

# プラズマフォーカス型 EUV 光源

指導 助教授 高杉 恵一

M3012 林 卓也

## 1.はじめに

Z ピンチは広い意味では、プラズマ中に大電流を流し、自己磁場の圧力によってプラズマ自身が圧縮・加熱されるプラズマの総称で、比較的容易に高温高密度のプラズマを生成することができる。Z ピンチプラズマを生成する方式としては主にガスパフ Z ピンチ方式、キャピラリーZ ピンチ、および同軸状の陽極と陰極の間の絶縁物から沿面放電が始まり、磁気圧によってプラズマが陽極先端部にかき集められピンチするプラズマフォーカスなどがある[1]。Z ピンチプラズマの中心軸上には高温の軟 X 線の点源が発生し、それを取り囲むバルクプラズマはそれ以下の温度をもっていて、EUV の放射源であることが確認されている。放電ガスに He を使用することによって電極材質によるスペクトルの波長選択が可能となる[2]。

近年、次世代の半導体リソグラフィ用光源として波長 13.5nm の EUV 光源が要求されている。Z ピンチは比較的繰り返しが簡単で、装置をコンパクトにできるため EUV 光源として期待されている。

現在、EUV 光源の研究としては、高繰り返しが容易で装置規模を小さくしやすい等の理由から、キャピラリー方式が先行している。しかしこの方式は、デブリが多くプラズマへの注入効率が低い、EUV 光の取り出す方向にガスも噴出して来るためガス自身が EUV 光を吸収してしまうなどの問題がある。

それに比べてプラズマフォーカス方式は、プラズマへの注入効率が高く、プラズマが生成される際ガスがかき集められるのでガス自身による EUV 光の吸収がない。また、デブリは発生するが磁気圧によって Z 軸上に方向性をもって飛んでいくので回避しやすい等の長所がある。以上のことから Z ピンチを EUV 光源として利用する場合、プラズマフォーカス方式が最適であると考えられる。

また、光源の媒質としては、Xe が先行しているが、Xe では、波長 13.5nm よりも 11nm の方で強度が強く 100W 近い EUV 出力を得るのは困難である[3]。そこで Sn の利用も検討されている。Sn の場合、デブリの量は増えるが波長 13.5nm のみ強度が強くなるので、Xe の数倍の EUV 出力が期待できる。

この研究の目的は、新たにプラズマフォーカス型装置を作成し、Sn の波長 13.5nm の EUV 光を放射させ、EUV 光源としての適正を調べることである。

## 2.実験装置

作成したプラズマフォーカス装置にはコンデンサー容量 7.5 $\mu$ F、充電電圧 30kV、充電エネルギー3.4kJ のコンデンサーバンクを使用している。中心導体の先端部は取り外し可能で、Al や Sn に変更することができる。陰極はステンレスでできている。放電ガスは、ニードルバルブで圧力を調整し、垂れ流した状態で放電を行う。プラズマフォーカス装置の概略図を図 1 に示す。

放電電流の測定にはロゴスキーコイルを使用し、EUV 光の時間分解測定には X 線ダイオード(XRD)を用いた。

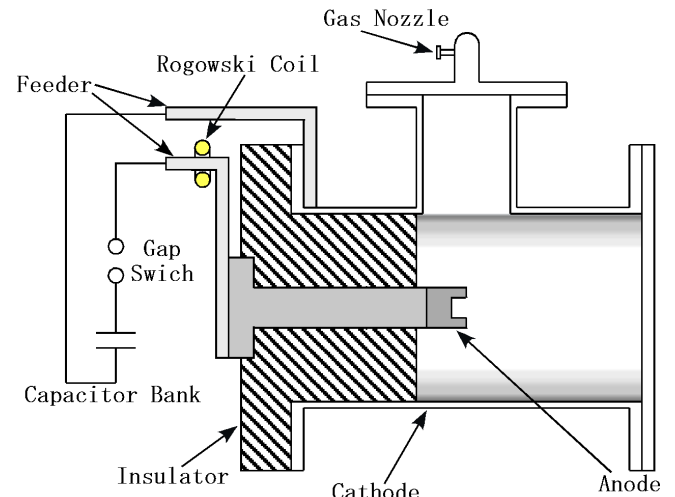


図 1 プラズマフォーカス概略図

## 3.実験結果

プラズマフォーカスは、プラズマがかき集められながら電極先端まで進んでいくので、プラズマの質量によって、放電の機構に変化が生ずる。また、電流のピーク直前にピンチさせる方がプラズマに入る正味のエネルギーが高い。両極を短絡した実験から電流のピークまでの時間は 2.8 $\mu$ s であることがわかっていて、そこで、放電の動作領域を確認するため、放電開始からピンチするまでの時間に対するガス圧の依存性を調べた。放電ガスに He、電極には Al を用いてその依存性を調べた。その結果、ガス圧が低くなるに従い、ピンチまでの時間も短くなっていく事が確認できた。また、その時 EUV 光の強度はガス圧にほとんど依存しない事も確認できた。従って、Al 電極を用いて He ガスで放電を行う場合、ガス圧は 0.05Torr で行うのが良いと判断した。

以上のことを踏まえて Sn の波長 13.5nm の EUV 光を放射させるため、Sn 電極で、He ガス圧 0.05Torr で放電を行った。その結果、ピンチまでの時間は、放電ガスの質量には依存し電極には依存しないと考えていたが、電極が Al と Sn では異なる事が確認できた。そこで、Sn 電極を用いて He ガスで放電を行う場合の放電の動作領域を確認するため、ピンチまでの時間とガスの圧力の依存性を調べた。図 2 にピンチまでの時間に対するガス圧の関係を示す。この結果より、ガス圧が 0.03Torr 以下なら電流のピーク前にピンチすることがわかった。

EUV 光源として考えた場合、EUV 光の強度は重要な特性になる。従って、次にガス圧を変化させた場合 EUV 強度にどの程度影響があるかを調べた。図 3 に EUV 強度に対するガス圧の関係を示す。この結果より、ガス圧を変化させても EUV 強度にはあまり変化が見られなかった。図 4 に He ガス圧 0.03Torr で Sn 電極を用いた放電の電流波形と時間分解 EUV 波形を示す。

### 5.まとめ

両極を短絡した実験から電流のピークまでの時間が 2.8 $\mu$ s だとわかった。He ガスを用いた放電実験からは、電極が Al と Sn では、ピンチするまでの時間に差があることが確認された。これは、Sn のような融点の低い材質を電極に使用する場合、プラズマが電極先端まで進む間に電極が蒸気となり一緒にかき集められたため、プラズマの質量が増加したからだと推測できる。また、Al 電極の場合も Sn 電極の場合もガス圧による EUV 強度の変化は見られなかったが、電極に Al と Sn を用いた場合では、強度に大きな違いが出る事が確認された。これは、Sn の方が電離価数が多いため放射が盛んに行われた事と XRD の測定領域での放射が盛んなことが原因であると推測される。

Sn 電極で He ガスを用いた放電で EUV 光の出力が確認されていることから、EUV 光源で要求されている Sn の波長 13.5nm 付近の EUV 光は放射されていると考えられる。しかし、EUV 光源で要求されているのは波長 13.5nm のみでの放射なので、分光測定を行い波長の特定する必要がある。

### 参考文献

[1] 横山 昌弘 著書, 「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.  
 [2] 小林 文成 修士論文, “ガスパフ Z ピンチプラズマにおける EUV 放射の研究“(2004).  
 [3] E. Hotta: J. Plasma Fusion Res. **79**, 248 (2003).

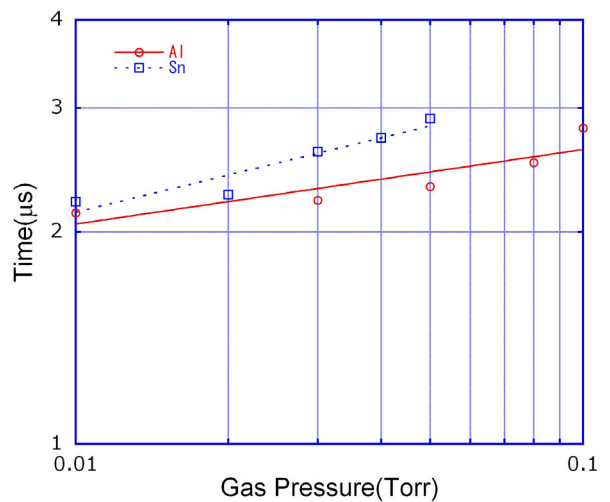


図 2 ピンチまでの時間に対するガス圧依存性

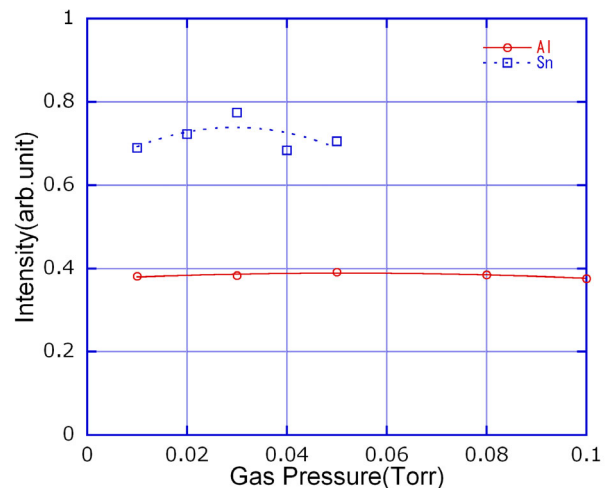


図 3 EUV 強度に対するガス圧依存性

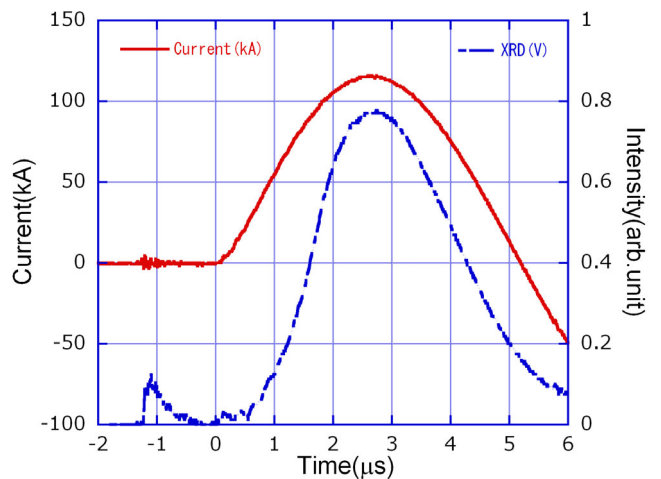


図 4 電流波形と時間分解 EUV 波形