

発振型自由電子レーザーの飽和についての考察

CONSIDERATION ABOUT THE SATURATION FOR OSCILLATOR TYPE FREE ELECTRON LASERS

川瀬啓悟

Keigo Kawase

Hiroshima Synchrotron Radiation Center, Hiroshima University

Abstract

The free electron laser(FEL) oscillator amplifies light as the result of interactions of the electron bunch train, undulator field and stored light inside the optical cavity. Although the optical intensity is exponentially amplified at the small signal region, at the strong signal region the intensity is saturated and even a part of the optical energy can be transferred to the electron beam. In usual case, though the initial electron beam parameters are constant for every electron bunches, by changing the initial parameters with proceeding the amplification, it is studied how to change the evolution of the FEL. In this presentation, the consideration of the possibility to avoid the saturation phenomena on the FEL amplification processes is reported.

1. はじめに

1970年代に実証された自由電子レーザー(FEL)[1]は、近年、従来型のレーザーでは現状で到達が困難な波長領域、すなわち、極端紫外から X 線領域とマイクロ波から中赤外領域において、国内外の多数の施設で光源の研究がなされ、利用研究に共用されている[2]。特に長波長領域では高反射率ミラーの利用が容易で、それほど高くない電子ビームピーク電流が要求されないことにより電子加速器への性能要求が比較的低いことから、高周波加速器からの電子バンチ列を用いる発振型 FEL がよく研究、利用されている。

発振型 FEL の動作ダイナミクスは、バンチ列の最初の電子がアンジュレータを通過する際に、種光として放射を放出する。種光は後続の電子バンチとの FEL 相互作用により、しばらく指数関数的に強度が増大する。増幅を続けると光強度が強くなり、もはや小信号領域ではなく、増幅は指数関数的ではなくなり、やがて飽和に至る。

この FEL の飽和メカニズムの詳細を研究するために、1次元 FEL 発振器シミュレーションコード FELO[3, 4]を用いて、光強度と位相空間における電子ビームの発展の詳細を眺める。さらに、飽和が顕著に見え始める領域で、電子ビームのエネルギーを変化させることで FELO においてどのような応答が見られるかを、いくつかのエネルギー変化パターンについて確認した。本研究では、電子パルス数について大阪大学産業科学研究所にあるテラヘルツ領域の FEL (阪大産研 FEL)[5]に対応する 200 パルスを、その他のパラメータについては計算コード付属の試験値を採用して、計算結果を示す。

2. 計算コード FELO への入力パラメータ

本研究で利用した FELO への入力パラメータを Table 1 に示す。本研究では試験的にパルス数と出力ミ

ラーの反射率以外は、計算コードの配布時に付属されているパラメータをそのまま流用している。パルス数とミラー反射率はそれぞれ阪大産研 FEL の現在のパラメータである 200 パルス、反射率 0.9 とした。今後、他のパラメータについても最適化を実施する。

Table 1: Input Parameters for FELO

Name	Value	Description
Shape	Gaussian	Shape of electron pulse current
σ_e	2	Duration of electron pulse
Pulse_num	200	Number of electron pulses
L_e	10	Scaled electron pulse duration
L_w	2.0	Scaled interaction length
Reflect	0.9	Reflectivity of output coupler
E_per_node	50	Number of electrons per one node
Nodes_e	100	Number of nodes inside an electron pulse
a_0	10^{-2}	Scaled initial field amplitude
Δ_e	0.0	Electron detuning
Δ_c	0.0	Cavity detuning
Add_noise	.false.	Add shot noise or not
Q	2×10^{-10}	Electron pulse charges
ρ	0.0039	FEL parameter
Outputchoice	1	Setting of output file
jitter	0.0	Maximum random fluctuation of Δ_c

kawase@hiroshima-u.ac.jp

3. 計算結果

3.1 電子ビームの分布と光強度

通常のエネルギー一様な電子ビーム列を用いた時の、指数関数的増幅領域における FEL 相互作用後の位相空間中の電子ビームの分布とその時の光の積分強度を Figure 1 に示す。

最初は光共振器内に光が存在していないから、時間的にガウス分布した電子パルスからのアンジュレータ中での自発放射した結果の電子の位相空間分布を示す。2回目以降は共振器中の光と合わせて FEL 相互作用するため、電子の位相空間分布は大きく変化していく。10 回程度の増幅で指数関数的増幅領域が飽和しはじめ、20 回程度では位相空間分布も大きく広がってしまう。

3.2 電子ビームのエネルギー変化の導入

一様なエネルギーを持つ電子ビームパルス列を用いた場合での FEL の増幅を見ることで、今回使用したパラメータでは 10 回程度の増幅で指数関数的増幅領域は終了し、いわゆる強い信号領域に入っていることがわかる。そこで、10 回目の増幅以降の電子ビームのエネルギー（ここでは規格化された運動量）に変化を与えることでどのような結果を得られるかを調べた。今回の試験では、10 回目の増幅以降に規格化された運動量で+2 一定、増幅回数ごとに+0.02、増幅回数ごとに+0.1 の 3 パターンの計算を実施した。その結果を Figure 2 に示し、位相空間分布の変化について Figures 3, 4 に示す。

Figure 2 からわかるように、一定量運動量を変化させた時には、線形スケールで見て最大で 2 倍ほどの強度増大が見られるが、飽和に達する領域ではそれほど顕著な差は見られない。また、運動量を少しずつ変えていく場合は強度の増大がさらに後半まで継続するが、その後飽和領域では逆に強度が下回っている。一方、運動量の変化勾配を大きくすると、はじめは強く増大するが、すぐに FEL 相互作用できなくなり、光は無くなってしまう。

4. まとめ

一次元の発振型 FEL 計算コード FELO を用いて、電子ビームのエネルギー変化に対する FEL の発展の影響を確認した。エネルギーを変化させることで飽和に達する前に数 10%程度の強度の増大が見られたが、飽和領域では一定エネルギーの電子ビームと比較して大きな差異は見られなかった。総じて、指数関数的な増幅をさらに継続することは、今回の運動量だけを変化させる方法では困難であることが示唆される。

今後は、本研究で得られた数値計算結果の理論的な解釈を進めるとともに、より多様なパラメータ探索や電子ビームの位相制御、より複雑な位相空間における制御を加えることで、FEL 強度の飛躍的な増大が達成できるかどうかを調査していく。

本研究の一部は JSPS 科研費(課題番号 15K13407)による助成を受けて実施している。

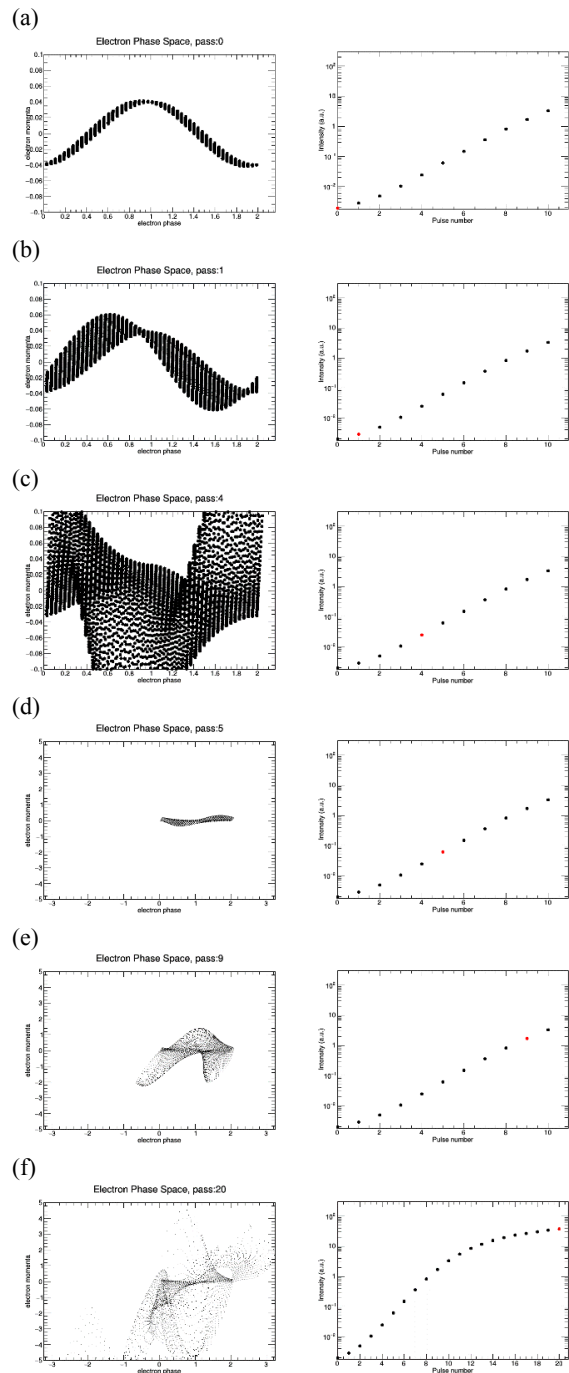


Figure 1: Electron distributions on the phase space after each FEL interaction and optical intensities. (a) After the first pass, which means the spontaneous emission of the electron pulse inside the undulator. (b) After second pass, (c) fifth, (d) sixth, (e) tenth and (f) 21th pass.

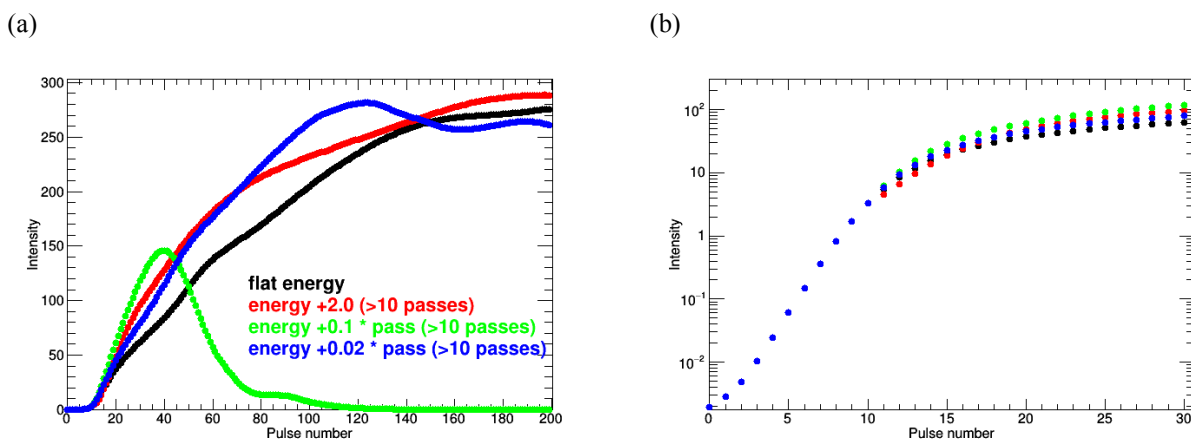


Figure 2: Evolutions of the optical intensity for several patterns of the momentum changing. (a) linear scale, (b) log-scale.

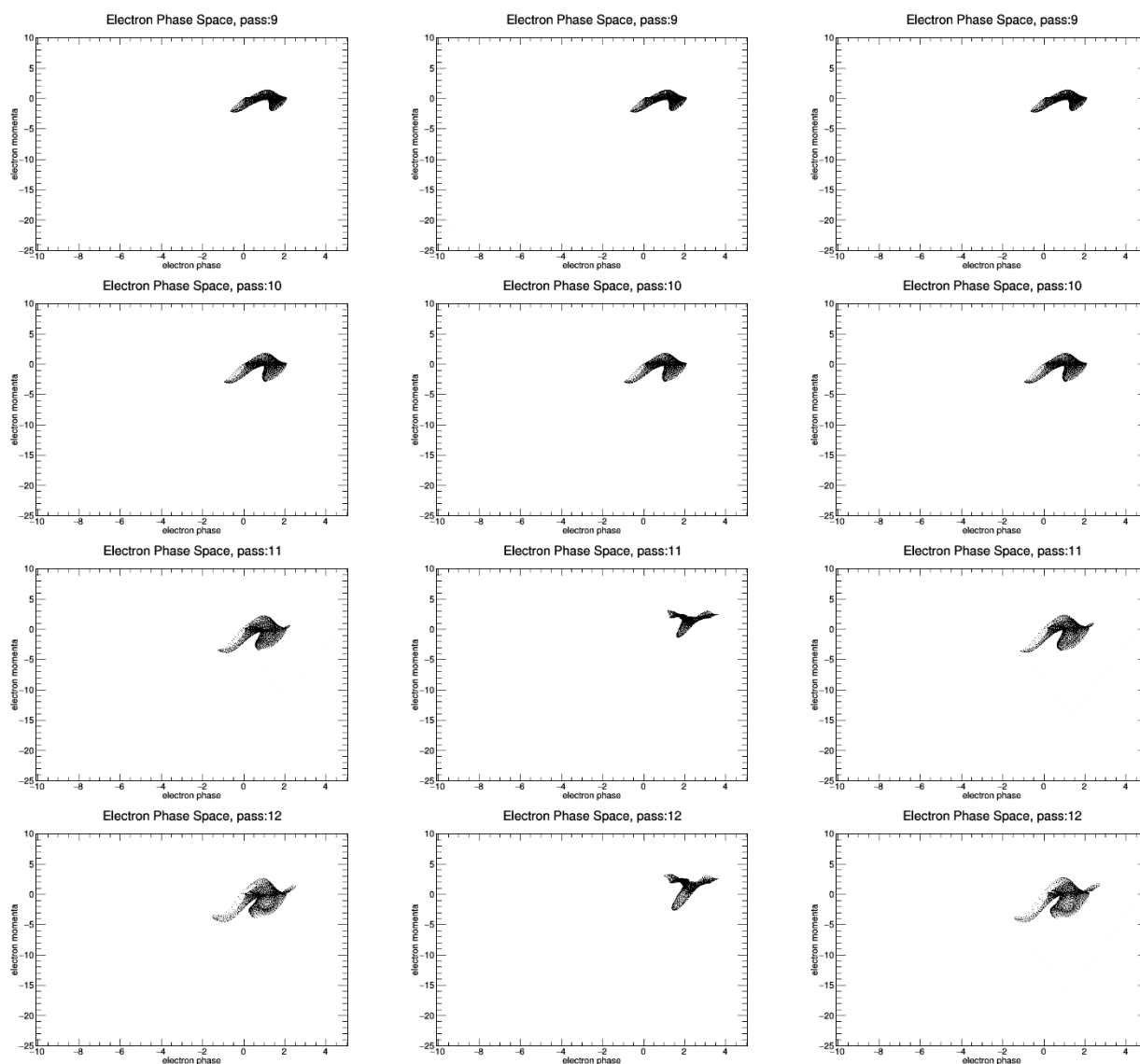


Figure 3: Evolutions of the electron distributions on the phase space. Left column shows the constant energy case, center is with the momentum of +2, right is with the momentum gradient of 0.02. First and second rows show after tenth and 11th passes which are before momentum change, third row is 12th pass just introduced the momentum change, and forth row is 13th pass.

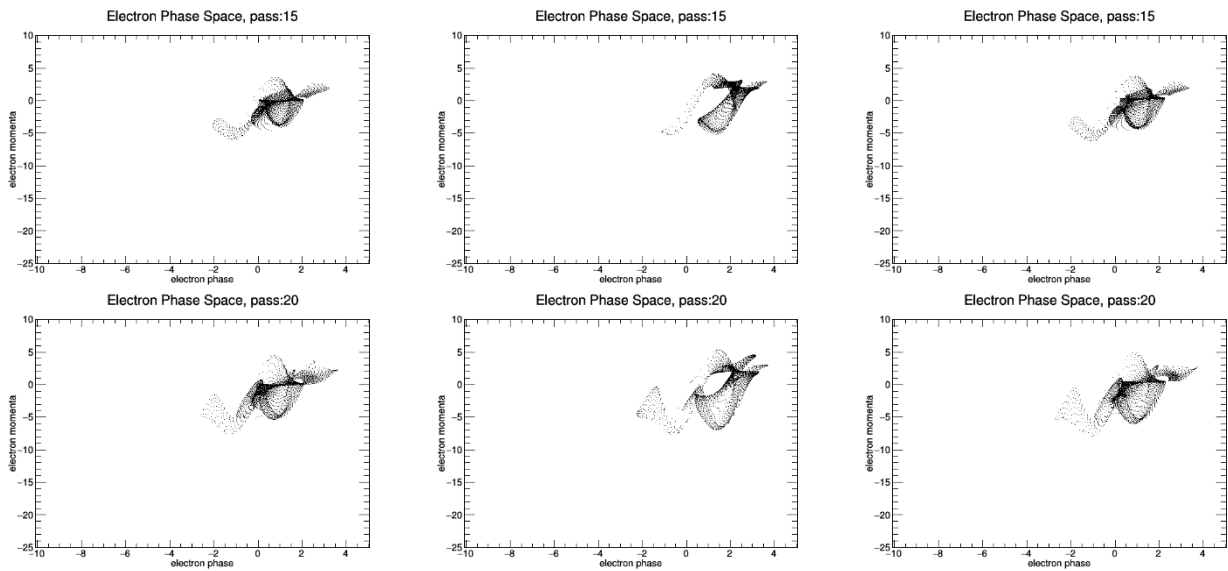


Figure 4: (continued). First row shows 16th pass and second row is 21th.

参考文献

- [1] L.R. Elias *et al.*, Phys. Rev. Lett. 36, 717 (1976), D.A.G. Deacon *et al.*, Phys. Rev. Lett. 38, 892 (1977).
- [2] K. Cohn *et al.*, "Free Electron Lasers in 2015", Proceedings of FEL 2015, Deajeon, Korea (2015).
- [3] B.W.J. McNeil *et al.*, "FEL0: A One-dimensional Time-dependent FEL Oscillator Code", Proceedings of FEL 2006, BESSY, Berlin, Germany (2006).
- [4] Currently available from <http://www.astec.stfc.ac.uk/ASTeC/Groups/Magnetics+and+Radiation+Sources+Group/Software/17464.aspx>
- [5] K. Kawase *et al.*, "High Power Operation of the THz FEL at ISIR, Osaka University", Proceedings of FEL 2014, Basel, Switzerland (2014).