

## 将来リソグラフィー用 EUV-FEL 光源

### EUV-FEL LIGHT SOURCE FOR FUTURE LITHOGRAPHY

中村典雄<sup>#, A)</sup>, 加藤龍好<sup>A)</sup>, 阪井寛志<sup>A)</sup>, 土屋公央<sup>A)</sup>, 谷本育律<sup>A)</sup>, 本田洋介<sup>A)</sup>, 宮島司<sup>A)</sup>

島田美帆<sup>A)</sup>, 山本将博<sup>A)</sup>, 谷川貴紀<sup>A)</sup>, 田中織雅<sup>A)</sup>, 帯名崇<sup>A)</sup>, 河田洋<sup>A)</sup>

Norio Nakamura<sup>#, A)</sup>, Ryukou Kato<sup>A)</sup>, Hiroshi Sakai<sup>A)</sup>, Kimichika Tsuchiya<sup>A)</sup>, Yasunori Tanimoto<sup>A)</sup>, Yosuke Honda<sup>A)</sup>,

Tsukasa Miyajima<sup>A)</sup>, Miho Shimada<sup>A)</sup>, Masahiro Yamamoto<sup>A)</sup>, Takanori Tanikawa<sup>A)</sup>, Olga Tanaka<sup>A)</sup>,

Takashi Obina<sup>A)</sup>, Hiroshi Kawata<sup>A)</sup>

<sup>A)</sup> High Energy Accelerator Research Organization

#### Abstract

A more powerful EUV light source will be required for lithography in future to overcome the stochastic effects for higher throughput and finer patterning. In Japan, Rapidus Corporation for mass production and LSTC(Leading-edge Semiconductor Technology Center) for open R&D were recently established in framework for next-generation semiconductor project. We have designed and studied a high-power EUV-FEL light source based on energy-recovery linac (ERL) for future lithography. In this paper, after overview of the EUV-FEL light source, we show that the EUV-FEL light source has many advantages such as extremely high EUV power, no tin contamination, narrow spectral width, upgradability to a Beyond EUV (BEUV) FEL, polarization controllability and low electric power consumption per scanner, as compared to the laser-produced plasma (LPP) source used in the present EUV lithography exposure tool. Furthermore, demonstration of proof of concept (PoC) of the EUV-FEL is in progress using the Compact ERL (cERL) at KEK. We also briefly present the current state of the PoC of the EUV-FEL.

#### 1. 背景

半導体リソグラフィーの分解能  $R$  は、光源波長  $\lambda$ 、開口数  $NA$ 、プロセスパラメータ  $k_1$  によって次のように与えられる。

$$R = k_1 \frac{\lambda}{NA} \quad (1)$$

そのため、半導体チップ内のトランジスタの数が2年に約2倍になるというムーアの法則を維持するように光源の波長は徐々に短くなってきている。現在最も短い波長はEUVリソグラフィーの13.5 nmで、これはEUV光学系に使用されているMo/Si多層ミラーの反射率曲線の波長に合わせられている。EUVリソグラフィーでは、250 Wのレーザー生成プラズマ(LPP)光源を用いてモバイルやPCに使われる先端半導体の量産製造が2019年頃に開始された。LPP光源では、CO<sub>2</sub>レーザーとスズ(Sn)液滴によって生成されたスズプラズマがEUV光を生成し、四方に散らばったEUV光を集光ミラーで集めてEUV光学系を含むスキャナーシステムに供給している[1]。スズプラズマ残留物の集光ミラーへの汚染とそれによる反射率の劣化はこの光源の問題の1つで、年に何回も高価なミラーを交換する必要がある。

EUVリソグラフィーにおけるより一般的な問題として、 stochastic効果(確率論的效果)がある。EUVリソグラフィーでは、光子エネルギーがこれまでのエキシマレーザー(ArF)に比べて14倍高いため、同じエネルギー線量ではウェハー上のレジストに吸収される光子数はエキシマレーザーよりも格段に少ない[2]。線量が不十分な

場合には半導体のウェハー上に stochastic効果によるパターン欠陥が現れやすくなる[3]。高いスループットと stochastic効果抑制に必要な線量を同時に実現するには、光源に高いEUV出力(パワー)が必要とされる[4]。今後、高まる先端半導体需要や高分解能化(高NA化、短波長化)に対応するためにも、将来より強力な光源が必要になる。

日本国内では、2022年8月に将来の次世代半導体の量産製造拠点となる新しい会社、ラピダス(株)が設立され、11月にはトヨタ自動車(株)やソニーグループ(株)など大手8社から出資を受けることになった[5]。ラピダスは2027年までに2 nm技術ノードの先端半導体を委託販売することを目指している。一方、日本政府は、次世代半導体の研究開発拠点として、2022年末に最先端半導体技術センター(LSTC: Leading-edge Semiconductor Technology Center)という公的機関を新たに設立した[6]。ラピダスが先端半導体の量産製造を行い、LSTCが関連する先端設計や先端装置・素材技術の開発研究を行うという次世代半導体プロジェクトの体制が構築されつつある。LSTCの参加機関には、ラピダスだけでなく、研究開発に必要な日本の主要な研究機関や大学が含まれていて、高エネルギー加速器研究機構(KEK)は9つのLSTC参加機関の一つになっている。

我々は、2015年頃からエネルギー回収リニアック(ERL)の産業利用としてリソグラフィー用高出力EUV-FEL光源の設計及び研究開発を行ってきた[7-10]。上述した国内外での半導体リソグラフィーの状況の下、KEKを中心にこのような将来リソグラフィー用光源の研究開発を行っていくことは次世代半導体プロジェクトとその将来の発展に向けて期待されることである。以下では、EUV-FEL光源の概要を示し、本光源がLPP光源と比較して優れている主な特長について述べる。また、cERLを

<sup>#</sup> norio.nakamura@kek.jp

用いた EUV-FEL 光源の概念実証(PoC: Proof of Concept)についても簡単に触れる。

## 2. EUV-FEL 光源の概要

### 2.1 光源設計の概要

ERL を用いた EUV-FEL 光源のイメージ図と基本パラメータ値を Fig. 1 に示す。この光源では、バンチ繰返し周波数 162.5 MHz で光陰極 DC 電子銃から発生するバンチ電荷 60 pC の電子ビームを、入射超伝導(SC)リニアックで約 11 MeV、主 SC リニアックで 800 MeV に加速する。電子バンチは第1アークの磁氣的バンチ圧縮によって圧縮され、周回部のアンジュレータシステムで SASE-FEL による EUV 光を生成する。FEL 発振後、電子ビームは主リニアックに戻り、エネルギー回収されてビームダンプに廃棄される。このエネルギー回収により、10 mA の高い平均電流が達成され、10 kW を超える高い EUV 出力を供給することができる。

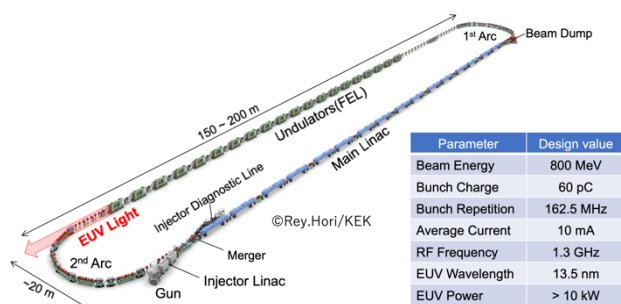


Figure 1: 3-D illustration and design parameters of the EUV-FEL light source based on ERL.

光源の主要なコンポーネントは入射部、主リニアック、2つのアーク部、アンジュレータシステムである。入射部は電子銃、ソレノイド電磁石、バンチャー空洞、超伝導加速空洞、マッチング部、合流部で構成される。電子銃は国内外での大電流・高品質ビームの生成・運転において実績のある光陰極 DC 電子銃[11, 12]を採用し、入射リニアックも cERL で実績のある超伝導加速空洞の技術とシステム[13, 14]を活用した設計としている。主リニアックは、電流 10 mA において加速勾配 12.5 ~ 15 MV/m で安定運転可能なように設計した 9 セル超伝導加速空洞 64 台で主に構成される[15]。第 1 アーク部は 3 セルの DBA ラティス、第 2 アーク部は 2 セルの TBA ラティスで構成され、それぞれバンチ圧縮とバンチ伸長を行う[16]。EUV 光を発生するための FEL のアンジュレータには、偏光制御とコスト削減のために固定ギャップの APU(Adjustable Phase Undulator)型可変偏光アンジュレータ(周期 $\lambda_u = 28$  mm、アンジュレータパラメータ  $a_w = 1.168$ 、ギャップ  $g=10$  mm)を検討している。

### 2.2 光ビーム輸送

EUV-FEL 光源の EUV 出力は 10 kW 以上が期待できるので、経済性や効率から考えて複数台の露光装置に EUV 光を同時に供給することが前提になる。放射線遮蔽された光源から別の建屋にある各露光装置の第 1 EUV ミラーまで EUV 光を輸送・分配・サイズ調整するた

めの光ビームラインが必要になる。EUV-FEL 光のパルス幅は FWHM で約 100 fs で、そのパルスあたりのエネルギー密度は FEL 出口から 3 m 離れた地点でおよそ 10 mJ/cm<sup>2</sup> となる。一方、SACLA の軟 X 線ビームラインの FEL 光(パルス幅: 100~300 fs)と EUV レーザー(パルス幅: 7 ps)を用いた 2 つの実験から得られた Mo/Si 多層膜やシリコンのアブレーションの閾値はどちらも約 20 mJ/cm<sup>2</sup> であった[17]。これより、本光源のパルスエネルギーはアブレーション閾値よりもやや低いことがわかる。加えて、アブレーションによるミラー損傷をより安全に回避するために、Fig. 2(a)に示すように視射角 2 度程度と小さい湾曲した全反射ミラーで垂直方向の光サイズをおよそ 100 mm まで広げ、さらに Fig. 2(b)に示すように分割された湾曲型全反射ミラーによって水平方向に広げつつ光を露光装置の数だけ分岐させる。その結果、エネルギー密度は大幅に減少し、アブレーションの閾値よりも 4 桁小さくなる[9]。この下流に、各露光装置の第 1 EUV ミラーに最適なビームサイズを供給できるように、水平・垂直方向の集光ミラーをそれぞれ設置する。これらの集光ミラーもやはり視射角の小さい全反射ミラーを使用する。このような方法を用いることで、光のロスやミラーの損傷なく各露光装置まで光を輸送できる。

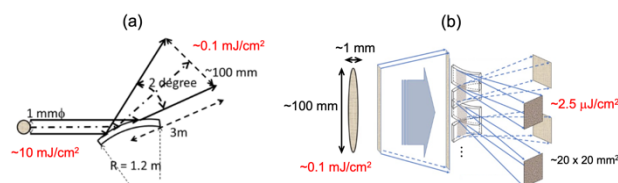


Figure 2: Handling of the EUV-FEL light in the optical beamline. (a) Vertical expansion of the EUV-FEL light by a curved grazing mirror with a small glancing angle. (b) Horizontal expansion and separation of the EUV-FEL light by a segmented multi curved mirror.

## 3. EUV-FEL 光源の特長

EUV-FEL 光源は LPP 光源と比べて優位性のある多くの特長がある。ここでは、その主な特長について述べる。

### 3.1 高 EUV 出力

EUV-FEL 光源の EUV 出力の評価を S2E シミュレーションで行った[10]。3 つのシミュレーションコードが使われ、GPT と GENESIS はそれぞれ入射部と FEL システム、Elegant は他のビームライン(周回部や主リニアックなど)に使用された。トラッキング粒子数は 500 k とした。GPT による入射部のシミュレーションでは、入射部出口でバンチ長に対して横方向エミッタンスの代わりに縦方向エミッタンスを最小化するようにした[18]。また、縦方向の空間電荷効果を全てのシミュレーションにおいて考慮した。シミュレーションによる最適化の結果、FEL 入口でのバンチ長と運動量広がり は 39 fs と 0.1 % で、水平および垂直方向の規格化エミッタンスはそれぞれ 2.0 と 0.9 mm mrad になった。

Figure 3(a)と Fig. 3(b)は、アンジュレータセクション内でのバンチあたりの FEL パルスエネルギーの成長と FEL 出口での FEL パワースペクトルである。ここでは、全アン

ジェネレータで円偏光モードが仮定されている。最適化されたリニアテーピング値(4%)では、計算されたFELパルスエネルギーは109.4 μJで、電流9.75 mAに対して17.8 kW(19.5 mAでは35.5 kW)で本光源が非常に高いEUV出力性能を有していることがわかる。また、FELのスペクトル幅は、Fig. 3(b)に示すように Mo/Si ミラー反射率に対して十分に狭い。一方、Sn のLPP 光源ではスペクトル幅はミラーの反射率曲線の幅よりも倍近く広がり[1]、本光源は高出力性能のみならずスペクトル幅でも優れていることがわかる。FEL 発振後、運動量広がり率は0.1%から0.34%まで増加するが、電子ビームはcERLと同程度の開口部を持つビームダクトでビーム損失なしにダンプリンまで輸送できることがわかった。今後、未考慮のビームダイナミクスのプロセスやさまざまな誤差も加えて、シミュレーションの精度を高めていく予定である。

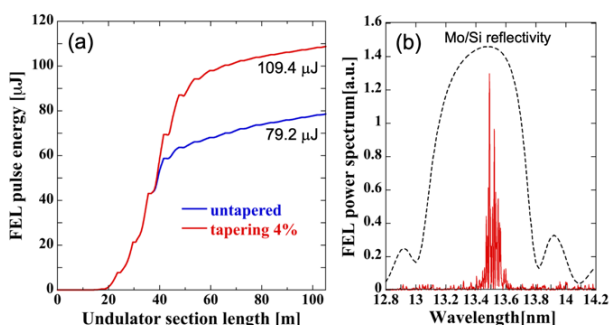


Figure 3: (a) Simulated FEL pulse energies with 0 and 4% tapering as a function of the undulator section length and (b) FEL spectrum at the FEL exit with the Mo/Si mirror reflectivity curve (a broken line).

### 3.2 BEUV-FEL 光源へのアップグレード

Figure 4(a)から4(c)は、EUV-FEL 光源からより微細加工可能な Beyond FEL(BEUV)-FEL 光源への3つの可能なアップグレード配置案の概略を示す。

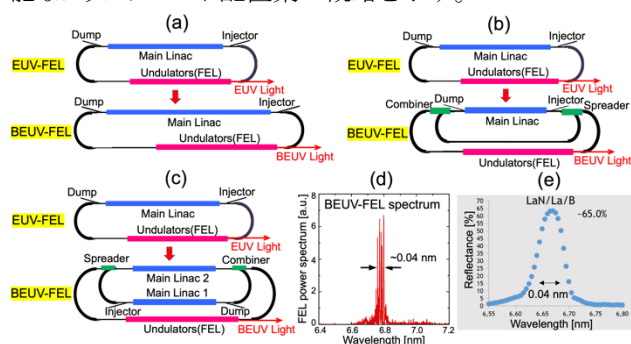


Figure 4: Three possible upgrade schemes to a BEUV-FEL based on (a) single-loop layout and (b)(c) double-loop layout, (d) a simulated BEUV-FEL spectrum and (e) measured reflectivity curve of a BEUV mirror.

BEUV リンググラフィーでは光源の波長は約 6.7 nm であるために、ビームエネルギーを800 MeVから約1.14 GeVに上げることで BEUV 光の発生が実現可能となる。Figure 4(a)は単純なシングルループ配置で、同じ加速勾配を維持する場合は主リニアックの長さをおよそ1.4倍に

増やすことになる。他の2つの方式は、光源の長さを増やさないようにダブルループにした配置案の例である。Figure 4(b)はビームは主リニアックによって2回加速を行う案で、Fig. 4(c)は1回加速ではあるが、主リニアックを2つの部分に分けて配置している。Figure 4(d)は計算されたBEUV-FEL スペクトルを示す[19]。このスペクトルの幅(FWHM:~0.04 nm)は、Fig. 4(e)[20]で測定された BEUV ミラー反射率曲線の幅よりも少し狭いことがわかる。これは、ERL による BEUV-FEL が BEUV リンググラフィーでも非常に有望な光源であることを示している。LPP 光源ではスズの代わりにガドリニウム(Gd)を用いることで6.7 nmのBEUV光を生成できるが、スペクトル幅はBEUV-FELと比べて格段に広がっていて、0.04 nmの幅に全光子数の2.4%しか入らないという実験結果が報告されている[21]。

### 3.3 偏光の利用と制御

式(1)に示すように、同じ波長でもNAが高いほど高分解能が得られる。光の偏光は、同じ波長でより高分解能が得られる高NAリンググラフィーに有用である。開口角θが大きい高NA配置では、Fig. 5に示すように、s偏光モードの光の方がp偏光モードよりも光の干渉によってウェハー上での光の強度とコントラストに優れている。実際に、実験でも高NAリンググラフィーにおけるこのような偏光効果が確認されている[22]。

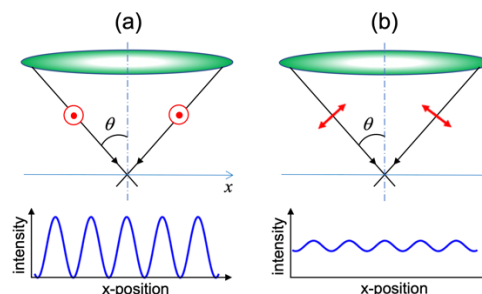


Figure 5: Schematic of two plane waves propagating on different paths in high-NA configuration and the light intensity produced by interference of the two waves on a wafer for the (a) s-polarized and (b) p-polarized modes.

EUV-FEL 光源および BEUV-FEL 光源には、前述したように可変偏光アンジュレータを使用することを検討している。低NAリンググラフィでは、EUV パワーを優先してすべてのアンジュレータを円偏光モードで動作させることが考えられる。一方、高NAリンググラフィにおいては、上述した偏光効果を最大限生かすことが重要となる。最も簡単な方法は、リンググラフィーのパターンに対してs偏光となる水平または垂直の直線偏光モードで全てのアンジュレータを運転することが考えられる。また、上流の何台かのアンジュレータを円偏光モードとし、残りのアンジュレータを直線偏光モードで運転することで、全ての台数を直線偏光モードで運転するよりもより高い出力を得られるような方式の可能性も検討している[23]。いずれにしても、EUV-FEL および BEUV-FEL 光源ではNAに応じて柔軟な偏光制御を行うことができる。一方、LPP 光源は無偏光であり、NAが大きくなるとウェハー上での強度とコントラストが減少することになる。

### 3.4 消費電力

半導体製造においても最近になって、その技術やシステムの持続可能性が重要視されるようになった。これは、微細化に伴って CO<sub>2</sub> 排出量や電力消費が急増しているため、半導体チップ開発においてコストや性能とともに環境への配慮やグリーン化が求められている[24, 25]。EUV 露光装置の電力の大部分は LPP 光源で消費されるために、光源の消費電力低減が EUV 露光の電力削減には効果的と言える。Table 1 に EUV-FEL 光源に必要な電力量の内訳を示す。超伝導加速空洞用のヘリウム冷凍機の電力がその中で最も大きく、空洞の加速勾配 12.5 MV/m、Q 値  $1 \times 10^{10}$  に対して見積られた値であるが、安定運転のために実際の電力の 1.5 倍の値になっている。RF 源については変換効率 30% で計算した値である。その他の光源機器としては電磁石・真空・制御システムなどがあり、インフラ設備としては冷却水や空調システムなどがある。総電力は、10 kW の EUV 出力に対しておよそ 7 MW であるため、1 kW の EUV 出力または 1 kW の露光装置あたり 0.7 MW となる。一方で、LPP 光源は 250 W の EUV 出力で約 1.1 MW の電力を消費し[26, 27]、1 kW の EUV 出力に対しては約 4.4 MW を消費することになる。従って、EUV-FEL 光源に代わることで露光装置 1 台あたりの消費電力を大幅に削減できる。

Table 1: Electric Power Needed for the EUV-FEL

Item	Electric power [MW]
Refrigerator System	3.2
RF Source	1.3
Other Components	1.0
Infrastructure	1.5
Total	7.0

光源にかかる建設コストや運転コストも重要である。特に現在の LPP 光源では集光ミラーの交換・保守費用が大きいと考えられる。EUV-FEL 光源の使用によって露光装置 1 台あたりの建設コストと運転コストも削減できる可能性がある[10]。

## 4. cERL を用いた EUV-FEL 概念実証

EUV-FEL 光源の概念実証を示すことも重要である。Figure 6 に示すように、KEK の ERL 実証機である cERL に、アンジュレータを設置して SASE-FEL 光を生成することは、EUV-FEL 光源の概念実証の1つになる。ただし、cERL では EUV ではなく赤外光を発生することになるが、それでも実現すれば、本光源の概念実証のみならず、世界初の ERL の SASE-FEL 光源となる。幸い、分子振動遷移に基づく光吸収を利用した高効率レーザ加工のための高出力中赤外レーザの開発を目的とする NEDO プロジェクトの一環として、2019 年 10 月から 2020 年 5 月にかけて cERL に 2 台の 3-m アンジュレータを設置して IR-FEL を建設することができた。ビームエネルギーは約 17.5 MeV で、APU 型の水平偏光アンジュレータは FEL 波長 10~20  $\mu\text{m}$  をカバーする。IR-FEL のコミッションングは、2020 年 6~7 月と 2021 年 2~3 月に実施された[28, 29]。コミッションングの結果、強い空間電荷効果を電子

ビームが受けながらも、FEL パルスエネルギーは NEDO プロジェクトの目標値をおよそ達成することができた。運転はエネルギー回収なしのバーストモードで行われたが、このような ERL 配置での SASE-FEL 光の有意な発生は、EUV-FEL 光源の概念実証における重要なステップとなった。

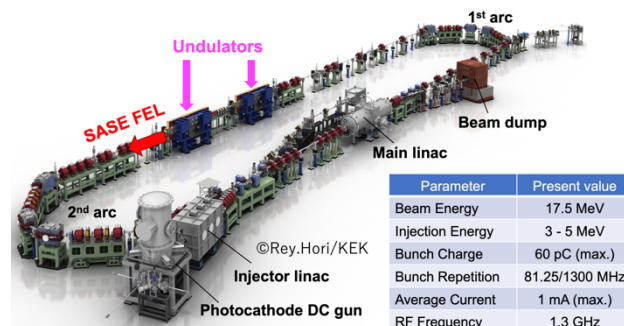


Figure 6: Schematic of PoC of the EUV-FEL light source using the cERL and the cERL parameters.

今後はバーストモードから CW モードに変えてエネルギー回収を伴う高出力 FEL 運転を目指すことになる。その準備として、cERL ダンプラインを 2020 年秋に改造し、ビーム損失を抑制するためにエネルギーアクセプタンスを大幅に改善した[30]。さらに、IR-FEL 建設後の最初の CW モードでの大電流運転(最大電流約 250  $\mu\text{A}$ )を 2022 年 2 月から 3 月にかけて行い、低バンチ電荷ながら~100% のエネルギー回収率を達成できた[31]。今後は、CW モードでの運転を増やしていくことになる。

予算獲得が前提ではあるが、さらに今後取り組むべき課題について挙げておく。1つは、EUV-FEL 光源の主リニアック用超伝導加速空洞の製作と試験である。現在の cERL 主リニアック空洞 2 台を含むクライオモジュールに代えて、EUV-FEL 用主リニアック空洞 4 台を入れたクライオモジュールを設置することで、エネルギーを 55-65 MeV に上げることができる。結果として、EUV-FEL 主空洞の性能評価と cERL の空間電荷効果の軽減及びビーム品質の向上が期待できる。また、EUV-FEL 光源と同じ 10 mA ビーム運転を電子銃システムと放射線遮蔽などの改善によって実現することを計画している。その他、EUV-FEL 光源用 APU 型偏光可変アンジュレータの試作も検討している。

## 5. まとめ

リソグラフィにおいてストカスティック効果などを克服しつつ、より高スループット・高分解能を実現していくためにより強力な光源が将来必要とされる。我々が設計・研究してきた ERL を用いた EUV-FEL 光源は LPP 光源と比べて、高 EUV 出力、ミラー非汚染、BEUV へのアップグレード、狭スペクトル幅、偏光制御、露光装置 1 台あたりの低い消費電力など、優れた特長を有する。cERL を用いた EUV-FEL 光源の概念実証も進められている。本光源は将来有望なリソグラフィ用光源であり、国内で次世代半導体プロジェクトが進む中、産業化に向けた研究開発を一段と推進していきたいと考えている。

## 謝辞

EUV-FEL 光源産業化研究会には、EUV-FEL 光源の産業化に向けた議論と研究会等の開催をしていただくとともに、EUV リソグラフィーに関する多くの情報も提供して頂きました。ここに、深く感謝致します。また、cERL 及び IR-FEL の建設や保守・運転に尽力してきました cERL 共同チーム及び NEDO プロジェクトチームの全メンバーに心から感謝致します。

## 参考文献

- [1] I. Fomenkov, “EUV Source for Lithography in HVM: performance and prospects”, Proc. Source Workshop 2019, Amsterdam, Netherland, Nov. 2019.  
<https://www.euvlitho.com/2019/S1.pdf>
- [2] J. J. Biafore *et al.*, “Stochastic simulation of resist at EUV and ArF”, Proc. SPIE 7273, San Jose, CA, USA, Apr. 2009, 727343.  
doi:10.1117/12.813551
- [3] P. De Bisschop and E. Hendrickx, “Stochastic effects in EUV lithography”, Proc. SPIE 10583, San Jose, CA, USA, Mar. 2018, 105831K.  
doi:10.1117/12.2300541
- [4] S. Inoue, “Trend of Leading-Edge Semiconductors and the Patterning Technologies”, Proc. 4<sup>th</sup> EUV-FEL Workshop, Akihabara, Japan, Dec. 2019.  
<https://conference-indico.kek.jp/event/93/contributions/1998/attachments/1327/1416/inoue.pdf>
- [5] <https://english.kyodonews.net/news/2022/11/148c2f25de20-breaking-news-japan-announces-strategy-for-domestic-production-of-advanced-chips.html>
- [6] [https://www.meti.go.jp/english/press/2022/pdf/1111\\_001a.pdf](https://www.meti.go.jp/english/press/2022/pdf/1111_001a.pdf)
- [7] N. Nakamura *et al.*, “Design Work of the ERL-FEL as the High Intense EUV Light Source”, Proc. ERL2015, Stony Brook, NY, USA, Jun. 2015, pp. 4-9.
- [8] N. Nakamura *et al.*, “Challenges Towards Industrialization of the ERL-FEL Light Source for EUV Lithography”, Proc. IPAC2019, Melbourne, Australia, May 2019, pp. 3478-3481.
- [9] H. Kawata, N. Nakamura, H. Sakai, R. Kato, and R. Hajima, “High power light source for future extreme ultraviolet lithography based on energy-recovery linac free-electron laser”, J. Micro/Nanopattern Mater. Metrol. **21**(2), 021210, Apr-Jun 2022.  
doi:10.1117/1.JMM.21.2.021210
- [10] N. Nakamura *et al.*, “High-power EUV free-electron laser for future lithography”, Jpn. J. Appl. Phys. **62**, SG0809 (2023).  
doi:10.35848/1347-4065/acc18c
- [11] N. Nishimori *et al.*, “Generation of a 500-keV electron beam from a high voltage photoemission gun”, Appl. Phys. Lett. **102**, p. 234103, Jun. 2013.  
doi:10.1063/1.4811158
- [12] M. Yamamoto *et al.*, “Development of a 500 kV DC gun with narrow gap”, Proc. ERL2015, Stony Brook, NY, USA, Jun. 2015.  
[https://accelconf.web.cern.ch/ERL2015/talks/tuiblh1021\\_talk.pdf](https://accelconf.web.cern.ch/ERL2015/talks/tuiblh1021_talk.pdf)
- [13] E. Kako *et al.*, “Construction of injector cryomodule for cERL at KEK”, Proc. IPAC’12, New Orleans, LA, USA, May 2012, paper WEPPC015, pp. 2239-2241.
- [14] K. Watanabe, S. Noguchi, E. Kako, K. Umemori, and T. Shishido, “Development of the superconducting RF 2-cell cavity for cERL injector at KEK”, Nucl. Instrum. Methods **A714** (2013) 67-82.  
doi:10.1016/j.nima.2013.02.035
- [15] T. Konomi *et al.*, “Design of the 9-cell superconducting cavity for EUV light source accelerator”, Proc. ICFA Mini Workshop on High Order Modes in Superconducting Cavities, Rostock-Warnemünde, Germany, Aug. 2016.  
[https://indico.cern.ch/event/465683/contributions/2269224/attachments/1325097/1988846/HOMSC16\\_EUV\\_cavity\\_V2.pdf](https://indico.cern.ch/event/465683/contributions/2269224/attachments/1325097/1988846/HOMSC16_EUV_cavity_V2.pdf)
- [16] N. Nakamura, R. Kato, T. Miyajima, M. Shimada, T. Hotei, and R. Hajima, “S2E simulation of an ERL-based high-power EUV-FEL source for lithography”, J. Phys.: Conf. Ser. **874**, 012013, Jul. 2017.  
doi:10.1088/1742-6596/874/1/012013
- [17] M. Nishikino, “Research on interaction of SXFEL with matter for EUV ultra-precision nano-fabrication”, Proc. 2nd EUV-FEL Workshop, Dec. 2017.  
[http://pfwww.kek.jp/PEARL/EUV-FEL\\_Workshop2/Proceedings/03\\_Nishikino.pdf](http://pfwww.kek.jp/PEARL/EUV-FEL_Workshop2/Proceedings/03_Nishikino.pdf)
- [18] O. A. Tanaka, N. Nakamura, T. Tanikawa, and T. Miyajima, “Injector Design Towards ERL-Based EUV-FEL for Lithography”, Proc. IPAC2022, Bangkok, Thailand, Jun. 2022, pp. 2299-2301.
- [19] R. Kato, “Demonstration of high-repetition FEL using cERL and beyond EUV-FEL”, Proc. 4<sup>th</sup> EUV-FEL Workshop, Akihabara, Japan, Dec. 2019.  
<https://conference-indico.kek.jp/event/93/contributions/1990/attachments/1322/1411/Kato.pdf>
- [20] M. D. Ackermann *et al.*, “EUV multilayers mirrors – wider, thinner, and deeper”, Proc. 2021 Source Workshop, Oct. 2021.  
<https://www.euvlitho.com/2021/S1.pdf>
- [21] R. Amano *et al.*, “Influence of short pulse duration of carbon dioxide lasers on extreme ultraviolet emission from laser-produced plasmas”, Jpn. J. Appl. Phys. **57**, 070311 (2018).  
doi:10.7567/JJAP.57.070311
- [22] B. W. Smith, L. Zavyalova, and A. Estroff, “Benefitting from Polarization – Effects on High-NA Imaging”, Proc. SPIE 5377, pp. 68-79, May 2004.  
doi:10.1117/12.537266
- [23] T. Tanikawa *et al.*, “次世代 EUV リソグラフィー用高出力 EUV-FEL における偏光制御シミュレーション”, PASJ2023, Funabashi, Japan, 29 Aug. - 1 Sep. 2023, FRP26, this meeting.
- [24] <https://www.imec-int.com/en/expertise/cmos-advanced/sustainable-semiconductor-technologies-and-systems-ssts>
- [25] L. V. den Hove, “The endless progression of Moore's Law”, Proc. SPIE PC12053, PC1205301, San Jose, California, USA, Jun. 2022.  
doi:10.1117/12.2606055
- [26] M. V. den Brink, IMEC Technology Forum USA, Jun. 2020.
- [27] M. Lercel, “EUV for High Volume Manufacturing”, Proc. 2022 EUVL Workshop & Supplier Showcase, 2022.  
<https://euvlitho.com/euvl-workshop/2022-euvl-workshop-supplier-showcase/>
- [28] Y. Honda *et al.*, “Construction and commissioning of mid-infrared self-amplified spontaneous emission free-electron laser at compact energy recovery linac”, Rev. Sci. Instrum. **92**, 113101, Nov. 2021.  
doi:10.1063/5.0072511
- [29] H. Sakai *et al.*, “Compact ERL を用いた中赤外 FEL の開発と FEL 発振”, PASJ2021, Takasaki (Online meeting), 9-12 Aug. 2021, MOPOA04.
- [30] N. Nakamura *et al.*, “Reconstruction and beam-transport study of the cERL dump line for high-power IR-FEL operation”, J. Phys.: Conf. Ser. **2420**, 012029, Jan. 2023.  
doi:10.1088/1742-6596/2420/1/012029
- [31] T. Tanikawa *et al.*, “Current Status of Beam Operation at Compact ERL toward Free-Electron Laser with CW Mode”, presented at IPAC’23, Venice, Italy, May 2023, TUPL159.