

平成 30 年 6 月 5 日現在

機関番号：17102

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H05472

研究課題名(和文) 新規軟X線光源用プラズマのためのイオン価数・電子密度・電子温度計測システムの開発

研究課題名(英文) development of ionic charge, electron density, and electron temperature measurement system for soft-X ray light sources

研究代表者

富田 健太郎 (Tomita, Kentaro)

九州大学・総合理工学研究院・助教

研究者番号：70452729

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 17,400,000円

研究成果の概要(和文)：波長13.5nmの次世代半導体露光用光源(極端紫外光源)や、さらに波長の短い水の窓光源(波長2.3-4.4nm)に代表されるように、軟X線領域光源の応用は多岐にわたる。低コストで手軽に利用できる軟X線光源として、プラズマは有力な候補である。プラズマによる軟X線の放射は、多価電離イオンの電子遷移によるものであり、所望の光源性能を得るためには、プラズマのイオン価数や密度・温度を計測・制御することが必須である。本課題ではレーザー散乱法を用いて、それらパラメータの非接触かつ局所計測法の開発を行った。

研究成果の概要(英文)：Soft X-ray light source have been used for various applications, such as extreme-ultraviolet(EUV) light sources (wavelength 13.5 nm) for next-generation semiconductor lithography system and water-window light sources (wavelength 2.3-4.4 nm), Laser-produced plasma is an attractive candidate for the Sof X-ray light source, because the plasma can be easily produced by table-top laser system. In order to optimize the plasma as the soft-X-ray light sources, to measure and control fundamental plasma parameters, such as averaged ionic charge state (Z), electron density (ne), and electron temperature (Te) are prerequisite. We have developed a new measurement system to obtain these plasma parameters. In our system, both ion and electron feature spectra of collective Thomson scattering have been observed simultaneously. From these spectra, it is possible to determine Z, ne, and Te.

研究分野：プラズマ工学

キーワード：軟X線光源用プラズマ トムソン散乱 レーザー生成プラズマ 電子密度 電子温度 平均イオン価数

1. 研究開始当初の背景

多価電離プラズマを軟X線の光源に利用する研究は、多方面で精力的に進められている。代表例として、波長 13.5 nm における極端紫外リソグラフィ (Extreme-ultraviolet lithography, EUVL) がある。EUVL では、比較的安価で高い光量を得られることから、光源としてレーザー生成プラズマ (laser-produced plasma, LPP) が使用されており、その実用化は目前まで迫っている。一方で、LPP を光源とする研究はさらに短い波長へと発展している。

2. 研究の目的

波長 2.3-4.4 nm 帯の水の窓領域における生体その場観測用光源や、EUVL の次の世代のリソグラフィ光 (beyond-EUV, B-EUV、波長 6 nm 台) である。しかし、EUVL の例からも分かる通り、その最適設計は容易ではない。プラズマ発光の波長ピークはイオン価数 (Z) に直接的に決定されるため、電子密度 (n_e) や電子温度 (T_e) を制御し、最適な Z を達成する必要がある。これらのパラメータを同時観測できれば、光源設計の大きな指針となる。本課題に先んじて、我々は協同的トムソン散乱のイオン項計測を実現し、EUV 光源用プラズマの診断手法を確立した [1,2]。しかし、水の窓領域や B-EUV 用の光源プラズマは EUV に比べ、より多価電離しており、イオン項のみの計測では不十分になる。そこで、イオン項に加え、電子項を同時に計測し、不足情報を補完しあうことでの測定達成を目指している。

3. 研究の方法

レーザートムソン散乱 (laser Thomson scattering, LTS) 法は、プラズマ内に電磁場を入射した際の、自由電子からの散乱光を分光解析することで、局所的なプラズマの温度、 n_e 、 Z を求めることができる測定法である。トムソン散乱計測用レーザーに Nd:YAG レーザーの第 2 高調波 ($\lambda=532$ nm) を用いると、多価電離プラズマから得られるトムソン散乱スペクトルは散乱パラメータ α が 1 より大きくなり、散乱には電子とイオンの集団的効果が現れ、協同的散乱領域に入る。この領域は、イオン項がレーザー波長を中心として 0.1-0.2 nm 程度のスペクトル拡がりを持つのに対し、電子項のスペクトル拡がりには 10 nm 程度まで広がる。イオン項には n_e 、 T_e 、イオン温度 (T_i)、 Z の情報が含まれるため、計測された散乱光スペクトルの散乱光強度、形状及びピーク間隔を求めることで以上のパラメータを求めることができる。しかし、 $Z > 20$ の多価電離プラズマでは、散乱スペクトルの形状による T_e と Z の分離が困難になる。一方、電子項のスペクトルは、ピーク間隔から n_e 、

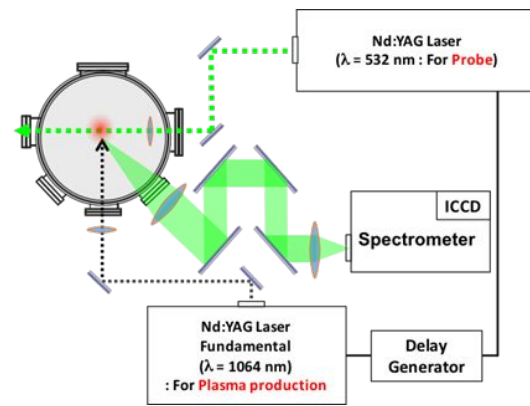


図 1. 装置概略図

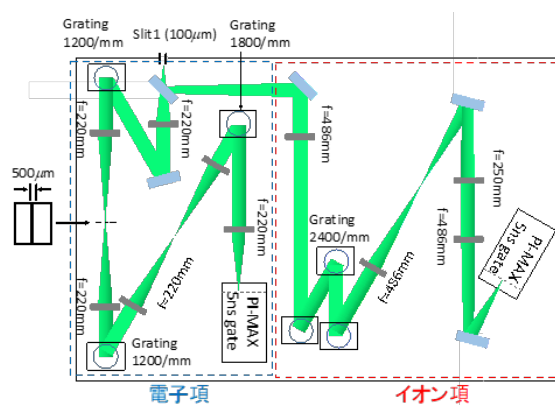


図 2. 同時計測のための分光システム

形状から T_e を求めることができる。そのため、電子項とイオン項を同時計測することで、 T_e と Z の分離ができるだけでなく、 n_e のクロスチェックも可能となる。波長域や強度の大きく異なるイオン項・電子項同時計測にあたり、高分散と低分散を同時に達成できる新たな分光器を作製した。実験装置の概略図を図 1、分光器の概要図を図 2 に示す。数百 pm しか波長が広がらないイオン項計測部は、迷光対策として極めて狭帯域のみをカットするノッチ部と、十分な波長分解能を達成する高分散部からなる。一方、電子項はスペクトルの波長拡がりが大きいため、低分散部とノッチ部からなっている。波長分解の点でイオン項に比べて計測が容易に見える電子項であるが、散乱光強度が小さい欠点がある。プラズマ生成直後では、プラズマの自発光に埋もれてその計測が困難になる。そのため、誘導ブリルアン散乱 (stimulated Brillouin scattering, SBS) システムを用いたピコ秒パルス幅レーザーを使用することで S/N 比を改善し、安定した電子項計測を可能とするシステムの開発を同時進行で行っている。

多価電離プラズマへの適用へ向け、レーザー生成空気プラズマを対象とした計測シス

テムの評価を行った。空気プラズマは、パラメータ範囲がよく知られており、ターゲットなどの反射物がないため迷光が非常に少なく、診断システムの評価に適している。

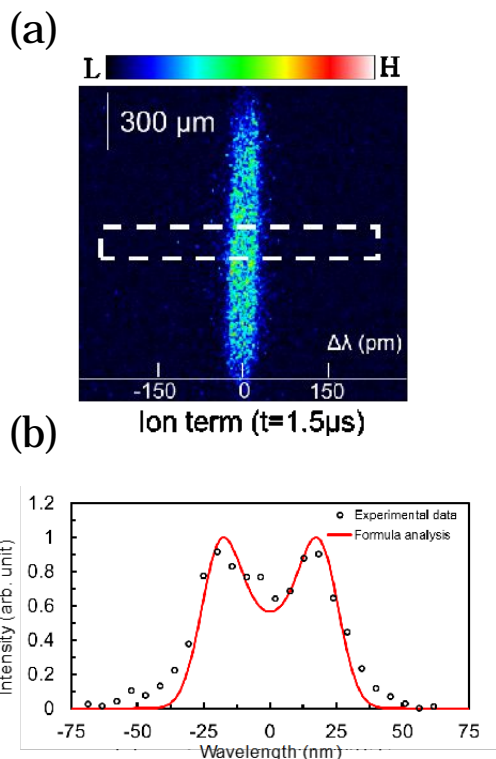


図 3. イオン項の計測結果

4. 研究成果

Fig.3(a)、Fig.4(a)は、プラズマ生成後 $1.5 \mu\text{s}$ でのレーザートムソン散乱のイオン項、電子項のスペクトルイメージ図である。この図では、横軸は中心波長 λ_0 からの差波長を表し、縦軸は空間的位置を表す。

Fig.3(b)、Fig.4(b)は、プラズマ生成後 $1.5 \mu\text{s}$ でのイオン項、電子項のフィッティング画像である。横軸は、中心波長 λ_0 からの波長差を表し、縦軸は強度を表す。このように、同一条件のプラズマに対して、イオン項および電子項スペクトルの明確な空間分布計測を達成した。

軟X線光源用多価電離プラズマのパラメータ計測に向けて、レーザー生成空気プラズマに対して、イオン項・電子項の同時計測を行った。新たに作製した分光器を用いて、プラズマ生成後 $1.5 \mu\text{s}$ の時刻で、両スペクトルの明確な空間分布を観測した。

プラズマ生成後直後の時刻では、高い電子密度により、プラズマの自発光の増加、並びに電子項強度の現象が予想される。自発光とトムソン散乱光の強度比の改善は、散乱角度の変更や、計測時間幅の縮小により期待されるが、そのためのシステム構築を行っていく。

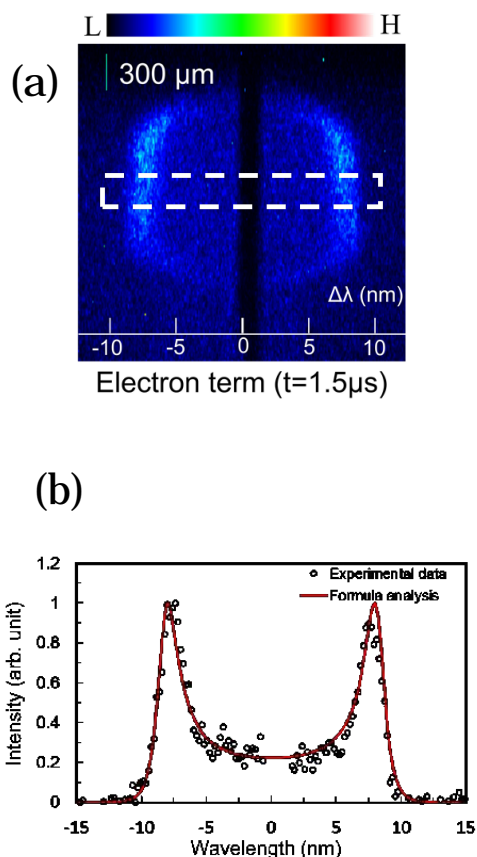


図 4. 電子項の計測結果

〔引用文献〕

- [1]: K. Tomita, Y. Sato, S. Tsukiyama, T. Eguchi, K. Uchino, K. Kouge, H. Tomuro, T. Yanagida, Y. Wada, M. Kunishima, G. Soumagne, T. Kodama, H. Mizoguchi, A. Sunahara, K. Nishihara, “Time-resolved two-dimensional profiles of electron density and temperature of laser-produced tin plasmas for extreme-ultraviolet lithography light sources”, *Scientific Reports* **7** 12328(7pages) (2017).
- [2]: K. Tomita, Y. Sato, K. Nishikawa, K. Uchino, T. Yanagida, H. Tomuro, Y. Wada, M. Kunishima, T. Kodama, H. Mizoguchi, A. Sunahara, “Development of a collective Thomson scattering system for laser-produced tin plasmas for extreme-ultraviolet light sources”, *Appl. Phys. Express* **8**, 126101(4pp) (2015).

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔学会発表〕(計 5 件)

- (Invited talk) K. Tomita, Y. Sato, T. Eguchi, S. Tsukiyama, T. Shiraiishi, M. Yoneda, K. Uchino, K. Kouge, H. Tomuro, T. Yanagida, Y. Wada, M. Kunishima, T. Kodama, H. Mizoguchi, T. Nakano, K. Murai, Y. Tanaka,

- K. Suzuki, T. Shinkai: “Collective Thomson scattering diagnostics for industrial plasmas”, Joint 13th Asia Pacific Physics Conference and 22nd Australian Institute of Physics Congress (APPC-AIP), Brisbane, Australia, 2016.12
2. (Invited talk) K. Tomita, Y. Sato, S. Tsukiyama, T. Eguchi, K. Uchino, K. Kouge, T. Yanagida, H. Tomuro, Y. Wada, M. Kunishima, T. Kodama, H. Mizoguchi: “Correlation of Fundamental Plasma Parameters with EUV Emission Profiles of Laser-produced Sn Plasmas for EUV Lithography Light Sources”, International Workshop on EUV and Soft X-Ray Sources (2016 Source Workshop), Amsterdam, The Netherlands, 2016.11
 3. (Invited talk) K. Tomita, Y. Sato, S. Tsukiyama, R. Fukada, K. Uchino, T. Yanagida, H. Tomuro, K. Kouge, Y. Wada, M. Kunishima, T. Kodama, H. Mizoguchi, "Two-dimensional profiles of electron density and temperature of laser-produced tin microplasmas for extreme-ultraviolet lithography light sources, International Workshop on Microplasmas (IWM2017), Garmisch-Partenkirchen, Germany, 2017.6
 4. (Invited talk) K. Tomita, Y. Sato, S. Tsukiyama, R. Fukada, K. Uchino, T. Yanagida, H. Tomuro, K. Kouge, Y. Wada, M. Kunishima, T. Kodama, H. Mizoguchi, "Two-dimensional electron density and temperature profiles of EUV light sources with 4.0% CE, International workshop on EUV and Soft X-ray sources (2017 source workshop), Dublin, Ireland, 2017.11
 5. (Invited talk) K. Tomita, Y. Sato, S. Tsukiyama, R. Fukada, K. Uchino, T. Yanagida, H. Tomuro, K. Kouge, Y. Wada, M. Kunishima, T. Kodama, H. Mizoguchi: “Diagnostics of extreme-ultraviolet (EUV) light source plasmas for next generation semiconductor lithography”, International Symposium in 27th Annual Meeting of MRS-J, Yokohama, Japan, 2017.12

6 . 研究組織

(1)研究代表者

富田健太郎 (TOMITA, Kentaro)

九州大学・大学院総合理工学研究院・助教

研究者番号：70452729