

## リソグラフィ用 ERL EUV-FEL に向けた入射器設計

### INJECTOR DESIGN TOWARDS ERL-BASED EUV-FEL FOR LITHOGRAPHY

田中 織雅<sup>#, A)</sup>, 中村 典雄<sup>A)</sup>, 宮島 司<sup>A)</sup>, 谷川 貴紀<sup>A)</sup>

Olga Tanaka<sup>#, A)</sup>, Norio Nakamura<sup>A)</sup>, Tsukasa Miyajima<sup>A)</sup>, Takanori Tanikawa<sup>A)</sup>

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

#### Abstract

A high-power EUV light source using ERL-based FEL can supply a large number of semiconductor exposure equipment with 10 kW-class EUV output needed in future. There are some requirements in whole and its injector, in particular, and their examination and necessary development are being carried out. The requirement for the injector was to generate high bunch charge beams at a high-repetition rate. In this regard, a space charge effect should be treated carefully on a design of the injector. For FEL operation, not only short bunch length and small transverse emittance but also small longitudinal emittance are required. By using a multi-objective genetic algorithm, we are minimizing them at the exit of the injector to investigate the injector performance and its effect on the FEL generation. In this study, we describe the injector optimization strategies and possible options suited for the ERL-based EUV-FEL.

#### 1. はじめに

極紫外線 (EUV) 光源としてのエネルギー回収リニア加速器 (ERL) ベースの自由電子レーザー (FEL) は、複数の半導体露光装置に供給する 10 kW を超える EUV 電力の生成を実証するために利用可能な技術を使用し設計されている[1, 2]。Figure 1 に、ERL ベースの FEL を使用した EUV 光源の概略図を示す[1]。電子ビームは、入射部の出口で 10.5 MeV に加速され、次に主リニア加速器出口で 800 MeV に加速される。SASE-FEL の生成に必要な高いピーク電流を得るために、最初のアーク部を使用して最終のバンチ圧縮が行われる。バンチ圧縮後、電子ビームはアンジュレータセクションに送られ、13.5 nm の EUV-FEL 光を生成する。FEL 生成後、バンチは 2 番目のアーク部に送られ、エネルギー回収のため主リニア加速器によって減速され、ビームダンプで吸収廃棄される。

バンチ電荷が 60 pC、バンチ繰り返し周波数が 162.5 MHz の場合、電子ビームの平均電流は約 10 mA となる。吸収廃棄されるビーム電力は、エネルギー回収プロセスによって 8 MW から 100 kW に削減される。KEK (cERL) の ERL 試験機を使用した EUV-FEL の概念実証は、参

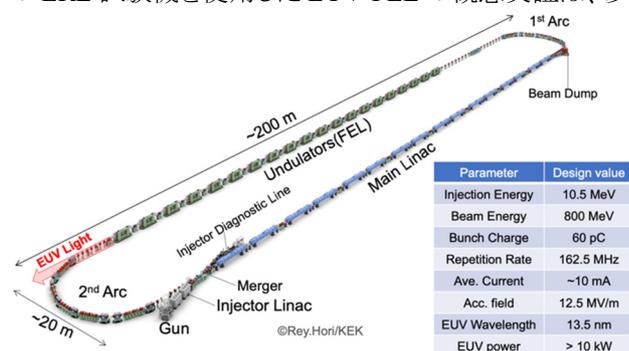


Figure 1: Design and specification of the ERL-based EUV-FEL light source for lithography.

<sup>#</sup> olga@post.kek.jp

考文献に記載されている[3, 4]。

EUV-FEL の入射器設計の目標は、入射部の出口に適切な品質のビームを送ることである [5]。「適切なビーム品質」には次の要件が含まれる:

1. バンチ長 3 ps 未満;
2. 横方向エミッタンス  $3\pi$  mm mrad 未満;
3. 縦方向エミッタンス 10 keV ps 未満。

先行研究では、入射器はバンチ長と横方向エミッタンスの両方を最小化する特定の目標によって最適化されていた。この戦略では、縦方向エミッタンスの値が不合理に大きくなっており (7.25 keV ps)、横方向エミッタンスはインジェクタ出口で十分に小さく保たれていた (0.63  $\pi$  mm mrad)。その結果、FEL での電荷密度が緩和され、結果として、FEL パワーが不足していた。

ビーム品質を向上させるために、1.と 2.だけでなく、3.も最小化するように入射器の設計戦略を変更した。新しい戦略がビーム品質にどのように影響したかについての議論は、以下に与えられる。

本論文では、「旧」入射器と「新」入射器の設計を比較している。

#### 2. 最適化手法

この論文で使用される最適化手法を明確にするため、最初に EUV-FEL 入射器のレイアウトを紹介する。Figure 2 に示すように、入射部、マッチングセクション、合流部の 3 つのセクションで構成されている。入射部には、安定した電子ビームを生成する 500 kV cERL タイプの DC 電子銃、横方向ビームサイズを制御する 2 つのソレノイド、バンチの長さを圧縮する 2 つのソレノイドの間に配置されたバンチャ空洞、および 3 つのそれぞれ 2 セル空洞を持つ超電導クライオモジュールが含まれる。その後、電子ビームは 10.5 MeV に到達する。マッチングセクションには、入射器の光学系を周回ループの光学系にマッチングさせるための 4 つの四重極が含まれている。最後に、合流部は、ビーム軌道を周回ループに導くための 3 つの曲げ磁石と、光学マッチングを促進するための 2 つの四重極で構成されている[6]。

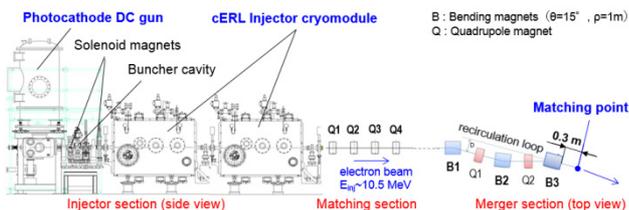


Figure 2: Schematic of the EUV-FEL injector.

マッチングポイント(Fig. 2 の B3 のエッジの 0.3 m 下流に位置)は、入射器の空間電荷制御が容易であるため、合流部の直後に選択されている。入射器の主なパラメータを Table 1 に示す。初期レーザースポット径、レーザーパルス長、バンチャ電圧のような他のパラメータは、入射器最適化の結果によって定義される。それらについては後で取り上げる。

Table 1: Main Parameters in the EUV-FEL Injector

Electron gun voltage	500 kV
Bunch charge	60 pC
Injector beam energy	10.5 MeV
RF frequency	1.3 GHz
Cavities' acceleration field	< 7.3 MV/m

このシミュレーションの最大電子エネルギーは 10.5 MeV であり、空間電荷効果は無視できない。そのため、その効果を含めた粒子追跡コード GPT (General Particle Tracer) [7] が使用された。小さな縦方向エミッタンスと短いバンチャ長の場合に適合する輸送条件が検討された。このような輸送を実現するパラメータのセットには、Table 2 に列挙された 26 の変数が含まれる。先行研究の変数と目的に関する詳細な情報は、参考文献中にある [6]。

多目的遺伝的アルゴリズム(MOGA) [8] が最適化手法として使用される。マッチングポイントでのアルゴリズムの目標(Fig. 2 参照)は、関連するパラメータの同時最小化である。「旧」戦略の場合、それらはバンチャ長と横方向エミッタンスであり、「新」戦略の場合、それらはバンチャ長と横方向エミッタンスに追加の制約(<math>3\pi\text{ mm mrad}</math>)が適用された縦方向エミッタンスである。パラメータを最小化するため、GPT トラッキングは最初に適切な開始条件で実行される。その後、最適化の目標を達成するため、多目的遺伝的アルゴリズムに従って輸送条件が徐々に変更される。十分な試行を繰り返すと、Fig. 3 に示す曲線が、最適化されるべき 2 つのパラメータ、バンチャ長と縦方向(横方向)エミッタンス、のために得られる。バンチャ電荷は 60 pC で、マクロ粒子の数は 500 k である。

### 3. 最適化結果

「旧」戦略と「新」戦略を使用して得られた結果の比較を Fig. 3 に示す。上のプロットは、合併の出口でのバンチャ長の関数として、最適化された縦方向エミッタンスとエネルギー拡散を表す。明らかに、「新」アプローチは、これらの最小化が最適化の当初の目標であったため、縦方向エミッタンスの値が小さく、明確で美しいパレートフロントをもたらした。最適化された横方向エミッタンスが合併の出口でのバンチャ長の関数として示される下のプロットの場合には対照的である。

Table 2: Variables

Laser spot diameter	1.21 mm
Laser pulse length <sup>1</sup>	13.75 ps
SL1 solenoid current	4.42 A
SL2 solenoid current	1.57 A
Buncher cavity. voltage	91.94 kV
Buncher cavity phase offset	-90.99 deg.
Inj1 cavity voltage	6.80 MV/m
Inj2 cavity voltage	7.99 MV/m
Inj3 cavity voltage	7.99 MV/m
Inj4 cavity voltage	7.99 MV/m
Inj5 cavity voltage	7.99 MV/m
Inj6 cavity voltage	7.99 MV/m
Inj1 cavity phase offset	-33.82 deg.
Inj2 cavity phase offset	-27.44 deg.
Inj3 cavity phase offset	-19.00 deg.
Inj4 cavity phase offset	3.73 deg.
Inj5 cavity phase offset	18.46 deg.
Inj6 cavity phase offset	0.59 deg.
Distances between:	
gun and solenoid 1	0.30 m
solenoid 1 and buncher	0.37 m
buncher and solenoid 2	0.13 m
solenoid 2 and cavity 1	1.38 m
Q1 quadrupole straight	16.23 / m <sup>2</sup>
Q2 quadrupole straight	-13.72 / m <sup>2</sup>
Q3 quadrupole straight	-4.12 / m <sup>2</sup>
Q4 quadrupole straight	8.94 / m <sup>2</sup>

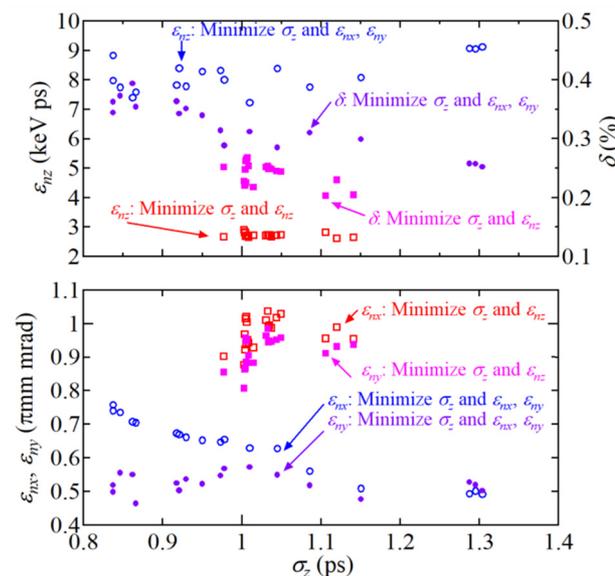


Figure 3: Optimized longitudinal emittance and energy spread (top) and transverse emittance (bottom) as a function of the bunch length at the exit of the merger.

Table 2 に列挙される輸送変数が導き出されると、バンチャ長を固定しエンベロップと粒子分布の計算により、入

<sup>1</sup> 均一分布の全幅

射部の出口でのビーム性能を調査することができる。具体的には、以下の議論ではバンチ長は 1 ps に固定されている。500 k マクロ粒子を使用した専用トラッキングの結果は、「旧」設計と「新」設計の両方で実行された (Fig. 4 参照)。

上のプロットは、入射器を通過する縦方向エミッタンスの時間進化を示し、中央はエネルギー拡散を示し、下のプロットは横方向エミッタンスを示す。それらは、Fig. 3 に示す最適化の結果と完全に一致している。エンベロープ計算によって得た最終的ビームパラメータを Table 3 にまとめた。固定バンチ長では、最適化の「新」戦略で、縦方向エミッタンスが 2.7 倍以上減少し、エネルギー拡散が 1.4 倍減少することがわかる。横方向エミッタンスは、「旧」設計と比較し約 1.5 倍に増加した。

ビームの横方向のサイズの 2 乗に比例するビームの横方向エミッタンスが小さいほど、FEL ゲインが高くなる。また実際には、横方向エミッタンスの下限は入射器の出口で設定され、下限を超えると横方向の空間電荷力が非常に小さくなり、位相空間で粒子を再配置する作用をしなくなる[9]。正規化された縦方向エミッタンスは、バンチ長とエネルギー拡散の積としてスケールされる[10]。したがって、バンチ長固定の場合、電子のエネルギー拡散が減少すると FEL 信号の増幅率(ゲイン)が増加するため、エネルギー拡散の値が小さいほど FEL の生成に適していると考えられる[11]。これら 2 つの入射器最適化戦略の結果の最終的な調査は、周回ループの下流で行う必要がある。この調査には、アーク部でのバンチ圧縮とアンジュレータセクションでの FEL 生成が含まれる。これらの研究は、現在の論文の範囲外である。

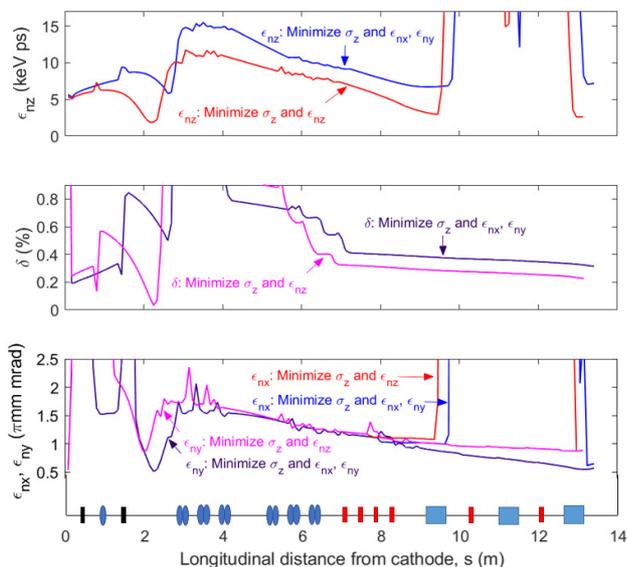


Figure 4: Tracking results of the optimized longitudinal emittances (top); energy spreads (middle); transverse emittances (bottom) through the injector.

今回は、入射部の出口での粒子分布の比較について考えてみる。500 k の粒子分布が追跡されている。位相空間と時間ヒストグラムを Fig. 5 で比較した。

Table 3: Beam Parameters at the Injector Exit

	‘Old’	‘New’
Bunch length $\sigma_z$ [ps]	1.00	1.00
Long. emittance $\epsilon_{nz}$ [keV ps]	7.25	2.66
Hor. emittance $\epsilon_{nx}$ [ $\pi$ mm mrad]	0.63	0.94
Vert. emittance $\epsilon_{ny}$ [ $\pi$ mm mrad]	0.58	0.88
Hor. Beam size $\sigma_x$ [mm]	0.81	0.99
Vert. beam size, $\sigma_y$ [mm]	1.52	1.49
Energy spread $\delta$ [%]	0.31	0.22

左側のグラフは「旧」デザインを示し、右側のグラフは「新」デザインを示している。明らかに、位相空間 (Fig. 5 (b)) は先行研究 (Fig. 5 (a)) と比較して線形化されている。縦方向エミッタンスは意図的に最小化されている。それはエネルギー拡散を小さくした。時間ヒストグラムに関しては、現在の結果 (Fig. 5 (d)) は、前の結果 (Fig. 5 (c)) と比較し、ヒストグラムの左側で粒子密度のスパイクが少ないことを示している。縦方向の空間電荷効果が主リニア加速器の加速におけるスパイクを大幅に緩和するため、スパイクは基本的に FEL ゲインに影響を与えない。

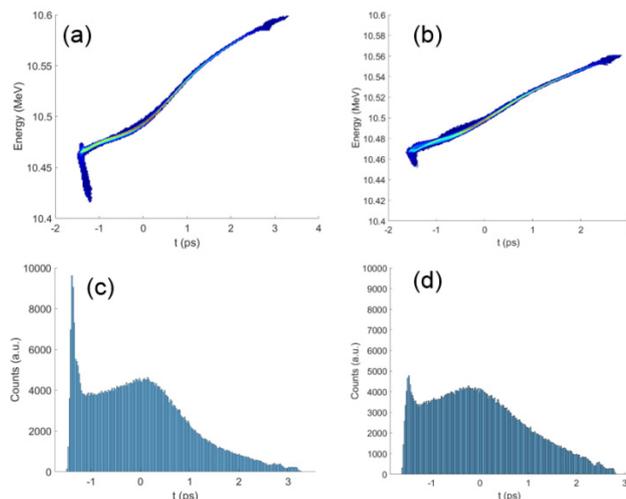


Figure 5: Particle distribution comparison: the phase space (a) and the temporal histogram (c) in the ‘old’ design; (b) and (d) are those for the ‘new’ design.

#### 4. 結論

本論文の入射器研究では、最適化戦略をバンチ長と縦方向エミッタンスの同時最小化に変更し、横方向エミッタンスに追加の制約を適用することにより、入射部の出口でのビーム品質を改善した。この改善により、マッチングポイントでのビーム品質が向上する。つまり、縦方向エミッタンスが 2.7 倍以上減少し、エネルギー拡散が 1.5 倍減少する。しかしながら、横方向エミッタンスの最大値は、「旧」設計と比較し 1.5 倍に増加している。は、「旧」設計と比較し 1.5 倍に増加している。今回のをさらに改善するかどうかについては、周回ループ(つまり、アークとアンジュレータのセクション)におけるバンチ圧縮や FEL 出力の計算結果に基づいて判断されることになる。

## 参考文献

- [1] N. Nakamura, “EUV ERLs for Semiconductor Integrated Circuits Lithography”, in *Proc. of ERL2017*, CERN, Geneva, Switzerland, Jun. 2017, paper TUIBCC002; [https://accelconf.web.cern.ch/erl2017/talks/tuibcc002\\_talk.pdf](https://accelconf.web.cern.ch/erl2017/talks/tuibcc002_talk.pdf)
- [2] N. Nakamura *et al.*, “Design Work of the ERL-FEL as the High Intense EUV Light Source”, in *Proc. of ERL2015*, Stony Brook, NY, USA, Jun. 2015, pp. 4-9; <http://jacow.org/ERL2015/papers/mopcth010.pdf>
- [3] H. Kawata *et al.*, “High Repetition Rate (81.25MHz) FEL Project Based on cERL”, in *Proc. of 2019 EUVL Workshop*, Berkley, CA, USA, Jun. 2019, paper P045; <https://www.euvlitho.com/2019/P45.pdf>
- [4] R. Kato *et al.*, “Stepwise Development to Realize the High Power EUV-FEL Light Source” in *Proc. of OSA High-brightness Sources and Light-driven Interactions Congress 2020 (EUVXRAY, HILAS, MICS)*, Washington, DC, USA, Nov. 2020, paper ETh2A.2. doi:10.1364/EUVXRAY.2020.ETh2A.2
- [5] R. Kato, private communications, Jan. 2022.
- [6] T. Hotei and T. Miyajima, “EUV-FEL 用入射器のビーム光学関数のマッチング”, in *Proc. PASJ2016*, Chiba, Japan, Aug. 2016, pp. 1049-1052; [https://www.pasj.jp/web\\_publish/pasj2016/proceedings/PDF/TUP0/TUP069.pdf](https://www.pasj.jp/web_publish/pasj2016/proceedings/PDF/TUP0/TUP069.pdf)
- [7] Pulsar Physics; <http://www.pulsar.nl/gpt/index.html>
- [8] C. M. Fonseca and P. J. Fleming, “Genetic Algorithms for Multiobjective Optimization: Formulation Discussion and Generalization”, in *Proceedings of the 5th International Conference on Genetic Algorithms*, San Francisco, CA, USA, Jun. 1993.
- [9] C. Leujeune and J. Aubert, *Emittance and Brightness: Definitions and Measurements*. Academic Press, Inc.: Paris, France, 1980.
- [10] S. Di Mitri, “Novel techniques for future TeV electron accelerators”, in *Proc. IPAC'18*, Vancouver, BC, Canada, Apr.-May 2018, pp. 57-59.
- [11] S. Di Mitri, “On the Importance of Electron Beam Brightness in High Gain Free Electron Lasers”, *Photonics*, vol. 2, no. 2, Mar. 2015, pp. 317-341.