

ANALYSIS OF THE GAIN SATURATION IN LEBRA FEL USING GENESIS

Y. Hayakawa*^{A)}, I. Sato^{A)}, K. Hayakawa^{A)}, T. Tanaka^{A)}, K. Yokoyama^{A)}, T. Kuwada^{A)},
A. Mori^{A)}, K. Nogami^{A)}, T. Sakai^{B)}, K. Kanno^{B)}, K. Ishiwata^{B)}, K. Nakao^{B)}

^{A)}Institute of Quantum Science, Nihon University 7-24-1 Narashinodai, Funabashi, 274-8501

^{B)}College of Science and Technology, Nihon University 7-24-1 Narashinodai, Funabashi, 274-8501

Abstract

At the Laboratory for Electron Beam Research and Application (LEBRA) of Nihon University the gain saturation of free electron laser (FEL) has been achieved. In order to analyze this phenomenon, the 3D FEL simulation code GENESIS has been modified to treat the optical cavity effect. Measured optical energy and cavity detuning curve are consistent with the results of simulation performed in the condition of 0.75 mm rms bunch length. Waveforms of the saturated FEL macropulse measured using a fast detector indicate that the FEL gain is much stable except the fluctuation of the seed light.

GENESIS による日大 FEL の利得飽和の分析

1. はじめに

日大電子線利用研究施設 (LEBRA) では 2001 年に自由電子レーザー (FEL) の first lasing に成功して以来、利用研究に供給できる品質を目指してリニアックの安定化を進めてきた^[1]。これと並行して、連続可変波長での FEL 発振を実現するために共振器ミラーを銅基板の銀コートミラーに交換し、利用研究に FEL を供給するためのビーム輸送系の整備を行ってきた^[2]。現在までに波長 885 nm から 6 μm の範囲での発振を達成しており、FEL 利得飽和と思われる状態が得られている。そのため、比較的安定に利用研究への供給が可能となっている。

LEBRA FEL はパルス駆動の共振器型 FEL であるので、利得飽和の定量的な分析を行うには、マクロパルス内の光パワーの成長をシミュレートする必要がある。しかしながら、現状の共振器型 FEL に対する研究は、主に t 長波長領域で 1 次元モデルを用いてなされている。LEBRA FEL は比較的短波長であるので、3 次元モデルを用いる方が望ましい。幸い、3D FEL コードである GENESIS が開発され、自己増幅型 (SASE) FEL の実験結果と良い一致を示している^[3]。GENESIS は主に 1-pass の計算に用いられているが、計算終了時に複素波面データを出力することができる。GENESIS にはショットノイズを扱える利点もあり、これを用いた繰り返し計算によって共振器型 FEL のシミュレーションを試みることにした。

2. GENESIS の共振器型 FEL への適用

2.1 波面変換

1-pass 計算後に出力される波面データ (バイナリデータ) には時間方向に波長単位でスライスされた複素振幅の情報が含まれている。各スライスは格子メッシュデータとなっている。GENESIS から出力された

データは発散波面であるため、次の計算ルーチンの入力データとするには、実際の共振器に対応した収束波面への変換を行う必要がある。共振器型の pass 数は数 100 回におよび、SASE と比べて計算負荷が大きいため、簡略化された変換によって現実的な計算時間に収める必要がある。ここで、

- アンジュレータの出入口が共振器鏡の焦点に近い
- 光パルスの時間方向の変化が緩やか
- 縦収差が無視できる

という仮定で、スライス毎に鏡像を利用した変換を行うことにした。ここでは、入力スライスと出力スライスの各点の共振器鏡に対する鏡像をとり、入力側の鏡像を円形開口光源として近似し、出力側の鏡像への Fraunhofer 回折を計算することにより位相情報の再構築を行っている。その際、共振器ロスに合わせて振幅を調整している。図 1 はこの波面変換の概念図である。

2.2 共振器長 detuning

共振器型 FEL では slippage での相互作用の効率を上げるために、共振器長をわずかに短くしてやる必要があり (detuning)、これによって発振の状態が大きく変わる。上記の波面変換において、波面データのスライスを detuning に相当する数だけずらしてやれば、GENESIS にこの効果を取り入れることができる。しかし、波長単位でスライスされているため、波長の整

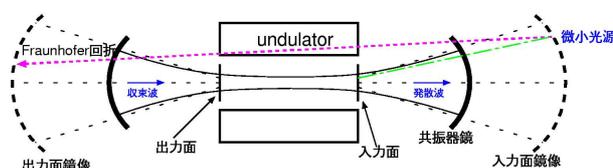


図 1: 共振器による波面変換の概念図

*E-mail: yahayak@lebra.nihon-u.ac.jp

表 1: シミュレーションで用いたパラメータ

発振波長	2440 nm
アンジュレータ周期数	50
アンジュレータ周期長	48 mm
電子エネルギー	87 MeV
エネルギー分散	0.4 %
ピークカレント	35 A
rms バンチ長	0.75 mm
ビーム半径	0.41 mm
$\epsilon_{x,y}$ (規格化)	15π mm mrad
$\alpha_{x,y}$	1.2, 0.3
共振器長	6.718 m
Rayleigh 長	1.468 m
共振器ロス	2.5 %

数倍以外の detuning を行うことができない。そこで、分数的な方法で近似的に detuning 効果を取り入れることにした。例えば 0.2 波長分 detuning させる場合、5 往復毎に 1 スライスずらしている。計算に必要な時間を考えると実際上、離散的に計算せざるを得ないので、この方式によるデメリットは少ないと思われる。

3. シミュレーションと実験の比較

上記の波面変換を行うコードと GENESIS を組み合わせた繰り返し計算を実際に行い、共振器型 FEL のシミュレーションを試みた。計算で使用したパラメータを表 1 に示している。LEBRA FEL では偏向磁石によるバンチ圧縮によって 1 ps 以下のバンチ長の実現が示唆されており、今回は rms バンチ長として 0.075 mm ($1\sigma:0.5$ ps) を仮定している^[4]。

図 2 は共振器長が 1 波長短い条件で実行されたシミュレーションの結果である。ノイズから立ち上がり、小信号利得領域を経て飽和に達する様子やパルスの時間構造の変化がわかる。飽和状態で観測された光パルスの幅が電子ビームの幅の半分程度になっているのも、自己相関干渉計などによる測定結果と矛盾していない。また、空間プロファイルも光パワーの成長とともに Gaussian ビームに近づいていく。これらは実際の FEL の振る舞いに整合しており、今回採用した波面変換法が有効であることを示唆している。

共振器長 detuning の条件を変えて計算した結果と、実際に測定されたマクロパルスの波形を比較してみたのが図 3 である。今回測定に使用した検出器 (InSb) は増幅器の線形性があまりよくないので、単純に波形を比較して評価することはできない。しかしながら、FEL のマクロパルス幅や飽和レベルの detuning による変化がおおよそ再現できており、detuning 効果の取り入れにも大きな問題が生じていないことが示唆される。このシミュレーションが信頼できるならば、detuning が小さい状態での発振では 100 fs 程度の幅の光パルスが得られていることになるが、安定性の問題もありこの状態での測定は現状では困難である。

共振器長 detuning に対する光パワーの変化、いわゆる detuning curve を計算し、パワーメータによる実際

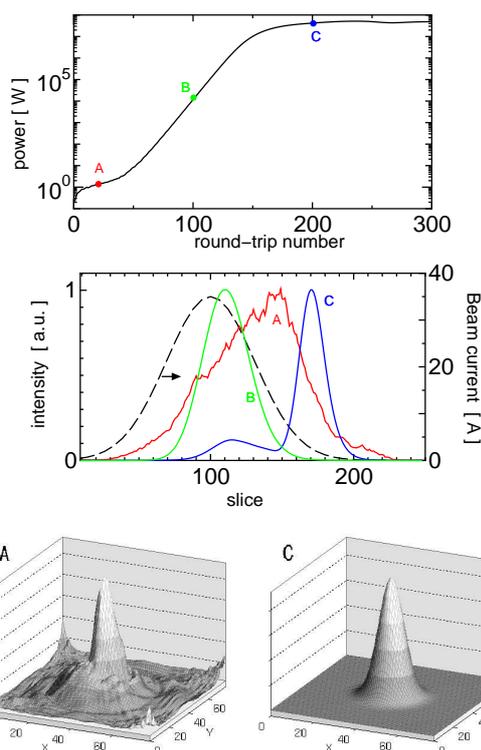


図 2: 上):シミュレーションによる FEL の成長の様子; 中):光パルス形状の変化; 下):空間プロファイルの変化

の測定値を比較したのが図 4 である。CW のシステムのように飽和レベルの比較で FEL の効率を議論するのは困難であるため、マクロパルス当りで得られる熱量で比較している。熱量の計算は、共振器鏡の穴からのアウトカップルを 0.8 %, そこからパワーメータまでの輸送系 (アルミミラー 11 枚, CaF₂ スプリッター 1 枚) の効率を 70 % として見積もっている。シミュレーションの結果は、detuning が小さいときには利得が小さく飽和レベルが高くなり、detuning を少し大きくすると利得が大きくなる反面、飽和レベルが下がるという共振器型 FEL の一般的な振る舞いが再現できている。detuning curve の形およびマクロパルス当りの熱量の比較においても、実験とシミュレーションの結果は近いものとなっている。共振器の振動といった問題を考慮すると、かなりよい一致であるといえる。

4. 高速検出器による測定

FEL 増幅の振る舞いを調べるため、高速な HgCdZnTe 赤外検出器 (プリアンプ:200 MHz) を用いて測定した。図 5 はそれで得られた波形である。パルスの立ち上がりで時間を引き伸ばして拡大すると、44.8 ns 周期で同じ波形が繰り返されているのがわかる。この周期は、LEBRA FEL の光共振器 1 往復に要する時間と一致しており、128 系列ある発振状態の違いが見えているものと思われる。この繰り返しの波形は、増幅の途中では相似形を保っており、増幅が頭打ちになると波形が崩れて収束していく。この挙動は利得飽和の達成を強く支持している。

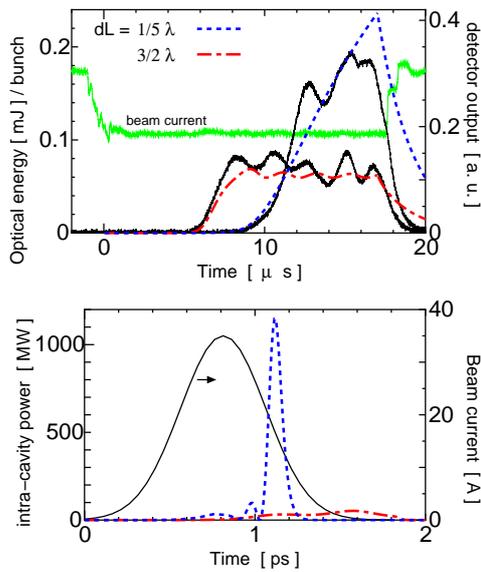


図 3: 上):測定された FEL マクロパルス波形とシミュレーション (破線) の比較; 下):detuning によるパルス形状の違い (計算)

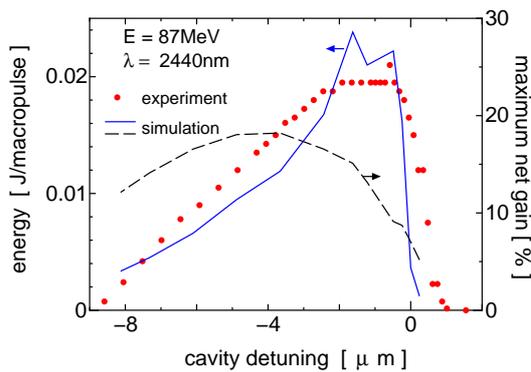


図 4: 共振器長 detuning 曲線のシミュレーションと実験結果の比較。シミュレーションで得られた小信号利得の値も破線で示してある。

また、この測定結果は小信号利得領域での FEL 利得は極めて安定であり、隣り合ったバンチの変動程度ではほとんど変化していないことを意味している。そのため、スタートアップにおける揺らぎがそのまま保存されて増幅し、利得飽和によってようやく履歴が消失することになる。利得の変動がほとんど無いということは、利得関数のピークで安定して増幅していることを示唆しており、発振波長に関してバンチ毎の違いが少ないことが予想される。このことから、共振器 FEL の増幅プロセスはショットノイズに起因する揺らぎを除けば非常に安定した現象であることが窺える。マクロパルス内での FEL の変動は電子ビーム変動と FEL 飽和領域でのシンクロトロン振動によるものがメインであると考えられ、これらは共にマイクロ秒周期の変動である。

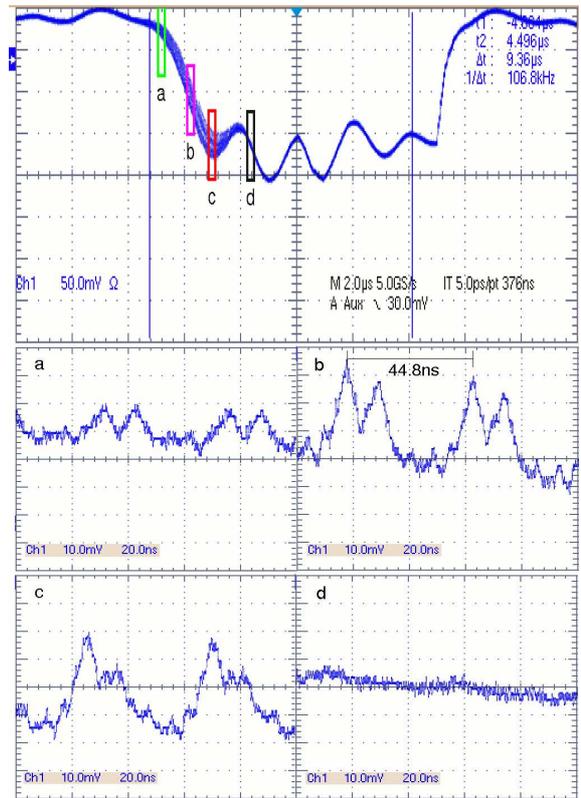


図 5: HgCdZnTe 検出器で測定された波形。

5. 結論

GENESIS と波面変換コードを組み合わせることにより、共振器型 FEL のシミュレーションが可能となり、rms バンチ長 0.075 mm という条件で計算されたマクロパルスの波形や熱量は、実験で得られたものと比較的良好に一致していた。この結果から、GENESIS は共振器型 FEL に対しても有用なシミュレータであり、定量的な分析や予測の手段として期待できる。

また、高速な検出器で得られた波形は FEL 増幅プロセスの情報をわかりやすい形で含んでおり、利得飽和の達成を示していた。

6. 謝辞

この研究は文部科学省・学術フロンティア推進事業および日本大学学術研究助成金 (H15 年度/一般 (個人)) の助成を受けている。

参考文献

- [1] Y. Hayakawa, et al., Nucl. Instrum. Methods A **483**, (2002) 29.
- [2] Y. Hayakawa et al., Proc. of 27th Linear Accelerator Meeting in Japan, (2002) 272.
- [3] S. Reiche, Nucl. Instrum. Methods A **429** (1999) 243.
- [4] K. Hayakawa et al., "Measurements of the pulse length of the FEL nonlinear harmonic radiation at LEBRA", in these proceedings.