞式は12月10日ストックホルムで開かれ、賞金1000万クローナ(1億5000万円)の半分がGlauberに、4分の1ずつがHallとHänschに贈られる。

MPQのHänschは私がFach Beirat(評価委員)を務めていた1990年頃Herbert Waltherの下で、ピコ秒レーザー計測で頭角を現していたことが思い出される。当時評価委員会で生真面目によくまとまったレポートを説明していたものである。当人は受賞が信じられないと驚いているようだ。久しぶりにレーザー関連のノーベル賞が与えられたことは大変喜ばしい。因みに化学分野では「有機合成化学におけるメタセシス法の開発」というテーマで仏石油研究所のYves Chauvin(74歳)と共同研究者の米CaltecのRobert H. Grubbs(63歳)とMITのRichard R. Schrockが受賞する。後の二人が作った金属錯体を用いた触媒を使うと炭素の二重結合が容易に切れるということである。

医学生理学賞はオーストラリアのBarry Marshall(54歳)とRobin Warren(63歳)が「ヘリコバクター・ピロリ菌の発見と胃炎や胃潰瘍における役割の解明」で受賞が決まった。

ノーベル科学賞は毎年厳密な選考の上、すぐれた業績に贈呈されるもので、研究者にとっては最高の榮譽である。巷間ノーベル賞獲得が目的の如く唱える向きがあるがそれは問題である。ノーベル賞はあくまで結果であって目的ではない。

たまたま今年のノーベル平和賞にはIAEAとそのDirector Generalエジプト出身のMohamed ElBaradei(67歳)の受賞が決まった。平和賞はその選考がどうしても政治の影響を受けるので、科学賞とは別に扱わねばならないが、核エネルギーの管理を業務とするIAEAとその事務総長が受賞したことは核エネルギー開発を志向する核融合研究者としてエールを送りたい。

核エネルギーの平和利用こそ人類にとって最大の宝である。

【(財)レーザー技術総合研究所 研究所長】

ら最大の課題として認識されてきた。対象とされる欠陥のサイズが25 nm(PSL換算)と非常に小さいこと、150 mm角のマスク基板でほぼゼロの欠陥数(0.003defects/cm<sup>2</sup>)が要求されるためである。米国のSEMATECHは、この問題をEUVL最大の課題と位置づけ、SEMATECH-NorthにMask Blank Development Center (MBDC)を設立し、本格的に欠陥低減に取り組んでいる。この動きは最近大きな進展を見せており、今年9月に開催されたMNE (International Conference on Micro- and Nano-Engineering)では、1年前の0.5defets/cm<sup>2</sup>@70nmから、0.02defects/cm<sup>2</sup>@70nmと、1桁以上の低減が図られたことが報告された。最終要求値0.003defects/cm<sup>2</sup>@25nmのためには、計測技術の進展も含めもう一步の技術開発が必要であるが、明るい展望が見えてきたと言える。

#### ■ 光源の課題はpowerからデブリ対策・寿命問題へ

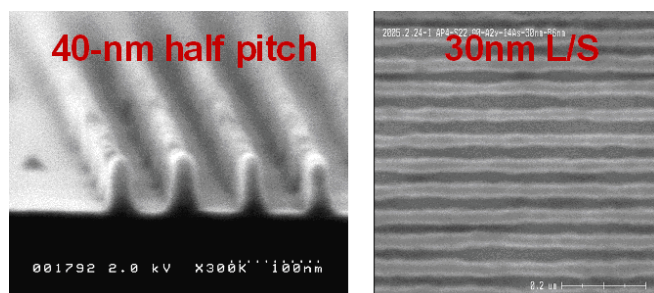
光源powerは、ここ数年critical issueのtopに位置付けられてきた。実用機に要求される115 W@IFに対し、1年前までは1桁以上の開きがあったためである。しかし、Snを用いるDPP光源の研究が進展し、昨年秋に50W@IFが可能であることが複数の光源メーカーから示された。そのため、光源powerはTop 3 issueからはずれ、残る技術課題の中に位置付けられるに至った。しかし、LPPに限れば依然として1桁の開きがあり、要求値までの技術的見通しを示すことが早急の課題となっている。

Debrisについては、大きく分けて二つの課題がある。一つは特にSnで問題となるミラー上へのdepositionであり、もう一つは高速ionによるerosionの問題である。前者についてはPhillipsからハロゲンサイクルなどの提案があり、彼らはこれで解決できるとしている。後者はSandiaのETSで現象が発見され、EUVAや大阪大学でplasmaからの高速ion発生が確認されて原因がほぼ特定された。頭の痛い問題であるが、最近Leading Projectの理論的考察から、高速ionを低減するためのplasma条件の指針が提示され、実験へのフィードバックが期待されている。実験的には、質量制限ターゲットや磁場を用いるmitigationが積極的に開発されている。

#### ■ 32nm hp以降に向けて、レジスト評価が加速

歴史的に言えば、EUVL開発の初期において、レジストがリスクとして認識されることは無かった。むしろ豊富なKrFレジストの技術蓄積が利用可能なことがその利点として取り上げられていた。しかし、32 nm以降への適用を見通したとき、化学増幅型レジストの限界が見え出したことからリスク認識が高まってきた。具体的に言えば解像度、Line Edge Roughness、感度の3大課題の達成である。これはEUVLだけの課題でなく、量産リソグラフィーに共通の課題でもある。

レジスト研究のためには、高解像度の実験用EUVL露光装置が必須であるが、EUVLには長らくそれが存在しなかった。し



【図1】レジスト転写パターン(化学増幅型レジスト)

かし、ここ2~3年の間に高NAの実験用露光装置が相次いで稼働し、レジスト研究が本格化する準備が整った。現在、米国には、Lawrence Berkeley National Lab.、SEMATECH-N、Intelに3台のMET(Micro-Exposure Tool)が稼働しており、レジスト研究に供されている。日本ではASETにHiNA(High NA Exposure Tool)が稼働している。装置導入当初は装置評価に主眼が置かれていたため、レジスト開発の本格化はこれからであるが、現状のレジスト能力の一端を図1に示す。化学増幅型で30 nmの解像性能が得られている。今後は、解像性、感度、LERの課題に本格的な取り組みが始まろうとしている。

#### ■ ペリクルレスハンドリングが今後の大きな課題に

通常の光リソグラフィーでは、マスクの表面近傍にペリクルと呼ばれる有機薄膜が張られていてParticleの付着を防いでいる。しかし、EUVLでは透過性の高い材料が存在しないため、ペリクルが使えない。そのため完成マスクの運搬・保管・真空引き・装置内運搬・静電チャックなどにおいて、particleを付着させない取り扱い技術が要求される。これに対し、新たなキャリアが幾つか提案され、HandlingやShippingの際のparticle付着のデータも蓄積されつつある。また、Thermophoreticなどのユニークなparticle防止方法もあり、その実用性が検討されている。Particleの問題は生産技術の要素が強く、実用化直前までその防止技術の開発が続くことであろう。

#### ■ Opticsの寿命問題に国際的取り組み

投影光学系ミラーのコンタミネーションの問題、具体的には炭素付着と酸化による反射率の劣化が問題になっている。その対策はもちろんのこと、5年という寿命を限られ実験データからどう保証するかという問題も大きな課題である。

これに関しては、SEMATECHがリーダーシップを取って、国際的に協力しつつ研究が進められており、日本ではEUVAとASETが協力・分担して研究にあたっている。寿命推定のためのdataが蓄積されつつあり、mitigationのためのcapping layer開発も進められている。またcleaningの研究も進みつつあり、ASETでは水素ラジカルクリーニングが炭素付着と酸化の両方に有効な方法であることを実証した。

#### ■ EUVL開発における大学・国研の貢献

EUVLの様にchallengingな技術の開発に当たっては、大学や国研の果たす役割は大きい。その典型的な例が米国のVirtual National Lab(VNL)であり、Lawrence Livermore National Lab.やLawrence Berkeley National Lab.で開発されたPDI(Point Diffraction Interferometer)は投影光学系の精度向上に多大な貢献をした。また、Sandia National Labが行ったETS(Engineering Test Stand)によるフルフィールド露光の実証は、EUVの実用性を世界中に広く知らしめる役割を果たした。その結果、4、5年前は、EUVLの3大課題の一つに挙げられていた非球面ミラーと投影光学系の精度に関する課題は、今では表1のようにcritical issue listから姿を消している。

光源技術ではLeading Projectへの期待が大きい。これまでに、powerの限界についての理論的な考察や実験的な実証、デブリ問題における高速ion発生の理論的解釈や実験データベースの蓄積など、開発に大きな貢献をしている。今後も開発サイドとの密接な連携により、近い将来光源問題がcritical issue listから外れる日が来ることを期待している。

\*ASETは、経済産業省およびNEDOの支援のもとで半導体等の次世代共通基盤技術の開発を行っている民間のコンソーシアムである。