



# Zピンチ放電プラズマ EUV 光源

勝木 淳, 佐久川貴志, 浪平隆男, 秋山秀典  
(熊本大学)

## Z-Pinch Discharge Plasma Based EUV Sources

KATSUKI Sunao, SAKUGAWA Takashi, NAMIHIRA Takao and AKIYAMA Hidenori

Kumamoto University, Kumamoto 860-8555, Japan

(Received 27 December 2004)

Presently high energy-density plasmas produced by gas discharges (DPP) are the most powerful EUV source for the next generation's high volume semiconductor manufacturing (HVM). This paper describes the radiation process in Z-pinch plasmas based on non-equilibrium ionization process and the fundamental Z-pinch plasma physics. Several schemes to control the pinching process and plasma parameters are shown. Also the present status of EUV sources developments and the critical issues to develop the DPP based EUV sources are discussed.

### Keywords:

EUV, lithography, conversion efficiency, Z-pinch, discharge produced plasma, non-equilibrium ionization process, pre-ionization, axial magnetic field, debris

### はじめに

次世代の半導体露光用光源として波長 13.5 nm の極端紫外線 (Extreme ultraviolet; EUV) の研究開発が日欧米で精力的に行われている。EUV 露光の研究は1986年に発表された木下ら (当時 NTT) の実験[1]に端を発する。いくつかの実証実験が行われたものの、EUV 露光は当時の技術要請に合わず、しばらく表舞台には出てこなかった。その後も携帯電話をはじめとする高度情報機器の登場とその高性能化に伴って、半導体の微細化技術は Moore の法則[2]に従って着実に進み、いよいよ EUV 光源が必要になってきたというわけである。実用化を見据えた本格的な EUV 露光の研究が始まったのは、1997年に米国において EUV LLC, 欧州でもほぼ同時期に EUCLIDES コンソーシアムが設立されてからである。翌年の1998年に日本でも技術研究組合 ASET において EUV 露光装置の検討が始まった。光源の開発は欧米で先行していたところ、純国産の EUV 露光装置を、との掛け声で2002年に経済産業省/NEDO の支援のもと技術研究組合 EUV 露光システム技術開発機構 (EUVA) が旗揚げされた。翌年2003年には文部科学省によって大阪大学を中心とした EUV 光源研究のリーディングプロジェクトが立ち上がり、EUVA の研究開発を理論的側面から支援している。このように経産省, 文科省の支援のもと2009年の国産実用機投入をめざして産官学が一体となって研究開発が進められている。

さて、13.5 nm という高エネルギーフォトンの生成法については、シンクロトロン放射光源 (SOR) とプラズマ光源があるが、設備コストを考慮するとプラズマ光源を選択

せざるを得ない。プラズマ光源にもレーザー生成プラズマ (LPP) と放電生成プラズマ (DPP) があり、それぞれに優位性と欠点があるため、特に日本においては両方式の光源開発が平行して進められている。本稿では、現時点において特に出力に関して大きい値が達成されており、最近目覚ましい進捗がみられる DPP 方式の光源について、放射物理, プラズマ物理, 最近の研究, 実用化に向けての課題を述べる。LPP 方式については文献[3, 4]を参考にされたい。

### 1. 次世代半導体 EUV 露光システム

Fig. 1 に反射型縮小光学系の EUV 露光システムの概略を示す[5]。EUV の波長領域ではこれまでの光源とは異なり透過型レンズが使えないため、光学系は図のようにすべて

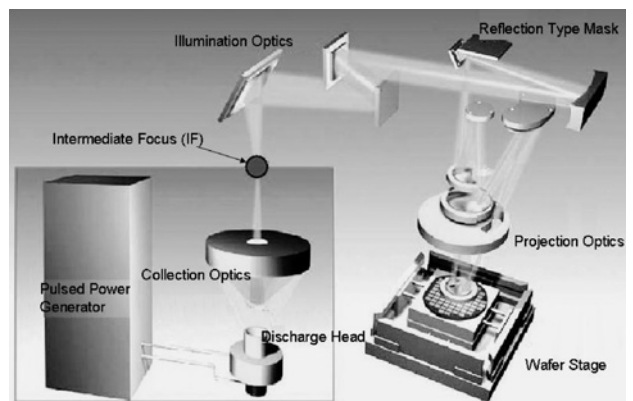


Fig. 1 EUV lithography system for semiconductor manufacturing [5].

author's e-mail: katsuki@eecs.kumamoto-u.ac.jp

反射光学系となる。光学系を光源から順にたどっていくと、まず光源からの光を集める集光光学系があり、中間集光点 (Intermediate Focus; IF) を通過した後、照明光学系、反射型マスク、投影光学系をやってウェハステージにたどりつく。もちろん酸素による吸収を避けるため光路はすべて真空容器の中に設置される。すべてのミラーには Mo/Si の多層膜が用いられる。Fig. 2 に Mo/Si 多層膜ミラーの典型的な反射特性を示す。波長 13~14 nm (バンド幅 2%) の光が約 70% の反射率で反射される。Mo/Si 多層膜ミラーの反射率およびウェハに塗布したレジストの感度 (約 5 mJ/cm<sup>2</sup>) を勘案すると露光実用機で必要となる光出力が算出できる。直径 12 インチのウェハを 1 時間に 100 枚処理するために必要な IF における光出力は 115 W となる [6]。IF よりも光源側の光の伝播特性には不確定要素が多いので、通常 IF での評価が行われる。集光ミラーの反射率等を考慮した光源部から中間集光点までの伝送効率も 20% 程度であり、光源部での集光率をかなり大きくとって 50% としても、光源での出力は 1 kW 以上が要求される。したがって、EUV 変換効率 2% が実現できたとしても、光源への入力も 50 kW を超えることになる。

Table 1 に露光用プラズマ光源に要求される主なパラメータを示す [6]。光出力のほかに、繰り返し周波数 7~10 kHz 以上、出力安定性は 0.3% 以下、光源の大きさや放射立体角の積で定義されるエテンデュは 1~3.3 mm<sup>2</sup>sr であり、実質的には 1.2 mm 以下の小さいプラズマが望まれる。放射スペクトルの分布も重要で、DUV/UV/Visible/IR における放射も厳しく制限される。これらに加えて実用化する上で最も厳しい要求が寿命である。非常にチャレンジングな開発であることに間違いはない。

## 2. ピンチ放電プラズマの生成と EUV 放射

### 2.1 高温・高密度プラズマからの EUV 放射

プラズマから波長 13.5 nm の高エネルギー光子 (90 eV) を取り出すためには、イオンを高密度の状態でも価に電離しなければならず、高エネルギー密度プラズマの生成が不可欠である。高エネルギー密度プラズマと放射物理に関する理論は文献 [7] が参考になる。最近の研究ではプラズマ源として Sn が用いられており、in-band EUV 光の高出

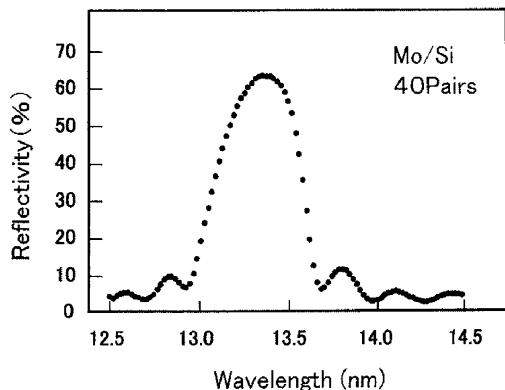


Fig. 2 Typical reflection characteristic of Si/Mo multilayer mirror [6].

力化に大きく貢献している [8-10]。ここでは放射物理に関する理論的な考察が多い Xe プラズマについて述べることにする。

定常状態のプラズマに関する放射スペクトルの計算例はいくつかあり、その中で原子力研究所の佐々木氏による計算例 [11] を Fig. 3 と Fig. 4 に示す。ここで、定常状態とは原子過程に比べてプラズマパラメータがゆっくりと変化し

Table 1 Requirements for EUV light source for high volume manufacturing (HVM) [6].

| Source characteristic                         | Requirement                    |
|---|--------------------------------|
| Wavelength                                    | 13.5 nm                        |
| EUV power at IF (2%band width, 13.5 nm)       | 115 W                          |
| Repetition frequency                          | >7~10 kHz                      |
| Integrated energy stability                   | ± 0.3%, 3σ over 50 pulses*     |
| Source cleanliness                            | ≥ 30,000 hours                 |
| Etendue of source output                      | max. 1 ~3.3 mm <sup>2</sup> sr |
| Solid angle input to illuminator              | 0.03~0.2 sr                    |
| Spectral purity: 130 ~ 400 nm (DUV/UV) ≤ 3~7% |                                |
| ≥ 400 nm                                      | to be discussed                |

\* σ is the dispersion of the output energy over 50 pulses.

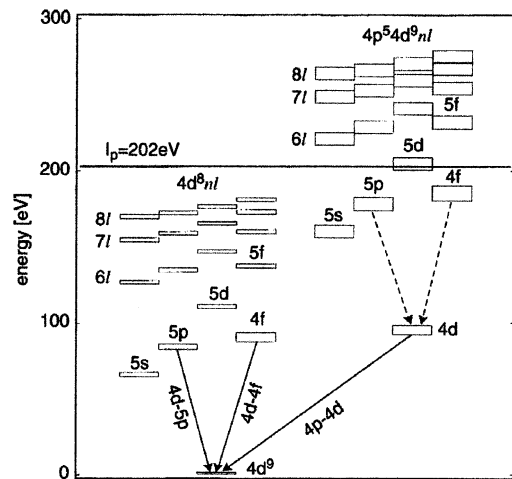


Fig. 3 Schematic energy level diagram of Xe<sup>9+</sup> [11].

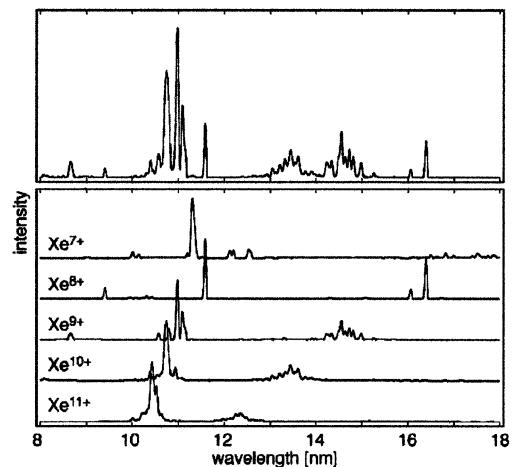


Fig. 4 Calculated spectrum of Xe<sup>7+</sup> to Xe<sup>11+</sup>, and synthetic spectrum of Xe plasma at  $T_e = 22$  eV, and  $n_i = 3 \times 10^{17}$  cm<sup>-3</sup> [11].

ている状態を意味する。計算では、放射に直接関与するXeイオンについてのHULLACコードの原子データが用いられている。Fig. 3はXe<sup>9+</sup>のエネルギー準位を示したものであり、各準位を示す箱の高さはその準位構造のエネルギーバンド幅である。Xe<sup>8+</sup>からXe<sup>15+</sup>は基底準位に4dnを有するという点で同様のバンド構造である。上準位である4d5p, 4d4fなどから基底準位4dへの遷移がEUV領域の放射に大きな影響を及ぼす。Fig. 4は、プラズマの電子温度とイオン密度をそれぞれ22 eV, 3×10<sup>17</sup> cm<sup>-3</sup>と仮定した場合の放射スペクトルと、Xe<sup>7+</sup>からXe<sup>11+</sup>までの各イオンからの放射に対する寄与を示す。図から13.5 nmは主にXe<sup>10+</sup>から放射されていることがわかる。以上の計算から、効率的に放射光を得るためにはXe<sup>10+</sup>が豊富に含まれるプラズマを生成することが鍵となることがわかるであろう。

Fig. 5は、衝突放射モデル[12]に基づいて計算されたプラズマエネルギーから波長13.5 nm(2%バンド幅)への変換効率(CE)を、プラズマの電子温度と電子密度に関してマッピングしたものである[13]。計算では、Xe<sup>10+</sup>の上準位4d<sup>7</sup>5pに関するHULLACコードの原子データが用いられている。プラズマは定常状態とし光学的厚さについても考慮されている。図から10<sup>18</sup>~10<sup>19</sup> cm<sup>-3</sup>のプラズマに対してCEが最大となることがわかる。

上述の定常状態モデルに対して、DPP方式、特にパルス幅100 ns程度の大電流で駆動したダイナミックなピンチプラズマでは、温度・密度の変化が原子内過程の速度と同等か速くなる、いわゆる過渡状態となる[13-15]。この場合、例えばエネルギーレベルの低い遷移過程が完了する前に更に上の準位に引き上げられることがあり得るので、効率良く多価イオンを生成ができる可能性があり、放射特性にも影響する。Fig. 6は過渡状態を考慮した計算例である。初期イオン密度を2×10<sup>17</sup> cm<sup>-3</sup>として、電子温度を0.1 eVから一定の率で100 ns間上昇させた。T<sub>e</sub>の上昇率dT<sub>e</sub>/dtを1と1.5 eV/nsとした場合についてXeの平均イオン価数、瞬間変換効率(IPCE)および時間積分の変換効率(PCE)が計算されている。比較のために、定常状態を仮定した衝突放射

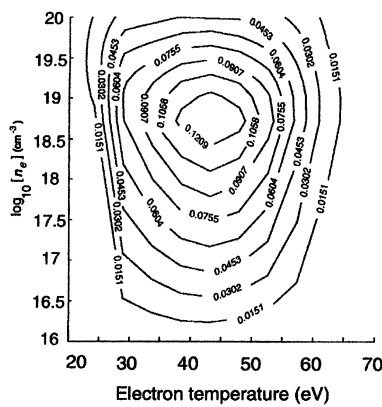


Fig. 5 Contour plot of the conversion efficiency (PCE in unit of %sr<sup>-1</sup> within 2% bandwidth) in electron density-temperature space. The calculation is based on the steady-state collisional radiation model. Maximum of the PCE is achieved for 10<sup>18</sup> < n<sub>e</sub> < 10<sup>19</sup> cm<sup>-3</sup> [13].

平衡モデル(CRE)の計算結果を載せている。変換効率はT<sub>e</sub>の上昇率、すなわち高温高密度プラズマを形成するプロセスによって大きく異なり、過渡状態を上手く利用することによって高いCEが得られる可能性があることがわかる。

Xe以外の発光材料にも触れておく。1999年ころからLPP方式でSnを発光材料として用いる研究が始まり、現在ではDPP方式でも用いられている[8-10, 16, 17]。いずれの実験でも高い出力と変換効率が得られている。Snは常温で固体であり低融点である割に比較的高沸点であるため、プラズマへの供給方法に工夫が必要である。このため、供給方法については光源サプライヤーからは公表されていない。Fig. 7は、XeまたはSnを用いた場合のEUV領域での典型的な発光スペクトルである。同一の電源で駆動されているので、両者において放電電流、投入エネルギーはほぼ同等である。Snを用いた場合は13.5 nm近傍に強い発光があることがわかる。これは、Sn<sup>8+</sup>-Sn<sup>13+</sup>の4d4f遷移による

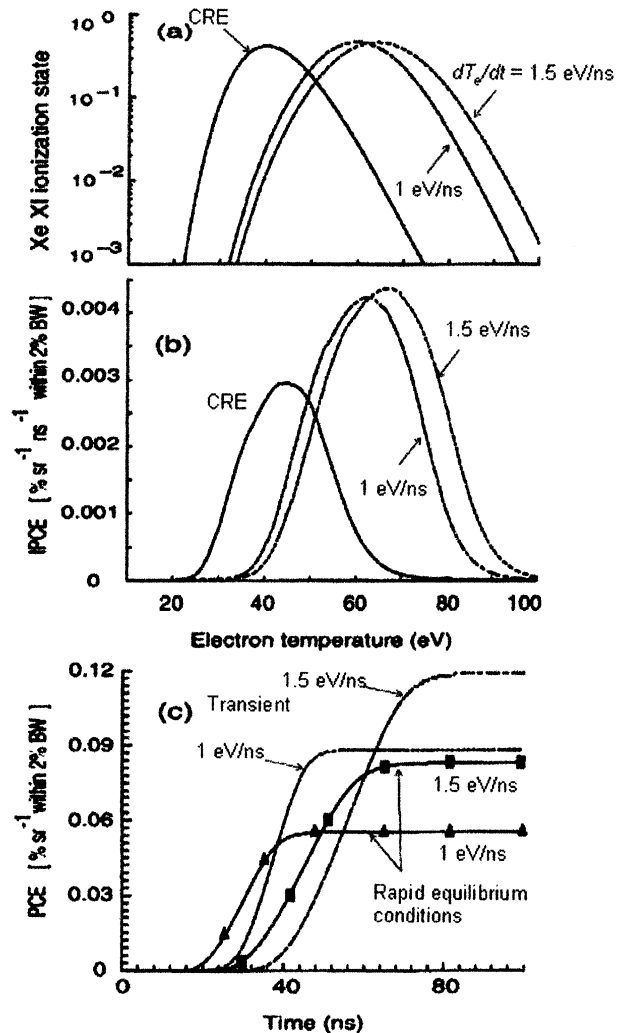


Fig. 6 (a) Variation of the Xe<sup>10+</sup> ionization state as a function of electron temperature for two electron heating rates. The Xe<sup>10+</sup> ionization state derived using collisional radiative equilibrium (CRE) is also shown. (b) Variation of the instantaneous plasma conversion efficiency (IPCE) as a function of electron temperature. (c) Integrated plasma conversion efficiency (PCE) against time [13].

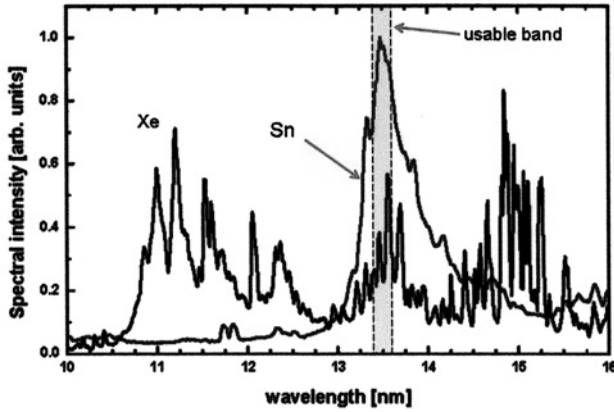


Fig. 7 EUV spectra at Xtreme Z-pinch EUV sources with tin and xenon [16].

発光である。

Liもちょうど 13.5 nm にシャープな発光スペクトルを有する。DPP 方式で実験的に使用された例[18]があるが、供給方法と取り扱いの難しさからLiを使用した実験はそれ以降公表されていない。LPP 方式ではLiをターゲットに用いた実験が多く発表されている。特にCymerでは2台のXeF レーザー (351 nm) と Li ターゲットを組み合わせた量産技術用の光源開発が進められつつある[19]。集光ミラーのLiによる汚損を熱で回復する技術[19]が報告されておりその信頼性がLiを選択する理由であると考えられる。

## 2.2 Zピンチによるプラズマ閉じ込め

XeのZピンチ放電プラズマを例に、磁気閉じ込め、MHD不安定性等について考える[20-22]。Zピンチプラズマの圧力平衡は、プラズマの圧力を $p$ 、電流と磁場を $i$ 、 $B$ とすると、

$$\nabla p = i \times B, \quad (1)$$

$$\nabla \times B = \mu_0 i, \quad (2)$$

$$\nabla \cdot B = 0, \quad (3)$$

で表される。ここで、 $\mu_0$ は真空の透磁率である。Z軸に対称なプラズマ柱における半径方向の平衡状態は(1)および(2)式から

$$\frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{r^2 B_\theta^2}{2 \mu_0} \right) + \frac{\partial}{\partial r} \left( p + \frac{B_z^2}{2 \mu_0} \right) = 0, \quad (4)$$

となる。 $B_\theta$ はプラズマ電流による方位角方向の自己磁場、 $B_z$ は後述(3.3(4))のZ軸方向の外部磁場である。ここでは $B_z = 0$ とする。温度および電流分布がプラズマ柱の断面わたって一様であると仮定すると(4)式からBennettの平衡条件

$$8\pi(1+Z)N\kappa T = \mu_0 I_0^2, \quad (5)$$

が得られる。ここで、 $Z$ 、 $N$ 、 $T$ はそれぞれイオン価数、イオン線密度、プラズマ温度、 $\kappa$ はボルツマン定数であり、 $p = (1+Z)N\kappa T$ である。 $T = 30$  eV、 $N = 6.5 \times 10^{16}$  cm $^{-1}$ 、 $Z = 10$ のピンチプラズマが生成されその半径が0.2 mm になったとすると、これを閉じ込めるためには $I_0 > 8.6$  kA

の電流が必要となる。

次にMHD不安定性について考える。Zピンチプラズマにおける支配的なMHD不安定性はソーセージおよびキンク不安定性である。表面電流モデルを用いた場合、非圧縮性プラズマのソーセージおよびキンク不安定性の線形成長率 $\gamma_0$ および $\gamma_1$ は、不安定性の波数を $k$ として、長波長近似ではそれぞれ次式で与えられる[22]。

$$\gamma_0 = \frac{kV_A}{\sqrt{2}}, \quad \gamma_1 = kV_A \ln\left(\frac{1}{kr_p}\right) \quad (6)$$

上述のプラズマ条件を当てはめると、成長率の逆数である成長時間として102 ns および 240 ns が得られる。ソーセージ不安定性の成長時間はプラズマの閉じ込め時間と同程度のため、十分な閉じ込め時間を得るにはこの不安定性を抑制しなければならない。MHD不安定性は初期擾乱をきっかけにして成長する。したがって、初期擾乱の少ないプラズマを生成できれば、閉じ込め時間内での不安定性の成長が、プラズマの閉じ込めに対して影響しない程度に抑制されることになる。初期擾乱の少ない様なプラズマを生成するためには予備電離(後述3.3(2))が重要である。ピンチダイナミクスの利用により、高温、高密度のプラズマを効率的に得ることができ、結果としてCEも大きくできる。ピンチ時間は放電管半径を $r_T$ 、初期質量密度を $\rho_{m0}$ として

$$\tau_p \approx \frac{r_T}{V_{A0}} = \frac{r_T}{B_0/\sqrt{\mu_0 \rho_{m0}}}. \quad (7)$$

で与えられる。衝撃波を伴う場合の最小ピンチ半径は初期半径の0.3程度[21]であるが、強い放射を考慮して $r_T = 1$  mm とし、前述の条件を当てはめると $\tau_p \sim 45$  ns が得られる。また、このピンチ時間で1価電離イオンが管軸上に達したときに得る運動エネルギーは約220 eVであるが、これだけでは10価電離に必要な電離エネルギー(合計は約850 eV)には達しない。ピンチに伴う衝撃波加熱や断熱圧縮、さらにはジュール加熱が必要不可欠である。

Fig. 8は100 Hz繰返し動作時のZピンチ放電プラズマの積分写真(斜め30°から撮影)である[23]。直径5 mm $\phi$ のアルミナ放電管にパルス幅150 ns、波高値27 kAのパルス電流を流してXeプラズマを駆動している。本実験条件では、プラズマの直径とZ方向の長さはそれぞれ300  $\mu$ m、7 mmである。Fig. 9は時間分解シュリーレン法でZ軸方向から撮影したプラズマシースの挙動を示す。放電管の近傍

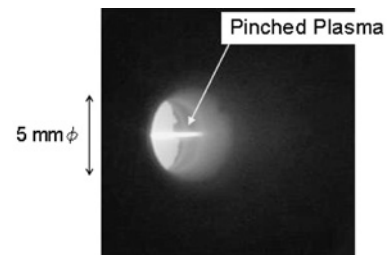


Fig. 8 Still photograph of the Z-pinched EUV plasma, viewed from 30° for the z axis. The diameter and the length of the discharge tube are 5 mm $\phi$  and 10 mm, respectively [23].

でプラズマが発生して時間とともに中心に向かって移動している様子が見られる。Fig. 10 に時間分解干渉法によって測定した Xe プラズマの挙動を示す。異なるショットの異なる時間の干渉像を合成して得た電子密度半径方向分布の時間変化である。右端は放電電流の概形である。放電条件は Fig. 8 と同じである。Fig. 10 においても Fig. 9 のプラズマの挙動が再現されていることがわかる。プラズマが中心軸上でピンチする 140 ns において中心軸上の電子数密度は急峻に立ち上がっている。干渉計測では半径 150 μm 以内のプラズマコアの密度を測定できていないが、その周辺において  $1.3 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  を超える値となった。

ここにきて、変換効率を高めるためにプラズマを制御する必要性が高まってきた。そのためには、まずプラズマの素性を明らかにしなければならない。トムソン散乱法などによってプラズマコアのパラメータ測定が不可欠となってきている。

2.3 プラズマダイナミクスの制御

LPP に比べて DPP では放電初期の低エネルギー密度からピンチするまでのプロセスが EUV 放射時の高エネルギー密度プラズマパラメータを決定する。したがって、ピ

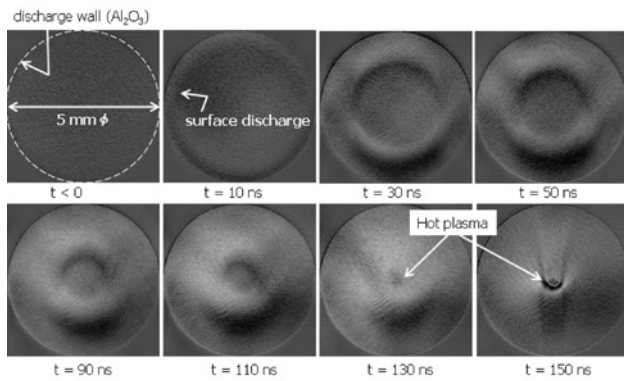


Fig. 9 Radial movement of the plasma sheet observed by a time-resolved Schlieren method. Temporal resolution is 7 ns [22].

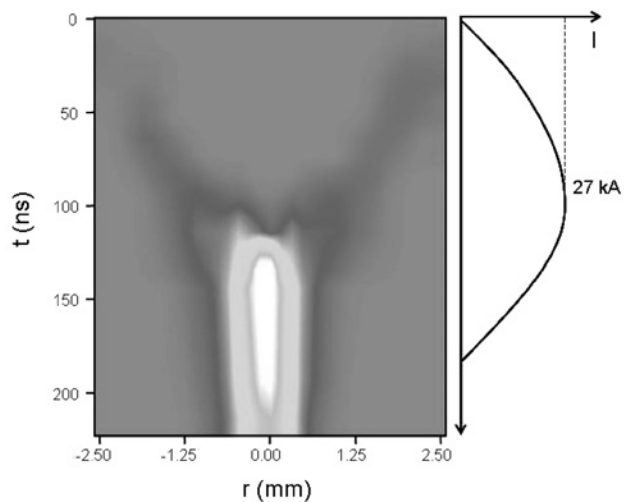


Fig. 10 Temporal development of radial electron density distribution during pinching. Diameter of the discharge tube is 5 mm [22].

ンチプロセスを制御できれば EUV 放射時のプラズマパラメータを制御でき、変換効率の向上が期待できる。ピンチプロセスの制御手法として、電流波形、予備電離、電極構造、外部磁場、ガスの混合などがある。これらを上手く組み合わせることによって EUV 放射の高出力・高品質化が期待できる。

(1) 電流波形

前節で述べたように、放電回路の低インダクタンス化により電流の立ち上がりを高速に、かつ電流値そのものを大きくできれば、プラズマをよりダイナミックに圧縮できるので、変換効率の改善が期待できる。現在のところ、パルス幅 150 ns、波高値 40 kA 以上の大電流でプラズマを駆動している研究があり、出力向上に一役買っている[24]。回路の寄生インダクタンスは 10 nH 程度と極限まで低減されている。さらにパルス幅を短くするためには、回路の最終段コンデンサの容量を減じて動作電圧を高くする必要がある。

(2) 予備電離

ピンチプラズマでは不安定性の制御が重要であり、放電形成時の初期擾乱を抑制するためにターゲットガスの予備電離が不可欠である。Fig. 11 は、堀田らによって行われた高速キャピラリー放電型軟 X 線レーザーの実験[25]において、予備放電の効果を示す放電のフレーミング写真である。放電観察用のパイレックスガラス製のキャピラリーの直径および長さはそれぞれ 3 mmφ、60 mm である。キャピラリーには 150 mTorr の Ar ガスが充填されている。電流

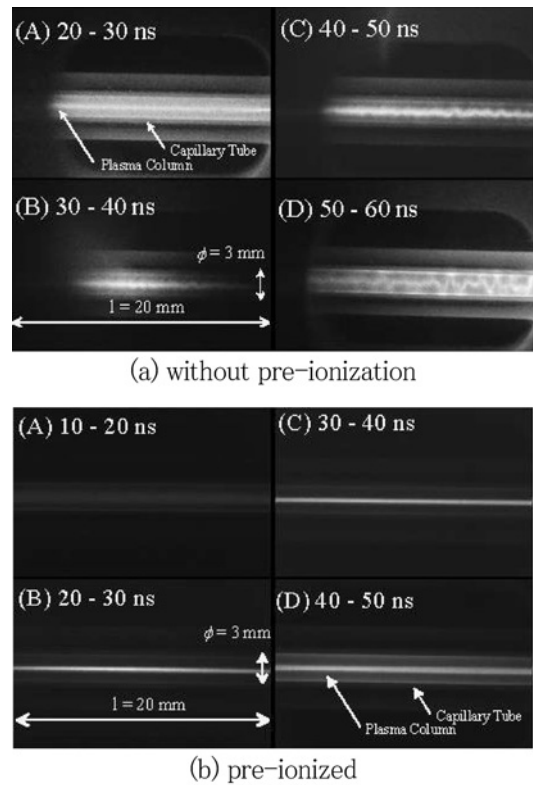


Fig. 11 Time-resolved photographs which are showing the improvement of discharge uniformity using pre-ionization in capillary discharges [25].

値10~30 kAの主放電の前に数10 Aの電流を放電管に流すことによってArガスの予備電離を行う。図中の数字は通電開始後の時間である。予備電離放電がない場合(a)はプラズマに不安定性が発生しプラズマ柱が崩壊しているが、適切な予備電離放電を用いることにより空間的に安定なZピンチプラズマが得られている(b)。

予備電離方式にはいくつかあり、予備放電方式、光電離方式、電離したガスを入射する方式が考えられる。DPP方式では多くの場合駆動電源回路に磁気スイッチが用いられており、主回路に電圧が印加されてから主電流が流れるまでの間、放電管を通して数100 A程度の電流が流れる。この電流を利用してガスを電離する。この方法は、特別な装置改造が必要なく自動的に行われるので都合が良いが、プラズマに与える電力と電離空間を制御できないので、予備電離の最適化は難しい。主電極とは別に電極を設け積極的に放電をさせることも可能である。XTREMEで採用されている光電離方式をFig. 12に示す[9, 16]。電極から離れた場所で沿面放電を起こして放電に伴う紫外線を利用する。沿面放電のZ方向延長線上に陽・陰極の端があり、陽・陰極を短絡するように円筒状領域が予備電離される。この状態で陽・陰極間に電圧が印加され理想的な円筒状放電が形成される。プラズマガンのように、プラズマを主放電部の外で生成して放電管内に入射する方法も検討されている。

### (3) 電極構造

プラズマをダイナミックに閉じ込めるにはプラズマの初期半径、すなわち放電部（絶縁壁）の内径の選択が重要である。放電管を大径化するとピンチ直前におけるプラズマの径方向の運動エネルギーが増加する。同時に、絶縁壁表面での熱負荷が低減される。ただし、管径を変化するとプラズマのダイナミクスに合わせて電流波形およびガス圧を調整する必要がある。また、ピンチするまでの時間が長くなることと移動する空間が大きくなるので、擾乱に起因するプラズマ不安定性が成長する可能性は高くなり、プラズマ閉じ込めや空間的安定性の劣化が懸念される。このため径が大きいほど予備電離の重要性が高まる。

以上に述べた平面的な1次元収縮に加えて、ガスダイナミクスを考慮してプラズマをZ方向にも移動させる2次元収縮によってピンチプロセスを制御する試みがなされている[26]。ディスク状陽・陰極の内径を異径にする、放

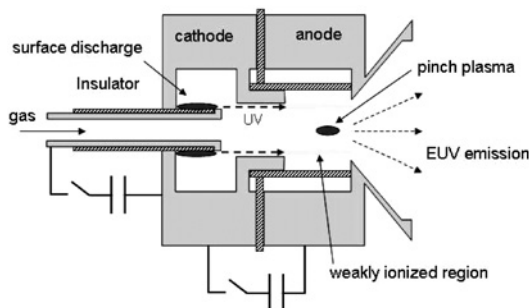


Fig. 12 Photo-preionization scheme based on surface discharge in Xtreme Z-pinch EUV source [9,16].

電管の内壁をテーパ状にする、Z軸方向に圧力勾配をつくる、などの手法が検討されている。ピンチプラズマをZ軸上で移動させて電極外に誘導できる可能性があるので、熱負荷と放射角の点で有利になると予想される。

### (4) 外部磁場

Zピンチ放電において、プラズマ生成前にあらかじめZ方向の磁場を印加しておくことによって放射スペクトルが長波長側へシフトすることは実験的によく知られている[27]。Fig. 13に外部磁場のプラズマへの作用の概念図を示す。急峻な立ち上がりの電流を放電管に流すと、放電管壁近傍で環状のプラズマが生成され、その後の電流によって加熱されて密度を増しながら放電管中心へ向かって移動する。ここで、Z方向に外部磁場が印加されていると磁場はプラズマを横切れず、環状プラズマの内部に閉じ込められたままプラズマとともに掻き集められる。プラズマが半径rまで収縮したとき、プラズマ内に閉じ込められる縦磁場 $B_z$ は、外部印加磁場を $B_{z0}$ 、プラズマ初期半径を $r_0$ とすると、

$$B_z = B_{z0} \frac{r_0^2}{r^2}, \quad (8)$$

となる。 $r_0/r$ は数10のオーダーなので、100 gauss以下の弱い外部磁場でもピンチ直前には1 Tを超える。この内部からの磁気圧が最大収縮時のプラズマ運動エネルギーを緩和する。外部磁場の強度を調整することによってピンチ時のエネルギー密度を制御でき、ひいてはスペクトルの制御が可能となる。また、ピンチダイナミクスが緩和されるのでプラズマ閉じ込めとともに放射時間が長くなり出力向上につながる。Fig. 14は、直径5 mmφの放電管に27 kAのパルス電流を流して生成したXeプラズマの挙動(電子密度径方向分布)を、外部磁場の有・無で比較したものである。外部磁場は主放電と独立した電源でソレノイドを駆動して生成し、放電管内における磁場は270 gaussである。右端は放電電流の概形である。外部磁場の有・無によってプラズマのピンチ過程が変化していることがわかる。一連の実験から、適当な強度の磁場を印加することによってプラズマの空間安定性が向上すること、EUV放射時間が長くなり出力が向上すること、光源サイズが若干大きくなることわかった[28]。

## 3. 放電プラズマ EUV 光源開発の現状と動向

放電プラズマ EUV 光源の研究の現状と動向について、

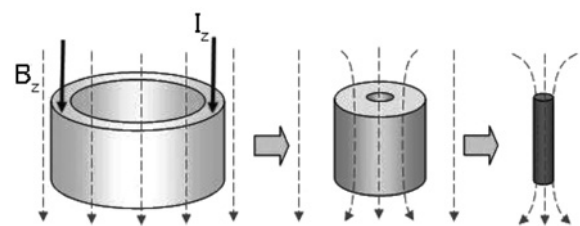


Fig. 13 Effect of an external magnetic field on the plasma pinching process.

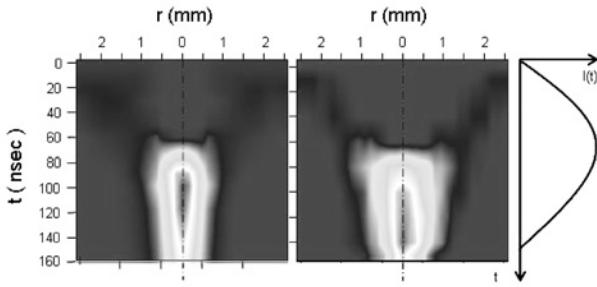


Fig. 14 Effect of an external magnetic field on the temporal development of radial electron density distribution of Z-pinch plasmas. Left: without the magnetic field, right: with the external magnetic field of 120 gauss. Diameter of the discharge tube is 5 mm. [28]

主な光源サプライヤーの成果を中心に述べる。主な光源サプライヤーとは、Xtreme Technology(独, 以下 Xtreme), Philips Extreme UV (独, 以下 Philips), Plex LLC (USA, 以下 Plex), EUVA (日本), Cymer (USA) であり, 各サプライヤーが公表した光源性能の一覧を Table 2 に示す。

Cymer ではプラズマフォーカス方式[29]の装置の開発を行っていたが, デブリや出力安定性の問題に対する解が得られなかったことと集光ミラーのLi汚損回復技術[19]に目処が立ったことなどから, 放電方式からLiをターゲットとしたレーザー方式へと変更している。そのため, 表中のデータは2004年2月時点のものである。

Xtreme のDPP 光源の特徴は, Fig. 12 のように沿面放電を利用して主放電空間の強力な予備電離を行っていることである。Xtreme は, 既にXe プラズマを用いた繰り返し1000 Hz, IF 出力3.8 W (発光点出力38 W/2πsr) の光源をExitech社に納めており, 評価用露光装置で稼働中である[16]。第3回 EUVL 会議で公表されたデータによると, 開発中の装置ではSn ターゲットを用いて発光点出力400 W

/2πsr, IF 出力51.4 W (推定) が得られている[9]。

Philips の光源は, 基本的にZピンチ放電であるが, ホロー陰極を採用しており陰極内に設けた電極の電位を変化することによって主放電をトリガーする構造となっている[30]。放電により放電管中心部に放電経路を形成するので放電管壁とプラズマとの距離を大きくでき熱負荷の低減に有利である。Philips はASML社にEUV実験用として発光点出力113 Wの光源を納入済みである。第3回 EUVL 会議で発表されたSn ターゲットを用いた装置では, 発光点出力257 W/2πsrを分単位の連続運転で実現している。注目すべきは, Sn の場合の光源サイズがXeに比べて小さくなったため集光効率が約2倍に改善されていることであり, 発光点出力をIF出力に換算すると46 Wとなる。入力を小さくして発光点出力を120 W/2πsrに抑えたと同じ電極で3×10<sup>8</sup>回以上の連続運転が可能である。Fig. 15にPhilipsにおいて得られた光源出力(IF換算)の変遷を示す。発光材料をXeからSnに切り替えることによって変換効率と集光効率が良くなり, 今後IF出力115 Wの達成が見込まれる。また, Philipsでは集光ミラーの延命技術とともに出力

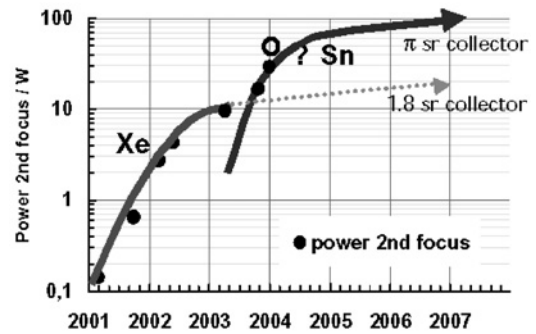


Fig. 15 Historical development of EUV output in Phillips Extreme UV [10].

Table 2 Present status of EUV source development. (mostly presented at the 3rd EUVL Symposium at Miyazaki, November 14, 2004)

|                                | EUVA                                      |                  | Xtreme Technology                                    |                           | Philips Extreme UV               |   | Plex LLC                 |                  | Cymer*                      |
|--------------------------------|---|------------------|--|---------------------------|----------------------------------|---|--------------------------|------------------|-----------------------------|
| Discharge type                 | Z-pinch + plasma injection                |                  | Z-pinch + pre-ionization                             |                           | Z-pinch + hollow cathode trigger |   | Star pinch               |                  | Plasma focus                |
| Radiator                       | Xe  | Sn (in progress) | Xe   | Sn                        | Xe                               | Sn  | Xe                       | Sn (in progress) | Xe                          |
| Input power / energy per pulse | 56 kW / 8 J -                             |                  |  |                           | 15 kW                            | 6 kW cw<br>13.4 kW min                          | 20 kW / 5 J -            |                  | 10 kW / 12.4 J              |
| Repetition frequency           | 7,000 Hz bst -                            |                  | 1,000 Hz cw<br>4,500 Hz bst                          | 5,000 Hz bst              | >5,000 Hz                        | >5,000 Hz <sup>4</sup><br>260 Hz min            | 2,000 Hz -               |                  | 1,000 Hz cw<br>4,000 Hz bst |
| Source power / 2 πsr           | 170 W bst -                               |                  | 38 W cw<br>200 W bst                                 | 400 W bst                 | 150 W bst                        | 120 W cw<br>257 W min                           | 100 W bst -              |                  | 50 W cw<br>200 W bst        |
| Power at IF                    | 12 W brst -<br>(1.8 sr collector assumed) |                  | 3.8 W cw<br>22.4 W bst<br>(1.8 sr collector assumed) | 51.4 W bst                | 15 W bst                         | 22 W cw<br>46 W min<br>(π sr collector assumed) | 5 W bst -                |                  |                             |
| Conversion efficiency / 2πsr   | 0.7 % -                                   |                  | 1 %  | 2.9 %                     | 0.5 %                            | 2 %   | 0.5 % -                  |                  | 0.42 %                      |
| Correction solid angle         | 1.8 sr -                                  |                  | 1.8 sr   | 1.8 sr                    | 1.8 sr                           | p sr  | 2 sr -                   |                  | π sr available              |
| Source size                    | 1.1 mm                                    |                  |  | 1 4 mm                    |                                  | 1.3 mmφ   | 4.5 mm -                 |                  | 2.5 mm                      |
| Energy stability               | σ*** = 1.3 % -                            |                  |  | σ = 10 %                  | σ = 0.2 %                        | -   | -                        |                  | 3σ = 20 %                   |
| Collector lifetime             | >10 <sup>7</sup> shots                    |                  | 10 <sup>8</sup> shots                                | 5 × 10 <sup>6</sup> shots | 2.3 × 10 <sup>9</sup> shots      | >3 × 10 <sup>8</sup> shots                      | >10 <sup>8</sup> shots - |                  | 10 <sup>7</sup> shots       |

\* Data shown here was presented at the 2nd EUVL symposium, November, 2003. Cymer has changes their direction to LPP base EUV source.  
 \*\* cw: continuous operation, bst: burst operation, min: minutes operation.  
 \*\*\* σ is the dispersion of the output energy over 50 pulses.

安定性の改善に取り組んでいる。集光ミラーについてはRu/Si膜の導入によって反射率が10%低下するまでに $5 \times 10^8$ 回の連続運転がされている。また、出力安定性についても0.2%を実現している[31]。

Plexの光源は、基本的にZピンチ放電であるが、Astronと称するPseudospark放電に似た電極構造となっており、Star Pinchと名づけられている[32]。放電管壁がピンチ放電から約30 mm離れており、熱負荷に配慮した設計となっている。また、Snドロップレットを高繰返しで放電部の中心に入射することが検討されている[33]。

EUVAでは、低インダクタンスの7 kHz電源によってパルス幅150 ns、ピーク値40 kAの短パルス電流でXeプラズマを駆動し、発光点出力170 W/ $2\pi$ sr、換算IF出力12 Wを得ている[34]。Xeを用いた放電プラズマ方式では2004年12月時点で最高値である。

#### 4. 課題とその対策

Table 3は、2004年11月EUVL会議に併催された光源ワークショップにおいて、光源開発重要課題について参加者に取られたアンケートを票数の多いものから順に並べたものである。2004年2月に行われたSPIEミーティング以前にずっと重要度1位に挙げられていた光源出力は4位に下がり、集光ミラーの延命とデブリ除去技術が最優先課題となった。要するに出力に関しては目処が立ったと言える。さらに詳しく見ると、1位の集光ミラー延命とデブリ除去、3位の放電管の放熱、7位放電管等の寿命、9位のCEは互いに関連があり、全ては熱の問題に帰着する。したがって、いかにして変換効率を向上するか？いかに放電管への入力を必要最小限にとどめるか？というプラズマダイナミクスの理解とパルス電源技術を高次元で融合した研究が必要となる。

50 kWの莫大な熱をどのように排除するか？放電によって発生したデブリをどのように除去するか？これらに対する決定的な解はまだ見当たらない。デブリには3種類あり、プラズマ生成の過程で放出される高速イオン、中性粒子、および電極などの蒸発や溶融に起因する微粒子である。これらはいずれも集光ミラーを損傷する。高速イオンについては静電気・静磁場によって曲げてとる方法が有力

である[4]。高速中性粒子については放電で帯電させた後に前出の方法でとる方法が検討されている。3つ目の微粒子については長時間運転時には深刻となる。特にSnを使った場合、1回の放電で $10^{15}$ 個の粒子を消費したとして[35]  $10^6$ 回の放電で10 gになる。これをどのように排除するかは重要な課題であり、いくつかの対策が検討されているが、決定的な方法は見つかっていない。

一方、出力に関しては、DPP方式ですでにIF出力で50 Wが得られているが、さらなる高出力化の方策はまだ残っている。3.1で述べたように、ピンチプロセスをよりダイナミックにすることによってCEを大きくできる予想があり、駆動電流の立ち上がりを高速にしてどこまでCEが大きくなるか非常に興味深い。発光材料に関しては、Snの場合、デブリの点で不利であるが、高出力を得るためには他の選択肢はないように思われる。Liもあるが、スペクトル幅が狭いので大きな出力が得られないという懸念がある。放電の繰返し周波数については、露光光学系からの要求により7–10 kHz以上とされているところであるが、高繰返し電源については、放電レーザー用パルス電源が既に開発されていることからあまり問題はない。放電で使い切れなかったエネルギーを回収する回路技術[36]も確立している。負荷に高速な電流を供給できるような、放電管と一体型となった低インダクタンス装置の設計が鍵を握ると考えられる。

#### 5. 今後の展望

2004年2月に行われたSPIEミーティングから同年11月のEUVL会議までの約8ヶ月で、光源出力は最優先課題ではなくなった。XtremeとPhilipsの驚くべき開発進展によって光源出力115 W達成の見込みが出てきた。しかしながら、次に解決すべき集光ミラーの寿命は依然として難題であり、この問題を解決するためには放電電力の最小化と変換効率の大幅な改善が必要である。このためには、プラズマをよく知る(計測する)ことと制御することを、プラズマ物理の基本的立場にたって推し進めることが重要である。

本稿で紹介した熊本大学の研究の一部はEUVA (NEDO/METI)からの支援を得て行われている。また、放電・放射物理に関しては、東京工業大学堀田、堀岡の両先生にご助言いただいた。ここに記して感謝の意とする。

#### 参考文献

- [1] H. Kinoshita *et al.*, J. Vac. Sci. Technol. B 7, 1648 (1989).
- [2] 例 えば <http://www.intel.com/research/silicon/mooreslaw.htm>
- [3] H. Nishimura *et al.*, J. Plasma Fusion Res. 80, 325 (2004).
- [4] 遠藤 彰: レーザー研究 32 (12), 757 (2004).
- [5] EUVA 公式ウェブサイト [http://www.euva.or.jp/technical\\_info/tool.html](http://www.euva.or.jp/technical_info/tool.html)
- [6] 岡崎信次: レーザー研究 32 (12), 744 (2004).
- [7] D. Attwood, *Soft X-rays and Extreme Ultraviolet Radiation - Principles and Applications* (Cambridge University Press).

Table 3 Critical issues for EUVL tool development, revealed at the Source Workshop at Miyazaki, November 4, 2004.

| Priority | Critical Issue                            | Votes |
|----------|---|-------|
| 1.       | Collector lifetime + debris mitigation    | 106   |
| 2.       | Cost of ownership                         | 64    |
| 3.       | Thermal loading                           | 44    |
| 4.       | Source power                              | 39    |
| 5.       | Spectral purity                           | 27    |
| 6.       | Higher efficiency collector designs       | 19    |
| 7.       | Non-collector critical component lifetime | 12    |
| 8.       | IF metrology readiness                    | 11    |
| 9.       | Conversion efficiency                     | 11    |
| 10.      | Laser related issues                      | 6     |
| 11.      | Standards for comparison of lifetime      | 5     |



- 1999).
- [ 8 ] V.M Borisov, J. Phys. D: Appl. Phys. **34**, 3254 (2004).
  - [ 9 ] J. Ringling et al., *Poster at the 3rd International EUVL Symposium*, Miyazaki, Japan, Nov. 1~4, 2004, So06.
  - [10] J. Pankert et al. Proc. SPIE **5037**, 112 (2003).
  - [11] A. Sasaki, J. Plasma Fusion Res. **79**, 315 (2003).
  - [12] 「プラズマの生成と診断」プラズマ・核融合学会編（コロナ社，2004）p.133.
  - [13] M. Masnavi et al., Jpn. J. Appl. Phys. **43** (12), 8285 (2004).
  - [14] M. Masnavi et al., J. Plasma Fusion Res. **79**, 1188 (2003).
  - [15] M. Masnavi et al., *Poster at the 3rd EUVL Symp.*, Miyazaki, Japan, Nov. 1~4, 2004, SoP08.
  - [16] U. Stamm, *Poster at 2nd European EUVL Workshop*, Rotterdam, NL, Sep. 23, 2004.
  - [17] S. Katsuki, *Poster at the 3rd EUVL Symposium*, Miyazaki, Japan, Nov. 1~4, 2004, SoP07.
  - [18] W. Partlo et al., Proc. SPIE **3997**, 136 (2000).
  - [19] D.W. Myers et al., *Poster at the 3rd EUVL Symposium*, Miyazaki, Japan, Nov. 1~4, 2004, So03.
  - [20] 堀田栄喜他：レーザー学会学術講演会第24回年次大会講演予稿集，29aS3, pp.S5-S6 (2004).
  - [21] 横山昌弘編：プラズマ理工学，大電流プラズマ現象とその応用（日刊工業新聞社，1989）p.27.
  - [22] M.A. Liberman, J.S. De Groot, A. Toor and R.B. Spielman, *Physics of High-Density Z-Pinch Plasmas* (Springer-Verlag, 1998).
  - [23] S. Katsuki et al., *Poster at the 3rd EUVL Symposium*, Miyazaki, Japan, Nov. 1~4, 2004, SoP05.
  - [24] Y. Teramoto et al., *Poster at the 3rd EUVL Symposium*, Miyazaki, Japan, Nov. 1~4, 2004, So05.
  - [25] G. Niimi et al., IEEE Trans. Plasma Sci. **30**, 616 (2002).
  - [26] 堀岡一彦他：電気学会研究会資料，PPT-04-24 (2004) p.51.
  - [27] T. Igusa et al., *NIFS PROC Series*, ISSN 0915-6348 (1998) p.70.
  - [28] S. Katsuki et al., *Poster at the 3rd EUVL Symposium*, Miyazaki, Japan, Nov. 1~4, 2004, SoP05.
  - [29] W. Partlo et al., Proc. SPIE **3676**, 136 (1999).
  - [30] J. Pankert et al., Proc. SPIE **5037**, 112 (2003).
  - [31] J. Pankert et al., *Poster at the 3rd International EUVL Symposium*, Miyazaki, Japan, Nov. 1~4, 2004, So02.
  - [32] M.W. McGeoch, Draft "Star Pinch EUV Source," to be appear on SPIE Press, Bellingham, WA, USA (2005).
  - [33] M.W. McGeoch, J. Phys. D: Appl. Phys. **37**, 3227 (2004).
  - [34] EUVA official web site, Research result, [http://www.euva.or.jp/research\\_results/euv\\_light\\_with\\_dpp.html](http://www.euva.or.jp/research_results/euv_light_with_dpp.html)
  - [35] 豊田浩一：レーザー研究 **32** (12), 742 (2004).
  - [36] 電気学会技術報告書，第960号「パワーデバイス応用大電力パルス電源の適用技術」26 (2004).



かつ き すなお  
**勝木 淳**

熊本大学大学院卒業後，熊本大学助手，助教となり現在に至る．同大学秋山教授の下パルスパワー電源の開発と産業応用に関する研究に携わってきた．2001年に渡米し K.H. Schoenbach 教授の下パルスパワーの生体作用に関する研究に従事し，その経験をもとに帰国後バイオ関係の研究を開始した．一方，Z-pinch 放電の研究には予てから携わっており，EUV 光源研究の礎となっている．家族は妻と娘の3人．血液型 O 型．最近 O 型といわれることに飽きてきた．IEEE，電気学会，水環境学会会員．



さ く が わ た か し  
**佐久川貴志**

1989年3月九州大学大学院総合理工学研究科エネルギー変換工学専攻修了．同年4月(株)明電舎入社，在職中に熊本大学大学院自然科学研究科修了(2004年3月)．2004年10月より熊本大学地域共同研究センター助教授．主として半導体と磁気スイッチを用いたパルスパワー発生装置の研究開発，学内発明相談の業務に従事．最近は安価な半導体式パルスパワー電源の開発とそのバイオ応用を考えている．レーザー学会，応用物理学会，電気学会，静電気学会，機械学会会員．趣味：(デジカメになった)写真と(研究室の窓からの)バードウォッチング．



な み ひ ら た か お  
**浪平隆男**

1997年熊本大学工学部電気情報工学科卒業，1999年熊本大学大学院工学研究科修士課程修了，同年熊本大学工学部助手に採用される．2003年米国テキサス大学パルスパワー・パワーエレクトロニクス研究所客員教授を経て，現在，熊本大学工学部電気システム工学科助手．IEEE，電気学会，静電気学会会員．研究分野：固体・液体・超臨界流体・気体中におけるパルス放電の物理と産業応用．



あ き や ま ひ で の り  
**秋山秀典**

1951年4月2日生．1979年3月名古屋大学大学院博士課程修了．同年4月同大学工学部助手，1985年4月熊本大学工学部助教授，1994年8月同大学教授，現在に至る．工学博士．2000年 IEEE Major Educational Innovation Award 受賞，IEEE Fellow 会員，2003年 IEEE Peter Haas Award 受賞，日本物理学会，日本レーザー学会，プラズマ・核融合学会会員．