

## 論文審査の結果の要旨

専攻名 システム創成工学

氏名 大塚 崇光

(1, 500字程度とし, 1行43文字で記入)

本論文は、EUV(極端紫外)光領域の中でも次々世代半導体リソグラフィ用の波長  $6. x \text{ nm}$  (ナノメートル) の領域において効率的に光を発生するためガドリニウムプラズマをレーザーによって生成し、 $6. x \text{ nm}$  近傍の光の発生及び吸収スペクトルの観測に成功している。さらに、短波長の水の窓領域 ( $2\text{-}4 \text{ nm}$ ) の光を発生するために、ビスマスをターゲットとして選択し、 $3\text{-}4 \text{ nm}$  近傍の光を観測している。研究では、プラズマから発生した光がプラズマ自身によって吸収され外部に放射されにくいことが予測され、それを確認するために、吸収分光実験を行い、それを確認した。さらに、量子力学的見地から、ビスマスプラズマからの発光ラインを計算し、今後のビスマスプラズマの最適化に対しての知見を与えている。

本論文は、八章で構成されており、それぞれに対してその評価を与える。

第一章は序論であり、EUV光源及び軟 X 線光源の研究背景、および現在世界で行われているEUVの発生手法を概観し、本研究で用いたレーザー生成プラズマ法についてその優位点を考察している。

第二章は、基礎的なプラズマ物理を述べ、レーザーがターゲット表面に集光した場合に生成される高温プラズマ内での物理過程を説明し、レーザーエネルギーがプラズマに付与される過程を導いている。また、高温プラズマから発生する EUV 領域の光について、古典物理学と量子力学的見地からその物理機構を記述し、第三章以降で述べられる実験やその結果の解析に用いられる理論について記述している。

第三章は、実験で用いられた実験装置について述べている。

第四章は、ガドリニウム(Gd)の吸収実験について述べている。プラズマから発光した光は、プラズマ自身で吸収されるため、プラズマ外部には出てこない。これを再吸収という。この現象は、高強度の光を必要とする応用を考えたとき非常に重要になる。二つのレーザー生成プラズマを用いる実験手法 (Dual laser plasma: DLP) により、発光するプラズマと吸収をするプラズマの二つのプラズマを生成し、Gd (ガドリニウム) の吸収スペクトルを観測しその特性を明らかにしている。発光スペクトルが有する吸収ラインが低価数イオンによるものであることを明らかにし、今後の実用光源開発に必要な指針を示していることは高く評価できる。

第五章ではビスマスをターゲットとしたときのプラズマ実験について述べている。

実験ではレーザー強度をパラメーターとして、波長 4 nm 周辺の軟 X 線スペクトルを計測し、理論的に予測されている波長 3 nm 近傍と 4 nm 近傍においてUTA (unresolved transition array) の発光を観測した。この 4*d*-4*f* 遷移に伴う 4 nm 帯の UTA の観測は世界で初めてであり、高く評価できる。

第六章は、前章で得られたビスマスプラズマからの 3 nm 帯の光に注目している。3 nm 帯の波長は「水の窓」と呼ばれる波長帯域に存在している。この波長帯の光に対して数多くの応用が提案されている。実験ではレーザーを二度照射することによりプラズマを追加熱し、イオンの価数をコントロールしている。このようにプラズマ温度を積極的に制御することによって 3 nm 帯の光が増強されることを観測したことは、高く評価できる。

第七章では、ビスマスの吸収実験について述べている。実験では第四章と同様に、二つのプラズマを生成し、吸収スペクトルを観測している。実験の結果、光子エネルギー 150 から 200 eV (エレクトロンボルト、波長 6.2 nm から 8.2 nm に対応) において 4*f* 軌道の内殻励起によるビスマスイオンの吸収を明らかにした。また、理論計算により実験で観測されたラインスペクトルの同定を世界で初めて行ったことは高く評価できる。さらに、5*p* 軌道の光吸収によってオージェ効果の一種によって光吸収の広帯域化が起こることも観測したことは評価に値する。

第八章は結論であり、以上七章までに述べた研究成果を総括し、得られた知見をまとめている。

本論文については、平成26年2月14日に本学オプティクス教育研究センター棟4F コラボレーションルームにおいて全審査委員の出席のもと公聴会が開催され、多くの質疑応答が行われた。公聴会終了後、直ちに学位審査委員会を開催し、本論文の内容を詳細に検討した。その結果、本研究成果は実用的にも工学的にも極めて大きな価値があり、研究内容の学術的水準の高さと独創性において極めて優れていると判断した。

よって、本論文は博士（工学）の学位論文に値するものと認める。