

Sn 固体ターゲットを装着した EUV 発生用 高電圧プラズマフォーカス装置

High Voltage Plasma Focus Device with a Installed Sn Solid Target
for Production of EUV Light

山本 敏和・渡辺 卓*

福島工業高等専門学校、電気工学科

*福島工業高等専門学校専攻科、機械・電気システム工学専攻
(現：株式会社NTTファシリティーズ)

Toshikazu Yamamoto and Suguru Watanabe*

Fukushima National College of Technology, Department of Electrical Engineering

*Fukushima National College of Technology,

Advanced Course in Mechanical and Electrical System Engineering

The lithography is a manufacturing process of the integrated circuit. It is the technology to copy a circuit pattern to a wafer by using a light source. Extreme Ultra Violet (EUV) light is expected as a light source for high density lithographic technology. In this work, a high voltage plasma focus device to produce EUV light was reconstructed. The plasma focus device was successively operated at the bank voltage of 60 [kV], hydrogen gas of 1330 [Pa]. A solid target made of Sn is used for generating EUV light. The form of the target is a projected type. The detector circuit using a photo-diode made by IRD was used in order to observe the output of EUV light. The waveform of EUV light and that of discharge currents of the four capacitors were observed by simultaneously. Maximum output power of the EUV light was evaluated as 6.1 [W].

Key words: Dense Plasma Focus, Extreme Ultra Violet Light, Sn solid target

1. はじめに

半導体集積回路はその登場以来、集積度の向上による高機能化の道を歩み、2年で2倍のペースで集積度が増えるというムーアの法則(Moore's rule)を維持してきた。この法則によれば、半導体の集積度は指数関数的に向上していくことになるが、近年は、集積度の向上ペースがこれより鈍化している。

今日の集積回路技術において近未来的にその発展を阻む課題は、微細加工技術、消費電力、設計技術、製造コストであり、最も大きな課題であるのが微細加工技術である¹⁾。集積回路の製造工程では、光源を利用して集積回路のマスクパターンを、シリコンウエハーに塗布されたレジスト樹脂に露光転写するリソグラフィーと呼ばれる微細加工技術が用いられている。露光パターンの解像度 R はレイリーの式で与えら

れる²⁾。

$$R = K\lambda / (NA) \quad (1)$$

ここで、 NA は露光光学系の開口数、 K は転写プロセスで決まる定数である。リソグラフィーの光源として、今日では波長が 193[nm]の ArF レーザーが主に使われている。しかし、高集積化の要求から、より短波長の光源が求められ、波長 13.5[nm]程度の EUV(Extreme Ultra Violet)光源が有力視されている。EUV 光リソグラフィーが実現すれば、波長が約 10 分の 1 となることから、パターンの縦横の解像度が 10 分の 1 になり、二次元の集積度は現在の約 100 倍になる。そこで、露光用の高輝度 EUV 光源の開発研究がプラズマを用いて行われている³⁾。

本研究室では、2006 年にプラズマフォーカス装置

を用いた EUV 光発生の研究に着手した。フォーカスプラズマからは可視光から X 線領域に至る電磁波が発生するため、EUV 領域に選択的に感度を有する検出系を製作し、EUV 発生用材料として Sn 固体ターゲットおよび Xe ガスバフを用いた実験を論文として報告した^{4,5)}。しかし、2009 年の電気工学科棟の耐震補強改修工事に伴い、真空容器、放電用コンデンサバンク、ノイズ遮蔽用のシールドルーム等の実験装置一式を分解して保管することとなった。改修完了後の 2010 年 4 月、実験装置の再構築に着手した。2011 年 3 月の地震により真空容器の損傷、重量約 1 トンのコンデンサバンクの位置ずれ等が生じたが、これらを補修して更にバンクエネルギーを高めるべく放電用ギャップスイッチを整備した結果、2012 年にコンデンサバンク充電電圧 60 [kV]にて放電が可能となった。本論文では固体ターゲットを用いた EUV 光発生用プラズマフォーカス装置とその実験結果を報告する。

2. プラズマフォーカス現象

プラズマフォーカスは、真空容器内に設けられた同軸円筒状電極間に充填されたガスが衝撃大電流放電によりプラズマ化され、電磁力により内部電極開放端側に移動し、先端で自己収縮（自己ピンチ）⁶⁾することにより、高温高密度（電子温度約 1[keV]、電子密度約 10^{19} [cm^{-3}]) のプラズマを生成する現象である。

本研究では、内部電極が外部電極に包まれておらず光の観測が容易なメーサー型プラズマフォーカス装置⁶⁾を用いた。プラズマフォーカスの動作原理を、Fig.1 に示す。

まず、真空容器内を 1.33×10^{-3} [Pa]程度に排気し、作用ガス（水素）を真空容器内に充填する。充電されたコンデンサバンクを内部電極に接続すると、内部電極と外部電極の間に高電圧が印加され、以下の順序で放電が進展する。

(1) Break-down phase (Fig.1 の①で示す段階)

コンデンサバンクの高電圧が内外電極間に印加され、内部電極根本のインシュレータ表面に沿って沿面放電が起こり、円筒状の電流シートが形成される。

(2) Run-down phase (Fig.1 の②で示す段階)

電流シートは、自身の電流密度 J と内部電極を流れ

る電流が作る磁束密度 B によるローレンツ力を受けて電極先端方向に加速される。電流シートは充填ガス中の音速を超えるために衝撃波を生じ、衝撃波は前方にあるガスを電離させながら移動する。

(3) Focus phase (Fig.1 の③で示す段階)

内部電極先端におけるプラズマの自己収縮から高温高密度プラズマの生成を経て、プラズマの崩壊に至る段階であり、次の 5 つの過程をたどる。

(a) Compression phase

電極先端に達した電流シートが電離した粒子を取り込みながら電極の中心軸に向かって自己収縮する。

(b) Very dense phase

自己収縮したプラズマの半径が最小 (1[mm]程度) となり、プラズマの電子温度、電子密度が最大となる。

(c) Quiescent phase

プラズマの内圧が高まり膨張する。内圧と磁気圧とが平衡して半径が数 mm 程度の柱状のプラズマ（プラズマ柱）が生成される。

(d) Unstable phase

プラズマ柱表面を一周する凹み ($m=0$ モードの不安定性) が発生する。不安定性により電流路の半径が小さくなると、その部分の磁気圧が大きくなり不安定性が成長する。

(e) Decay phase

不安定性の成長によりプラズマ柱が切断される。プラズマの密度が低下し、プラズマ柱は崩壊する。

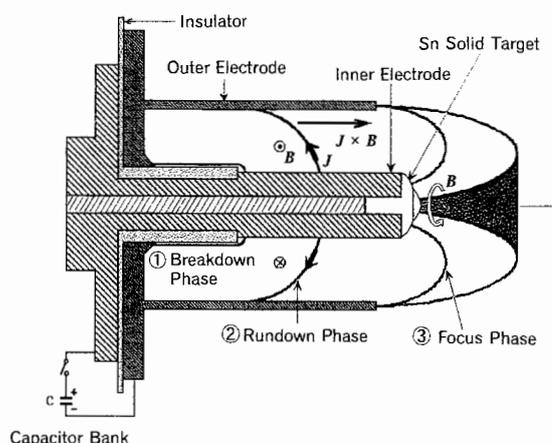


Fig. 1 メーサー型プラズマフォーカス装置の動作原理

3. 実験装置

3.1 プラズマフォーカス装置

Fig.2にプラズマフォーカス電極を収めた真空容器、コンデンサバンク（コンデンサ4台）、メインギャップスイッチ（4個）、放電電流供給用同軸ケーブル（32本）の外観を示す。

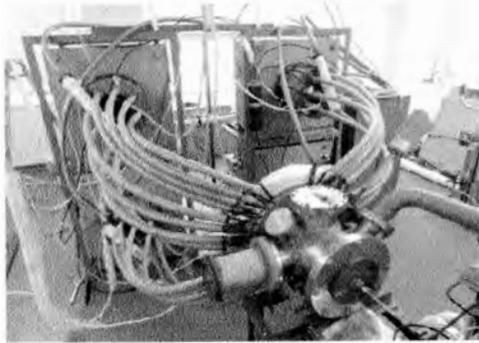


Fig. 2 実験装置外観

放電電源は、耐圧 100 [kV]、静電容量 1.0 [μF]のコンデンサ 4 台を並列接続したコンデンサバンクである。電流シートを急激に圧縮し高温高密度プラズマを生成するために、磁界の増加率すなわち電流の増加率を数百[kA/ μs]のオーダーとする必要からコンデンサに設けられたギャップスイッチ 1 個あたりに同軸ケーブルを 8 本並列接続して回路の低インダクタンス化を図っている。

バンクからプラズマに転送されたエネルギーが最大となる放電電流の最大時刻付近でフォーカスプラズマを生成させることが望ましい。放電の開始から Focus phase までの時間は、電極の長さや直径、充填ガス種と圧力、バンクの充電電圧により制御可能である。

3.2 充電回路およびトリガー回路⁷⁾

充電回路は、50 [kV] 高圧試験変圧器、ダイオード、充電抵抗、コンデンサバンクから構成されている。トリガー回路の電源を OFF にするとコンデンサバンクの高圧端子は水抵抗を通して接地される。

トリガー系は 4 台のパルス発生器（出力電圧 9 [V]、300 [V]、15 [kV]、30 [kV]）、コンデンサ毎の一つずつ設けられたメインギャップスイッチから構成されている。バンクを充電後、9 [V]のパルスを発生させると、各パルス発生器が順次動作して 30 [kV]のパルス

がメインギャップスイッチを導通させ、プラズマフォーカス放電が開始される。

3.3 放電電流・EUV 観測系

1 台のコンデンサの放電電流と EUV 検出器の出力信号をデジタルオシロスコープで記録した。また、別の 1 台のオシロスコープで 4 台のコンデンサの放電電流のスタートと最大時刻を観測した。

(a)放電電流観測用ロゴスキーコイル

放電電流の観測にはロゴスキーコイルを使用した。ロゴスキーコイルはトロイド状の枠に巻線を設けたものである。巻線枠内に被測定電流が流れると、電流が作る磁界により巻線に誘導起電力が生じる。ロゴスキーコイルの誘導起電力は被測定電流の微分信号であるため、CR 積分器により電流波形に変換してオシロスコープで観測する⁸⁾。

(b)EUV 検出器

EUV 検出器は、EUV 波長領域に選択的に感度を有するフォトダイオードと電流 - 電圧(I-V)変換回路を組み合わせたものである。Fig.3 に EUV 検出器の回路を示す。なお、フォトダイオードは、プラズマとの接触および放電による金属デブリとの衝突を避けるため、プラズマフォーカス電極の中心軸に対して直角方向、距離 45 [cm]に設けた。

EUV 検出用のフォトダイオードは米国 IRD 社製 SXUV20HS1 (立ち上がり時間 1000 [ps])である。仕様を Table 1 に、分光感度を Fig.5 に示す⁹⁾。I-V 変換回路には、高スルーレート(180 [V/ μs])で広帯域(145 [MHz])のオペアンプ AD8065 を用いた^{4, 5)}。

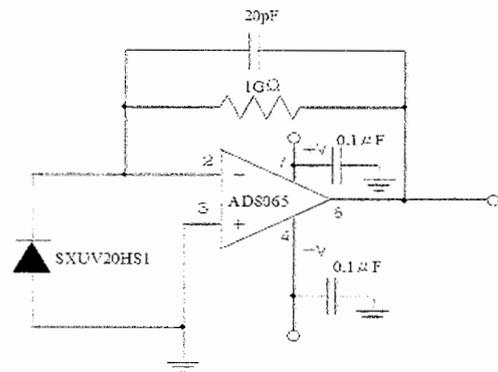


Fig. 3 EUV 検出器の回路図

Table 1 SXUV20HS1 の仕様

Sensitive Area (mm ²)	Size (mm)	Shunt Resistance (MΩ)	Risetime (10-90%) (psec)	Filter	Filter Thickness (nm)
20	5φ	100	1000	Mo/Si	350/500

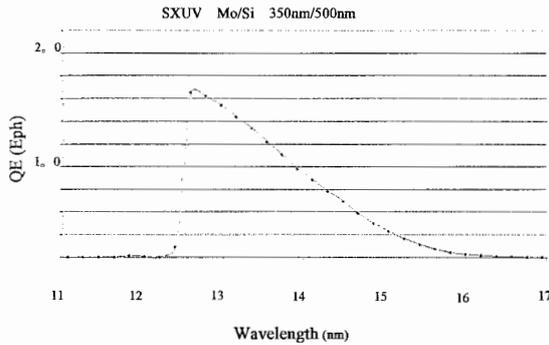


Fig. 4 SXUV20HS1 の分光感度

3.4 固体ターゲット

波長 13.5 [nm] 付近の EUV 光は Xe、Sn、Li の電子温度 30[eV]程度、イオン密度は $10^{17} \sim 10^{19} [cm^{-3}]$ 程度のプラズマから生じる。(4d-4f)の狭帯域発光のピーク波長は原子番号によって決まる。原子番号 54 の Xe の場合、13.5 [nm] の発光は 10 価イオンの(4d-5p)遷移のみから得られ、11[nm]帯に発光のピーク値を持つ。これに対し、原子番号 50 の Sn の場合、複数価数(8~12)のイオンの(4d-4f)遷移から得られ、13 [nm] 帯に発光のピークがある。原子番号 3 の Li では、 Li^{2+} の Lyman- α 線から得られる¹⁰⁾。本研究では、ガスバフなどとのタイミング調整が不用な固体ターゲットを用いて実験した。ターゲットの材料は純度 4 N の Sn である。Fig.5 に固体ターゲットの外観を示す。なお、EUV 検出用フォトダイオードの視野範囲に突起型電極が含まれている。

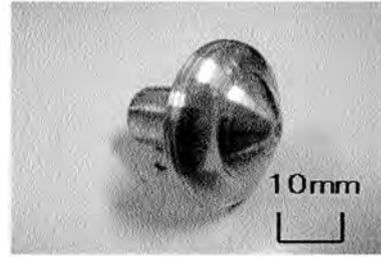


Fig. 5 固体ターゲット(Sn)の外観(突起型)

3.5 実験条件

本研究では、固体ターゲットを設けていない中空内部電極を用いた場合にピンチが達成できた充電電圧、作用ガス圧力で実験した。その条件を Table 2 に示す。

Table 2 実験条件

固体ターゲットの材料	Sn
固体ターゲットの形状	突起型
コンデンサの充電電圧	60 [kV]
作用ガスおよび充填圧力	H ₂ 1330 [Pa]

4. 実験結果

4.1 放電電流波形

プラズマフォーカス現象を起こすためには 4 台のコンデンサの放電電流が同期して流れて、電流シートを駆動する必要がある。波形例を Fig.6 に示す。

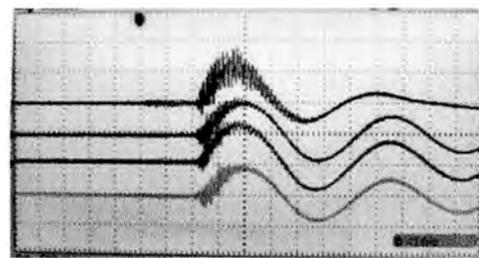


Fig. 6 コンデンサ 4 台の放電電流波形
84.5 [kA/div], 500 [ns/div]

コンデンサバンクの初期静電エネルギーは、7.6 [kJ] であり、全放電電流の最大値は約 340 [kA]に達する。

4.2 EUV 波形

Fig.7 に EUV 検出回路の出力波形を示す。CH1 は 1 台のコンデンサの放電電流、CH2 は EUV 検出回路の出力である。なお、EUV 検出器の電源を OFF として放電した場合には、EUV 検出器からのケーブルに信

号は現われない。EUV 検出器の最大出力電圧 v_p は Fig.7 において約 3 [V]であった。

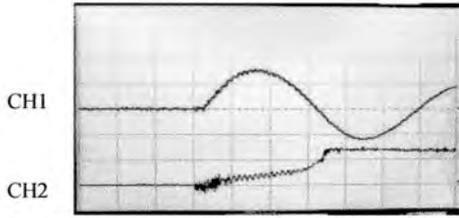


Fig. 7 放電電流波形(CH1) : 56 [kA/div]
EUV 波形(CH2): 2 [V/div]、
500 [ns/div]

5. 考察

5.1 EUV 光出力について

Fig. 7 の EUV 波形は、コンデンサの放電開始から 1.6 [μ s]、放電電流の最大時刻から 0.9 [μ s] 遅れてピーク (約 3 [V]) となった。全空間へ放射された EUV 光のごく一部を EUV 検出用フォトダイオードは受光しているため、一般性を持たせるために全空間へ等方的に EUV 光が放射されたものと仮定して EUV 最大出力 W [J] を評価する^{4, 5)}。EUV 検出器の最大出力電圧 v_p より、フォトダイオードの出力電流 i_1 を求めると、

$$i_1 = v_p / R = 3 / 10^9 = 3.0 \times 10^{-9} \text{ [A]} \quad (2)$$

すなわち、単位時間の移動電荷 Q は、

$$Q = 3.0 \times 10^{-9} \text{ [C/s]} \quad (3)$$

電子の電荷 $e = 1.602 \times 10^{-19}$ [C]より、フォトダイオードから出力された電子数 n_e は、

$$n_e = Q / e = 1.87 \times 10^{10} \text{ [個/s]} \quad (4)$$

SXUV20HS1 の量子効率 η は、13.5 [nm]において 1.017 [%]であるので、入射した光子数 n_p は、

$$n_p = n_e / (\eta / 100) = 1.84 \times 10^{12} \text{ [個/s]} \quad (5)$$

EUV の波長を $\lambda = 13.5$ [nm]とすると、プランク定数

$h = 6.624 \times 10^{-34}$ [J · s]、光速 $c = 2.998 \times 10^8$ [m/s]より、EUV 検出器への入力 W_i [W] は

$$W_i = n_p h c / \lambda = 2.71 \times 10^{-5} \text{ [W]} \quad (6)$$

電極中心軸から SXUV20HS1 の受光面までの長さ $R_d = 45 \times 10^{-2}$ [m]、受光面の半径 $r = 1.9 \times 10^{-3}$ [m]から、全空間への EUV 出力 W は、

$$W = W_i \times 4\pi(R_d)^2 / \{\pi \times (r)^2\} = 6.1 \text{ [W]} \quad (7)$$

となる。

EUV 信号のピークがコンデンサの放電電流の最大となる時刻から遅れているのは、水素プラズマが固体の Sn を加熱、蒸発、電離する過程で時間を要したためと考えられる。その理由としては、固体ターゲットの電極形状が突起型であるため、電流シートと接触する面積が広くなり、Sn の蒸気を多く発生して取り込んでしまうため、EUV が発生する時刻が遅くなったと考えられる。

EUV 検出器の出力から、全空間への EUV 最大出力を評価すると 6.1 [W]であった。これは、EUV 信号波形のピーク値から評価した出力であるが、実際にフォトレジストを露光する際には単位時間の出力[W]と照射時間[sec]の積[J]が閾値を超えれば露光できる。今回実験で得られた EUV 信号はテイルが長い。これは高温プラズマから移行した比較的低温度のプラズマからの放射である可能性があり、フォトレジストを露光させるには好ましいと言える。しかし、現段階ではフォトレジストを実際に露光可能かどうかは検証できていない。今後は、EUV の単位時間当たりの出力とその持続時間についても研究を進める必要があると考える。

5.2 電流シートのピンチについて

固体ターゲットを備えた内部電極を用いた放電実験では、Fig.6 および Fig.7 に示したようにコンデンサの放電電流波形は減衰する正弦波であった。電流シートが急激にピンチすれば以下の理由により電流波形にディップが生じるはずであるので、今回の実験ではピンチが不十分であったと考えられる。

電極先端部におけるプラズマフォーカス放電の電流路を Fig.8 に示す同軸往復電流路として模式化すると、プラズマ柱の部分の往復同軸線路のインダクタンス L は、次式で表わされる。

$$L = \{\mu_0 \ell \ln(r_2/r_1)\} / (2\pi) \quad [\text{H}] \quad (8)$$

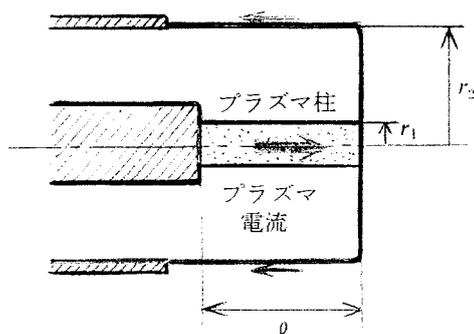


Fig. 8 電極先端部における電流路の模式図

ここで、プラズマ柱の半径 r_1 、外部電極の半径 r_2 、プラズマ柱の長さ ℓ 、真空の透磁率 μ_0 である。プラズマがピンチしてプラズマ柱の半径 r_1 が小さくなると、 L が大きく、すなわち回路インピーダンスが大きくなるため、プラズマが急激にピンチすると放電電流にディップを生じる。また、プラズマに生じた不安定性によりプラズマ柱が切断されると、切断部の電子密度が低下して放電電流の減少をもたらす。この二つの効果が放電電流波形のディップの原因である。よって、今回の実験では、プラズマの急激なピンチが起こらなかったと言える。その原因としては、次の理由が考えられる。① 電流シートが内部電極中心軸上でピンチする間に、Sn が蒸発してかき集められて電流シートの質量が増加したため、十分にプラズマが圧縮されなかった。② Fig.6 の放電電流波形において、コンデンサの放電開始時刻は揃っていたが、最上段の電流波形の最大時刻は他 3 つの電流波形のそれに比べて約 0.2 $[\mu\text{s}]$ 早い。そのため、コンデンサバンクのエネルギーをプラズマへ効率良く入力できなかった。

6. 結言

プラズマフォーカス装置を再構築し、従来よりもコンデンサバンクの充電電圧、蓄積エネルギーを高めることができた。Sn 固体ターゲットをプラズマフォーカス電極先端に設けて放電させることにより、EUV のピーク出力 6.1 $[\text{W}]$ が得られた。

プラズマが十分にピンチすれば、Sn 表面で局所的な加熱が起こり、イオン化される Sn の量が増加することにより EUV 出力の増加が期待できる。今後は、①メインギャップスイッチの同期始動、②放電電流最大時刻におけるプラズマのピンチ、③円滑にピンチが起こるように固体ターゲットの形状を工夫することが課題である。

7. 参考文献

- 1) 牧野昇 他: 総予測 21 世紀の技術革新, p.38 (工業調査会, 東京, 2000).
- 2) 上野巧 他: 短波長フォトレジスト材料, p.3 (ぶんしん出版, 東京, 1993).
- 3) K.Takasugi, T.Umeda, E.Kiuchi and T. Hayashi: Dense Z-Pinches, 6th International Conference on Dense Z-Pinches, Ed. J. Chittenden, AIP Conf. Proceedings 808, p, 223 (American Institute of Physics, New York, 2006).
- 4) 甲高友則, 二瓶元気, 山本敏和: Journal of JACT, 14, 35 (2009).
- 5) 二瓶元気, 甲高友則, 山本敏和: Journal of JACT, 14, 41 (2009).
- 6) 横山昌弘: 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, p. 53, (日刊工業新聞社, 東京, 1988).
- 7) 山本敏和, 高橋亜紀生, 中野兼輔, 綿引順一: 撃大電流放電による高温高密度プラズマ生成の基礎研究, 福島高専研究紀要 46, 35 (2005).
- 8) 赤崎正則 他: プラズマ工学の基礎, p. 204 (産業図書, 東京, 2004).
- 9) <http://www.ird-inc.com/sxuvwdd/sxuvwdd.html>
- 10) 堀田和明, EUV 光源, プラズマ・核融合学会誌, Vol. 81, No. 12, p. 1007 (2005).