

## CONTENTS

- リソグラフィ用極端紫外光源開発に着手
- 極端紫外光光源開発の世界現状報告
- アントワープでのEUVL国際シンポジウムに参加して -
- 『光と蔭』小柴昌俊教授の異議



【写真】各種計測器が取り付けられたEUV実験用真空タンクの内部

## リソグラフィ用極端紫外光源開発に着手

レーザービーム伝送研究チーム 内田成明

EUV光源の研究は

いつでもどこでも誰もが必要な情報にアクセスできるユビキタスネットワーク社会はわれわれのライフスタイルを変化させるだけでなく、新しい経済活動を創出することが期待される。この革新を実現する技術キーワードは小型化と高速化であり、基盤技術の一つは半導体回路の超微細化である。半導体製造は縮小投影露光技術により行われており、その光源は現在のエキシマレーザーからフッ素レーザー(波長157nm)が見通されている。さらに微細な線幅(50nm以下)でトランジスタ回路を露光するため、次々世代光源として極端紫外(EUV)光(波長13~14nm)の発生技術が研究されている。

EUV光源の研究は欧米で盛んに行われているが、これまでの研究は発生技術の開発に重点がおかれ、光源であるプラズマ条件や物理的理解にはあまり注意が払われてこなかった嫌いがあった。基礎的な物理現象の理解なしに必要なシステムが構築されようとしている。数年後にはEUV光源を搭載した露光装置の試作機が米国などで稼働し始める可能性があり、戦略的な観点からは基礎研究にのみ集中している余裕はあまり無いことも確かである。

リーディングプロジェクトによるEUV研究

このような状況の下、わが国で文部科学省と経済産業省が連携してプロジェクトを推進し、基礎科学と実用化技術、両睨み

次ページへつづく▶



の戦略をとっている。文部科学省リーディングプロジェクト(LP)の一環として半導体製造用EUV光源の研究が今年度からスタートした。当研究所でも大阪大学レーザー核融合研究センターと連携し研究を開始した。EUV光源技術には大きく、レーザープラズマを利用する方式(LPP)とキャピラリー放電などを用いる方式(DPP)があり、われわれは主にLPP方式を扱う。LPP方式を構成する技術には高繰り返し高出力レーザー、レーザープラズマ発生法、光源ターゲット技術などがある。当研究所が担当するのは主にレーザープラズマ発生法に関する開発研究である。プラズマ発生法では高効率のEUVを発生することはもちろんターゲットの供給方式により排熱やターゲットデブリ除去技術などが実用化にとって大きな課題になると考えられる。これら技術課題の解決のためにもレーザープラズマ物理現象の系統的な理解が重要である。

レーザー、プラズマ、シミュレーション技術を駆使した研究  
上記のような要請を満たすため、われわれはレーザー核融合や高出力レーザー応用研究で培ったレーザー技術、プラズマ診断およびレーザープラズマシミュレーション技術を連携させた総合的な研究体制を組織している。この特徴を活かすため激光XIIレーザーや高機能小型レーザーを用いて研究を進めている。特に複雑な挙動を示すレーザープラズマの理解には計算機シミュレーション技術が不可欠であり、高精度の計算には実験サイドからのデータ供給が大切である。すなわち実験とシミュレーションが同じ条件で比較できることが重要で、プラズマ実験の計算機シミュレーションがよく整合されている。一次元プラズマは投入されたエネルギーがプラズマ周辺へ損失する割合を低減させる特長も持っており、高効率EUV光源に適しているが、このような実験条件を実現できるのは高出力レーザー技術を有する当研究グループなど世界でも少数である。このような条件下でわれわれが展開する研究課題はEUV発光のレーザー条件依存性、プラズマダイナミクス、オパシティ(吸収特性)計測などである。EUVの変換効率(CE、入射レーザーエネルギーからEUV発光エネルギー)ではレーザー照射強度や波長に対する依存性などを計測している。これら二つのパラメータはプラズマの密度、温度構造を大きく変化させるのでEUVの発生条件にも強い影響を持つと考えられる。

EUV光伝送システムとの結合による特性把握が重要

また、EUVの発生状態はその絶対量と角度分布など実用機レベルでのEUV光伝送システムとの結合も視野に入れた特性把握が重要である。そのため業界標準となっている絶対較正された計測器を用いEUV放射の角度分布を実測し、より正確で

実用的な変換効率を計測している。

LPの目的はプラズマ状態を詳しく調べ、EUV発生のメカニズムを理解することである。そのため粒子計測と輻射分光計測を行っている。分光計測は対象となる13nm付近の波長を中心とした高分解スペクトル計測に空間分解や時間分解を付加した計測を行い、生成プラズマの立体的な状態解明を試みている。粒子計測はイオンを中心に行っているが、投入レーザーエネルギーがどのようにプラズマに再配分されているのかを知る重要な計測である。

分光計測はEUV発生効率に直接関与するスペクトル形状やプラズマ温度またはプラズマ種のイオン化状態などを直接計測する。EUVの発生効率を最大化するプラズマの温度条件は数eV(エレクトロンボルト)の精度で制御される必要があると考えられており、精密な絶対分光計測を行っている。

思い切った発想の転換

光源プラズマを特徴付けるもう一つのパラメータは密度であるが、これを時間・空間分解した計測を行うことが必要である。そのためにX線バックライト法とピンホール画像計測を組み合わせた測定システムを構築中である。これによりナノ秒の時間分解能でプラズマの密度プロファイルを観測可能とする。

同様の手法はオパシティ計測に適用済みである。プラズマはEUVの発生源であると同時に吸収体でもある。したがって特性既知のEUV光源を対象プラズマを通して観測することによりプラズマのオパシティを計測することができる。EUVの発生を正確に評価するためにはプラズマのEUV領域におけるオパシティを実験により明らかにすることはシミュレーションの精度を保証するために不可欠である。

上記の研究はEUV光源をレーザープラズマの研究という観点から見ると、いわばオーソドックスな研究手法であるが、EUVの実用化という観点からは排熱やターゲットデブリ除去の問題が工学的に大きな課題である。例えばEUVの発生効率を2%とすると200WのEUV光源は10kWの熱を排出することになる。さらにデブリの問題は深刻で、比較的効率のよい固体ターゲットを何も対策を施さずに用いると瞬く間にEUV集光鏡はデブリによりコートされて使い物にならなくなる。ターゲットから高速でかつ大量に発生するデブリはイオン粒子または中性粒子であり、それらに関してはいくつかの手法が提案され研究されているが、まだ決め手となるものは現れていない。ターゲット生成法も含めて新機序の提案が望まれるところであるが、思い切った発想の転換を行い根本的に問題の発生しない手法を検討することもLPが担うべき使命と考えている。



## 第2回 EUVL symposium会議報告 NO.1

# 極端紫外光光源開発の世界現状報告

## - アントワープでのEUVL国際シンポジウムに参加して -

レーザービーム伝送研究チーム 山浦道照

## EUV光源の開発背景

筆者は、当研究所において、文部科学省のリーディングプロジェクトの一環である極端紫外光(Extreme Ultra Violet 以下、EUV)光源(波長 = 13.5 nm)の開発に従事している。EUV光の光源開発は、米国、欧州などを中心に盛んに研究されており、日本でも、大阪大学を中心に今年度から本格的な研究開発が始まった。13.5 nmのEUV光を発生させるターゲットとしては、銻(Sn)もしくは、キセノン(Xe)が有力視されている。方式としては、ターゲットにレーザー光を照射してプラズマを生成し、そのプラズマからEUV光を取り出すLaser Produced Plasma方式(以下、LPP方式)とZピンチ放電を用いて、EUV光を取り出すDischarge Produced Plasma方式(以下、DPP方式)が代表的である。

EUV光源に要求されるキーポイントは大きく分けて二つある。一つは、高い変換効率(Conversion Efficiency、以下CE)を得ること

(2%/2 str 以上)。もう一つは、ターゲットより発生するデブリ(飛散中性粒子、イオンなど)から集光系ミラーを保護すること(デブリフリーのターゲットを製作すること)である。

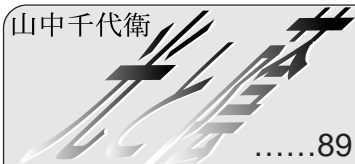
今回は、2003年9月29日～10月2日の日程で、第2回EUVL国際シンポジウムがベルギー王国、アントワープ市のヒルトンアントワープホテルで開催され、この会議に出席したので内容を報告する。

## EUV Modeling and Source Workshop

前日(28日)には、EUV Modeling Workshop、29日にはEUV Source Workshopが、EUVL国際シンポジウムと同様の場所であるヒルトンアントワープホテルで開催された。このため、29日は、Workshop終了後、registration、welcome partyと催され、EUVL会議は、30日が初日となった。この研究会の参加者は、180人程度で、会場はほぼ満席であった。

この研究会で最も印象深かったのは、CYMER(米国)から報

山中千代衛



## 小柴昌俊教授の異議

文科省が進めている素粒子・ニュートリノ実験の前倒し計画を内閣府の総合科学技術会議が最低のC評価としたことについて、「カミオカンデ」の業績でノーベル賞を

受けた小柴昌俊教授は同会議に対し「がく然とした。評価Cは理解できない」と異議を唱えたというニュースが流れている。

文科省はこの計画のため来年度の概算要求に約8億円を盛り込んでいるという。同会議の井村裕夫議員は「計画に見直すべき内容があるため、ニュートリノ研究自体は否定していない。今後の文科省の対応を見たい」と答えたと10月22日の毎日新聞は報じている。

政府の科学技術振興に関するスタンスは産業应用到資する研究に視点がおかれ、短期的なベンチャー指向が強すぎる嫌いがある。国勢の進展はまさに本物の科学技術の発展にかかっており、それは基礎から応用まで広く豊かな視野で追究されなければならないことは言うまでもない。ビジネス向きの技術のみにとられるなら国際的に尊敬されるべき地位を築くことなど到底出来ない相談だ。何でもアメリカをお手本にするわが国の姿勢であるが、よく観察すればアメリカは決して基礎研究を軽視してはいない。むしろ広く基礎から応用まで一貫した体勢を整えているのである。

もう一言付け加えれば、わが国の研究評価システムは誠に不十分と言わざるを得ないのである。評価の専門家が不足している上、正確な評価の重要性と評価者の責任に関する自覚が欠けている。極めて斬新なテーマを提案したりすれば十中八九は最低の評価になるのが落ちである。評価者の安定志向、新奇への恐れ、変化への警戒、平均値への迎合、さらには身内仲間への配慮などなどが問われている。

かつての日本であればノーベル賞受賞者の提案は全く無条件で有り難く拝受されたであろうが、今回の総合科学技術会議の判断は未熟なのか成熟したのかまことに理解に苦しむところである。

【(財)レーザー技術総合研究所 研究所長】

告されたCEに関するターゲット別でのシミュレーション結果であった。Snターゲットを用いた場合、CEは7.5%、Xeガスジェットの場合は3.5%、Xeクライオの場合は4.5%到達可能とのことであった。いずれの値も最大値である。

一方、実験結果から算出されたCEの現状は、Snターゲット(LPP方式)で2.5%、Xeターゲット(LPP方式)で1%程度、Xeガス(DPP方式)で0.5%程度であり、いずれの値もシミュレーションの結果を大きく下回っている。

#### 2nd International EUVL Symposium

研究会の会場より、さらに広い会場に移動して、第2回EUVL会議が開催された。AM8:00の時点で会場は超満員であり、スクリーンは映画館並みで、後ろに座る人にもよく見えるように配慮されていた。参加者は、会議最終日に354人と発表され、研究会の参加者のほぼ2倍であった。Oral sessionは、source、mask、resist、optics、metrologyなどの部門別に行われ、oral session後に、引き続き、poster sessionが行われた。Source部門のoral sessionは、初日の午前中と2日目の夕方に分けて行われた。

初日は、EUVA(日本)、Xtreme(独)、CYMER(米国)、Philips(独)などから報告があった。EUVAからは、液体のXeジェットをターゲットにしたLPP方式とXe-Zピンチ放電によるDPP方式の研究が並行して行われ、それぞれの方式での変換効率(CE)が報告された。LPP方式においては、Xeジェットの直径が50 $\mu\text{m}$ 程度、ジェットの速度が35 m/sで、CE $\sim$ 0.36% DPP方式では、CE $\sim$ 0.57%であった。Xtremeからの報告では、Xe-LPP方式において、レーザー光のスポットサイズ250 $\mu\text{m}$ でCE $\sim$ 0.95%、Xe-GDPR(Gas Discharge Produced Plasma)方式では、CE $\sim$ 0.55%であり、最適化されるとXe-LPP方式では、CE $\sim$ 2.5%は可能と主張した。さらに、デブリフィルターを用いて、レーザー光を数百万パルス照射してもミラーの反射率はほぼ一定を示すデータや、1keV以上のイオンからスパッタリングの量が指数関数的に増加するデータが示され、非常に興味深かった。CYMERからは、Xe-DPP方式でのCE $\sim$ 0.45%(光源サイズ=0.4 $\times$ 25 mm<sup>2</sup>)やデブリシールドを用いて、デブリが80%緩和されるとの報告があった。

最終日には注目すべき研究成果が発表

最終日のsource部門のsessionでは、フロリダ中央大学(米国)、産業技術総合研究所(日本)、TRINITY(露)、大阪大学(日本)、イリノイ大学(米国)、姫路工業大学(日本)の順で報告された。フロリダ中央大学のMartin Richardson教授は、Xeターゲットでは、CE $\sim$ 1%以上は期待できないと主張した。彼は、質量最小限、液滴錫ターゲット(The mass-limited Tin-droplet target)を考案しており、レーザー光のスポットサイズが20 $\mu\text{m}$ でCE $\sim$ 1.6%に到達している。デブリに関して、固体である錫を液滴に混ぜることによって、圧倒的に削減できたと報告した。筆者も内田主任研究員(レーザー総研)とともに、このMartin Richardson教授の研究室を今年の6月に訪問したが、ターゲットは、特許の都合上、一切見せてもらえなかった。産業技術総合研究所の富江氏も、錫ターゲットに着目しておりEUV光源プラズマパラメーター(温度、密度)やレーザースポットサイズの最適値などが述べられた。その結果、プラズマ温度30eV、プラズマ密度 $3 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 、スポットサイズ

300 $\sim$ 500 $\mu\text{m}$ と報告された。TRINITYのV.Borisov教授からは、錫の固体を高繰り返しKrFエキシマレーザーで照射し、錫をガス状態にした後、ピンチ放電によって、EUV光を取り出すユニークな研究(Tin-pinch plasma)が紹介された。その結果、プラズマ長1.6mmでCE $\sim$ 2.2%と報告された。大阪大学の西原教授より、激光XII号レーザー(12ビームを持つ核融合用のレーザーシステム)を用いて、錫、もしくは酸化錫の球ターゲットを照射した際のEUV放射スペクトルのレーザー波長依存性、照射強度依存性および変換効率の詳細な結果が報告された。さらに、シミュレーション結果と実験結果を比較し、EUV光源最適化のためのメカニズムについても述べられた。時間の都合上、質問時間が割愛されたことが残念であった。イリノイ大学からは、デブリに関する報告があった。DPP方式においては電極やチャンパー素子がスパッタリングされるとデブリが発生するが、イリノイ大学では、RFアンテナを用いて、デブリを再電離させ、foil trapを用いてデブリ量を測定した。その結果、磁場の増加とともにデブリ量も軽減できることを示した。姫路工業大学の望月教授よりXeクライオターゲットを用いて、CE $\sim$ 1.4%と報告された。Xeターゲットでの、このCE値は非常に高い値であり、今後の研究成果が興味深い。

激光XII号レーザーでポスターセッションに参加

初日、2日目のオーラルセッション後にポスターセッションの時間が設けられ、120件程度のポスターが分野別に掲示された。ポスターを観覧する人は、コーヒーやビール、ワインなどを片手に、順番に見て回られる方や自身【写真】ポスターセッションで参加者に説明の興味深いポスターをあらかじめ決めておき、そのポスターの前でメモを取る人、もちろん、ポスターの製作者である研究者と討論される人など、国際学会独特の和やかな雰囲気の中で行われた。筆者は、激光XII号レーザーを用いて、錫、もしくは酸化錫ターゲットを照射した場合、得られるEUV光放射スペクトルのレーザー波長依存性の評価について報告した。CYMER、Philips、LAMBDA PHYSIK(独)などから興味をもたれうれしかった。



全体的な印象としては、オーラルセッションの質問時間が短すぎた。2日目のsource部門のオーラルセッションは、時間帯が16:00 $\sim$ 18:00頃で、会場は、前日もしくは午前中の疲れなどもあるのか、眠っている人、席を立つ人の姿が目立った。参加費は、割高ではあったが、朝食、昼食、夕食代すべて込みのため、会議中、ホテルから、外にでる必要もなく会議に集中できるように配慮されていた。

次回は2004年11月に日本で開催

第1回EUVL国際会議は、ダラス(米国)で開催され、第2回が今回のアントワープ(ベルギー)であった。次回の第3回EUVL国際会議は2004年11月1日 $\sim$ 4日の日程で宮崎県のシーガイアホテルで開催予定である。なお、アブストラクトの締め切りは、2004年7月1日である。