

論文 / 著書情報
Article / Book Information

題目(和文)	Xenonガスジェット型13.5 nm 極端紫外線プラズマ光源のZピンチダイナミクスに関する研究
Title(English)	Z-pinch Dynamics in a Xenon Gas Jet Type 13.5 nm Extreme Ultraviolet Plasma Source
著者(和文)	黄 斌
Author(English)	Bin Huang
出典(和文)	学位:博士(工学), 学位授与機関:東京工業大学, 報告番号:甲第9520号, 授与年月日:2014年3月26日, 学位の種別:課程博士, 審査員:堀田 栄喜,堀岡 一彦,奥野 喜裕,肖 鋒,藤井 隆
Citation(English)	Degree:Doctor (Engineering), Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:甲第9520号, Conferred date:2014/3/26, Degree Type:Course doctor, Examiner:,,,,,
学位種別(和文)	博士論文
Category(English)	Doctoral Thesis
種別(和文)	審査の要旨
Type(English)	Exam Summary

(博士課程)

論文審査の要旨及び審査員

報告番号	甲第	号	学位申請者氏名	Huang Bin (黄 斌)	
論文審査 審査員		氏名	職名	氏名	職名
	主査	堀田 栄喜	教授	藤井 隆	連携教授
	審査員	堀岡 一彦	教授		
		奥野 喜裕	教授		
	肖 鋒	准教授			

論文審査の要旨 (2000 字程度)

本論文は「Z-pinch Dynamics in a Xenon Gas Jet Type 13.5 nm Extreme Ultraviolet Plasma Source」と題し、次世代リソグラフィ用露光光源の候補の一つである放電生成キセノンプラズマ極端紫外光源における Z ピンチダイナミクスについての研究成果を述べたもので、英文 6 章から構成されている。

第 1 章「Introduction」では、次世代リソグラフィ技術において有望な光源として期待されている波長 13.5 nm の極端紫外 (EUV : Extreme Ultraviolet) 光源の構成、要求仕様、光源方式などについて概観し、現状では十分な EUV 出力が得られていないことを指摘している。ついで、放電生成プラズマ (DPP : Discharge Produced Plasma) EUV 光源において、Z ピンチは EUV 光を発生させる効率的な手段ではあるが、Z ピンチプラズマでは不安定性が成長して EUV 放射の非一様性を生じさせ、EUV 出力を低下させているとし、本研究の目的が、DPP EUV 光源の Z ピンチダイナミクスを実験およびシミュレーションにより研究し、EUV 発生効率の向上に資することであるとしている。

第 2 章「Xe Gas Jet Type DPP EUV Source and Diagnostic Techniques」では、実験に用いたキセノンガスジェット型 DPP EUV 光源およびプラズマ診断法について述べている。本光源では、パルスパワー技術を用いて立ち上がり時間 110 ns、波高値 20 kA の単パルス放電電流を得ている。また、RF 予備電離プラズマを真空排気された放電ギャップに導入してジェットを形成し、初期プラズマを得たとしている。ついで、プラズマ診断に関し、時間分解 EUV 出力計測や可視光高速度カメラによる駒撮撮影、レーザ干渉計による電子密度計測、時間積分 EUV 像の撮影などにより Z ピンチのダイナミクスを観測したと述べている。

第 3 章「Experimental Results of Plasma Diagnostics」では、実験パラメータを変化させて EUV 出力を測定し、本光源における最適パラメータとして電極間ギャップ長 16 mm、キセノンガス圧力 25 Torr を得ている。このときレーザ干渉計測により EUV 出力に対する理論的最適電子密度 $10^{18} \sim 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ が得られたと述べている。また、予備電離用 RF 電力が低いときに高い EUV 出力が得られるが、一方、このとき波長 1 mm 程度の MHD 不安定性が成長することを EUV ピンホール像の観測結果から指摘している。

第 4 章「Physical Model and Numerical Scheme for Z-pinch Gas Discharge」では、DPP EUV 光源における Z ピンチ放電の物理モデルと数値計算スキームについて述べている。すなわち、完全電離プラズマを仮定した一流体二温度近似の軸対称 2 次元 MHD 方程式を用い、原子素過程については衝突電離、放射再結合、三体再結合を考慮したとしている。また、MHD プロセスの数値解析には、安定性に優れ、計算速度の速い TVD-LF (Total Variation Diminishing Lax-Friedrich) スキームを用いたとしている。

第 5 章「Simulation of Plasma Behaviors in Z-pinch」では、まず、Z ピンチプラズマのダイナミクスについてシミュレーションを行い、インプロージョン時のプラズマ殻の厚さは 1 mm 程度であり、初期密度が $(2 \sim 3) \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ のときに EUV 出力に対する理論的最適値である電子温度 25~30 eV、密度 $\sim 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ が得られることを見出し、実験における最適ガス圧力の存在を示していると述べている。ついで、磁気レーリーテラー (MRT : Magneto-Rayleigh-Taylor) 不安定性のシミュレーションを行い、初期擾乱として単一モードを与えた場合、短波長モードの成長が速く、非線形領域では高調波が現れること、また多モードを与えた場合にはモード結合によって新たなモードが出現すること、ランダムモードを与えた場合には波長 1 mm 程度の不安定性が支配的モードになり、実験における観測結果と一致することを見出している。さらに、MRT 不安定性は温度・密度の擾乱を生じさせて EUV 出力に影響を与えると指摘し、軸方向磁場や立ち上がり時間の短い放電電流による安定化について論じている。

第 6 章「Conclusions and Future Plan」では、本研究で得られた成果を総括するとともに、今後の研究課題について述べている。

以上を要するに本論文は、放電生成キセノンプラズマ EUV 光源における Z ピンチダイナミクスについて、実験およびシミュレーションにより新たな知見を得たもので、工学上ならびに工業上貢献するところが大きい。よって本論文は、博士 (工学) の学位論文として十分価値あるものと認められる。