

EUV-FEL 用入射器のビーム光学関数のマッチング OPTICS MATCHING OF EUV-FEL INJECTOR

布袋貴大 *A)、宮島司 B)

Takahiro Hotei* A), Tsukasa Miyajima B)

A)The Graduate University for Advanced Studies, SOKENDAI

B)High Energy Accelerator Research Organization, KEK

Abstract

Photolithography, which is exposure technology, is used for semiconductor manufacturing. Extreme ultraviolet (EUV) lithography has been developed for next generation technology and finally is required to output power of more than 10kW. One of the light sources satisfied this condition is a free electron laser (FEL) based on energy recovery linac (ERL) to generate EUV. KEK has designed the EUV-FEL light source through the beam test in compact ERL (cERL). In order to achieve a low emittance and short bunch length, optimization of transport conditions was performed for the design of the EUV-FEL injector so far. Optics matching of EUV-FEL injector was carried out to connect to the main linac, which accelerates the particles and recovers energy. We optimized not only quadpole magnets in connecting part but also the strength of a solenoid magnet and the voltages and the phases of the buncher cavity and injector cavity and explored a transport condition to achieve both conditions, one is a low emittance and short bunch length and the other is optics matching. This report show a result of optics matching and a design of EUV-FEL injector.

1. はじめに

半導体製造の1つの方法としてリソグラフィーと呼ばれる露光技術が用いられている。短波長の光を使うことで微細化を行い、現在ではArFエキシマレーザー(波長193nm)など約200nm前後の波長の光が用いられている。リソグラフィーの次世代技術としてさらに短波長(十数nm)の極紫外線(EUV)リソグラフィー技術の開発が進められている。これには主にレーザー励起プラズマ光源の開発が進められており100W程度の出力が得られている。最終的に250Wの出力が見込まれるが、さらに次のリソグラフィー技術では10kWの高出力が求められる。

この要求に応える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、EUV領域における自由電子レーザー(Free Electron Laser, FEL)が有力な候補となっている。ERLはエネルギー回収によって大電流ビームを扱うことができ、さらにライナックの特徴を活かして、常に低エミッタンスのビームからの高輝度な放射光を利用できる。このERLとEUV-FELを組み合わせることで、要求される出力を実現できると期待されている。KEKではERL実証機として開発されたcompact ERL(cERL)でのビーム試験を通して、EUV-FEL光源実現のための技術開発を着実に進めている。ここで図1に現状のERLベースのEUV-FEL光源のイメージを示す。

またこれまでの研究の中で実際に低エミッタンス・短バンチのビームを実現するために、シミュレーションによって輸送条件の最適化を行ってきた。この時点では光学関数のマッチングまでは行っていなかったが、本研究では入射器から出た電子ビームを加速・エネルギー回収を行う周回部へ接続するために、ビーム光学関数のマッチングを行った。そのマッチング区間、電子銃

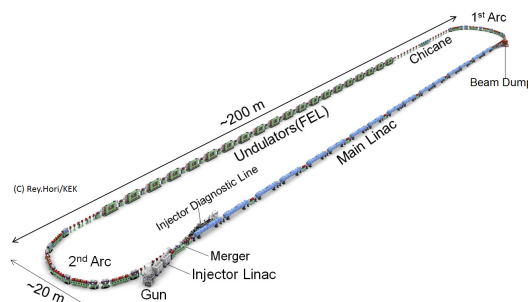


Figure 1: Image of the designed EUV-FEL light source based on the ERL.

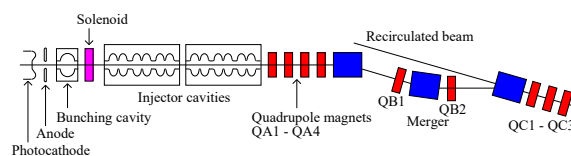


Figure 2: Layout of the injector and merger for the EUV-FEL light source based on the ERL.

から出て周回部へ入射する前まで、のレイアウトを図2に示す。今回実施したマッチングでは接続区間の四極電磁石だけでなく、入射器内のソレノイドの強さ、バ

*hotei@post.kek.jp

ンチャー空洞の電圧・位相、入射空洞の電圧・位相の最適化も行い、低エミッタンス・短バンチとビーム光学関数のマッチング条件を両立する輸送条件の探索を行った。

本会議録は以下のような構成になっている。まずは第2節でこれまでに行われた合流部手前までの最適化計算の結果を示す。ただしこれまででは合流部手前の四連四極電磁石 (QA1-QA4) を抜けた後でのビームパラメータを見ていたので、今回はその結果を基に QA1 手前でのビームパラメータを計算しなおした。第3節では、第2節での結果を初期パラメータとして、空間電荷効果なしの条件における合流部のオプティクス計算を行った。ここではシミュレーションコードとして elegant [1] を用いている。この計算によって合流部手前の四極電磁石、及び合流部後ろのトリプレットの磁場強度、磁石間のドリフト長の最適な値を探した。ここでの計算は線形近似の計算であるが、今回のシミュレーション領域における電子のエネルギーは最大 10.5 MeV であり、空間電荷効果が無視できない。そこで最終的には、それらの効果も含めた粒子トラッキングコード GPT (General Particle Tracer) [2] を用いて、電子銃から生成された電子が、合流部後ろのトリプレットを抜けるまでの計算を行い、低エミッタンス・短バンチとビーム光学関数のマッチング条件を両立する輸送条件を探索することになる。第3節の計算はこの計算の初期条件を決めるためのものであり、空間電荷効果まで含めた計算については第4節で示す。最後に第5節で全体のまとめを行う。

2. 入射部でのビームパラメータ

これまでに行っていた合流部手前までの計算について報告する。計算には粒子トラッキングコード GPT を用いている。このコードではビームをマクロ粒子の集団として扱っており、3次元空間電荷効果まで考慮され、特にいま計算したい低エネルギー領域での解析には適切であると考えられる。合流部手前でエミッタンスとバンチ長の2つを最小化するための輸送条件の探索を行った。探索の手法としては Multi Objective Genetic Algorithm (MOGA) [4, 5] を用いている。この計算手法はエミッタンスとバンチ長という2つの相反するパラメータを最小化するために、はじめに適当な条件で計算を行い、輸送条件を遺伝的アルゴリズムに則って変えていき、最適な輸送条件を探索するというものである。十分な試行回数が繰り返されれば、最適化した2つのパラメータ、今回はバンチ長とエネルギー拡がり、に関して図4のような曲線が得られることになる。

両者が最小になるところは原点に最も近い点がある。今回はバンチ長が約 0.3 mm となる値を採用した。実際に採用した値は、合流部手前でバンチ長 $\sigma_z = 0.3009$ mm とエネルギー拡がり $\sigma_\gamma = 0.0653$ である。このような輸送を実現する変数の組と値を表1に示す。バンチ電荷は 60 pC で、マクロ粒子数は 25000 個である。

ただしここで得られた結果は合流部前の QA4 (実際には磁場を 0 にしていたので長いドリフト空間) における値であり、次の計算のために欲しいのはその QA1

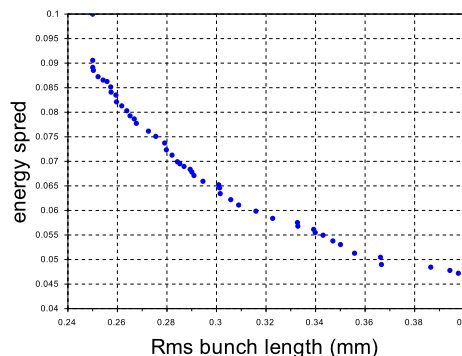


Figure 3: Optimized energy spread as a function of the bunch length at the exit of QA4.

Table 1: Variables

Laser spot diameter	1.361 mm
Laser pulse length	7.862×10^{-11} s
solenoid magnet	0.03097 T
Voltage of buncher	49.88 kV
Injector cavities	2.01 MV/m
	4.183 MV/m
	4.87 MV/m
	10.1 MV/m
	10.1 MV/m
	8.228 MV/m
Offset phases of buncher	-90.6 deg
Offset phases of injector cavities	-29.23 deg
	-14.07 deg
	-29.99 deg
	-29.6 deg
	-0.927 deg
	28.14 deg
Between gun and buncher	0.4163 m
Between buncher and solenoid	0.2264 m
Between solenoid and cavities	1.162 m

の入り口における値である。したがって表1のパラメータを基に QA1 入り口における光学関数を求めた。これを表2に示す。

3. 線形計算による光学関数の計算

第2節の計算では下流に輸送するためのビーム条件を考慮していなかったが、実際にはビームの加速・エネルギー回収を行う周回部へビームを入射するためには、光学関数を周回部の設計に合わせこむ必要がある。そのための目標値として光学関数に関して $\beta_x = \beta_y = 2.5$ m, $\alpha_x = \alpha_y = 0.55$ という値が周回部の輸送条件の設計より求められた。今回の計算ではこの値を目標に四極電磁石 (QA1-QA4, QC1-QC3) のパラメータを決定する。入射器出口から周回部までの区間には、まず

合流部でのエミッタンス悪化を避けるための四極電磁石 (QA1-QA4) が合流部手前に配置されている。また合流部から周回部までの間に光学関数を整えるための四極電磁石 (QC1-QC3) がおかれる。合流部の磁石配置は今回は固定し、その前後の四極電磁石の強さ・磁石間のドリフト長を調整することで、エミッタンスの悪化を避けつつ光学関数をマッチさせるというのが、この節と次節での目的であり、今回の計算のメインである。ここではまずシミュレーションコード elegant を用いた線形計算の範囲でのマッチング計算結果を示す。なお elegant における四極電磁石の収束力を表す K 値の定義は

$$K = \frac{B'}{B\rho}$$

である ($K > 0$ のとき水平方向に収束力が働き、 $K < 0$ のとき垂直方向に収束力が働く)。

計算の初期値に用いた光学関数の値は第 2 節の結果から表 2 のように与えた。マッチング計算の結果、それ

Table 2: Initial Twiss Parameter

β_x	20.18 m
β_y	20.12 m
α_x	17.87
α_y	17.81

ぞれの磁石の強さと長さを表 3 のように決定した。四

Table 3: Strength and Length of Quadrupole Magnets

Name	K value [$1/m^2$]	Length [m]
QA1	-2.275	0.1
QA2	-17.56	0.1
QA3	1.516	0.1
QA4	-16.05	0.1
QC1	-8.833	0.1
QC2	1.011	0.1
QC3	14.56	0.1

極電磁石の長さは全て 0.1 m とし、磁石間のドリフト長は QA1 と QA2 の磁石間が 0.4 m でほかの磁石間は 0.3 m になっている。また表の上から順にビームラインの上流側から配置され、上 4 つが合流部手前、下 3 つが合流部後ろに置かれるような設計になっている (図 2 参照)。

以上の配置における光学関数の計算結果を図 4 に示す。かなり β の値は抑えられ、最終的に $\beta_x = \beta_y = 2.5$ m, $\alpha_x = \alpha_y = 0.55$ という目標値を達成した値が得られた。しかし線形計算の範囲ではこれで十分であるが、途中の β が低くなりすぎているなど、空間電荷効果を取り入れた場合にどうなるかという問題も残っている。そこで次節では再び GPT に戻っての最適化計算の結果を示す。

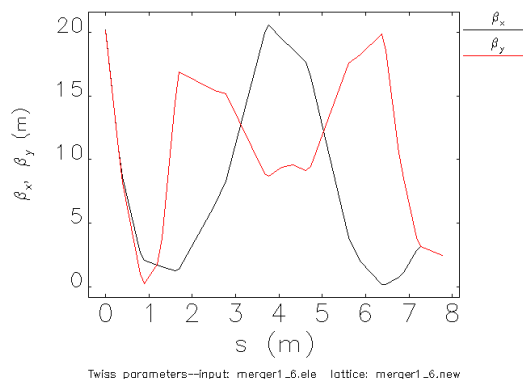


Figure 4: Optics function (beta function) from the 0.3 m gun side of QA1 to the 0.5 m main linac side of QC3.

4. 空間電荷効果を取り入れた最適化計算

第 3 節で線形近似の範囲での四極電磁石の強さが決まったので、それを基に GPT による最適化に戻る。最初から四極電磁石を含んだ計算を行ってもよいが、その場合は第 2 節で見た変数にさらに 7 つ変数が増えることになる。あまりに変数が多くなりすぎるとなかなか結果が収束せず、輸送条件を見つけるのが困難であることが多い。そのため線形計算の範囲である程度四極電磁石の強さを決めておいたのが第 3 節である。計算の手法は第 2 節と同じで、しかし今回は電子が電子銃から生成されて、合流部後ろのトリプレットを抜けるまでの一貫したトラッキングである。

計算の結果を示す。図 5 は今回の計算におけるバンチ長とエネルギー拡がりに関するプロットである。第 2

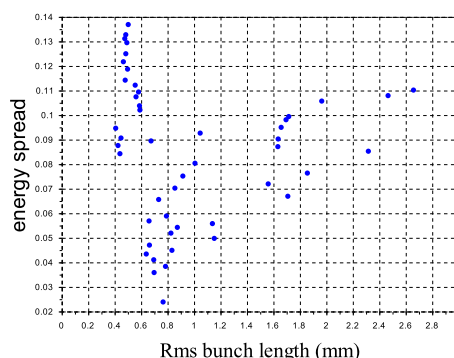


Figure 5: Optimized energy spread as a function of the bunch length at the 0.5 m main linac side pf QC3.

節のようにきれいなカーブは得られていない。これは計算回数が不十分であったことを意味している。その中でも良いと考えられる、つまり原点に近い点を与えるような輸送条件を表 4 に示す。またこのときのバンチ長とエネルギー拡がり、及び光学関数の値を表 5 に示す。短バンチかつエネルギー拡がりを抑えられた輸送条件であるが、 α の値がまだ目標から大きく離れている。

Table 4: Variables

Laser spot diameter	0.002985 mm
Laser pulse length	7.676×10^{-11} s
solenoid magnet	0.03138 T
Voltage of buncher	51.76 kV
Injector cavities	2.067 MV/m
	5.92 MV/m
	10.98 MV/m
	10.01 MV/m
	10.35 MV/m
	10.8 MV/m
Offset phase of buncher	-90.10 deg
Offset phases of injector cavities	-28.93 deg
	-3.883 deg
	17.16 deg
	-7.844 deg
	27.88 deg
	-24.59 deg
Between gun and buncher	0.4049 m
Between buncher and solenoid	0.4407 m
Between solenoid and cavities	0.9576 m
Quadrupole magnets	$6.342 / \text{m}^2$
	$2.375 / \text{m}^2$
	$-16.37 / \text{m}^2$
	$19.97 / \text{m}^2$
	$-12.72 / \text{m}^2$
	$-13.16 / \text{m}^2$
	$15.56 / \text{m}^2$

Table 5: Bunch Length, Energy Spread and Optics Function at the Entrance of the Main Linac

Bunch length	0.635 mm
Energy spread	0.0436
β_x	23.41 m
β_y	28.05 m
α_x	-30.8
α_y	-64.79

5. まとめ

本計算は低エミッタンス・短バンチとビーム光学関数のマッチングを両立する輸送条件を見つけるために行われた。第3節で空間電荷効果なしの線形計算の範囲での輸送条件を、第4節で空間電荷効果を取り入れた状況での輸送条件を見た。一目でわかるように今回の計算領域、つまり電子銃から生成されて主加速空洞に入る前までの低エネルギー領域では、お互いが作る電場の寄与が大きく、それを無視した計算とでは結果が大きく異なる。

線形計算においては、はじめ合流部前後の四極電磁

石間のドリフト長を全て0.2 mとしていたが、それを適当に伸ばしてあげることによって低エネルギー領域が伸びたものの、少なくとも線形計算の範囲では、光学関数をうまくマッチングすることができた。GPTによる計算では計算の試行回数が足りず、図3で見られたようなきれいなカーブは得られなかった。その中からよさそうな輸送条件を取り出してみたが、 α の値が目標値から大きく離れてしまっている。

今後はより適した輸送条件を探すために、線形計算による初期条件決定の見直しや計算回数を増やすことを試みる。そして最終的には実際に加速してFEL発振を行い、さらにエネルギーを回収するまでの一連の計算にまでつなげる必要がある。

参考文献

- [1] Argonne National Laboratory, <http://www.anl.gov/>
- [2] Pulsar Physics, <http://www.pulsar.nl/gpt/index.html>
- [3] T. Miyajima *et al.*, “Design Work of EUV-FEL Light Source Based on Energy Recovery Linac”, Proceedings of the 12th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (2015).
- [4] Carlos M. Fonseca and Peter J. Fleming, “Genetic Algorithms for Multiobjective Optimization: Formulation Discussion and Generalization”, Proceedings of the 5th International Conference on Genetic Algorithms (1993).
- [5] Ivan V. Bazarov and Charles K. Sinclair, “Multivariate optimization of a high brightness dc gun photoinjector”, Phys. Rev. ST Accel. Beams **8**, 034202 (2005).