

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 9 月 12 日現在

機関番号：32689

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2013～2015

課題番号：25600143

研究課題名(和文)短パルスマルチバンチ電子ビームプレ励起によるBEUV光源の実現

研究課題名(英文)BEUV light generation via multi-bunch short electron pulse pre-irradiation

研究代表者

鷲尾 方一 (Washio, Masakazu)

早稲田大学・理工学術院・教授

研究者番号：70158608

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：LPP用のCO₂レーザーシステムの開発、更に電子ビームをプレパルスとして用いた際に発生するLPP光の量の計測を実施することで、将来の高効率LPP生成に向けた、基礎的なデータ取得を目的として研究を遂行した。フォトカソード励起用レーザーの安定化とマルチパルス化を行い、その安定発生を実現した。またCO₂レーザーについては、レーザーエンハンスキャビティの設計製作を行い、高Finesseシステムの構築に成功した。

最終的には、高出力のCO₂レーザー(パルス幅、400ns)を利用しての、LPP生成実験を実施し、電子線のマルチパルス(10バンチ)プレ照射法により、出力を約1.5倍に高めることに成功した。

研究成果の概要(英文)：We have achieved the major subjects for obtaining the basic data aiming the highly efficient system of laser produced plasma (LPP). In this study, we have performed the high quality electron beam production system by using a photo-cathode rf-gun installed in Waseda University, and then we have developed the laser system with laser enhanced cavity in CO₂ laser scheme. Through the development, we have obtained the data for LPP light under the pre-irradiation of multi-bunch electron beam in combination with the CO₂ laser illumination. In the study, we have realized the stabilization of electron beam generation even in the multi-bunch scheme. Further, we have succeeded the construction of CO₂ laser with the high finesses laser enhanced cavity. Finally, we have demonstrated the enhancement of LPP light up to 150% by using ten bunch electron beams in combination with 700mJ CO₂ laser pulse with the duration of 400ns.

研究分野：量子ビーム科学

キーワード：高性能加速器 レーザー・電子複合照射 EUV光 BEUV光 レーザープラズマ

1. 研究開始当初の背景

次世代半導体リソグラフィシステムにおいては、13.5nmの波長を用いるため、CO₂レーザーによるLPP(Laser Produced Plasma)UTA(Unresolved Transition Array)あるいはDPP(Discharge Produced Plasma)UTA方式が採用されており、そのターゲットにはSnが現在でも使われている。プラズマを作るために、高輝度レーザープレパルスターゲットに照射、さらに大出力のCO₂レーザーを照射し、多価イオンからの放射を実現する。この際、多価イオンからの放射を用いるためには最適な電子温度があることが理論的に示されていた。

次々世代半導体リソグラフィ用光源として、既に6.x(6.7)nm光源の開発準備も進んでいるが、ここでのUTA方式ではGdを用いることを想定している。次世代用のSnでの最適な電子温度は比較的低温度(20~50eV)であるが、Gdでは130~200eVが必要となる。また、次々世代(水の窓領域)を担うとされるBiでは1keV以上が必要である。このような状況下で次々世代装置用のプレパルスとして使用されるYAGレーザーに対するスペックが非常に高くなることが懸念されており、対策が急務となっていた。この研究はこのプレパルスに高輝度のマルチバンチ電子ビームを用いることで、高い電子温度を実現し、実用可能な高輝度次々世代および次々世代用ターゲットシステムを検討しようとするものである。

2. 研究の目的

本研究は、高輝度6.xnm(BEUV)光源および水の窓領域光源(6.x~2.4nm)を実現するための、短パルスマルチバンチ電子ビームプレ励起によるレーザープラズマ光源の実現に関するものである。具体的には、金属ターゲットを電子線照射により、高い電子温度でかつ低密度化を行い、そこにCO₂レーザーを照射し、多価イオン化を経由した高輝度の当

該波長プラズマ光源を実現しようというものである。特にGdのような高融点金属であっても容易に光源として利用できるようなシステムの最適化を含む開発を通じて、将来の超高精細リソグラフィシステムへの展開と、水の窓領域軟X線顕微鏡への展開を図るための基礎データを取得するものである。

3. 研究の方法

本研究ではまず、我々が所有するフォトカソードRF電子銃から電子を取り出す際に、高度なレーザー制御システムを用いて、制御された時間的構造を持つマルチバンチ電子ビームを発生させ、その特性を調べた。取り出された電子ビームを高効率に輸送するためのビーム輸送系の検討を行なうとともに、BEUV光発生用のチェンバー設計を行なった。さらに多価イオン化を達成するためのCO₂レーザーの伝搬システムの設計を実施し、これらを組み合わせ、BEUV光の発生及び測定システム構築を実施した。この開発により、ターゲット金属(当初はSnによる検討、その後Gd、Biを対象とする)からのプラズマ発光の詳細計測が可能となる。このシステム実証を通じて、高輝度の6.xnm光および水の窓領域の光の生成を最も効果的に行う電子ビームおよびレーザーの条件を定量的に導き出すことが可能となる。具体的な研究の進め方は以下の通りである。

1. これまでに実施されてきたSnを中心としたプラズマ発光の詳細メカニズムの実験的なデータの集約と理論研究の結果を集約し、電子ビームを使った金属の低密度化及びイオン化に必要な詳細データを確認した。これと並行して、大出力のマルチバンチ電子ビーム生成が可能となるRF電子銃の周辺設備の立ち上げを実施した。具体的にはCs-Teカソードの安定動作を可能とする真空システムの増強を行った後、以下の開発要素について検討した。

1.1 電子発生用レーザーの安定化と大出力化

電子発生には Nd:YLF の第四高調波を使用するので、我々が持つ 119MHz オシレータからのレーザーをファイバーレーザー増幅と特別に設計した非線形光学結晶を用いた 4 倍波生成を通じ 100 パルス以上のトレインからなる大強度 UV 光を取り出せるよう設計を行った。我々はこれまでに比較的输出の弱いマルチバンチビームについては原理実証に成功していたので(K. Sakaue, M. Washio et al., *Review of Scientific Instruments* **80**, 123304 (2009)) そのシステムの高度化を最初の目標とした。高度化の具体的内容はマルチバンチビームのパルス数の制御と電荷量の精密制御、エミッタンスの低減化(目標 3 mm・mrad)である。

1.2 ターゲットチェンバー

具体的には、専用のターゲットチェンバーの設計製作を目指した。このチェンバーは加速器のビームライン下流に取り付け中心部に金属ターゲットを設置し、さらに電子ビームの 45 度方向から CO₂ レーザーを照射できるように計画した。設置するターゲットには必要に応じて背面温度制御システムも組み込む予定であったが、今回は見送ることとなった。またターゲットの位置にレーザー及び電子ビームの位置と強度を診断するシステムも組み込むようにした。これについても我々はすでに実績(S. Kashiwagi, M. Washio et al., *Journal of Applied Physics*, **98**, No12, 123302- 1-6 (2005)) を有していたため、その方式を踏襲することとなった。これによれば、最終的には数 μm の精度で照射位置の特定ができるようになる。

1.3 CO₂ レーザーシステム

金属の多価イオン化を行うための CO₂ レーザーシステムについても、コンパクトで大強度を得ることができるように、レーザースーパーキャビティーといわれるものを新たに設計する。このキャビティーについても我々

はすでに原理実証を済ませており(K. Sakaue, A. Endo and M. Washio *J. Micro/Nanolith. MEMS MOEMS* **11**(2), 021124 (2012))、比較的短時間に設計製作ができるものと想定した。

これらの検討を踏まえ、達成できた電子ビームの高度化によりターゲット上での電子ビームの収束サイズは約 25μm と推定された。パルス当たり最大で約 1nC(パルス幅 10ps)の電荷を期待できる(ただし、エミッタンス等の関係で、実際には 420pC のビームを使用した。)パルス当たり 40J 相当になる。使用する電子のエネルギーを 4MeV とするとターゲット表層 25μm 当たりには 0.4J 程度のエネルギーを与えることができると考えられる。したがって、これまで YAG レーザープレパルスで行われてきた低密度化に匹敵するエネルギー付与が可能となるので、まずこの状態で BEUV 光発生の予備実験を行うこととした。同時に YAG レーザープレパルス実験も並行して行い、その比較から、電子ビームプレパルス法の評価を実施することとした。これらの開発により相当な成果が得られると想定したが、電子ビーム照射によってかなりの量の遮蔽放射 X 線の発生が予想されるので、この遮蔽方法についての検討も欠かせなかった。この点についても我々は散乱 X 線計算及び実験の実績を持っているので、その知見を活用して、BEUV 光測定への影響を排除する方法を検討した。使用するターゲットについては Sn による基本的な検討を終えた時点で Gd に移行し、その特性について詳細検討を行う予定であったが、最終試験として Sn による EUV 光の発生の確認をするにとどまっている。しかしながら、BEUV 光源実現のための基礎データは確実に取得できる体制を組みあげた。

4. 研究成果

電子発生に用いる Nd:YLF レーザーの第 4 高調波を効率的に発生させるためのシステム開発を実施した。特に 119MHz オシレータからのレーザーをファイバーレーザー増幅

し、更に特別に設計した非線形光学結晶を用いた、4倍波生成を実施した。また100パルスのマルチバンチ電子線を生成するための、マルチパルストレインを持つレーザーシステムの構築を行った。次に、CO₂レーザーシステムの開発について、コンパクトで大強度を得られるようレーザーエンハンスメントキャビティを設計しその特性を計測した。その結果フィネス 795 を達成し、出力として2.3kWを実現した。具体的なシステムを図1に示す。

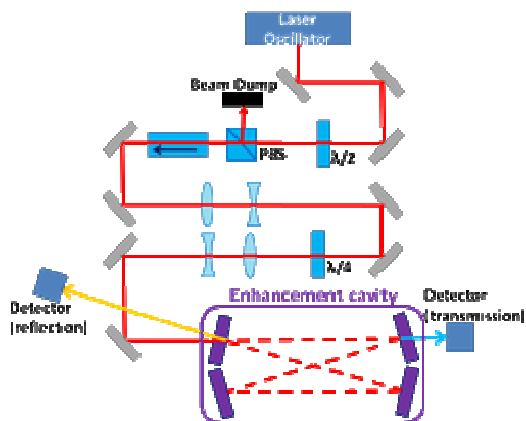


図1 作製したCO₂レーザーエンハンスメントキャビティの模式図

これらの開発を通じ実際にEUV光発生について詳細に検討した。

レーザー生成プラズマ発光(LPP)によるEUV光源発生について実際に、電子線をプリパルスとした、LPP法に関する実験的研究を実施した。LPP法では、既に述べたように波長10μmのCO₂レーザーをメインパルスとして、変換効率を向上させるために波長1μmのYAGレーザーを用いている。本課題では、これを電子線に置き換え、試験を実施した。ターゲットとしては、金属スズ(Sn)板を用いている。LPPにおいては、ターゲット材料のイオン発光スペクトルによって特有の波長の発光を得ることができるが、今回は検出器等が容易に手に入る13.5nm帯のSnを用いた。これをGdなどに置き換えることによって波長帯をより短波長に拡張することが可能である。

LPP実験用のセットアップ周りの写真を以下の図2に示す。

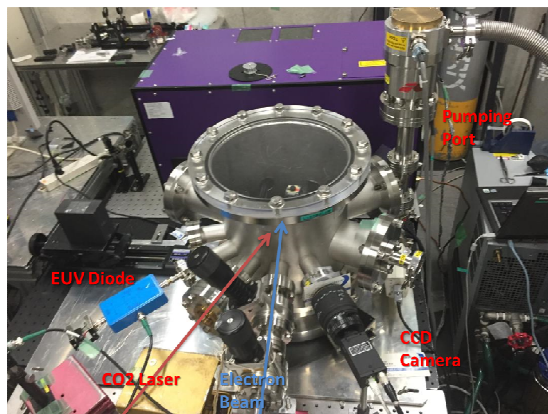


図2 EB-LPP実験体系

電子線としては、前年度まで開発したレーザーフォトカソード高周波電子銃から得られるマルチバンチ電子ビームを用いた。最大15パルスのマルチバンチを照射した。実際に使用した電子線はエネルギー4MeV、サイズは半径1mm程度、電荷量はバンチあたり500pCであった。レーザー光は前年度までに開発したものをさらにアップグレードし、最大700mJ、パルス幅400nsのCO₂レーザーを用いた。両者の照射タイミングを調整することにより、最大発光を得られるようデータ取得を行った。レーザーのみで生成した、EUVの強度との関係を図3に、電子線のプリ照射も行い、かつ電子線によって生成されたEUVもしくは生成されたバックグラウンドを差し引いたグラフを図4に示す。

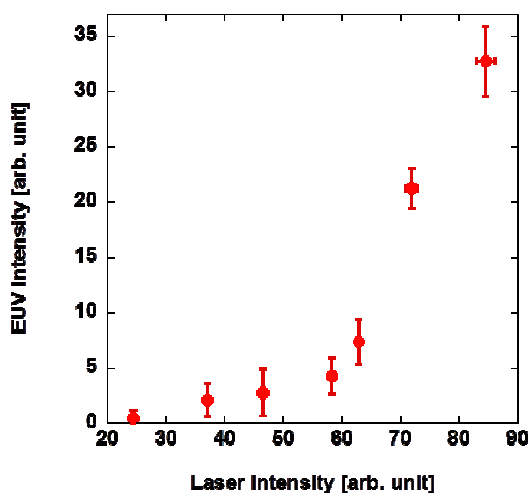


図3 CO₂レーザー強度とEUV強度の関係

図3より、実際にLPPでEUV光が生成されていることがわかる。問題点としては、CO₂レーザー強度揺れに起因するEUV光の強度揺れが大きい点であった。

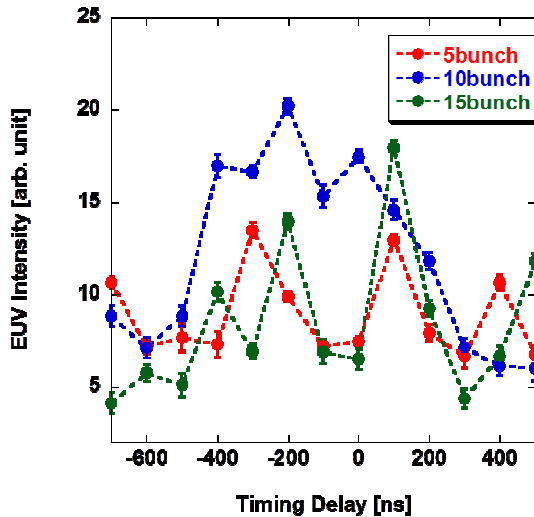


図4 電子線プリパルスによる照射効果

図4を見てわかるとおり、電子ビーム10バンチ(約5nC)、レーザーよりも200ns(両者のピーク位置が重なっているタイミングを0とした)前に電子線を照射することによってLPPの発光効率を1.5倍程度向上させることが可能であることを確認した。特に10バンチの際に顕著に見られることがわかる。この結果はプリパルスという特性上、当然予想されるメインパルスとの時間差がどの程度が最適化ということを明らかにしている。さらに、電子線の強度に対しても、過剰な電子ビームの照射はプラズマ中に電子を増やしてしまい、発生したEUV光を反射することが知られている。本成果では電子ビーム10バンチ程度の時に最適であり、電子の強度に対しても重要な知見が得られた。このように、明らかなLPP発光の効率向上が確認でき、電子線プリパルスが有用であることを確認した。但しCO₂レーザーの強度・タイミング揺れなども大きかった。本研究課題の成果を礎に、CO₂レーザーの一層の性能向上、短パルス化、電子線増強によるシングルバンチでのプリ

パルス照射などを行うことによって、詳細な性能評価を行うことができるものと考えている。またより広くパラメータを模索することによって将来的に電子線プリパルスLPP光源の可能性が大きく広がったものと理解している。

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)

[雑誌論文] (計 2件)

- ① Y. Uesugi, Y. Hosaka, Y. Honda, A. Kosuge, K. Sakaue, T. Omori, T. Takahashi, J. Urakawa, and M. Washio, Feedback-free optical cavity with self-resonating mechanism, *APL PHOTONICS*1, 026103 (2016), doi: 10.1063/1.4945353 (査読有)
- ② K. Sakaue, M. Washio and A. Endo, Demonstration of an Optical Enhancement Cavity with 10micron wavelength, *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*. SPIE, Vol. 9513, 951313, (2015) DOI: **10.1117/12.2178623** (査読有)

[学会発表] (計 11件)

- ① 五十嵐大裕、高橋孝、坂上和之、遠藤彰、鷺尾方一、収束電子ビームを用いた高強度レーザーのプロファイル測定、日本物理学会第71回年次大会、2016年3月22日、仙台
- ② 五十嵐大裕、高橋孝、坂上和之、遠藤彰、鷺尾方一、レーザーコンプトン散乱によるEUV光発生と大強度レーザープロファイル計測への応用、次世代レーザー技術とEUV・軟X線光源に関する研究会、2016年1月25日、蔵王
- ③ 坂上和之、遠藤彰、鷺尾方一、レーザーパルス蓄積共振器開発、次世代レーザー技術とEUV・軟X線光源に関する研究会、2016年1月25日、蔵王
- ④ K. Sakaue, A. Endo, and M. Washio, Recent Progress in Photo-cathode rf gun as a Pulsed Radiation Source, International Congress of Radiation Research, 2015年5月27日、京都
- ⑤ 武市直人、小林岳周、安藤浩平、坂上和之、遠藤彰、鷺尾方一、CO₂レーザーを用いた光共振器の開発、レーザー学会第469回研究会、2014年12月5日、喜多方
- ⑥ 五十嵐大裕、佐藤令、野々村洗、坂上和之、遠藤彰、鷺尾方一、収束電子ビームを用いた高強度レーザーのプロファイル測定、レーザー学会第469回研究会、2014年12月5日、喜多方

- ⑦ 小林岳周、鈴木里佳、坂上和之、鷺尾方一、光共振器を用いたパルスレーザーの繰り返し逡倍化に関する研究、日本物理学会第70回年次大会、2015年3月24日、東京
- ⑧ 鈴木里佳、坂上和之、遠藤彰、鷺尾方一、モード同期 Yb ファイバーレーザーを用いた、光陰極用レーザーシステムの開発、日本物理学会第70回年次会、2015年3月24日、東京
- ⑨ 笥田知慶、高橋猛之進、西山将大、野々村洗、坂上和之、鷺尾方一、高富俊和、浦川順治、RF-Deflector を用いたフォトカソード RF-Gun における Bunching Factor 計測、日本物理学会第70回年次会、2015年3月24日、東京
- ⑩ 佐藤令、吉田靖史、野々村洗、坂上和之、遠藤彰、鷺尾方一、フォトカソード RF-Gun による電子ビームを用いた高強度レーザーの直接プロファイル計測の研究、日本物理学会第69回年次大会、2014年3月29日、平塚
- ⑪ 坂上和之、遠藤彰、鷺尾方一、加速器をベースとした Beyond EUV 光源の検討、レーザー学会第450回研究会、2013年10月22日、東京

〔図書〕 (計 0 件)

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.f.waseda.jp/washiom/top.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

鷺尾 方一 (WASHIO Masakazu)

早稲田大学・理工学術院・教授

研究者番号：70158608

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3) 連携研究者

坂上 和之 (SAKAUE Kazuyuki)

早稲田大学・高等研究所・助教

研究者番号：80546333

東口 武史 (HIGASHIGUCHI Takeshi)

宇都宮大学・工学部・准教授

研究者番号：80336289