

Numerical simulation of tabletop THz FEL amplifier

Keisuke Higashimura, Satoshi Ueda, Kyouhei Yoshida, Ryota Kinjo, Mahmoud A. Bakr,
Taro Sonobe, Toshiteru Kii, Kai Masuda, Hideaki Ohgaki,
Institute of Advanced Energy, Kyoto University
Gokasho, Uji, Kyoto, 611-0011

Abstract

At Institute of Advanced Energy, Kyoto University, we have studied on a tabletop THz FEL amplifier by using photocathode RF gun. Injection-seeded THz-wave parametric generator is planned to be used for FEL seeding. Concerning about the combination between a long wavelength FEL and a short bunch electron beam, the phenomenon that the electron beam slips from the FEL light and the interaction between the electron beam and the FEL light stops before FEL saturation was confirmed from numerical simulation. As FEL not being saturated under this condition, unstable FEL operation originated from unstable electron beam and/or seed light could be predicted. Fluctuation of the FEL power was calculated by beam tracking simulation code Parmela and 3-D FEL gain simulation code GENESIS1.3. We found that FEL with peak power 5.1kW and pulse energy 0.10μJ can be expected from this amplifier.

Discussion about design of FEL amplifier and electron beam property which is more suitable for users is reported to achieve FEL power stability.

テーブルトップTHz FEL増幅装置の数値シミュレーション

1. はじめに

京都大学エネルギー理工学研究所では、光陰極型高周波電子銃より発生させた高輝度電子ビームを用いたテーブルトップサイズTHz FEL増幅装置の設計を行っている。長波長FEL発振においてslippageの及ぼす影響を含め、増幅器のFEL出力計算を行い設計の評価を行った。その上でFEL出力安定化用の対策として、発振に適した装置設計と電子ビームに関する考察を行ったので報告を行う。

2. FEL増幅装置

今回検討するFEL増幅装置の概念図を図1に示す。今回のFEL出力計算はシミュレーションコードPARMELA^[1]による電子銃からアンジュレータ入口までのビーム軌道計算とシミュレーションコードGENESIS 1.3^[2]によるアンジュレータ中のFEL出力計算に分けておこなった。BNLタイプ1.6空洞型光陰極型高周波電子銃^{[3][4]}によって高輝度電子ビームを発生させ、ソレノイド磁気レンズを用いて電子ビームに収束をかける。電子ビームは波長可変である光注入型THz波パラメトリック発生器^[5](injection-seeded THz-wave parametric generator: is-TPG)より発振したシード光と同期させて短周期アンジュレータに入射してFEL増幅をおこなう事を計画している。is-TPGとはNd:Yagレーザーと半導体レーザーをそれぞれポンプレーザーとアイドラーレーザーとしてMgO:LiNbO₃結晶に入射させる、THz光のパラメトリック発生装置である。この際装置の小型化をはかる為、Nd:Yagレーザーをビームスプリッターに通し、光陰極励起用レーザーとis-TPGポンプレーザー双方の役割を担わせる予定である。is-TPGより発生した

シード光はTHz波用レンズで集光させホローミラーにより反射させることで電子ビームの軸軌道と一致させる。装置全体で2m×4mのテーブルトップサイズとすることを目標としている。

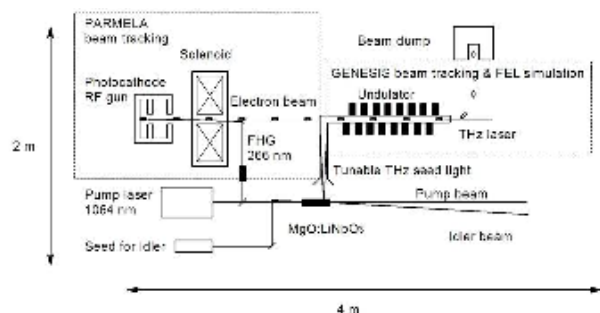


図1: FEL増幅装置概念図

3. ビーム軌道計算

粒子シミュレーションPARMELA^[1]で電子ビームの電子銃における発生並びにソレノイド磁気レンズにおける収束を計算した。電子銃に用いる空洞はSバンド(2856MHz)の1.6セル空洞で、電界強度100MV/mまで使用可能と報告されている^[6]。陰極からのアンジュレータ入口までのビーム移動距離は0.8mとする。光陰極に入射するレーザーのパルス長と陰極上での半径はそれぞれ10psと0.7mmとして計算に用いた。FEL発振に適したパラメータを探索した結果^[7]、レーザー入射位相を40°、空洞内電界強度を70MV/mに今回の計算では固定した。ソレノイドはエミッタンス補償に用いるものであるが、磁気レンズとして用いることで機器を増やすことなく電子ビームの収束が可能となる。磁場は2.5kGまでの

K	2.0
---	-----

出力が可能であり^[3]、2.0kG以上の磁場をかけることで電子ビームの収束が行えることが計算より確認されている^[7]。バンチ電荷が1nC、ソレノイド磁場が2.1kGとして計算した場合、アンジュレータ入口での電子ビームのパルス長、ピーク電流、エネルギーはそれぞれ3.47ps、115A、6.25MeVと求められた。

4. FEL出力計算手法

アンジュレータ中でのFEL出力計算は3-D FELシミュレーションコードGENESIS1.3^[2]により行った。計算に用いたビームパラメータはソレノイド磁場2.1kGの条件下においてPARMELAで求めた電子ビームのものを用いた。陰極から0.8mの距離にあるアンジュレータ入口での、バンチ電荷1.0nCをもつ電子ビームのパラメータを表1に示す。シード光は出力0.20Wとし、アンジュレータ入口で半径3.5mmのビーム焦点をもつものとした。また表2にはアンジュレータのパラメータを示す。

アンジュレータのギャップと周期に対してピーク磁場は次の式によって表される。

$$B_{\max} = 3.33 \exp \left[-\frac{Gap}{\lambda_u} (5.47 - 1.8 \frac{Gap}{\lambda_u}) \right] \quad (1)$$

これを変形すると

$$\frac{1.8}{\lambda_u} Gap^2 - 5.47 Gap - \lambda_u \ln \left(\frac{B_{\max}}{3.33} \right) = 0 \quad (2)$$

となり期待されるピーク磁場をもつためにアンジュレータが必要なギャップを計算することができる。周期 $\lambda_u=20.0\text{mm}$ 、ピーク磁場 $B_{\max}=1.0\text{T}$ として計算を行うと必要なギャップは4.8mmであると求められた。FELはアンジュレータ中を一边4.8mmの正方導波管をすすむものと仮定した。

電子ビームのパルス長が1mm程であるため、FEL計算にはslippageの影響も含めた計算を行うtime-dependentシミュレーションをGENESIS 1.3で行った。

表1: 電子ビームパラメータ

規格化エミッタンス(x,rms)	1.77 π mm-mrad
規格化エミッタンス(y,rms)	1.63 π mm-mrad
エネルギー幅	0.80%
x 方向ビーム半径(rms)	0.74mm
y 方向ビーム半径(rms)	0.72mm
twiss parameter α_x	1.77
twiss parameter α_y	1.95
ピーク電流	115A
ビームエネルギー	6.25MeV
パルス長(rms)	3.47ps ($L_b=1.04\text{mm}$)

表2: アンジュレータパラメータ

周期 λ_u	20.0mm
周期数 N_u	125
ピーク磁場 B_{\max}	1.0T

5. 考察

図2にアンジュレータ出口におけるバンチ電荷1.0nCをもつ電子ビーム、及びバンチ電荷0.8nC、1.0nC、1.2nCをもつ電子ビームに対し得られる波長185 μm のFELパルスの時間構造を示す。バンチ電荷1.0nCの電子ビームでFEL発振を行った場合ピーク出力5.1kW、パルス全体で0.10 μJ の出力をもつFELが得られることが計算より求められた。またbunching factorが増加傾向にあり飽和に達していなかったため、FEL飽和には125周期のアンジュレータでは達していないとみなすことができる。ただしアンジュレータ周期数増加は装置のさらなる延長を必要とし2m \times 4mに増幅装置全体が収まらない可能性が出てくるため、アンジュレータ周期125以上での装置設計を考えないこととする。

FEL飽和に達していないため、FELがどの程度安定した出力で発振できるか確認する必要がある。図2よりバンチ電荷が1.0nCが0.8nCへと減少してもFELパルスには大きな変化は確認できず、安定したFEL発振が可能であった。逆にバンチ電荷が1.2nCに増加した場合、FELピーク出力が著しく減少する計算結果が得られた。よって安定してFEL発振が可能である電子ビームパラメータの領域は存在するものの、過度の電荷によりFEL出力が減少すると考えられることができる。図3にバンチ電荷0.8nC、1.0nC、1.2nCをもつ電子ビームのx方向半径が発展する計算結果を示す。バンチ電荷増大による電子間の空間電荷効果増大から、電子ビーム半径はバンチ電荷増加に伴い拡大していることが確認できた。安定したFEL発振が可能な0.8nC \sim 1.0nCでは電荷量が減少した場合、ピーク電流が減少する影響に対して空間電荷効果減少によるビーム収束が補償となって出力が安定すると考えられる。しかしFEL出力が下がる1.2nCでは電荷量が増大し、ビーム収束力の悪化によるロスがピーク電流増大によるゲインを上回ったものと考えられる。

現在の設計においてもFEL出力安定領域は存在するものの、FELゲインが増加し飽和に達して出力が安定するようFEL増幅装置の再設計を行うことも必要であると考えられる。FEL飽和に達していない理由として電子ビームがFELよりslipした影響(slippage)があげられる。電子ビームはアンジュレータ1周期につき1FEL波長分の長さFELよりスリップする。電子ビームのパルス長が1.04mmでFEL波長が185 μm であった時、電子ビームとFELは数周期相互作用をおこした後slipすることになる。そのためFEL飽和に達するためにはアンジュレータ1周期での相互作用で得るゲインを増大させることが有効であると考えられる。

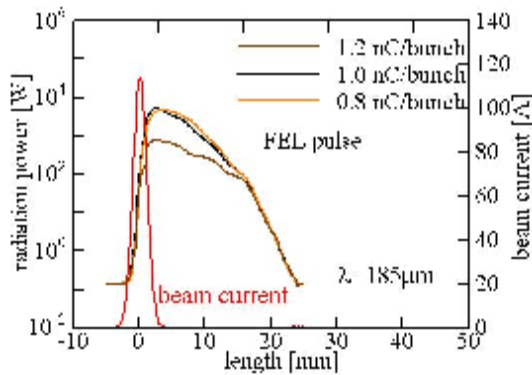


図2: アンジュレータ出口における電子ビーム及びFELパルス時間構造

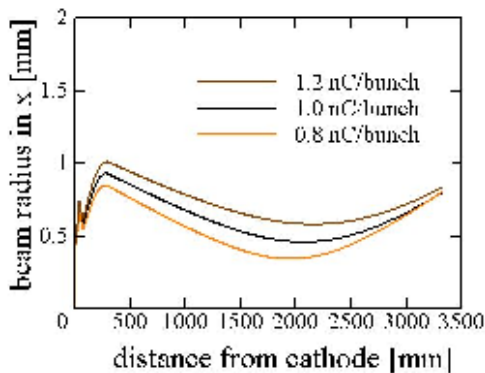


図3: 電子ビームx方向半径の発展

6. 装置設計

1周期での電子ビームとFELの相互作用で得るゲインを増大させ、FEL飽和に近付けるために、ソレノイド磁気レンズの磁場を2.1kGから2.3kGに増加させ、より強い収束をかけた電子ビームをPARMELAにおいて計算した。電子ビームに強い収束をかけた場合、収束部以外でのビーム半径は急速に発散するためアンジュレータ中であってもFELゲインも急減するものと考えられる。よってアンジュレータ周期数を減らし、アンジュレータ中では電子ビーム半径を短く保ち1周期あたり強い相互作用を起こすように装置を再設計した。

ソレノイド磁気レンズの磁場を2.3kGとし、アンジュレータ周期数 $N_u=80$ とした条件の元でバンチ電荷1.0nCの電子ビームが発振するFEL出力をGENESIS 1.3において計算した。ソレノイド磁気レンズ磁場の変化に対するアンジュレータ出口におけるFELパルス時間構造を図4に示す。ソレノイド磁場が2.3kGの時に、ピーク出力350kW、パルス全体で4.1μJに達する波長185μmのFELパルスを発生することが計算より得られた。ソレノイド磁場が2.1kGの時と比較してFELのピーク出力が2桁増大したことからFEL飽和に近づいたと考えられる。その反面、装置の現設計では電子ビーム半径の発散によりアンジュレータ周期数を増やしてもこれ以上のゲインは望めないため、例えばアンジュレータ間に四重極電

磁石を挟んだFODO構造^[8]としてアンジュレータ周期数を増やす必要があると考えられる。

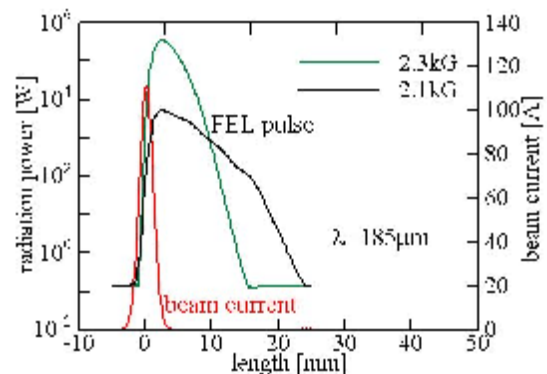


図4: ソレノイド磁気レンズ磁場の変化に対するアンジュレータ出口におけるFELパルス時間構造

7. まとめ

テーブルトップTHz FEL増幅装置の数値シミュレーションを行った結果、ピーク出力5.1kW、パルス全体で0.10μJの出力をもつFELが得られることが計算より求められた。slippageによりFEL飽和に達しないという結果が得られたものの、安定的にFEL発振が可能なバンチ電荷領域が存在することが計算より求められた。またより強いソレノイド磁場による電子ビーム収束を行いアンジュレータ1周期におけるゲイン増大によって飽和を達成するため装置の再設計を行った。アンジュレータ周期数を減らし、ソレノイド磁場が2.3kGの時ピーク出力350kW、パルス全体4.1μJに増大したFELパルスを発振する計算結果が得られた。

アンジュレータ中を電子ビームが収束状態で進行させることにより、大きなゲインをFELが受け続けることになり最終的には飽和に達する可能性もあると考えられる。そのため今後は小型の四重極電磁石を挟んだFODO構造のアンジュレータを用いた設計も考えてFEL発振のシミュレーションを行う予定である。

参考文献

- [1] L.M. Young, et al., PARMELA, LA-UR-96-1835, (2001)
- [2] S. Reiche, Nucl. Instr. and Meth. 429 (1999) 242
- [3] F.Sakai, et al., Japanese Journal of Applied Physics, vol. 41, pp.1589 (2002)
- [4] R. Kuroda, et al., International Journal of Modern Physics B, vol. 21, pp.488 (2007)
- [5] K. Kawase, et al., Applied Physic Letters, vol. 80, no. 2, pp. 195 (2002)
- [6] J.Yang, et al., Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, A 491, pp.15 (2002)
- [7] K.Higashimura, et al., "Conceptual design study on a tabletop seeded-THz FEL", 第5回日本加速器学会年会 Proceedings, (2008)
- [8] Y.U.Jeong, et al., Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, A 475, pp.47 (2001)