

# EUV 光源のためのリチウムプラズマフォーカス装置

## A Lithium Plasma Focus Device for EUV Light Source

指導 助教授 高杉 恵一

量子理工学専攻 M5004 梅田 武

### 1. はじめに

現在、半導体リソグラフィ用光源として波長 13.5 nm の極端紫外線 (EUV) の研究が進められている。EUV の主な発光材料は Xe、Sn、Li であり、レーザー生成法では各材料で盛んな研究が行われているが、放電生成法では大半が Xe を用いた研究である。しかし Xe からの放射スペクトルは 13.5 nm よりも 11 nm で強く、発光効率に懸念がある。また Sn と Li はともに 13.5 nm にシャープな放射スペクトルを持つが、ともに低融点で 1 回の放電での消費量が多いため、プラズマへの供給方法に工夫が必要である。特に Li は取り扱いが難しく、放電生成法での実験はほとんど公表されていない[1]。

当研究室では Z ピンチ放電とプラズマフォーカス放電による EUV 光源の研究を行っており、Z ピンチ方式では Xe と Sn からの EUV が観測されている [2,3]。2 つの方式を比較すると、プラズマフォーカスの方が安定に一点の点光源を生成でき、集光装置を傷めにくいというメリットを持っている。プラズマフォーカス方式では電極物質に Al と Sn、放電ガスに He を用いて放電を行い、電極物質の変化と放電ガス圧の増減による放電波形の変化が確認されている。なお分光測定は行っておらず、EUV は観測されていない[4]。

この研究では、プラズマフォーカス方式で従来よりも測定器を増設し、放電ガスに Ar を用いたときの装置の動作領域を調べた。また、アノード先端に Li 化合物を塗布したときの放射スペクトルを調べた。この研究では、放電生成法における Li の供給方法を提案している。

### 2. 実験装置

図 1 はプラズマフォーカス実験装置の概略図である。この装置はコンデンサー容量 6.0  $\mu\text{F}$ 、充電電圧 40 kV、充電エネルギー 4.8 kJ のコンデンサーバンクを電源としている。中心導体 (アノード) の直径が 10 mm、カソードの直径が 30 mm、放電管の直径が 150 mm、アノード・カソード間の軸方向の距離が 30 mm である。アノードはステンレス製、カソードはアルミニウム製、絶縁物はセラミックス製である。

電流測定にロゴスキーコイル、軟 X 線～紫外線の

時間分解測定に X 線ダイオード (XRD)、X 線の時間分解測定にシンチレーションプローブ (Sci) を使用している。XRD のカソードには Al を使用したものと Au を使用したものをを用いている。Au を用いた方がエネルギーの高い軟 X 線に感度が高く、Al との強度比からプラズマの温度を比較している。また、プラズマの瞬間的な状態を、イメージインテンシファイアカメラ (IIC) を用いて可視光で観測している。パルスを加えている間だけシャッターを開くことができ、そのパルス幅は約 40 ns である。そして、プラズマからの放射スペクトルを、可視分光器を用いて調べ、元素を特定している。

### 3. 実験結果

図 2 に、充電電圧 25 kV、放電ガス Ar (3.0 Torr) で放電を行ったときの典型的な放電波形を示す。電流は立ち上がってから最大値に達するまで約 2  $\mu\text{s}$  かかり、その最大値は約 100 kA である。XRD は Al と Au ともに放電開始直後から反応している。これは、軟 X 線～紫外線が放電の間に放射され続けていることを示している。また、放電開始から約 1.9  $\mu\text{s}$  後に Sci が反応していることから、このときにプラズマから X 線が放射されている。

図 3 に、放電開始から約 1.9  $\mu\text{s}$  後に IIC で撮影したプラズマの写真を示す。図 2 中に放電波形との対応を示している。このとき電流値はほぼ最大であり、X 線発生と同時に時刻である。アノードの先端直前にプラズマが集束し、プラズマがピンチしている。

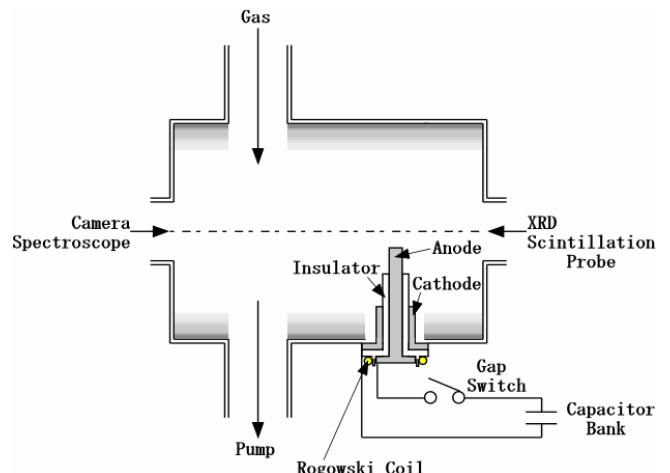


図 1 プラズマフォーカス実験装置概略図

ガス圧 0.1~4 Torr で放電を行った結果、電流のピーク時刻はガス圧によらず約 2  $\mu\text{s}$  で、X 線の発生時刻はガス圧の上昇に伴って遅くなる傾向があり、1~3 Torr で約 2  $\mu\text{s}$  であった。X 線発生時刻における XRD 信号の強度は、Al はガス圧の上昇に伴って増加し、Au は 2~3 Torr で極大となった。また Al と Au の強度比は、2~3 Torr で Al に対する Au の強度が極大となった。つまり、Ar ガスを用いた放電では、ガス圧 2~3 Torr で放電すると、それ以外のガス圧と比べて温度の高いプラズマを生成でき、エネルギー変換効率のよいプラズマフォーカスを発生できる。

上記の高温プラズマ発生条件で、アノード先端に Li 化合物 ( $\beta$ -ユークリプタイト;  $\text{LiAlSiO}_4$ ) を塗布して放電し、分光測定を行った。その結果、Li I (610.3 nm) の放射スペクトルが観測され、Li のプラズマが生成されたことを確認できた (図 4)。EUV の分光測定も行ったが、プラズマから放射される可視光が強く、測定に成功しなかった。ピンチ時のプラズマからの放射光以外は分光器に入らなくなるよう、明光対策を進める必要がある。

#### 4. まとめ

放電ガスに Ar を用いて、装置の動作領域を調査した。その結果、Ar ガスを用いて放電すると、Sci をピンチのモニターとできることがわかった。また 2 種類の XRD 信号を比較することにより、高温なプラズマを生成できるガス圧の範囲を見つけることができた。その範囲は、X 線の発生時刻が電流のピーク時刻とほぼ等しくなる範囲と重なっている。プラズマにかかる磁気圧が電流の 2 乗に比例することから、プラズマの持つエネルギーも電流の 2 乗に比例すると考えられる。したがって電流値の高い方がプラズマの温度が高くなっているのだと考えられる。

Li 化合物を用いた放電を行い、可視領域で Li の放射スペクトルを観測することができた。この研究から、アノード先端のプラズマピンチ部分に Li 化合物を配置すれば、Li のプラズマを生成できるということが示された。

#### 参考文献

- [1] 勝木淳他, J. Plasma Fusion Res. Vol.81, No.4, pp.231-239 (2005).
- [2] 小林文成: 修士論文「ガスパフ Z ピンチにおける EUV 放射の研究」(2004).
- [3] 山口義智: 修士論文「ガスパフ Z ピンチによる EUV 光源の研究」(2005).
- [4] 林卓也: 修士論文「プラズマフォーカス型 EUV

光源」(2005).

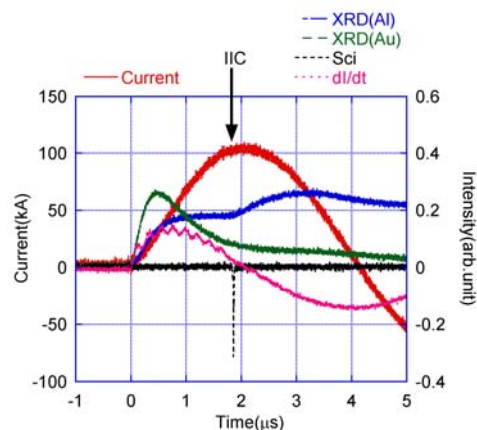


図 2 放電波形(25 kV、Ar 3.0 Torr)

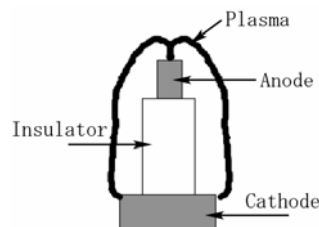


図 3 ピンチ時のプラズマの写真(約 1.9  $\mu\text{s}$ )

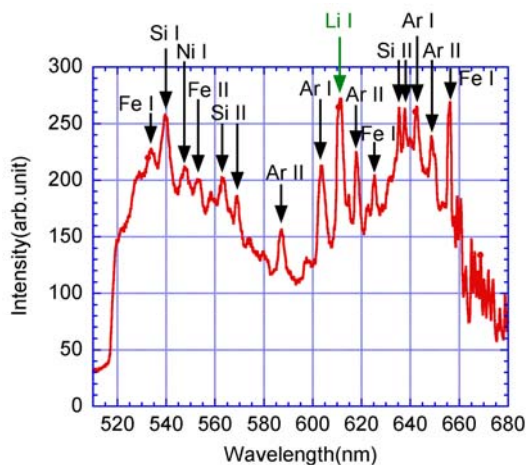


図 4 放射スペクトル(25 kV、Ar 2.5 Torr)