

EUV 露光の高出力化をもたらす光源プラズマ流観測に成功

～「流れを操り、光を作る。」新しい概念に基づく半導体露光用 EUV プラズマ光源の開発に期待～

ポイント

- ・半導体露光用 EUV 光源を構成するプラズマの流れの観測に世界で初めて成功。
- ・これまで観測が困難であったプラズマの流れと EUV 発光強度の関係を解明。
- ・流れの制御が可能となることで、より明るくクリーンな EUV 光源の開発が期待される。

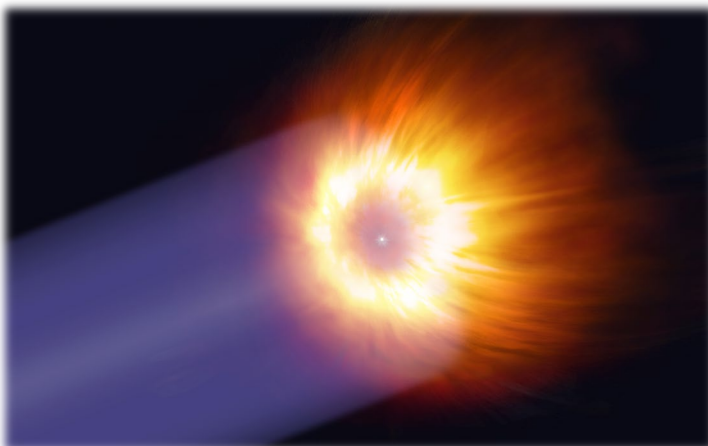
概要

北海道大学大学院工学研究院の富田健太郎准教授らの研究グループは、大阪大学レーザー科学研究所の西原功修博士（大阪大学名誉教授）、米国パデュー大学の砂原 淳博士、ギガフォトン株式会社の開発チームと共に、世界各国がしのぎを削る最先端の半導体製造に必須の技術である、EUV 露光^{*1} の高出力化に重要な役割を果たす、光源プラズマの複雑な流れ構造を世界で初めて明らかにしました。

EUV 露光とは、非常に短い波長（13.5 ナノメートル、1 ナノは 10 億分の 1）の光を用いる露光技術であり、半導体の 2 ナノメートル線幅以下の超微細加工に不可欠です。露光機内では光源からの光を転送するために多数の反射ミラーを利用しますが、EUV 領域のミラー反射率は高くありません。そのため、極めて高出力な EUV 光源（温度が 30 万度程度のプラズマ）が必要となります。EUV が光る原理を考えると、光源プラズマの温度とともに密度やプラズマの流れを把握し、制御することが基本となりますが、プラズマの寿命は 20 ナノ秒程度、大きさは 0.5 ミリメートル以下であるため、これまでプラズマ内部の高速流動現象の把握は困難でした。

今回、研究グループは、新開発したレーザートムソン散乱^{*2} 計測システムを用いて、世界で初めて秒速数 10 キロメートルの複雑なプラズマの流れを、非接触な方法で可視化することに成功しました。その結果、光源プラズマ内部では通常と異なる中心部への流れが存在し、その流れが EUV 発光強度の増加に寄与していることを明らかにしました。この発見は、EUV 光源のさらなる高出力化の鍵となる知見であると同時に、「プラズマの流れを制御して光の出力を向上させる」という、まったく新しい概念の可能性を示すものです。

なお、本研究成果は、2023 年 2 月 1 日（水）公開の Scientific Reports 誌にオンライン掲載されました。



図の左から右に照射されたレーザーにより加熱されたプラズマ（EUV 光源）が中心に集まる流れを持ち、特に図の明るい領域から効率よく EUV 光が放出されることが判明した。

中心部への流れはプラズマが周辺に拡散する速度を抑え、周辺のミラーの汚染の低減にも効果的と考えられる。

【背景】

半導体はスマートフォン、自動車、家電製品など、私たちの身近にある、あらゆる電子機器に使用されていると同時に、様々な業種のデジタルトランスフォーメーション（DX）を支える基幹部品でもあります。今後も自動運転や AI 技術をはじめとする IoT 領域が拡大するにつれ、半導体にはデータ処理能力の飛躍的な向上と低消費電力化の両立が求められています。そのためには半導体のさらなる微細加工が必須であり、超微細加工を実現する最先端技術として、EUV 光を用いた露光があります。

EUV 露光とは、非常に短い波長（13.5 ナノメートル、1 ナノは 10 億分の 1）の光を用いる露光技術であり、スマートフォンやパソコンの頭脳にあたるプロセッサ（ロジック半導体）の 2 ナノメートル以下の超微細加工に不可欠な技術です。露光機内では光源からの光を転送するために多数の反射ミラーを利用しますが、EUV 領域のミラー反射率は高くありません。そのため、十分な光量を確保するためには、極めて高出力の EUV 光源（温度が 30 万度程度のプラズマ）が必要であり、今後はさらなる高出力化・低消費電力化が求められています。EUV が光る原理を考えると、光源プラズマの温度や密度、そしてプラズマの流れを計測し、制御することが最適化の基本となります。しかし、そのような物理パラメータを計測することはとても難しく、詳細が不明のままでした。

EUV 光源の開発は、基本的な物理量が不明なまま（ブラックボックスのまま）進んでおり、「なぜ光るのか」の核心に迫ることがありませんでした。「計測できないものは制御できない」という理念の下、本研究グループは EUV が光る原理に立ち返り、最も基本的なパラメータであるプラズマの温度・密度・流れの計測の実現に向け基礎研究を続けてきました。

【研究手法】

プラズマ計測という観点から EUV 光源プラズマを見たとき、微小（直径 0.5 mm）・短寿命（20 ns 程度）なことに加え、高密度（0.2 kg/m³ 程度）かつ高速移動（毎秒 10 キロメートル以上）することから、その温度や密度、流れの時間変化・空間構造を計測するのは困難でした。外部からレーザー（電磁波）を入射し、プラズマとレーザーの相互作用で生じる 2 次的電磁波（散乱光）を計測することで、非接触で高い空間・時間分解能が得られるレーザートムソン散乱（Laser Thomson scattering: LTS）法は、計測条件を満たす数少ない手法の一つです。（図 1）。

しかし、得られるトムソン散乱光は極めて微弱であり、EUV 光源プラズマの LTS 計測は技術的に不可能とされてきました。そこで、従来のシステムでは不可能な LTS 計測を実現するため、研究グループは 6 枚の反射型回折格子などからなる差分散型回折格子分光器を立案・作製し、それによって EUV 光源プラズマの電子温度・密度の詳細構造を世界で初めて計測可能としました（図 2）。

【研究成果】

作製した差分散型回折格子分光器を用いて計測を進めていくと、プラズマの中心位置（プラズマ生成用レーザーの軸上）では、周辺部より密度が低い中空様構造を形成していることが分かりました（図 2(b)上部）。

様々な条件で計測した結果、この中空様構造が、高効率化に重要な役割を果たしている可能性が大きいことが判明しました。一方で、この中空様構造が発現すると、なぜ EUV 放射に適した高温・高密度プラズマが比較的長時間維持されるのかは不明でした。

プラズマは複雑な流れを形成し得る高温媒質であり、前述の温度・密度に加え、その流動を把握することが疑問の解明に重要だと考え、トムソン散乱光スペクトルのドップラーシフト^{*3}に着目しました。プラズマ流動の速度は光速の 1 万分の 1 程度あるので、受光する散乱光の波長シフト（光のドッ

ブラスフト)にはプラズマの流動情報が明確に現れます。

そこで研究グループは、波長シフトの高度な解析を行い、流れの「方向」と「大きさ」を各位置・各時刻でそれぞれ独立に決定できるようにしました(図3)。これにより、わずか±200 μm程度の微小領域内で、プラズマの流れの方向は180度反転し、流れの大きさが様々に変化することなど、微細な速度場構造が存在することや、それが速度の絶対値(矢印の大きさを表現。毎秒10キロメートル程度の高速な流れである)として可視化されていることが分かりました(図3(b))。

また、プラズマの中心軸上に向かう、特徴的なプラズマの流れを観測しました(図3(b))。中心軸に向かうプラズマの流れは、いつでも存在するわけではなく、プラズマ生成条件に依存します(図4)。これは、生成条件で流れが制御できることを確認しています。

プラズマ内部の温度・密度・流れ場の時間・空間変化を基に、研究グループは、この中心軸に向かうプラズマの流れが、EUV放射の効率を高めていることを突き止めました。すなわち、中空構造発現時に生じる中心軸上に向かう流れにより、EUV発光に適したプラズマが、中心部に長時間留まる効果があることを発見しました。

この一連のプラズマ速度計測技術は、EUV光源のさらなる高出力化の鍵となる知見であると同時に、「プラズマの流れを制御して光の出力を向上させる」という、まったく新しい概念の可能性を示しています。

【今後への期待】

EUV光の高出力化には、プラズマの温度と密度の最適化が必須です。しかし、その最適な温度・密度を実現するには、プラズマの流れの制御が重要であることが、本研究を通じて示されました。特に、中心方向への流れを誘起することは、効率よく光るプラズマを長時間閉じ込めることや、プラズマの保温効果があります。この流れはまた、プラズマの運動エネルギーを抑える効果も期待できます。高い運動エネルギーを持ったプラズマは、プラズマの周囲にあるEUVを集光するミラーまで到達し、ミラーを曇らせてしまう(反射率低下を招く)ため、大きな問題となっています。

速度場、すなわち流れ場を非接触に可視化するプラズマ速度計測技術は、フェムト秒(1フェムトは1兆分の1)・ピコ秒(1ピコは10億分の1)・ナノ秒のすべてのレーザープロセスにおける「その場観測」の実現が期待されます。そしてまた、実験室宇宙物理実験のような最先端の科学研究における、宇宙物理のダイナミクスの計測をも可能とするものです。今後は、EUV光源開発だけでなく、幅広い分野での応用が期待できます。

論文情報

論文名 Observation of plasma inflows in laser-produced Sn plasma and their contribution to extreme-ultraviolet light output enhancement (レーザー生成スズプラズマ内の内向き流れの観測とその EUV 発光強度増加への寄与)

著者名 富田健太郎¹、潘 奕明²、砂原 淳^{3,4}、神家幸一郎⁵、溝口 計⁵、西原功修⁴ (¹北海道大学大学院工学研究院、²九州大学大学院総合理工学府、³Center for Materials Under eXtreme Environment (CMUXE), Purdue University, ⁴大阪大学レーザー科学研究所、⁵ギガフォトン株式会社)

雑誌名 Scientific Reports

DOI 10.1038/s41598-023-28500-8

公表日 2023年2月1日(水)(オンライン公開)

お問い合わせ先

北海道大学大学院工学研究院 准教授 富田健太郎 (とみたけんたろう)

TEL 011-706-5594 メール tomita.kentaro@eng.hokudai.ac.jp

URL https://www.eng.hokudai.ac.jp/labo/pmel_a/index.html

配信元

北海道大学社会共創部広報課 (〒060-0808 札幌市北区北8条西5丁目)

TEL 011-706-2610 FAX 011-706-2092 メール jp-press@general.hokudai.ac.jp

【参考図】

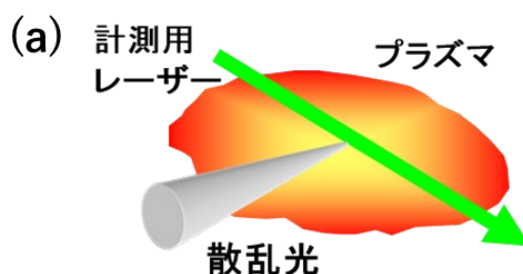


図1. トムソン散乱計測の概要。外部から計測用のレーザーを照射することでプラズマの非接触計測が可能。

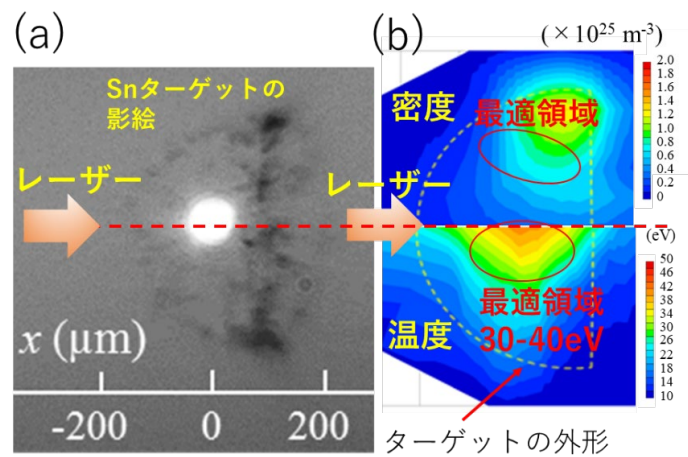


図 2. (a) プラズマ生成前の Sn(スズ)ターゲットの影絵像。(b) プラズマの電子密度 (上側) と電子温度 (下側) のプロファイル。レーザーは図の左から右に照射。レーザー軸上は EUV 放射に最適な温度 30-40eV (1eV エレクトロンボルトは約 1 万度) であり、密度は周辺部の方が高い中空様構造が確認された。

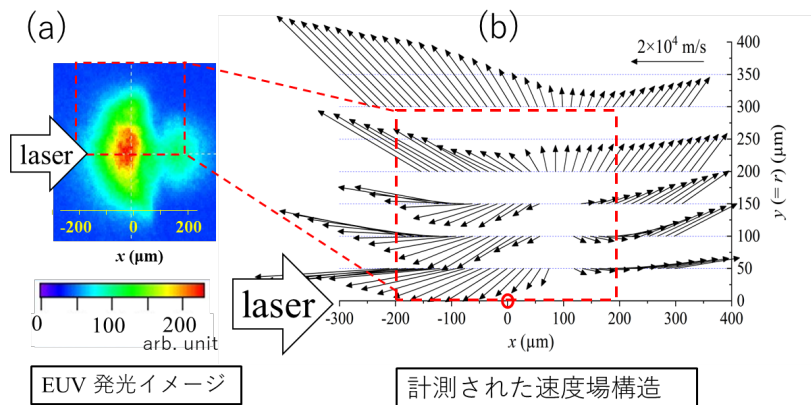


図 3. (a) EUV 発光イメージ。(b) プラズマ内の 2 次元速度場構造 (上側のみ表示)。半径 150 μm の範囲は、レーザー軸上 (プラズマ中心軸上) へ流れていく様子が観測された。

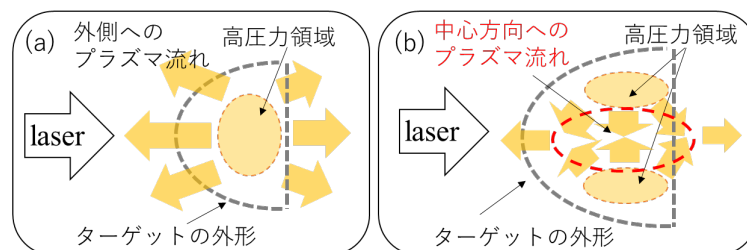


図 4. (a) 一般的なプラズマの流れの説明。加熱されやすい中心部が高圧力となり、周辺への流れが生じる。EUV を発する高温・高密度のプラズマが中心部分へ長く留まることはできない。(b) 本研究で観測された中心方向へのプラズマ流れの説明。プラズマによるレーザーエネルギーの非線形吸収過程により、レーザー強度の低い周辺部で高圧領域は形成され、プラズマ中心部への流れが形成される。一部の高温・高密度プラズマは中心部に留まることができる。

【用語解説】

- *1 EUV 露光 … 露光は写真のフィルムなど、光に反応する材料（感光材料）の表面に光をあて、感光させることを言う。半導体分野における露光とは、シリコンなどの半導体基板を、回路模様が刻まれた「マスク」と言われる部材で覆い、光を照射して、回路パターンを焼きつける工程を指す。露光は半導体製造の中核的な工程であり、光を用いるため、回路パターンをどれだけ細かくできるかは、波長の長さに依存する。露光の光源として、水銀ランプの i 線（波長 365 ナノメートル）、KrF（フッ化クリプトン）エキシマレーザー（波長 248 ナノメートル）、ArF（フッ化アルゴン）エキシマレーザー（波長 193 ナノメートル）などがあるが、波長を一気に 13.5 ナノメートルまで短くし、超微細な回路パターンを可能とするのが、EUV 露光である。EUV とは極端紫外域（Extreme Ultraviolet）の略。

- *2 プラズマ … 固体・液体・気体に次ぐ物質の第 4 の状態。プラズマ中では気体を構成する中性粒子の一部、またはすべてが電子とイオンに分離しており（電離）、様々な特徴がある。とても反応性が高いことから、多くの産業（微細加工、薄膜合成、薄膜合成、表面改質、滅菌など）に活用されているが、本研究ではプラズマが発する強い「光」を利用している。プラズマは流体（電磁流体）として扱われるので、密度や温度、流れ場（速度場）が基本の物理量となるが、これらを計測やシミュレーションで正確に把握することは一般に困難であり、性質が良く分からないまま利用されている場合がある。

- *3 トムソン散乱 … 自由電子を何らかの力で強制的に振動させたときに発生する、2 次的な電磁波のこと。ただし、とても微弱であり、図 1 で示すように、レーザーなどによる強力な電場で電子を振動させない限り、検知することは困難。

- *4 ドップラーシフト … ドップラー効果（救急車が近づく時と、遠ざかる時で、サイレンの音の高さ、すなわち音の周波数が変化する現象）により、検出される光の周波数が変化（シフト）すること。光も波であり、光の発生源（ここでは高速で動くプラズマ）が観測者（観測装置）に対して移動していると、音の場合と同様にドップラー効果が現れる。