

ERL を利用した EUV-FEL 光源の設計

DESIGN WORK OF EUV-FEL LIGHT SOURCE BASED ON ENERGY RECOVERY LINAC

宮島司 *^{A)}, Si. Chen^{A)}, 古屋貴章^{A)}, 芳賀開一^{A)}, 羽島良一^{B)}, 羽入勇^{A)}, 原田健太郎^{A)}, 本田融^{A)}, 本田洋介^{A)}, 加古永治^{A)}, 神谷幸秀^{A)}, 加藤龍好^{A)}, 河田洋^{A)}, 小林幸則^{A)}, 許斐太郎^{A)}, 久保毅幸^{A)}, 道園真一郎^{A)}, 仲井浩孝^{A)}, 中村典雄^{A)}, 西森信行^{B)}, 帯名崇^{A)}, 生出勝宣^{A)}, 阪井寛志^{A)}, 坂中章悟^{A)}, 島田美帆^{A)}, 土屋公央^{A)}, 梅森健成^{A)}, 山本将博^{A)}

T. Miyajima*^{A)}, S. Chen^{A)}, T. Furuya^{A)}, K. Haga^{A)}, R. Hajima^{B)}, I. Hanyu^{A)}, K. Harada^{A)}, T. Honda^{A)}, Y. Honda^{A)}, E. Kako^{A)}, Y. Kamiya^{A)}, R. Kato^{A)}, H. Kawata^{A)}, Y. Kobayashi^{A)}, T. Konomi^{A)}, T. Kubo^{A)}, S. Michizono^{A)}, H. Nakai^{A)}, N. Nakamura^{A)}, N. Nishimori^{B)}, T. Obina^{A)}, K. Oide^{A)}, H. Sakai^{A)}, S. Sakanaka^{A)}, M. Shimada^{A)}, K. Tsuchiya^{A)}, K. Umemori^{A)}, M. Yamamoto^{A)}

^{A)}KEK, 1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801

^{B)}JAEA, 2-4 Shirakata-Shirane, Tokai-mura, Naka, Ibaraki, 319-1195

Abstract

An free electron laser (FEL) light source based on energy recovery linac (ERL) to generate intense extreme UV (EUV) light has been designed as a future light source for EUV lithography. The light source has been designed based on the operation results of the compact ERL (cERL), which is a test accelerator to demonstrate the performance of ERL. The requirements for the EUV-FEL light source are the wave length of 13.5 nm, and the FEL power of more than 10 kW. In order to estimate the light source performance, simulations about the injector, the bunch compression and decompression, and the FEL generation were carried out. These results show that the performance of the EUV-FEL light source based on ERL can satisfy the target performance of the future EUV lithography.

1. はじめに

KEK では、次世代の放射光源としてエネルギー回収型線形加速器 (Energy Recovery Linac, ERL) を利用した光源の開発を行っている。ERL は線形加速器型光源の特徴をもつとともに、エネルギー回収によって平均ビーム電流 10 mA 以上の大電流ビームを扱うことができるという大きな特徴をもつ。この特徴を活かして、ERL 加速器の一つの応用先として、自由電子レーザー (Free Electron Laser, FEL) と ERL を組み合わせた、大出力の極端紫外線 (EUV) を生成するための EUV-FEL 光源の検討を行っている。EUV-FEL 光源は、半導体製造のための次世代リソグラフィ技術である EUV リソグラフィ用の光源として期待されている。

これまでの EUV リソグラフィ用の光源開発では、波長 13.5 nm をもつ EUV 光を生成するレーザー励起プラズマ光源 (Sn ドロップレットにレーザーを照射してプラズマを作り、そこから EUV 光を生成する) の開発が進められており、現在 100 W 程度の出力が得られる状態まで開発が進んでいる。レーザープラズマ光源では最終的に 250 W の出力が見込まれているが、その次の世代の EUV 光源では、10 kW 以上というより高い出力が要求される。これを満たす光源の一つとして、ERL と FEL を組み合わせた EUV-FEL 光源が一つの有力な候補となっている。KEK では、ERL 実証機として開発した compact ERL (cERL) のビーム試験^[1]を通して、EUV-FEL 光源実現に欠かせない高輝度大電流電子源と超伝導加速空洞の技術開発を着実に進めており、これらの試験で実証された性能を基に EUV-FEL 光源の検討を開始している^[2]。本報告では、次世代 EUV リソグ

ラフィーに必要な光源性能^[3]についてまとめたあと、EUV-FEL 光源の設計方針とその進捗状況について報告する。

2. 次世代 EUV 光源の要求性能

リソグラフィ用 EUV-FEL 光源は産業利用専用の光源加速器となるため、学術利用の場合より信頼性・安定性という点で厳しい性能が要求される。IPAC'15 で、FEL の産業利用、特に次世代 EUV リソグラフィ用の光源についての報告があり、これまでのレーザー励起プラズマ光源の開発の現状と、その次の世代の EUV 光源に期待される性能について報告がなされた^[3]。ここではこの報告に基づき、次世代 EUV 光源に要求される性能についてまとめる。

表 1 に次世代 EUV リソグラフィ用光源に要求される性能を示す。まず光源の波長であるが、EUV 領域の 13.5 nm がターゲットとなる。現在検討されている EUV リソグラフィでは、一つの光源から複数の露光装置へ振り分けが行われるため、EUV-FEL 光源に期待される

Table 1: Requirements for Future EUV Light Source

Wave Length	13.5 nm
Power	20 kW - 40 kW
Size of Light Source	On the Order of 150 m
Reliability	> 99 % Uptime
Source Power Stability	< 1 % with 1 ms Integration Time
Pulse Length	> 2.5 fs
Band Width	< 2 % (Ideally < 0.6 %)

* tsukasa@post.kek.jp

出力は、レーザープラズマ励起光源の目標値 250 W よりもはるかに高い 20 kW - 40 kW となっている。産業利用では光源装置全体のサイズが重要となるが、競技場程度の 150 m オーダーのサイズは許容範囲であることが報告されている。加速器を利用した光源の場合、そのサイズはビームエネルギーと高周波空洞の加速勾配に依存するため、それによってサイズが制限されることになる。今回の ERL を用いた EUV-FEL 光源の設計検討に当たっては、cERL の運転を通して実証してきた現実的な加速勾配の値を用いている。

産業利用でより重要となるのが、光源の信頼性、安定性である。IPAC'15 の報告では、光源を 24 時間、365 日ずっと稼働させ、稼働時間の 99 % 以上の信頼性が必要ということが紹介されており、通常の加速器を利用した光源よりも高い要求となっている。安定性の高い貯蔵リング型光源においても、定期的なメンテナンス期間を必要としており、極めて高い安定性と途切れない利用時間の確保というのは加速器を利用した光源としては挑戦的な目標となる。光源の安定性については、リソグラフィーの露光時間との関係で積分時間 1 ms で 1 % 以下の出力安定性が要求される。

その他の光源性能については、リソグラフィー利用の要求から、FEL 光の特徴を必要としないものもある。光のパルス長については、ある値より短くせよという要求ではなく、逆に 2.5 fs 以上という短すぎないことというのが要求されている。これは、通常の FEL では問題にならない値である。FEL 光の大きな特徴は出力が高いとともに、コヒーレンスがあるということである。しかしながら、リソグラフィー利用では、横方向、縦方向ともにコヒーレンスを必要としない。特に、横方向のコヒーレンスはない方が良いということが報告されており、露光装置側の工夫が必要となる。

以上のように、リソグラフィー用次世代 EUV 光源で要求されるのは、高い光源信頼性と、高い EUV 光の出力ということである。次に、以上で示した EUV-FEL 光源に要求される性能を基に、これを実現するための ERL を利用した光源加速器の設計検討について紹介する。

3. ERL を用いた EUV-FEL 光源の検討

次世代リソグラフィー用光源で要求されるのは高い平均出力の EUV 光であり、加速器でこれを実現するには、高い平均ビーム電流が必要となる。線形加速器型光源を利用する場合、高い平均ビーム電流を実現するには、加速に必要な電力と、そのビームを捨てる際の放射線発生との 2 つの問題を解決する必要がある。これを解決するための一つの方法が、ERL を利用することである。ここでは、ERL の周回部に EUV-FEL 発生を行うためのアンジュレータ区間を設けた光源加速器を考え、これまでの検討結果について報告する。

3.1 光源加速器の要求性能

ERL では電子銃から高輝度かつ高平均電流のビームを生成することと、それを高い加速勾配をもつ超伝導加速空洞で加速することが重要である。cERL の総合運転^[4]を通して、これらの要素の現実的な性能、長期間運転したときの安定性、信頼性についての多くの知見を得てきた。これらの開発を通して得られた知見を基に、

Table 2: Target EUV-FEL Light Source Performance

Wave Length	13.5 nm
FEL Power	10 kW
Bunch Charge	60 pC
Beam Energy	800 MeV
E_{acc} of SC cavity	12.5 MV/m
Number of SC Cavity	64 cavities
Beam Repetition Frequency	162.5 MHz
Average Beam Current	9.75 mA

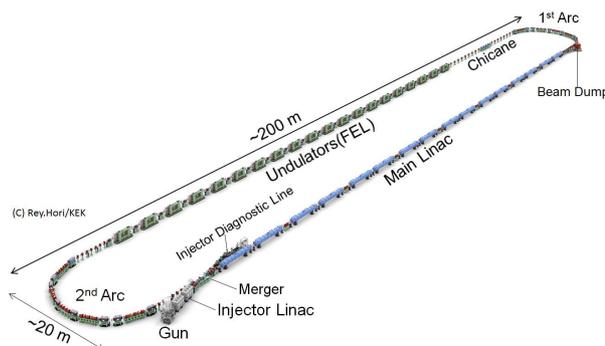


Figure 1: Present image of the designed ERL-based EUV-FEL light source^[2].

ERL を用いた EUV-FEL 光源加速器に必要な性能を検討した。

表 2 に ERL を用いた EUV-FEL 光源加速器の目標性能を示す。FEL 出力については、まず 10 kW を目標としている。ビーム繰り返し周波数の上昇による平均ビーム電流の増強やアンジュレータの最適化によって FEL 出力の増強を見込めるが、まずは無理のない条件で光源加速器の検討を行っている。FEL 出力を最適化するためのパラメータ探索を行い、その結果、バンチ電荷を 60 pC と定めた。これは ERL のビーム繰り返し周波数 1.3 GHz の 100 mA CW 運転におけるバンチ電荷 77 pC より少し低い値となる。FEL 発振区間でのビームエネルギーは 800 MeV とした。ビームエネルギーと超伝導空洞の加速勾配 E_{acc} から、加速空洞区間の長さ、あるいは加速器全体の大きなサイズが決まることになる。加速勾配は、cERL における超伝導空洞の実績を踏まえて 12.5 MV/m とした。図 1 に ERL を用いた EUV-FEL 光源加速器の現状の概略案を示す。現状の加速器全体の大きなサイズは、 $\sim 200 \text{ m} \times \sim 20 \text{ m}$ となっている。平均ビーム電流は 10 mA 程度であり、GeV クラスの ERL 光源で想定される最大平均ビーム電流 100 mA の 1/10 程度となる。

ERL を用いた EUV-FEL 光源の検討状況は、ERL2015 で詳細に報告されている^[2]。ここでは、この報告に基づき、幾つかの鍵となる要素についての検討結果を紹介する。

3.2 入射器

入射器の基本構成は、cERL と同様に DC 光陰極電子銃、バンチャー空洞、超伝導加速空洞としている。電子

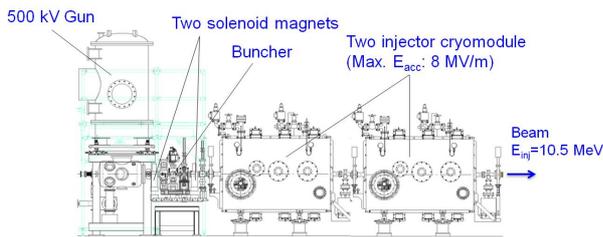


Figure 2: Layout of the injector beam line designed for the ERL based EUV-FEL light source [2].

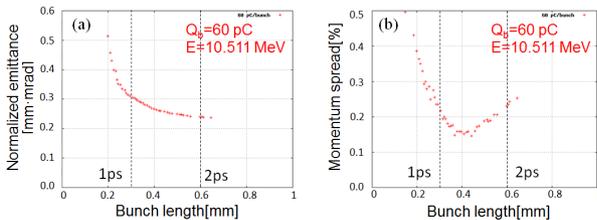


Figure 3: Optimization results of the designed injector beam line with the bunch charge of 60 pC [2]. Optimized normalized emittance (left) and momentum spread (right) as a function of the bunch length. These values were calculated before the merger.

銃の加速電圧は 500 kV を想定している。cERL の運転において電子銃は 390 kV の加速電圧で極めて安定に運転されており、さらに現在進めている絶縁セラミック管の増設によって、2015 年度後半には 500 kV でのビーム運転の見込みが立ちつつある [5]。入射器空洞の加速勾配は、cERL の運転で実績のある 7 MV/m 程度を想定している。cERL では 3 つの 2-cell 空洞で 5 MeV まで入射ビームを加速しているが、バンチ電荷 60 pC の場合、空間電荷効果によるエミッタンス増大を抑制するために入射ビームエネルギーを 10 MeV 程度まで上げる必要がある。このため、入射器空洞の数を 2 倍にして、10 MeV まで加速することを考えている。現在検討中の入射器配置案を図 2 に示す。この入射器構成を用いて、エミッタンスを最小化するためのビーム輸送条件の最適化を進めている。最適化後のバンチ長と規格化エミッタンス、エネルギー拡がりの関係を図 3 に示す。合流部手前の位置でバンチ長 1 ps のときに、規格化 rms エミッタンスは 0.60 mm-mrad、エネルギー拡がりは 0.25 % となっている。これらの値を初期値として、加速・バンチ圧縮の影響評価や、FEL 性能の計算を行っている。さらに、100 pC ~ 300 pC というより高いバンチ電荷に対してのビーム輸送条件の最適化も行っている [6]。これらの計算は、空間電荷効果を含んだ粒子トラッキングコード General Particle Tracer (GPT) を用いて行われている。

3.3 エネルギー回収を行う超伝導加速空洞

ERL を用いた加速器では、加速・減速を行う超伝導加速空洞 (主空洞) の性能が重要である。cERL には、主空洞として 2 台の 9-cell の超伝導加速空洞が設置されており、8.5 MV/m の加速勾配で安定に運転されている [7]。しかしながら、10 MV/m を超えると、超伝導加速空洞からのフィールドエミッションによる放射線の増大が確認され

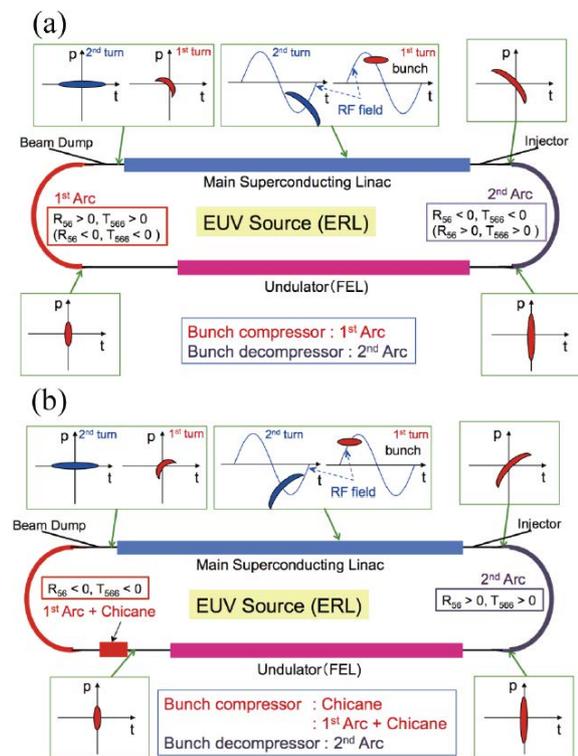


Figure 4: Bunch compression and decompression schemes [2]: (a) The bunch compressor is the first arc. (b) The bunch compressor is only the chicane or combination of the first arc and chicane. For all the case, the bunch decompressor is the second arc.

ており、EUV-FEL 光源加速器に要求される 12.5 MV/m の加速勾配を実現するには修正が必要となる。cERL の超伝導加速空洞は、100 mA という大電流に対応するために設計された空洞であるが、EUV-FEL 光源加速器に必要な平均ビーム電流は 10 ~ 20 mA とこれに比べて低い値であり、高い平均ビーム電流に対応した設計から、高い加速勾配を安定に実現するための設計に変更することを検討している。TESLA 型 9-cell 超伝導加速空洞は、cERL の空洞と比較して空洞内のピーク電場が低くフィールドエミッションが起きにくいいため、これを基にした形状を採用し、形状の最適化を検討している。

3.4 バンチ圧縮

FEL 発振のためには、高いピーク電流を実現するためのバンチ圧縮が重要となる。これに加えて、ERL を用いた光源の場合にはバンチ圧縮だけでなく、減速・エネルギー回収のためにバンチ長の復元 (伸長) も重要となる。

バンチ圧縮を行うには、偏向電磁石が設置された区間で転送行列の R_{56} 成分を制御する必要がある。ERL 加速器には、主空洞から FEL 用のアンジュレータ区間にビームを輸送する第一弧部と、減速・エネルギー回収のためにビームを再び主空洞まで輸送する第二弧部があり、この 2 つの区間の R_{56} を制御し、バンチ圧縮・伸長することになる。図 4 (a) に、二つの弧部を利用したバンチ圧縮・伸長法の概略図を示す。主空洞でエネ

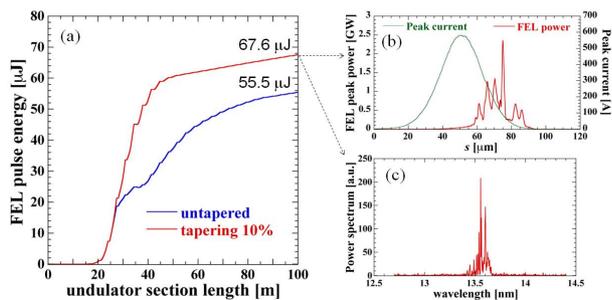


Figure 5: Calculated FEL performance of the designed ERL-based EUV-FEL light source^[2]: (a) the FEL pulse energy as the function of the undulator section length, (b) the FEL temporal profile and (c) the FEL power spectrum.

ギーチャープを発生させたあと、第一弧部でバンチ圧縮し FEL 発振したあと、第二弧部で伸長させる。

また、図 4 (b) に示すように、第一弧部とアンジュレータ入口の間にシケインを設置してバンチ圧縮を行う方法も検討している。シケインを追加した場合、バンチ圧縮には、第一弧部のみ利用、第一弧部 + シケイン、シケインのみ利用の 3 つの方法が可能となる。これら 3 つの方法に対して、バンチ圧縮条件とビーム性能・FEL 性能の評価を行っている。

3.5 FEL の性能

アンジュレータ入口までの区間でバンチ圧縮したビームを初期条件として、FEL 計算コード *Genesis* を用いて FEL の性能評価を行っている。計算では、周期長 28 mm のヘリカルアンジュレータを用いている。図 5 (a) に、パルスあたりの FEL のエネルギーをアンジュレータの長さの関数として示す。計算の初期条件として、第一弧部とシケインの組み合わせでバンチ圧縮を行った条件を利用している。図 5 (b) にビームと FEL 出力の時間構造、図 5 (c) に FEL 出力のスペクトラムを示す。パルスあたりの FEL のエネルギーは、アンジュレータ 100 m の位置で、アンジュレータのテーパなしで 55.5 μJ、10% の線形なテーパを与えた場合 67.6 μJ となった。これは、ビーム繰り返し周波数 162.5 MHz で平均ビーム電流 9.75 mA の場合、テーパなしで 9 kW、テーパありで 11 kW に対応し、ターゲットとなる 10 kW の FEL 出力を満たすことが確認された。今後、FEL 出力を上げていくために、ビーム条件と FEL 発振条件の最適化を行っていくことになる。

4. まとめ

ERL 加速器の実証機である cERL の運転結果を基にして、産業利用を目指した大出力の EUV 光を生成するための ERL を用いた EUV-FEL 光源加速器の検討を行っている。光源として要求される性能は波長 13.5 nm、FEL 出力 10 kW 以上であり、また極めて高い信頼性・安定性が要求される。ERL を用いた EUV-FEL 光源の鍵となる要素は電子銃と超伝導空洞であり、これまでに cERL で実証されてきた性能を全体設計に反映させている。要求される光源性能を満たす光源加速器条件を見積もるために、ビーム生成・加速、バンチ圧縮および FEL

のシミュレーションを行い、ターゲットとなる FEL 出力 10 kW を満たす条件があることが確認された。今後、鍵となる要素性能の検討・実証を進めるとともに、FEL 出力を上げていくためにビーム条件と FEL 発振条件の最適化を行っていく。

参考文献

- [1] S. Sakanaka *et al.*, "Recent Progress and Operational Status of the Compact ERL at KEK", in Proc. of IPAC'15, Richmond, USA (2015), TUBC1.
- [2] N. Nakamura *et al.*, "Design Work of the ERL-FEL as the High Intense EUV Light Source", in Proc. of ERL2015, Stony Brook, USA (2015), MOPCTH010.
- [3] P. Naulle, "Industrial Applications of Free Electron Lasers: Extreme UV Lithography", in Proc. of IPAC'15, Richmond, USA (2015), MOYGB1.
- [4] 高井良太他, "コンパクト ERL のコミッショニング状況とビーム利用に向けた取り組み", FROM03, in these proceedings.
- [5] 西森信行他, "コンパクト ERL 電子銃の現状とアップグレード計画", WEPO37, in these proceedings.
- [6] T. Miyajima *et al.*, "Beam Simulations of High Brightness Photocathode DC Gun and Injector for High Repetition FEL Light Source", in Proc. of FEL2014, Basel, Switzerland, 2014, pp. 980-984.
- [7] H. Sakai *et al.*, "Operational Experience of CW SRF Injector and Main Linac Cryomodules at the Compact ERL", in Proc. of ERL2015, Stony Brook, USA (2015), WEIBLH2054.