

半導体リソグラフィのための ERL を用いた EUV-FEL 光源の S2E シミュレーション S2E SIMULATION OF AN ERL-BASED EUV-FEL SOURCE FOR LITHOGRAPHY

中村典雄^{#, A,C)}, 加藤龍好^{A,C)}, 宮島司^{A,C)}, 島田美帆^{A,C)}, 羽島良一^{B)}, 布袋貴大^{C)}

Norio Nakamura^{#, A,C)}, Ryukou Kato^{A,C)}, Tsukasa Miyajima^{A,C)}, Miho Shimada^{A,C)}, Ryoichi Hajima^{B)}, Takahiro Hotei^{C)}

^{A)} High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

^{B)} National Institute for Quantum and Radiological Science and Technology (QST)

^{C)} The Graduate University for Advanced Studies (SOKENDAI)

Abstract

Energy recovery linac (ERL) based extreme ultraviolet (EUV) free electron lasers (FELs) are expected as a new-type high-power EUV source for lithography, which can distribute 1-kW class power to multiple scanners simultaneously. An ERL-based EUV FEL source has been designed in order to demonstrate the feasibility of generating a 10-kW class EUV power. We perform Start-to-End (S2E) simulation including the injection beam optimization, bunch compression, FEL lasing and bunch decompression for the designed EUV source. As a result we demonstrate that the EUV FEL can produce high power more than 10 kW at 10 mA and that the electron beam can be well transported throughout the EUV source without significant beam loss.

1. 序

13.5 nm の極紫外光(EUV)を利用する EUV リソグラフィは有力な次世代半導体露光技術で、その EUV 光源として LPP(Laser-Produced Plasma)光源が開発されてきた[1]。その光源開発は必ずしも順調ではなかったが、近年 200 W を越える出力も得られて EUV リソグラフィによる半導体集積回路の量産が始まる可能性が高まっている[2]。ただ、将来要求される 1 kW 以上の高い EUV 出力を LPP 光源で実現することは難しいと考えられている。一方で、自由電子レーザー(FEL)は大型で高コストであるが、10 kW を越えるような出力が得られれば、多数の露光装置に対して 1 kW クラスの EUV 光を同時に供給できる。高出力性はもちろん経済性の観点からも LPP 光源に対して優位となる可能性を秘めている[3]。また、EUV 光学系を汚すデブリ(debris)が発生しないことや将来必要になる可能性がある偏光特性を持つ光を発生することも LPP 光源にはない利点である。エネルギー回収型リニアック(ERL)を用いた EUV-FEL 光源を使用すれば、通常のリニアックと比較して高出力化やエネルギーの効率化とともに廃棄ビームパワーとそれによる放射化の格段の低減が期待できる。このような点から、ERL を用いた EUV-FEL 光源は EUV リソグラフィの新しいタイプの光源として期待されている。

日本において、高エネルギー加速器研究機構(KEK)を中心とした国内の研究者グループが企業と共同で 10 kW 級の EUV 光の発生と近い将来での利用を目標にして設計・検討を行ってきた[4-10]。設計には KEK に建設されたコンパクト ERL(cERL)の技術や資産も最大限に活用した。この EUV-FEL 光源の性能と実現可能性を評価するために、電子銃から FEL 発振後のエネルギー回収までを含む電子ビームの Start-to-End (S2E)シミュレーションを行った。本発表ではこの S2Eシミュレーションとその結果について報告する。

2. ERL を用いた EUV-FEL 光源

Figure 1 に設計検討中の ERL を用いた EUV-FEL 光源のイメージ図を示す。入射部は cERL の第 2 電子銃 [11]と超伝導入射空洞[12]を用い、入射エネルギーを 10.5 MeV 以上まで上げるために入射空洞モジュールをもう 1 台追加して 2 台とし、合計で 6 台の 2 セル空洞を用いて加速する。主超伝導加速空洞は、フィールドエミッションの影響を抑えるために cERL の 9 セル空洞のセル構造を変更して、最大電場と加速電場の比を 3 から 2 に低減して 12.5 MV/m の加速勾配を安定的に実現する [13,14]。800 MeV までの加速のために 4 空洞を収納するモジュールを 16 台設置する。この加速したビームをバンチ圧縮して SASE-FEL の発振に必要な高いピーク電流を得るために、第 1 アーク等で磁氣的に圧縮する。バンチ圧縮ではコヒーレント放射光(CSR)のビームへの影響を抑制するようにラティスやオプティクスを最適化する。バンチ圧縮後、ビームは多数の長尺アンジュレータから成る FEL システムに送られて EUV-FEL 光を生成する。FEL 発振後は第 2 アークによってバンチは伸長されて、主空洞でエネルギー回収のために減速されてからビームダンプにて捨てられる。

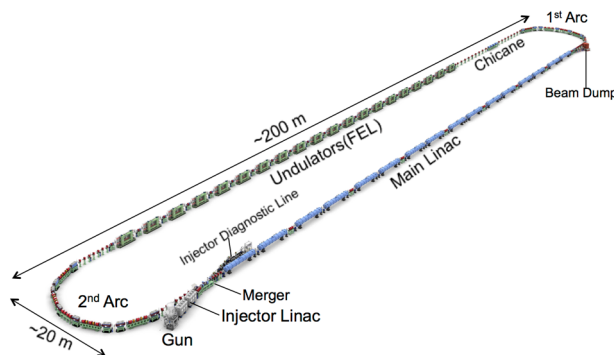


Figure 1: Image of the designed ERL-based EUV-FEL.

[#] norio.nakamura@kek.jp

3. 入射部最適化とバンチ圧縮

電子銃から主空洞入口までの入射ビームパラメータはトラッキングコード GPT[15]と遺伝的アルゴリズムを使って最適化した。ここで、60 pC のバンチ電荷と 10.5 MeV の入射ビームエネルギーを仮定した。加えて、主空洞入口でのバンチ長はバンチ圧縮後に高いピーク電流と約 0.1 % の運動量幅を得るためにおよそ 1ps に設定した。入射・合流部のパラメータ最適化と主空洞とのオプティクスマッチングを行った結果、主空洞入口での水平及び垂直方向の規格化エミッタンスはそれぞれ 0.65, 0.73 mm·mrad で、そのときの運動量幅は 0.347% であった。トラッキングの粒子数は 100k である。

電子ビームは主空洞で off-crest 加速されてエネルギー 800 MeV になる。高い FEL パワーを得るためにピーク電流を上げる必要があり、第 1 アーク部もしくはシケインによってバンチ圧縮される。今回の S2E シミュレーションでは、バンチ圧縮のために第 1 アーク部はこれまでの 2 セル TBA (Triple-Bend Achromat) ラティスではなく、3 セルの DBA (Double-Bend Achromat) ラティスを用いることにした。その理由は、バンチ長が変わる場合でも DBA ラティスが偏向部でのコヒーレント放射光 (CSR) のビームへの影響を抑えるのにより有効なためである[16]。DBA オプティクスはその 2 つの偏向電磁石中央でのベータatron位相の差が 180 度になるように設計され、さらに 2 つ目の偏向電磁石中央でのトウイスパラメータ β_{x2} , α_{x2} は水平エミッタンスあるいはバンチ圧縮性能が最適になるように調整される。Figure 2 は調整された第 1 アークのオプティクスで、 $\beta_{x2}=1.0$ m, $\alpha_{x2}=1.6$ である。偏向電磁石の曲率半径と偏向角はそれぞれ 2.2 m, 30 度で、第 1 アーク部の縦方向分散 R_{56} は 0.3115 m である。

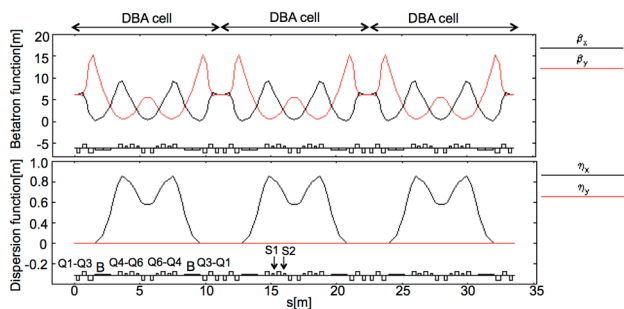


Figure 2: Betatron and dispersion functions of the 1st arc with three DBA cells having $\beta_{x2}=1.0$ m and $\alpha_{x2}=1.6$.

Figure 3 は上述した入射ビームを初期分布として用いたバンチ圧縮の結果で、シミュレーションコードとして elegant [17]が使われている。第 1 アーク部でのバンチ圧縮を最適化するために、主空洞の RF 位相と 2 ファミリーの六極電磁石 (S1, S2) の磁場強度を調整した。バンチ長は運動量幅 0.11% に対して 47fs まで圧縮され、水平・垂直方向の規格化エミッタンスは 2.02, 0.72 mm·mrad であった。第 1 アーク直後のバンチ内の電流とスライスエミッタンスを Figure 4 に示す。DBA オプティクスによって、ピーク電流は 700A を越え、水平のスライスエミッタンスは

ピーク電流で 1.5 mm·mrad 以内に収まっている。水平のスライスエミッタンスは明らかに射影エミッタンスよりも小さいことがわかる。

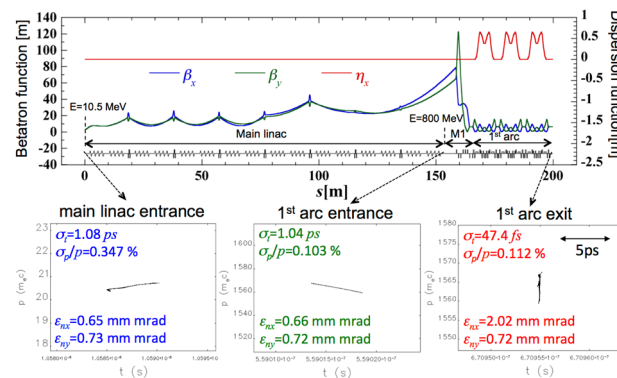


Figure 3: Betatron and dispersion functions from the main-linac entrance to the 1st arc exit (upper) and the time-momentum distributions with the basic beam parameters at the main-linac entrance, the 1st arc entrance and exit (lower).

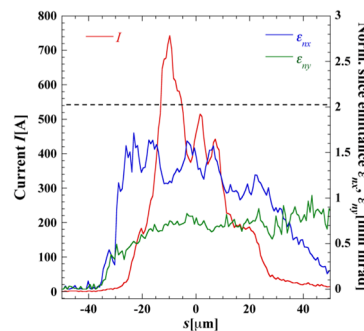


Figure 4: Current and horizontal and vertical normalized slice emittances in the bunch at the exit of the 1st arc. The broken line indicates the projected horizontal normalized emittance.

4. SASE-FEL

SASE FEL に関するシミュレーションをバンチ圧縮後の電子分布と FEL シミュレーションコード Genesis (version 3) [18] を用いて実施した。FEL は長さ 4.9 m の円偏光アンジュレータ (磁場周期 28 mm, K 値 1.656) 18 台で構成され、13.5 nm の EUV 光を発生させる。17 台の収束用電磁石が 1.12 m のアンジュレータ間ギャップに移相器とともに設置され、その半分の長さを持つ四極電磁石が第 1 アンジュレータの 0.56 m 前と最後のアンジュレータの 0.56 m 後に設置される。FEL システムの前には四極電磁石列によるオプティクスのマッチング部が設けられ、FEL 出力が最大になるように FEL 入口でのトウイスパラメータが調整される。

Figure 5 は SASE FEL に関するシミュレーション結果を示す。今回、マッチング部の調整によって FEL 入口でのトウイスパラメータを $\beta_x=\beta_y=14$ m, $\alpha_x=\alpha_y=0$ に設定している。Figure 5a は FEL のパルスエネルギーをアンジュレータのテーパリング無しの場合と最適化されたリニアテーパリング (2%) を与えた場合について図示している。

バンチ電荷 60 pC でバンチ周波数 162.5/325 MHz に対して平均電流は 9.75/19.5 mA になり、リニアテーピング 2% の場合の FEL パワーは 14.4/28.8 kW になる。テーピング無しの場合でも 10 mA で 10 kW を越える EUV 出力が生成されることがわかる。FEL の時間プロファイルと波長スペクトル Figure 5b と 5c に示す。FEL の波長スペクトル幅は露光装置内で EUV 光学系として使われる Mo/Si 多層膜ミラーの反射バンド幅に比べて十分狭いことが確認できる。

Figure 6a と 6b に FEL システム入口・出口での時間-運動量空間での電子分布を示す。FEL 入口の電子分布は *elegant* による 6 次元電子分布からの出力であり、FEL 出口の電子分布は FEL 発振後も S2E シミュレーションを続けるために *Genesis* を用いて作成した 6 次元電子分布からの出力である。前者の粒子数は 100k で、後者の粒子数は 69k である。2 つの分布を比べると、高い密度分布を持つ領域で電子は FEL 発振によって運動量あるいはエネルギーを奪われていることがわかる。結果として、エミッタンスやバンチ長には大きな変化は見られないものの、運動量幅が顕著に増加する。また、平均の運動量やエネルギーが少し減少する。

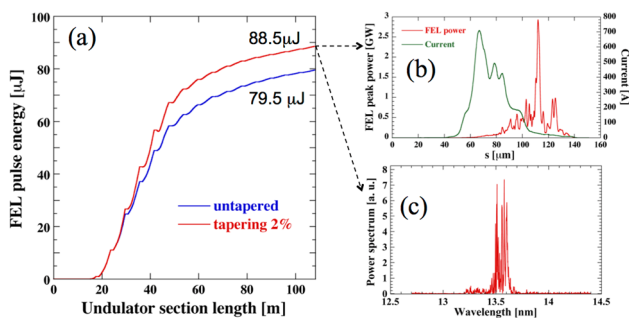


Figure 5: Results of the FEL simulation: (a) the FEL pulse energy without and with tapering as function of the undulator section length, (b) the FEL temporal profile and (c) the FEL power spectrum for 2 % tapering at the FEL exit.

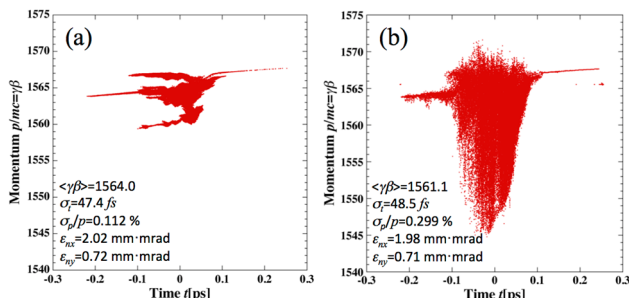


Figure 6: Time-momentum (t - p) distributions in the electron bunch at (a) the entrance and (b) the exit of the FEL system.

5. バンチ伸長とエネルギー回収

FEL 出口からダンプライン前の主空洞出口までのビーム輸送シミュレーションを *Genesis* で作成した FEL 出口で電子分布と *elegant* を用いて行った。第 2 アーク部はバンチ伸長のために $R_{56} = -0.25$ m の 2 セル TBA ラティ

スを用いた。Figure 7 に FEL 出口から主空洞出口までのベータatron関数と分散関数、及び FEL 出口、第 2 アーク出口、主空洞出口での時間-運動量空間分布と基本パラメータ値を示す。バンチ伸長とエネルギー回収を最適化するために主空洞の RF 位相と第 2 アーク部の 2 ファミリーの六極電磁石の磁場強度が調整された。ビームは主空洞で約 10.5 MeV まで減速されて そのエネルギーに対して運動量幅が最小化された。FEL 発振の影響によってバンチは最終的には主空洞出口で入射バンチ長の 2 倍以上となる 2.5 ps まで伸びている。Figure 8 に FEL 出口から主空洞出口までの水平・垂直方向のビームサイズを示す。最大ビームサイズは第 2 アーク分散部の 3.1 mm (水平方向) であるが、ビームは仮定したアーク部ビームパイプのアーチャー 35 mm (H) x 20 mm (V) (cERL アーク部とはほぼ同じ) に比べて十分に小さいことがわかる。その他、主空洞で内半径 35mm、それ以外の直線部で内半径 25mm のアーチャーが仮定された。結果として、電子ビームは仮定されたアーチャーに対して主空洞出口まで 69k のトラッキング粒子において 1 粒子の損失もなく輸送されることがシミュレーションから確認できた。

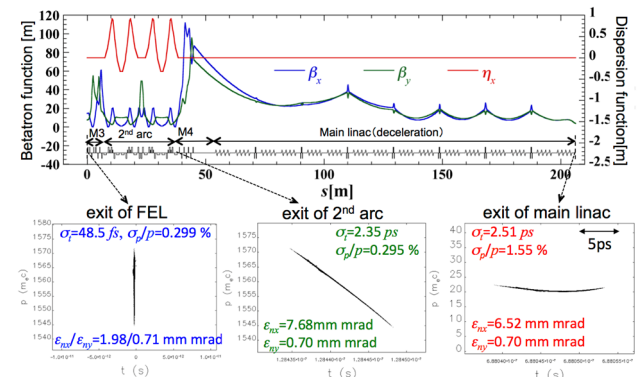


Figure 7: Betatron and dispersion functions from the FEL exit to the exit of the decelerating main linac (upper) and the time-momentum distributions with the basic beam parameters at the FEL exit, the 2nd arc exit and the exit of the decelerating main linac (lower).

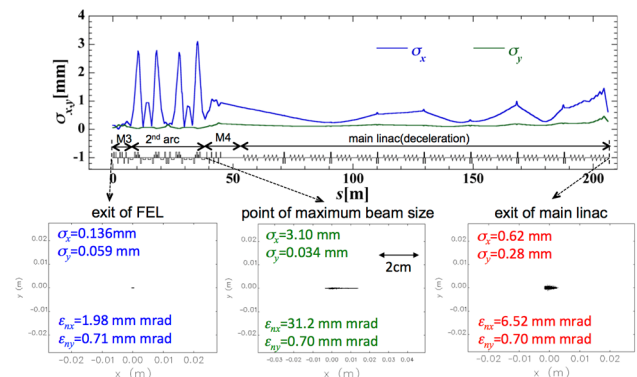


Figure 8: Horizontal and vertical beam sizes from the FEL exit to the main-linac exit (upper) and the transverse position distributions at the FEL exit, the 2nd arc exit and the main-linac exit obtained by the S2E simulation (lower).

6. 結論

設計された EUV-FEL 光源に関する S2E シミュレーションを行った結果、10 mA の平均電流で 10 kW 以上の FEL 出力が生成されることが確認できた。また、電子ビームは FEL 発振後でも深刻なビーム損失なく輸送され、エネルギー回収できることもわかった。これは、設計した EUV-FEL 光源が新しいタイプの半導体リソグラフィ用 EUV 光源として機能することを示すものである。今後は、さらなる高出力化や産業化に向けて設計・検討を行っていく予定である。

参考文献

- [1] H. Mizoguchi *et al.*, Proc. of SPIE 10143, Extreme Ultraviolet (EUV) Lithography VIII, 101431J (March 27, 2017); doi:10.1117/12.2256652.
- [2] B. Turkot, P2, 2017 International Workshop on EUV Lithography, LBNL, Berkeley, CA, USA, June 12-15, 2017.
- [3] E. Hosler *et al.*, Proc. of SPIE 9422, Extreme Ultraviolet (EUV) Lithography VI, 94220D (March 13, 2015); doi:10.1117/12.2085538.
- [4] N. Nakamura *et al.*, Proc. of ERL2015, Stony Brook, NY, USA, June 7-12, 2015, pp.4-9; N. Nakamura, P42, 2015 International Workshop on EUV Lithography, Maui, Hawaii, USA, June 23-27, 2015.
- [5] T. Miyajima *et al.*, Proc. of the 12th Annual Meeting of PASJ, Tsuruga, August 5-7, 2015, pp.247-250.
- [6] K. Umemori, S22, 2015 International Workshop on EUV and Soft X-ray Sources, Dublin, Ireland, November 9-11, 2015.
- [7] R. Kato, P43, 2016 International Workshop on EUV Lithography, LBNL, Berkeley, CA, USA, June 13-16, 2016.
- [8] H. Kawata, S62, 2016 International Workshop on EUV and Soft X-ray Sources, Amsterdam, Netherland, November 7-9, 2016.
- [9] H. Kawata, P18, 2017 International Workshop on EUV Lithography, LBNL, Berkeley, CA, USA, June 12-15, 2017.
- [10] N. Nakamura, TUIBCC002, ERL2017, CERN, Geneva, Switzerland, June 18-23, 2017.
- [11] M. Yamamoto *et al.*, TUIBLH1020, ERL2015, Stony Brook, NY, USA, June 7-12, 2015.
- [12] E. Kako *et al.*, Proc. of IPAC2012, New Orleans, LA, USA, 2012, pp.2239-2241.
- [13] T. Konomi *et al.*, Proc. of the 13th Annual Meeting of PASJ, Chiba, 2016, pp.263-267.
- [14] H. Sakai *et al.*, MOXA04, SRF2017, Lanzhou, China, July 17-21, 2017.
- [15] GPT; <http://www.pulsar.nl/gpt/index.html>
- [16] S. di Mitri, *Nucl. Instrum. and Methods A* 806 (2016) 184.
- [17] M. Borland, "elegant: A Flexible SDDS-Compliant Code for Accelerator Simulation," Advanced Photon Source LS-287, September 2000.
- [18] Genesis; <http://genesis.web.psi.ch>