

ガスパフ Z ピンチプラズマにおける EUV 放射の研究

指導 助教授 高杉 恵一

M2005 小林 文成

1. はじめに

Z ピンチはエネルギー注入効率が高く、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[1]。Z ピンチの中心軸上にはホットスポットと呼ばれる高温のプラズマが発生して、パルス的に強力な軟 X 線を放射する。ホットスポットの温度はガスパフから放電までの遅延時間の増加とともに 0.7~1.2keV の範囲で上昇することがわかっている[2]。また、Z ピンチプラズマに縦磁場を付加することによってホットスポットの発生が抑制されることが示された [3]。

最近、次世代半導体リソグラフィ用光源として波長 11~13nm の EUV 光源が要求されている。このため、EUV 放射源としてのバルクプラズマの研究を行うことが必要である。

この研究の目的は EUV 分光計測を通じて、ガスパフ Z ピンチのバルクプラズマの特性を調べることである。そのため、(1)希ガスを用いたガスパフ Z ピンチプラズマの EUV 分光測定[4]、(2)遅延時間による EUV 分光測定、(3)縦磁場を用いた EUV 波長制御、の実験を行った。ここで、バルクプラズマとはホットスポット等の局所的に加熱された部分を除いた大部分のプラズマを指し、EUV 計測によって観測されるものを示している。

2. 実験装置

SHOTGUN Z ピンチ装置は全容量 24 μ F、充電電圧 25kV、充電エネルギー 7.5kJ の高速コンデンサーバンクを電源としている(図 1)。陽極は中空のガスノズルになっており、高速電磁弁を用いて電極間に円環状のガス分布を形成し、その後、電極間で放電を起こす。ここで、電極間隔は 30mm、ガスの圧力は真空に対して 5 気圧である。両電極間の裏側には 165mm 間隔のソレノイドコイルが配置されており、プラズマ柱に縦磁場を付加することが可能である。また、ロゴスキーコイルで放電電流、シンチレーションプローブで X 線、XRD で EUV 光の時間分解波形をそれぞれ測定している。電流波形の解析から Z ピンチへの入力エネルギーが求められる。

EUV 光の分光測定には斜入射型分光器を用いた。この分光器では 4~20nm の範囲の EUV 光を測定することが可能である。EUV スペクトルの記録には Kodak BioMax-MS を用いている。

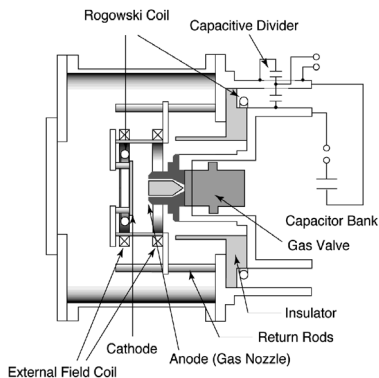


図 1 SHOTGUN Z ピンチ装置

3. 実験結果

図 2 は Ar ガスパフ Z ピンチプラズマの EUV スペクトル強度分布である。スペクトルは大きく 2 つの集団となって観測された。ここで、n は回折の次数であり、実際の波長は n 倍した位置に観測される。左側の集団が 4.33~4.50nm の Ar X、右側に 2 本並んだ 4.87~4.92nm のラインが Ar IX であった。同様の実験を行った結果、Ne ガスパフ Z ピンチプラズマからは 6.04~9.82nm 付近に Ne VIII、Kr ガスパフ Z ピンチプラズマからは 4.50~7.80nm 付近に Kr IX、Kr XI、Kr XII、Kr XIII、Kr XIV、Xe ガスパフ Z ピンチプラズマからは 11~13nm を含む Xe IX、Xe X、Xe XI、Xe XII のスペクトル線が観測された。また、He ガスパフ Z ピンチプラズマからは電極物質である Al のスペクトル(Al IX、Al X、Al XI)が観測された。

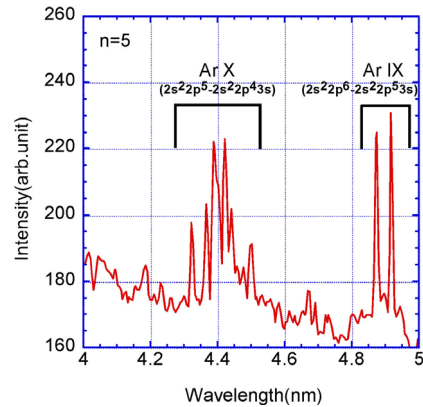


図 2 Ar ガスパフ Z ピンチの EUV スペクトル分布

He と Ar の混合比を 500:1 としたガスを用いて放電を行った(図 3)。その結果、純粋な Ar 放電では観測されなかった Ar XI の 6 次の回折光が観測された。

しかしながら、XRD で測定された EUV 強度は純粋な Ar を用いた場合と比較して減少していた。

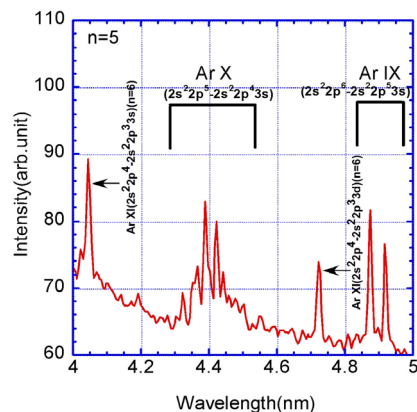


図 3 Ar ガスパフ Z ピンチの EUV スペクトル分布 (He:Ar=500:1)

次に、遅延時間を変化させた場合の EUV 放射の変化について調べた。図 4 は遅延時間をパラメータとした場合の Ar X に対する Ar IX の強度比をグラフにしたものである。遅延時間とともに EUV の強度は増加していく傾向がみられた。また、Ar X に対する Ar IX の強度比の減少が確認できた。これは、電子温度が遅延時間とともに減少していくことを表している。

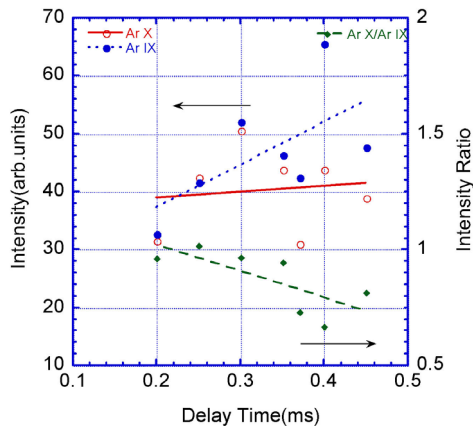


図 4 EUV スペクトルの遅延時間依存性

次に Z ピンチ柱に縦磁場を付加した場合の X 線、EUV 放射の変化について調べた。図 4 は縦磁場の強さに対する X 線、EUV の放射量の変化をグラフにしたものである。磁場の強さとともに X 線の放射量が減少しているのに対して EUV の放射量は磁場の強さとともに増加する傾向がみられた。また、入力エネルギーは縦磁場とともに減少する傾向がみられた。

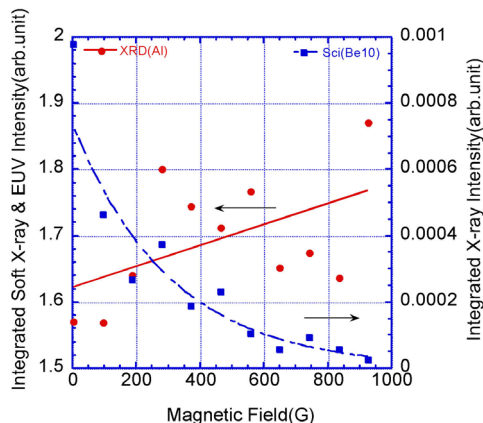


図 5 EUV スペクトルの磁場の強さ依存性

4. 考察

Ar ガスパフ Z ピンチプラズマからは Ar IX、Ar X のスペクトル線が観測されたが、熱平衡を仮定した場合、Ar IX、Ar X と共存する場合のプラズマの電子温度は約 40~60eV であった。これは、ホットスポットの電子温度と比べて極めて低温であった。また、ホットスポットの温度が遅延時間とともに上昇するのに対して、バルクプラズマの電子温度は遅延時間とともに減少していく傾向がみられた。原因として、ガス 1 粒子当たりに入力されるエネルギーの減少が考えられる。

表 1 は遅延時間が 0.25ms と 0.40ms の場合のプラズマパラメータをまとめたものである。遅延時間とともにピンチ時間、ピンチ電流、ピンチ質量、入力エネルギーは増加している。しかしながら、ガス 1 粒子当たりに入力されるエネルギーは減少している。これは、遅延時間を遅くするとピンチ時間が長くなり、エネルギーが多く入力される。しかし、ガス 1 粒子当たりに入力されるエネルギーが減少する。その結果、局所的な部分であるホットスポットが高温であってもプラズマ全体を形成するバルクプラズマの温度は平均的にみだ場合、低下するということが考えられる。

Ar の場合と同様に熱平衡を仮定した場合、He、Ne、Kr、Xe ガスパフ Z ピンチプラズマの電子温度はそれぞれ、約 40~80eV、約 20~140eV、約 32~55eV、約 22~35eV であることが推測できる。この結果から、原子番号が小さいガスを用いて生成されたバルクプラズマは原子番号が大きいガスを用いて生成されたバルクプラズマと比べて高温であることがわかる。これは、He のような原子番号の小さい原子は完全電離しやすいために、完全電離した後に入力されたエネルギーが温度上昇に使われるためだと考えている。

Z ピンチ柱に縦磁場を付加した実験では X 線の放射量が縦磁場の強さとともに減少していくのに対して、EUV の放射量は縦磁場の強さとともに増加していく傾向がみられた。これは、縦磁場を付加することによって、ホットスポットが抑制されたためにバルクの部分が増加して放射時間が長くなったということが考えられる。

表 1 遅延時間とプラズマパラメータの関係

Delay Time	[ms]	0.25	0.40
Pinch Time	[μ s]	0.80	1.38
Pinch Current	[kA]	151	201
Pinch Mass	[ng]	17.5	49.0
Input Energy	[J]	241	294
Energy per Ptl.	[keV]	5.71	2.50

5. まとめ

EUV 分光計測より He、Ne、Ar、Kr、Xe ガスを用いた Z ピンチプラズマにおける発生するイオン種の特定と電子温度の推定が行われた。その結果、原子番号の大きなガス程、低温になることがわかった。

ホットスポットの温度が遅延時間とともに上昇するのに対してバルクプラズマの温度は遅延時間とともに減少していくことがわかった。

Z ピンチ柱に縦磁場を加えることによって、EUV の放射量が増加することが確認できた。

He の性質を利用することによって、混合ガスや電極材質による波長選択が可能となることが示された。

6. 参考文献

- [1] 横山 昌弘 編著、「プラズマ工学 大電流プラズマ現象とその応用」 日刊工業新聞社
- [2] H.Akiyama and K.Takasugi : NIFS-PROC-51. 17 (2002).
- [3] 辰巳 勝広 修士論文、「ガスパフ Z ピンチプラズマの縦磁場による安定化と放射 X 線の波長制御」 (1996).
- [4] F.Kobayashi and K.Takasugi : NIFS-PROC-54.70 (2003).