

京都大学中赤外自由電子レーザーの引き出し効率測定

MEASUREMENT OF EXTRACTION EFFICIENCY OF KYOTO UNIVERSITY FREE ELECTRON LASER

全炳俊^{#, A)}, 紀井俊輝^{A)}, 大垣英明^{A)}, 羽島良一^{B)}

Heishun Zen^{#, A)}, Toshiteru Kii^{A)}, Hideaki Ohgaki^{A)}, Ryoichi Hajima^{B)}

^{A)} Institute of Advanced Energy, Kyoto University

^{B)} National Institutes for Quantum and Radiological Science and Technology

Abstract

An oscillator-type mid-infrared Free Electron Laser (FEL) named as KU-FEL has been developed at the Institute of Advanced Energy, Kyoto University. The extraction efficiency is one of the key parameter of FEL and determines its performance. In this study, the extraction efficiency of KU-FEL was measured by measuring the energy distribution of electron beam with and without FEL lasing at the downstream of the undulator. The measured extraction efficiency was around 5% at the highest power condition of the relative optical cavity length. This value is the highest extraction efficiency observed in an oscillator-type FEL driven by a normal conducting linac. The macro-pulse duration and bunch charge of the linac at KU-FEL are relatively smaller than other facilities. The reason why KU-FEL could achieve such high extraction efficiency was discussed and concluded as the “Dynamic Cavity Desynchronization” in a macro-pulse.

1. はじめに

京都大学エネルギー理工学研究所では、エネルギー関連研究への応用を目指し、中赤外自由電子レーザー装置(Kyoto University Free Electron Laser, KU-FEL, Fig. 1)を開発してきた[1, 2]。これまでに、波長 3.5~23 μm での発振に成功しており[3]、固体試料や薄膜のポンプ・プローブ分光[4-7]、生物試料への照射[8]等、幅広い応用実験に供されている。

それらの応用実験向け運転をこなしている内に、KU-FEL の調整が進み、発振強度が強くなると、アンジュレータ下流に設置された偏向電磁石(Fig. 1 中の B1)通過後のビームロスが大きくなっている事に気が付いた。このビームロスの量は明確に FEL の発振強度と強く相関しており、FEL 発振時に電子ビームの運動エネルギーがレーザーの光エネルギーに変換され、電子ビームのエネルギーが顕著に低下した事が原因であると示唆された。偏向電磁石 B1 の直後にはビームダンプ兼、ビーム電流波形測定用ファラデーカップ(Fig. 1 中の FC)が設置されている。この間のエネルギーアクセプタンスは少なくとも 3% 以上であり、これを越える FEL 発振由来の電子ビームエ

ネルギー低下が発生していると考えられ、高い引き出し効率が得られている事が予測された。本研究では、KU-FEL の引き出し効率を明らかにすることを目的とし、実際に引き出し効率の測定を行った。

2. 共振器型 FEL の引き出し効率とその測定

共振器型 FEL では、アンジュレータ中での電子と光との相互作用を利用して、電子を光電場により減速する事で、電子の運動エネルギーを光エネルギーへと変換する。引き出し効率とはこの時の電子の運動エネルギーがどれだけの割合で光のエネルギーとして『引き出されたか』を示す量である。FEL パワーが飽和した条件では、光共振器の1往復当たりの総エネルギー損失(Q_{loss})が電子ビームから取り出された光エネルギー(Q_{ext})と釣り合っている為、

$$Q_{loss} = Q_{ext} = \eta_{ext} Q_{beam} \quad (1)$$

と書ける。ここで η_{ext} は引き出し効率、 Q_{beam} は電子バンチの持つ総運動エネルギーである。光共振器の総エネルギー損失は光共振器外部に取り出される出力(またはアウトカップリング)損失 Q_{out} 、光共振器ミラーの反射率が100%でない事に起因する反射損失、光の回折により真空チェンバーで光の一部が蹴られたり、光共振器ミラーの内側に収まらなかったりする事に起因する回折損失に大別できる。光共振器の構成が決まると、ある波長 λ における出力損失が総損失に占める割合は一意に決まる。これを $\kappa(\lambda)$ とすると、

$$Q_{out} = \kappa(\lambda) Q_{loss} = \kappa(\lambda) \eta_{ext} Q_{beam} \quad (2)$$

となる。同じ電荷量、運動量を持つ電子ビームを用いた場合、引き出し効率が高ければ高いほど、より大きな FEL 出力が得られる。

全長に渡り、一定のアンジュレータ磁場を持つテーパー無しアンジュレータを用い、スリッページ長 L_s よりも

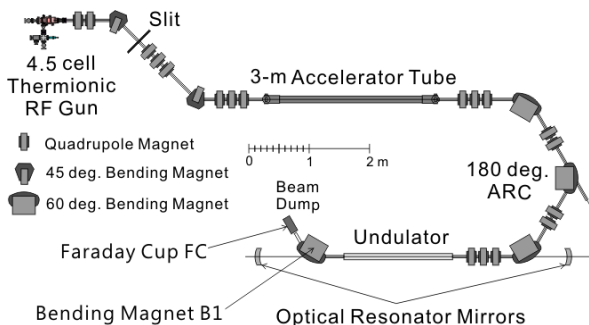


Figure 1: Schematic Layout of KU-FEL.

[#] zen@iae.kyoto-u.ac.jp

電子バンチ長 L_b の方が長い ($L_s < L_b$) 場合、古典的 FEL 理論では引き出し効率はアンジュレータの周期数 N_u に反比例し、 $\eta_{\text{ext}} \sim 1/(2N_u)$ となる事が知られている。一方、 $L_s > L_b$ の場合には、引き出し効率は“superradiant scaling law of a short-bunch FEL oscillator [9, 10]”によって決まり、 $\eta_{\text{ext}} \propto (1/\alpha_0)^{1/2}$ となる。ここで α_0 は共振器損失 ($Q_{\text{loss}}/Q_{\text{cav}}$, Q_{cav} : 光共振器内に蓄積されている光エネルギー) である。このスケールリング則によると、共振器損失が小さければ小さいほど、引き出し効率が增大する。KU-FEL においては、アンジュレータ周期数が 53 であり、波長 $10 \mu\text{m}$ におけるスリッページ長は $530 \mu\text{m}$ 、時間にして約 1.8 ps である。電子バンチ長は 1 ps-FWHM 以下であり、 $L_s > L_b$ の条件にあてはまる。因みに、 $L_s < L_b$ の条件下では、 $\eta_{\text{ext}} \sim 1\%$ となり、高い引き出し効率は望めない。

これまでに報告された各共振器 FEL 施設の引き出し効率を Table 1 にまとめる。これまでに共振器 FEL において観測された最大の引き出し効率は JAERI-FEL の 9% であり、バンチ長がスリッページ長よりも短い条件下かつ、電子バンチの繰り返し周波数と光共振器のラウンドトリップ周波数とが完全一致した完全同期条件(ゼロデチューニングと呼ぶ)下で実現されたものである[11]。この条件では、FEL ゲインが小さく、立ち上がりに数十マイクロ秒という長い時間を要する。一般に $10 \mu\text{s}$ 程度のマクロパルス長を持つ常伝導加速器ではこういった運転条件は実現が困難であり、長マクロパルス運転可能な超伝導加速器を利用した JAERI-FEL で初めて発見された[12]。常伝導加速器を用いた装置で観測された最大の引き出し効率は Los Alamos National Laboratory の 4.4% で、アンジュレータ磁場を下流に行くに従い、30%も低下させたテーパードアンジュレータを用いて得られたものである[13]。

Table 1: Reported Extraction Efficiency of FEL Facilities

Facility	η_{ext} [%]	λ [μm]	N_u	Q [pC]	Taper [%]	Cav.
JAERI [11]	9	22.4	53	510	No	SC
LANL [13]	4.4	11	-	1500	30	NC
LANL [14]	3.5	16.5	100	4500	12.5	NC
FELIX [9]	1.6	25	38	200	No	NC
JLab [15]	1	10	24	150	No	SC
CLIO [16]	0.9	9	38	1000	No	NC

Q: Bunch Charge, Cav.: Type of RF Cavity, SC: Super Conducting, NC: Normal Conducting.

Table 1 に示した全ての施設で、FEL 発振時と非発振時のアンジュレータ通過後の電子ビームの平均エネルギー差を測定する事で、引き出し効率の測定が行われている。これは、系のエネルギー保存則を利用した方法で、FEL 発振により電子が失ったエネルギーと FEL 光が受け取ったエネルギーが等価である事を利用している。引き出し効率は、元々、電子ビームの持つ運動エネルギーの内、どれだけ割合の運動エネルギーが FEL 光に移行したかを表す量である為、FEL 発振時、非発振時のアンジュレータ通過後の電子ビームの平均エネルギーをそれぞれ E_1, E_0 とすると、次のように表せられる。

$$\eta_{\text{ext}} = \frac{E_0 - E_1}{E_0} \quad (3)$$

実際に、偏向電磁石・エネルギースリット・ファラデーカップを用いて、FEL 発振時、非発振時のエネルギー分布の時間発展を測定し、マクロパルス中の各時刻において、Eq. (3)に基づいて計算を行う事で、引き出し効率のマクロパルス中での時間発展を評価する事が可能となる。

3. 実験セットアップと実験条件

Figure 2 に実験の模式図を、Fig. 3 にアンジュレータ、偏向電磁石、ファラデーカップ、アルミスリットの写真を示す。KU-FEL アンジュレータ下流の偏向電磁石により曲げられた電子ビームをアルミ製のスリットを通した後、ファラデーカップへ入射した。ファラデーカップからの信号は 50Ω 終端したオシロスコープで測定され、これによりマクロパルス中のスリットを通過した電荷量の時間発展を得る。スリットを通過する電子のエネルギーは偏向電磁石の励磁電流を変化させることで変化する。Figure 2 の様に、FEL 光共振器中にシャッターが設置されており、これを挿入する事で、他の条件を一切変更することなく、FEL の発振・非発振を切り替える事が可能である。

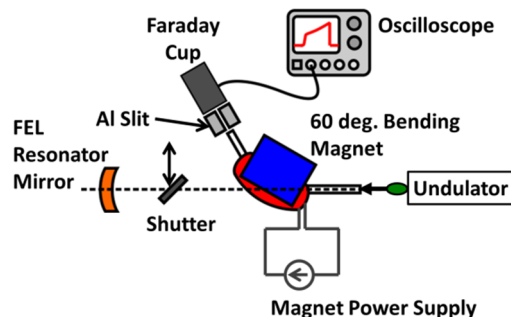


Figure 2: Schematic drawing of experimental setup.

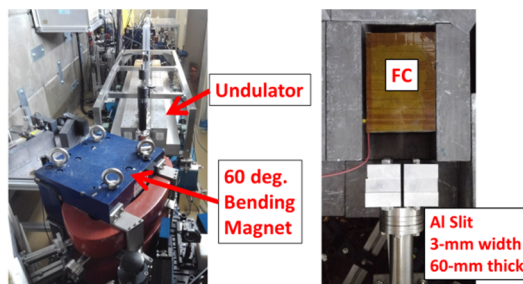


Figure 3: Photographs of devices used in this experiment.

実験条件を Table 2 にまとめる。ユーザー利用実績も多く、運転調整が上手く行っている電子ビームエネルギー 27 MeV で、波長 $11.6 \mu\text{m}$ の条件を対象とした。この際のスリッページ長は約 $615 \mu\text{m}$ ($\sim 2 \text{ ps}$) であり、電子ビームのバンチ長 ($< 1 \text{ ps}$) がスリッページ長よりも短い条件となっている。Figure 4 に今回の実験条件における KU-FEL のマクロパルス中のピーク出力と光共振器長の関係を示す。絶対共振器長を測定する装置を有していない為、横軸は最もピーク出力が大きくなる条件を基準点(ゼロ)とした相対共振器長となっている。相対共振器長が正側では FEL ピーク出力が急激に低下し、発振しなくなる

のに対し、負側では約 $70 \mu\text{m}$ に渡り、発振可能となっている。電子のアンジュレータ内での速度が光の速度よりも遅くなっている為、即ちスリッページが存在する為、この様なパターンになる。引き出し効率測定実験は相対共振器長が $0, -15, -30 \mu\text{m}$ の条件で行った。

Table 2: Experimental Condition

Macro-pulse Repetition Rate	2 Hz
Macro-pulse Duration of e-beam	~ 7 s
Expected Bunch Length	< 1 ps
Electron Beam Energy	~ 27 MeV
Electron Bunch Charge	< 50 pC
Undulator Structure	Planer, Uniform
Undulator Number of Period	53
Undulator Period Length	33 mm
Undulator K-Value	1.34
FEL Wavelength	$\sim 11.6 \mu\text{m}$
FEL Cavity Length	~ 5.0358 m
FEL Cavity Roundtrip Loss	$\sim 3\%$

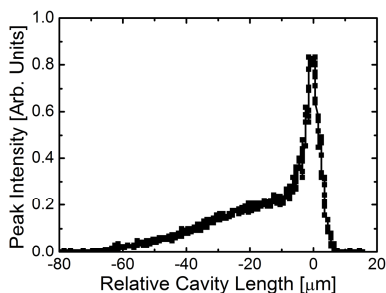


Figure 4: The FEL macro-pulse peak intensity as the function of relative length of the FEL optical cavity.

4. 実験結果

最大出力が得られる相対共振器長 $0 \mu\text{m}$ の際の典型的な実験結果を Fig. 5 に示す。縦軸は偏向電磁石の励磁電流であり、スリットを通過する電子のエネルギーと比例する。FEL 非発振時には電子ビームエネルギーはマクロパルス全域に渡りほぼ一定であるが、FEL 発振時には $3 \mu\text{s}$ 以降に顕著な電子ビームエネルギーの低下が生じている事が見てとれる。Figure 6 には Fig. 5 横軸 $6.6 \mu\text{s}$ でのエネルギー分布を示した。FEL 発振時には励磁電流 12.0 A のピークが消失し、代わりに約 10.9 A と 11.7 A にピークを持つ構造へと変化している事が分かる。 10.9 A のピークは 12.0 A に対し、約 9.2% エネルギーが低下した電子に相当する。

次に、マクロパルス内の各時刻でのエネルギー分布から、その平均エネルギーを計算し、Eq. (3) に基づき、各時刻における引き出し効率を算出した。結果を Fig. 7 に示す。相対共振器長 $0 \mu\text{m}$ の場合、時刻 $3 \mu\text{s}$ より引き出し効率が増加し始め、時刻 $6.6 \mu\text{s}$ で約 5% に到達した。これは常伝導加速器で駆動される共振器型 FEL として報告された中では、世界最高の引き出し効率である。相対共振器長を $-15 \mu\text{m}$ とした場合は、 $0 \mu\text{m}$ の場合と比べて、少し早く引き出し効率が増え始めるが、 1.2% で頭打ちとなった。また、 $-30 \mu\text{m}$ とした場合は、引き出し効率の立ち上がりが遅くなると共に、最大値も低下した。

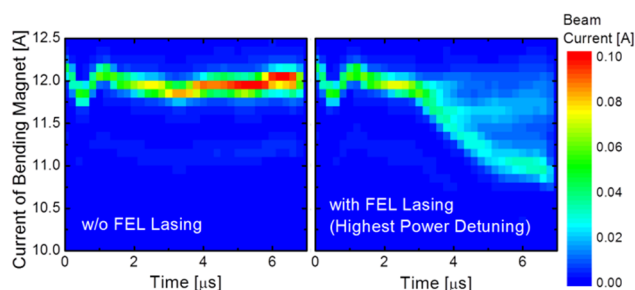


Figure 5: Electron beam energy evolutions with and without FEL lasing.

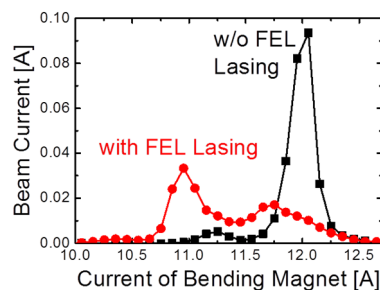


Figure 6: Energy spectrum of electron beam after the undulator with and without FEL lasing at the end of the macro-pulse.

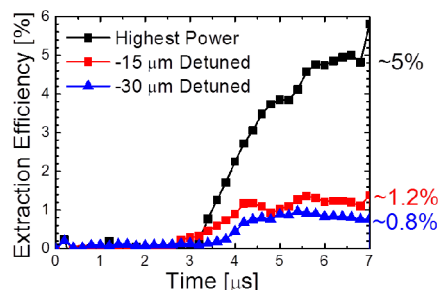


Figure 7: Temporal evolution of extraction efficiency η_{ext} under the relative cavity length of $0, -15$ and $-30 \mu\text{m}$.

5. 考察

KU-FEL のバンチ当たり電荷量は JAERI-FEL と比べ、 50 pC 以下と小さく、マクロパルス長も約 $7 \mu\text{s}$ と短い。この為、JAERI-FEL で発見された完全同期長条件での発振は困難であると考えられる。また、LANL-FEL の様に電荷量が多く、テーパードアンジュレータを使っている訳でもない。考えられる要因として、Bakker らが 1993 年に報告した Dynamic Cavity Desynchronization (DCD)[17] が挙げられる。この手法では、電子バンチの繰り返し周波数をマクロパルス中で変調する事により、マクロパルス前半では FEL のゲインが高くなる様、電子バンチの繰り返し周波数が光の往復周波数よりも少し低くなる様に調整してやり、FEL 強度が飽和に近づいたら、電子バンチの繰り返し周波数と光の往復周波数がほぼ等しくなる様な条件を作り上げる事で、早い立ち上がり高い引き出し効率を同時に実現可能である。KU-FEL では、低電力高周波系にマクロパルス中の RF 位相変調を補正する為の高速移相器が導入されており、FEL のピーク出力が出来る限り大きくなる様、微調整を行っている。この為、意

図せず、DCD法が適用されていた可能性がある。この仮説を検証する為、アンジュレータ上流に設置された BPM に誘起される電子ビーム由来の高周波信号を位相検出器で測定する事で、バンチ位相のマクロパルス中での時間発展を計測した。測定結果からマクロパルス後半に合わせて線形成分を差し引いた結果を Fig. 8 に示す。結果として、マクロパルス前半では $-1.6 \text{ deg./}\mu\text{s}$ の位相シフトが導入されており、これは -4.46 kHz の電子バンチ繰り返し周波数変調、即ちマクロパルス後半に比べ、 $7.6 \mu\text{m}$ だけ電子バンチから見た共振器長が短くなっている事に相当する。実際の実験パラメータを反映した計算機シミュレーション(計算コードについては参考文献[18]を参照)でも DSD 法を用いない場合は、最大 2%程度の引き出し効率しか得られないのに対し、DSD 法を用いる事で、5%程度の引き出し効率が達成可能との結果が得られている。これらの結果から、DSD 法により、短いマクロパルス長、低いバンチ電荷量しか持たない KU-FEL において 5%もの高い引き出し効率を得る事に成功したと考えられる。

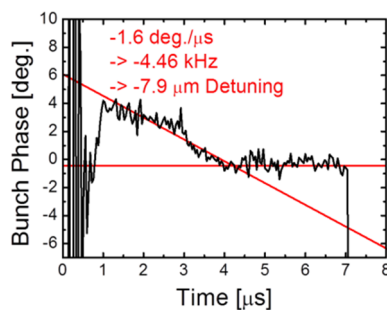


Figure 8: Temporal evolution of the measured electron bunch phase in a macro-pulse.

6. 結論

中赤外自由電子レーザー装置 KU-FEL の引き出し効率の測定を行った。結果として、最もマクロパルス中でのピーク出力が高くなる光共振器長条件下において、最大 5%の引き出し効率が得られている事が示された。これは、常伝導加速器で駆動された共振器型 FEL としては最大の引き出し効率である。バンチ当たりの電荷量が低く、マクロパルス長も短い KU-FEL において、この様な高い引き出し効率が得られた原因はバンチ長がスリッページ長よりも短く、“superradiant scaling law [9, 10]”の条件が達成されていて、尚且つ、マクロパルス中で電子バンチの繰り返し周波数に最適な変調が導入されている為であると考えられる。実際に、マクロパルス中の電子バンチ位相変化測定結果および、実験パラメータを反映させた数値シミュレーションの結果から、マクロパルス中での位相変調(DSD)がこの様に高い引き出し効率を実現できた原因であるとの結論を得た。

参考文献

[1] H. Zen *et al.*, “Development of IR-FEL Facility for Energy Science in Kyoto University”, *Infrared Physics and Technology*, 51, 2008, pp. 382-385; <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1350449507001077>

[2] H. Zen *et al.*, “Present Status and Perspectives of Long

Wavelength Free Electron Lasers at Kyoto University”, *Physics Procedia*, 84, 2016, pp. 47-53; <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1875389216303042>

[3] H. Zen *et al.*, “Present Status of Infrared FEL Facility at Kyoto University”, *Proceedings of FEL2017*, 2018, pp. 162-165; <http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/fel2017/papers/mop050.pdf>

[4] M. Kitaura *et al.*, “Visualizing Hidden Electron Trap Levels in $\text{Gd}_3\text{Al}_2\text{Ga}_3\text{O}_{12}:\text{Ce}$ Crystals Using a Mid-Infrared Free Electron Laser”, *Applied Physics Letters*, 112, 2018, 031112; <https://aip.scitation.org/doi/full/10.1063/1.5008632>

[5] M. Kagaya *et al.*, “Mode-Selective Phonon Excitation in Gallium Nitride Using Mid-Infrared Free Electron Laser”, *Japanese Journal of Applied Physics*, 56, 2017, 022701. <http://iopscience.iop.org/article/10.7567/JJAP.56.022701/meta>

[6] E. Ageev *et al.*, “Time-resolved detection of structural change in polyethylene films using mid-infrared laser pulses”, *Applied Physics Letters*, 107, 2015, 041904; <https://aip.scitation.org/doi/full/10.1063/1.4927666>

[7] K. Yoshida *et al.*, “Experimental Demonstration of Mode-Selective Phonon Excitation of 6H-SiC by a Mid-Infrared Free Electron Laser with Anti-Stokes Raman Scattering Spectroscopy”, *Applied Physics Letters*, 103, 2013, 182103; <https://aip.scitation.org/doi/10.1063/1.4827253>

[8] F. Shishikura *et al.*, “ザリガニの眼は中赤外線が見えるのか”, *日大医誌*, 75, 2016, pp. 140-141; https://www.jstage.jst.go.jp/article/numa/75/3/75_140/_article/-char/ja/

[9] N. Piovello *et al.*, “Analytical Theory of Short-Pulse Free-Electron Laser Oscillator”, *Physical Review E*, 52, 1995, pp. 5470-5486; <https://journals.aps.org/pre/pdf/10.1103/PhysRevE.52.5470>

[10] P. Chaix *et al.*, “Superradiant, Single-Supermode and Nonlinear Regimes of Short Pulse Free Electron Laser Oscillators”, *Physical Review E*, 59, 1999, pp. 1136-1151; <https://journals.aps.org/pre/pdf/10.1103/PhysRevE.59.1136>

[11] N. Nishimori *et al.*, “Systematic Measurement of Maximum Efficiencies and Detuning Lengths at the JAERI Free Electron Laser”, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A* 483, 2002, pp. 134-137; <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S016890020200298X>

[12] N. Nishimori *et al.*, “Sustained Saturation in a Free-Electron Laser Oscillator at Perfect Synchronism of an Optical Cavity”, *Physical Review Letters*, 86, 2001, pp. 5707-5710; <https://journals.aps.org/prl/pdf/10.1103/PhysRevLett.86.5707>

[13] D. W. Feldman *et al.*, “High extraction efficiency experiments with the Los Alamos Free Electron Laser”, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A*, 285, 1989, pp. 11-16; <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/016890028990418X>

[14] D. C. Nguyen *et al.*, “Regenerative Amplifier FEL”, *XX International Linac Conference*, 2000, pp. 731-735; <http://www.slac.stanford.edu/econf/C000821/TH301.pdf>

[15] G. R. Neil *et al.*, “The JLab High Power ERL Light Source”, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 557, 2006, pp. 9-15; <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168900205019674>

[16] <http://old.clio.lcp.u-psud.fr/clieng/laserMISC5.html>

PASJ2018 FROL03

- [17] R. J. Bakker *et al.*, “Dynamic Desynchronization of a Free-Electron Laser Resonator”, *Physical Review E*, 48, 1993, R3256(R);
<https://journals.aps.org/pre/pdf/10.1103/PhysRevE.48.R3256>
- [18] R. Hajima and R. Nagai, “Generation of a Self-Chirped Few-Cycle Optical Pulse in a FEL Oscillator”, *Physical Review Letters*, 91, 2003, 024801;
<https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.91.024801>