極端紫外リソグラフィ用レーザー生成プラズマ光源の開発

住谷 明

技術研究組合極端紫外線露光システム技術開発機構(EUVA)研究部平塚研究室
コマツ研究本部EUV光源研究室(〒254-8567 神奈川県平塚市万田1200)

Development of Laser Produced Plasma Source for Extreme Ultraviolet Lithography

Akira SUMITANI

R&D Center, Hiratsuka, Extreme Ultraviolet Lithography System Development Association (EUVA),
EUV Source Research Department, Research Division, Komatsu Ltd., 1200 Manda, Hiratsuka, Kanagawa 254-8567

(Received May 26, 2008)

The development of a reliable high power EUV light source is one of the major technical challenges for the implementation of EUV lithography. A review is given on the development of a laser produced plasma light source for high volume manufacturing (HVM) EUV lithography. An LPP source is the most promising approach to generate the required in-band EUV power level. Our source is based on a high power, high repetition rate CO₂ laser system, a tin target and magnetic plasma guiding for collector mirror lifetime enhancement. EUV in-band power equivalent to 60 W at intermediate focus was produced by irradiating a tin rotating plate with 6 kW laser power. Collector mirror life can be extended by using droplet target and magnetic plasma guiding. The effectiveness of this approach is examined by monitoring the motion of fast Sn ion in a large vacuum chamber.

Key Words: EUV light source, Laser produced plasma, CO₂ laser

1. はじめに

波長13.5 nmの極端紫外(Extreme Ultraviolet: EUV)光を使ったEUVリソグラフィは、ArFエキシマレーザーリソグラフィに続く次世代の半導体集積回路の微細化技術の有力候補として期待されている。EUVリソグラフィを実現する上で、重要な技術課題として、光源の出力と寿命、レジストの解像性能、マスクの無欠陥化、露光装置の光学系などが挙げられている。この内、光源の出力と寿命は、EUVリソグラフィ国際シンポジウムにおいて、2003年から毎年発表されている技術課題の常に最も上位に位置付けられている。

将来の量産リソグラフィ工程で用いられる(量産用)EUV光源の仕様^{1,2)}をTable 1に示す。この表はEUV装置メーカー3社(ASML, キヤノン, ニコン)によって合意された共通仕様であり、量産用露光装置の光源として求められる項目と数値が表記されている。この中で最初に達成すべき項目は、生産性に直結する中間集光点(Intermediate Focus point: IF)でのEUV出力115~180 Wである。生産性の向上のためには更なる高出力化が求められており、少なくとも出力300 Wに近いEUV光源が近い将来に必要なと言われていた。次に重要な技術課題として、ランニングコストに影響を及ぼす高価な集光ミラーの長

寿命化が挙げられる。量産用光源の要件は、生産性の向上に不可欠な出力の拡張性と集光ミラーの長寿命化、そして経済的に成り立つ装置構成であると言える。

EUV光源にはレーザー生成プラズマ(Laser Produced Plasma: LPP)方式と、放電生成プラズマ(Discharge Produced Plasma: DPP)方式の2つがある。従来は多くの研究機関が実用化を目指して研究を実施していた³⁾が、現時点で量産用光源の研究開発を継続しているのは、我々を含めてLPP方式の2陣営^{4,5)}と、DPP方式1陣営⁶⁾の計3陣営に集約されている。

技術研究組合極端紫外線露光システム技術開発機構(Extreme Ultraviolet Lithography System Development

Table 1 Joint requirements for EUV source.^{1,2)}

Source characteristics	Requirements
Wavelength	13.5 nm
EUV power	115-180 W at IF
Repetition rate	> 7-10 kHz
Integrated energy stability	±0.3 %, 3 σ over 50 pulses
Source cleanliness	> 30,000 hours after IF
Etendue of source output	< 3.3 mm ² sr
Spectral purity	
130-400 nm	< 1 % at wafer
> 400 nm	< 10-100 % at wafer

IF: Intermediate focus

Association : EUVA)では、2002年後半よりLPPとDPPの両方式についての研究を開始し⁷⁾、どちらの方式の光源も、2007年度までにEUVA光源プロジェクトの出力目標値50 Wを超えるEUV出力を技術的に実証した^{4,8)}。既に、小面積露光実験用のSFET (Small Field Exposure Tool)に用いられ、レジストやマスクの評価と共に、光源のシステム検証も合わせて進められている^{9,10)}。LPP方式に比べて開発が先行しているDPP光源は、フルフィールド露光装置であるADT (Alpha Demo Tool)にも搭載された¹¹⁾。しかしながら、システムとして実証された出力は10 W以下であり、量産時に要求されている出力180 Wには遠く及ばないのが現状である。昨年10月に開催された最新のEUVリソグラフィ国際シンポジウム (2007 International EUVL Symposium, Sapporo, Japan, October, 2007)でも、引き続き光源の出力と寿命は最大の懸念事項であった。

LPP光源の最大の特徴は、出力の拡張性である。基本的には、ドライブレザーの出力を増加させることによって、EUV光源の高出力化を実現することができる。また、プラズマが小さく、効率的に発光したEUV光を利用できるという特徴がある。さらに、プラズマと他の構造物との距離が長く取れ、プラズマがフリースタANDINGであるために、熱の処理が比較的容易で量産用EUV光源となり得る可能性が高いと考えられる。一方、LPP方式には、装置構成が複雑なために研究から実用化に時間を要すると共に、装置コストが比較的高くなるという問題がある。レーザーの発振効率の改善と共に、レーザーからEUVへの変換効率 (Conversion Efficiency : CE)の向上が、LPP光源の実用化への重要な技術課題となる。

本稿では、量産用EUV光源の実用化を目指して、EUVA平塚研究センタおよびコマツ研究本部で実施したLPP方式EUV光源の研究開発、即ち上述した技術課題への取り組みと、現状の性能について述べる。

2. LPP-EUV光源の研究開発

EUV光源の研究開発については、2002年度からEUVAにて新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) 委託研究が開始され、2007年度末に出力50 Wを達成する計画がLPPとDPPの両方式について実行された。我々は、レーザーの特性と経済性から、早い段階から波長10.6 μm のレーザーを用いる方式を提案し、研究開発を進めてきている¹²⁾。また、2006年度にはシステム実証機としてSFETが計画され、EUVAで開発された光源が小面積露光装置に搭載された¹³⁾。なお、特にLPP光源においては、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の先進半導体製造技術の実用化」研究¹⁴⁾と連携して研究開発を進めた。以下にLPP方式EUV光源の基本構成と装置化技術の現状について述べる。

2.1 LPP-EUV光源の基本構成

LPP方式EUV光源は、強度 $10^9 \sim 10^{11} \text{ W/cm}^2$ 程度のパルスレーザーを固体、液体あるいは気体のターゲット材に照射して生成する高温高密度プラズマから放射するEUV光

を利用する。プラズマを生成するドライブレザーとしては、パルス時間幅 $\sim 20 \text{ ns}$ で、10 kHz以上の高出力高繰り返し動作が可能で、レーザービームの集光性が確保されることが望まれる。従来はNd:YAGレーザーの使用を検討していたが、高出力時のビームの集光性と装置の経済性から、現在は量産用光源としてCO₂レーザーを用いた開発を進めている。CO₂レーザーへの変更とその後の研究開発にあたっては、文部科学省リーディングプロジェクトで実施された実験結果¹⁵⁾と理論計算¹⁶⁾に負う所が大きい。またSFET用としては、リソグラフィ用光源として実績のあるKrFエキシマレーザーを用いた。

ターゲット材としては、Xe, Sn, Liが候補として挙げられている。当初はデブリと呼ばれる飛散物質による汚染の問題の少ないXeを用いた⁷⁾が、現在はEUV変換効率の高いSnを用いている。出力の確認には、暫定的にSn固体ターゲットを使用した。量産用としては、デブリの減少と連続供給が期待できるSnドロプレットターゲットを採用する予定である。

LPP光源の特徴の一つであるフリースタANDINGな発光点のプラズマは、周りに構造物が無い空間で、ドロプレットにレーザーを照射することによって生成される。このプラズマから照射されたEUV光は、プラズマから100 $\sim$ 200 mm程度離れた位置に置かれた集光ミラーで反射集光され、露光装置へ送られる。

2.2 SFET用LPP-EUV光源の開発

基盤技術を実用的に有効なものとするためには、システムとして機能させて検証する必要がある。EUVAでは研究開発してきた各要素技術の総合評価を目的に、2005年度にSFET用LPP光源装置の試作と光源性能評価を実施した。2006年には光源を露光サイトへ移設し、露光装置と接続して実露光でのシステム運転を実証した¹³⁾。

SFET用LPP光源は、LPP方式の基本構成であるドライブレザー、ターゲット供給装置、集光ミラー、スペクトル純化フィルターから成る。ドライブレザーには、リソグラフィ用光源として実績のあるギガフォトン製の波長248 nmのKrFエキシマレーザーを改良して用いた。不安定共振器を採用し、4 kHz動作で最大出力580 W、ビームダイバージェンス0.2 mradの高出力でビーム品質の良いKrFエキシマレーザーを開発した。ターゲット材としては、デブリが少なく生成技術が確立していたXeジェットを選択し、集光ミラーには、Mo/Si多層膜コート、スペクトル純化フィルターには、Zrフィルターを用いた。なお、集光ミラーの反射率は60 %であり、形状は要求仕様と経済性から集光立体角 $\pi \text{ sr}$ のフルミラーを1/3に分割したものとした。実露光で重要となるIF位置でのEUV像の安定性を確保するために、CCDカメラとアクチュエーターでXeジェットの位置をフィードバック制御で安定させ、プラズマの位置変動 $\pm 10 \mu\text{m}$ 以内を達成した。

開発したLPP光源は、キヤノン製の評価装置による光源単体評価を経て、露光サイトで装置本体と接続された (Fig. 1)。その後、半導体先端テクノロジーズ (Selete)、キヤノン、EUVA平塚研究センタのメンバーが参加した露光

Fig. 1 Picture of SFET system with LPP light source at Canon.

実験が実施され、32 nmの解像結果が得られた⁹⁾。

2.3 量産用LPP-EUV光源開発の現状

量産用LPP光源として、CO₂レーザーとSnターゲットの組み合わせが、性能とコストの両面から最も適していると考え、Fig. 2に示すような高出力CO₂レーザーとSnドロプレットターゲットを用いたLPP方式EUV光源の開発を進めている。また、Snターゲットからのデブリの発生に対しては、磁場を用いた集光ミラーの保護技術を適用する予定である。

最も重要なIFでのEUV出力については、CO₂レーザービームをEUV発生チャンバー内に導いて、Snターゲットに照射し、生成したプラズマから放射されたEUV光をミラーで集光して計測した。計測には、EUV光のみを透過する薄膜付きの、感度補正されたダイオードを用いた。本実験では、IFでのEUV光の評価を主な目的としたため、ターゲットには位置安定性が良いSn回転円盤固体ターゲットを用い、集光ミラーはSFET光源と同じ仕様の集光立体角 π srのミラーを1/3に分割したミラーを使用した。

100 kHz動作で出力6 kWのCO₂レーザーを照射して得られた集光点でのパルス毎のEUVエネルギーをFig. 3に示す。パルスエネルギーの安定性に課題があるものの、平均で16 Wの出力が実測されており、実際に使われる4 srフルミラー換算で約60 WのEUV出力が得られた。なお、EUVエネルギーのばらつきは、主にCO₂レーザー発振器の出力パルスエネルギーの不安定性に由来するもので、共振器構造の最適化やビーム伝播系の温度制御などによって改善する予定である。

Fig. 2 Schematic diagram of LPP light source system for high volume manufacturing EUV lithography.

Fig. 3 Measured EUV energy at IF by 6 kW CO₂ laser and Sn plate.

IFでのEUV集光像(a)とプロファイル(b)をFig. 4に示す。集光像は、EUV光に対して発光する蛍光版上の像2000パルス分をCCDカメラで撮影して得た。集光サイズ($1/e^2$)は、X方向3.6 mm、Y方向3.3 mmであり、対象性の良い集光像が得られている。この集光サイズから計算した発光点サイズと、4 srの集光立体角のミラーを想定した場合のエタンドュは1.9 mm²srであり、十分に要求仕様を満足している。

3. 量産用LPP方式EUV光源の要素技術

量産用EUV光源の出力180 Wには、捕集、転送効率を約30%と仮定すると、プラズマ発光点出力として600 Wが必要となる。この発光点出力600 Wを達成するためには、レーザー出力15~20 kW、EUV変換効率3~4%が必要と試算され、これらが当面の開発目標値となる。ターゲットとしては、デブリ低減が期待できる直径30 μ m以下の小径ドロプレットが適しており、また、集光ミラーの長寿命化は、磁場によるプラズマ制御によって実現する予定である。以下に量産用LPP-EUV光源へ向けての各要素技術の現状を述べる。

3.1 高出力CO₂レーザー

LPP方式ではプラズマを生成するドライブレザーの性能がEUV出力を決定づけるため、短パルス高出力CO₂レーザーシステムの開発が急がれた。開発したCO₂レーザーは、短パルス発振段レーザーと高速軸流RF励起増幅器を組み合わせたMOPA (master oscillator power amplifier) シス

Fig. 4 Measured (a) EUV in-band image and (b) beam profile on x-axis and y-axis at IF.

テムである (Fig. 5). 発振段は、波長 $10.6\ \mu\text{m}$ 、パルス幅 $20\ \text{ns}$ (FWHM)、繰り返し周波数 $100\ \text{kHz}$ のRF励起のQスイッチ CO_2 レーザーである。増幅段は、CW出力 $5\ \text{kW}$ および $15\ \text{kW}$ 相当の産業用の高速軸流RF励起 CO_2 レーザーの共振器を取り除いて用いた。光学素子の熱レンズ効果を補正するビーム成形と、増幅段の励起強度の向上により、 $100\ \text{kHz}$ 動作で最大出力 $13\ \text{kW}$ が得られた。増幅後のパルス幅は $20\ \text{ns}$ (FWHM)であり、顕著なメインパルス以外の周辺出力 (ペDESTAL成分)も観測されなかった。また、増幅前後の集光径もほぼ一致していたことから、本MOPAシステムと同様な構成により、良質なビーム品位を保った出力 $20\ \text{kW}$ の CO_2 ドライブレザーが可能であると試算された。

3.2 EUV変換効率 (CE)

EUV変換効率向上の研究には、基礎データの取得を目的に、低繰り返し回のTEA- CO_2 レーザーとSn平板を用いた。Fig. 6にCEとターゲットのキャビティ深さとの関係を、Nd:YAGレーザーと比較して示す。 CO_2 レーザーとYAGレーザーの条件はほぼ等しく、パルスエネルギー約 $30\ \text{mJ}$ 、パルス幅 $10\ \text{ns}$ (FWHM)、集光径 $100\ \mu\text{m}$ (FWHM)、繰り返し $10\ \text{Hz}$ とした。 CO_2 レーザーの場合、キャビティが深い方がCEは高く、平板でのCE $2\sim 2.5\%$ に対して、キャビティ深さ $200\ \mu\text{m}$ で最大 4.5% のCEが得られた。一方Nd:YAGレーザーではキャビティ深さに対する依存性は見られず、CEは 1.8% 程度であった。このキャビティの効果については、キャビティの深さに伴ってプラズマ特性長が増加する可視画像¹⁷⁾から、レーザーエネルギーの吸収量の増加によると考えられる。 CO_2 レーザーによるプラズマは、相対的に低密度であるため、光学的に薄く $13.5\ \text{nm}$ の自己吸収が少ないため、プラズマ特性長の増加に伴ってCEが増加したと考察される。

3.3 Snドロプレットターゲット

量産用LPP-EUV光源のターゲット材としては、EUV変換効率が良く、デブリの低減が図れ、連続の供給と回収が容易なSnドロプレットターゲットが有力な候補と考えている。EUV出力に必要なSn原子数とデブリ低減の観点および高繰り返しレーザーの照射への対応から、直径 $20\ \mu\text{m}$ 、

Fig. 5 Schematic diagram of high power pulsed CO_2 Laser system.

Fig. 6 EUV CE values as a function of the cavity depth for CO_2 laser (circles) and Nd:YAG laser (rectangles), respectively.

～ $30\ \mu\text{m}$ 、速度 $60\ \text{m/s}$ 以上で位置安定性の良い、孤立したSnドロプレットターゲットの開発を進めている。

開発したドロプレット生成法¹⁸⁾は連続ジェットに基づいたものである。まず溶融した液体ジェットを生成し、このジェット表面にピエゾ素子等の振動により、規則的な擾乱を与えることで、体積が一定な球状のドロプレットを形成する。Fig. 7に示すように、最小の直径約 $20\ \mu\text{m}$ までの、ほぼ均一なSnドロプレットの生成が可能となっている。

連続ジェット生成法では、形成されるドロプレットの間隔はドロプレットの直径に依存し、直径 $20\ \mu\text{m}$ ドロプレットの間隔は約 $45\ \mu\text{m}$ となる。このため、小径ドロプレットでは、レーザー照射スポット径の中に複数個の余分なドロプレットが存在し、これらがデブリの発生源となり好ましくない。少なくともレーザー照射スポット径 $150\sim 300\ \mu\text{m}$ より大きい間隔となるように、ドロプレットを孤立させる必要がある。

孤立ドロプレットの生成には帯電と偏向を利用している。ドロプレット生成装置の直下に、ドロプレットを任意の周期で帯電させる帯電用電極対と、帯電したドロプレットを偏向させるために直流電圧を印加した偏向用電極対を配置し、これらの電極間にドロプレットを通すことによって孤立ターゲットを得る。Fig. 8に、直径 $40\ \mu\text{m}$ のドロプレットを10個に1個の割合で偏向させた写真を示す。ドロプレット間隔は $1\ \text{mm}$ で、元のドロプレ列からも十分に離れた孤立ターゲットが得られた。

Fig. 7 Photographs of Sn droplets 50 mm below the nozzle.

Fig. 8 Isolated Sn droplets with uniform spacing about 1 mm.

3.4 磁場プラズマ制御による集光ミラー保護

プラズマからは、広いエネルギーレベルのイオン、原子が発生し、集光ミラーの表面へ付着、あるいは、表面をスパッタする。いずれの場合も、ミラー反射率の低下をもたらすため、集光ミラーの保護が課題となる。これまでの実験結果¹⁹⁾からCO₂レーザーをSnに照射した場合、デブリが大幅に低減できることが明らかになっている。Nd:YAGレーザーと比較して、CO₂レーザーでは、ミラー表面に飛沫状のデブリの付着が観測されず、水晶振動子質量計(QCM)を用いた評価では、総量として付着量が3桁程度少ないことを確認している。ここでは、磁場によるデブリ抑制効果について述べる。

実験には、コイル直径530 mm、コイル対間隔50 mm、中心部での最大磁束密度1 Tの電磁石を用いた。コイル間の閉じられた空間において、TEA-CO₂レーザーをSn平板ターゲットに照射し、イオン計測用のファラデーカップと、デブリ評価用サンプルミラーとを用いて、磁場によるデブリ抑制効果を確認した。

Fig. 9は、典型的なファラデーカップによるイオン信号波形である。プラズマ発生領域に磁束密度1 Tの磁場を印

Fig. 9 Faraday cup signal with and without magnetic field.

加することにより、ファラデーカップの信号は検出感度以下に減少し、信号の積分値は3桁以上低減した。Fig. 10は、Sn平板にCO₂レーザーを 4.0×10^4 パルス照射し、Snプラズマに暴露したサンプルミラーのTEM断面像である。Snプラズマに暴露されたミラーサンプル表面には、真空蒸着粒子とは異なるナノからサブナノ粒子が堆積した。磁場がない場合(b)は、ミラー堆積層の厚みは4~5 nm程度であったのに対して、磁束密度1 Tの場合(c)の堆積層の厚みは1 nm程度であった。磁場によるイオンの抑制がSnの堆積量を1/4~1/5に低減したと考えられる。

本実験は、コイル対間隔50 mm内の狭い空間のものであったため、イオンの再結合の影響などが排除できず、また、実際に用いる直径300 mm以上の集光ミラーに対する効果を見積もることができない。そこで、現在は広い磁場空間が確保できる超電導磁石を用いた試験を行なっている。Fig. 11に磁場中でのプラズマの様子を示す。磁束密度2 Tの磁場を印加した場合、イオンが磁束方向へ収束する様子が観測された。また、サンプルミラーを用いたSnプラズマ暴露試験から、パルス数 1×10^5 ではミラー表面にSnの堆積が見られないことも確認されている。

4. まとめ

EUVリソグラフィの実現には、光源の性能が決め手となる。将来の生産性向上に不可欠なEUV出力の拡張性と集光ミラーの長寿命化が図られ、経済的に成り立つ装置としてのEUV光源の早期実現が期待されている。これらの要請に応える量産用EUV光源として、我々はCO₂レーザー生成Snプラズマ光源の研究開発を進めている。

昨年度までにEUV光源プロジェクトの出力目標を上回る60 Wを達成すると共に、CO₂レーザーの出力向上、Snドロプレットターゲットの生成、磁場プラズマ制御による集光ミラー防御などの要素技術に目処をつけた。現在

Fig. 10 TEM cross sectional images of Mo/Si multilayer samples, (a) without exposure (b) without magnetic field (c) with a magnetic field of 1 T.

Fig. 11 Visible image of Sn ion flow (a) without magnetic field and (b) in a magnetic field of 2 T.

は、これらのEUVAでの成果を受け継ぎ、民間が主体となってEUV光源の実用化研究および開発を進めている。EUVリソグラフィ本格的な導入時期は2011～2012年と言われており、これに間に合うように、今年度中に統合システムでの検証を行い、その後実用装置の試作と評価を行う予定である。

謝 辞

本研究は、NEDO「極端紫外線(EUV)露光システムの基盤技術研究開発」の一環としてなされました。EUV光源プロジェクトを推進するにあたり、経済産業省、NEDOから頂いた支援に感謝します。LPP-EUV光源の研究開発は、文部科学省リーディングプロジェクト「極端紫外(EUV)光源開発等の先進半導体製造技術の実用化」と連携して進めました。数多くの有益な知見と助言を賜りました先生方に御礼申し上げます。また、本研究は、ギガフォトンの溝口計CTO、遠藤 彰LPP技術リーダーの指導の元、EUVA平塚研究センタおよびコマツ研究本部EUVグループの研究員によって実施されました。実際の研究に携わった研究員と関係者の皆様に感謝します。

参考文献

- 1) K. Suzuki, H. Kanazawa, and V. Banine: EUV Source Requirements, Presentation of EUV Source Workshop, Vancouver, May, 2006 (unpublished).
- 2) V. Bakshi (ed): *EUV Source for Lithography* (SPIE, Bellingham, 2005) Chap. 2.
- 3) 堀田 和明: レーザー研究 **29** (2001) 638.
- 4) A. Endo, H. Hoshino, T. Suganuma, K. Nowak, T. Yanagida, T. Yabu, T. Asayama, Y. Ueno, M. Moriya, M. Nakano, H. Someya, T. Nishisaka, T. Abe, G. Soumagne, H. Komari, H. Mizoguchi, A. Sumitani, and K. Toyoda: *Proc. Emerging Lithographic Technologies XII SPIE* **6921** (2008) 69210T.
- 5) D. C. Brandt, I. V. Fomenkov, A. I. Ershov, W. N. Partlo, D. W. Myers, N. R. Bowering, A. N. Bykanov, G. O. Vaschenko, O. V. Khodykin, J. R. Hoffman, E. Vargas L., R. D. Simmons, J. A. Chavez, and C. P. Chrobak: *Proc. Emerging Lithographic Technologies XI SPIE* **6517** (2007) 65170Q.
- 6) M. Corthout, R. Apetz, J. Brudermann, M. Damen, G. Derra, O. Franken, J. Jonkers, J. Klein, F. Kupper, A. Mader, et al.: *Proc. Emerging Lithographic Technologies XII SPIE* **6921** (2008) 69210V.
- 7) 遠藤 彰: レーザー研究 **32** (2004) 757.
- 8) Y. Teramoto, Z. Narihiro, D. Yamatani, T. Yokoyama, K. Bessho, Y. Joshima, T. Shirai, S. Mouri, T. Inoue, H. Mizokoshi, et al.: *Proc. Emerging Lithographic Technologies XI SPIE* **6517** (2007) 65173R.
- 9) S. Uzawa, H. Kubo, Y. Miwa, T. Tsuji, and H. Morishima: *Proc. Emerging Lithographic Technologies XI SPIE* **6517** (2007) 651708.
- 10) Y. Tanaka, H. Aoyama, K. Tawarayama, S. Magoshi, S. Shirai, and H. Tanaka: *Proc. Emerging Lithographic Technologies XII SPIE* **6921** (2008) 69211D.
- 11) J. Pankert, R. Apetz, K. Bergmann, M. Damen, G. Derra, O. Franken, M. Janssen, J. Jonkers, J. Klein, H. Kraus, et al.: *Proc. Emerging Lithographic Technologies X SPIE* **6151** (2006) 61510Q.
- 12) 小森 浩, 住谷 明, 遠藤 彰: レーザー研究 **35** (2007) 148.
- 13) T. Abe, T. Suganuma, M. Moriya, T. Yabu, T. Asayama, H. Someya, Y. Ueno, G. Soumagne, A. Sumitani, and H. Mizoguchi: *Proc. Emerging Lithographic Technologies XI SPIE* **6517** (2007) 65173C.
- 14) 井澤 靖: Optics & Photonics Japan 2006 講演予稿集 (2006) 9aBS3.
- 15) K. Nishihara, A. Sunahara, A. Sasaki, S. Fujioka, Y. Shimada, M. Nunami, H. Tanuma, M. Murakami, T. Aota, K. Fujima, et al.: *Proc. Emerging Lithographic Technologies XII SPIE* **6921** (2008) 69210Y.
- 16) H. Tanaka, A. Matsumoto, K. Akinaga, A. Takahashi, and T. Okada: *Appl. Phys. Lett.* **87** (2005) 041503.
- 17) Y. Ueno, G. Soumagne, A. Sumitani, and A. Endo: *Appl. Phys. Lett.* **91** (2007) 231501.
- 18) 中野 真生, 遠藤 彰: 日本流体力学会年会2005講演論文AM05-07-004.
- 19) 植野 能史, スマン ゲオルグ, 住谷 明, 遠藤 彰: レーザー研究 **35** (2007) 457.