

ANALYSIS OF CHIRP-PULSE GENERATED FROM ERL-FEL AT PERFECT SYNCHRONISM

Hokuto Iijima^{1,A)}, Ryoji Nagai^{A)}, Nobuyuki Nishimori^{A)}, Ryoichi Hajima^{A)}

^{A)} Energy Recovery Linac Development Group, Japan Atomic Energy Agency
2-4 Shirakata-Shirane, Tokai, Naka, Ibaraki, 319-1195

Abstract

We report an experimental result of measuring mid-infrared FEL pulses by means of frequency-resolved optical gating (FROG). The FEL pulse was driven by an energy recovery linac (ERL) at Japan Atomic Energy Agency. The measurement was performed for perfect synchronism of FEL resonator. The spectral phase was varied as a cubic function of frequency. This chirp was not caused by dispersive materials or energy-chirp of electrons but an amplification mechanism of the FEL pulses. The measurement result was good agreement with the numerical simulation result.

完全同期長におけるERL-FELチャープパルスの解析

1. はじめに

我々は超伝導加速管を利用したエネルギー回収型の加速器(ERL)を用いて中赤外領域(波長20 μm 程度)の高出力FELの開発研究を行ってきた。これまでにマクロパルスの平均出力で1.7kWの発振を達成している^[1]。

こうした高出力の発振は完全同期長とよばれる共振器内のFEL光パルスの往復と入射電子のタイミングが一致した状態で実現される。図1は電子ビームのマクロパルスを230 μs としたときの、FEL共振器長に対する平均出力の計測結果である。

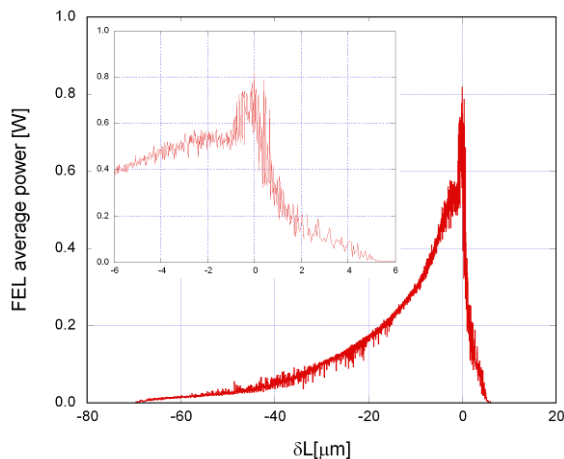


図1: FEL共振器長に対する出力の関係。 $\delta L=0\mu\text{m}$ が完全同期長の状態。 $\delta L<0$ は共振器長が短くなる方向。Insetは $\delta L=0\mu\text{m}$ 付近を拡大したもの。

ここで δL は完全同期長からのずれを表している。この測定からも明らかなように $\delta L=0\mu\text{m}$ ではFELの出力が最大になる。また、 $\delta L>0$ では出力が急激に減少し、これに対し

$\delta L<0$ の側は緩やかに減少している。FELパルスの時間波形も、 δL に依存することが分かっている。 $\delta L=0\mu\text{m}$ 付近では時間幅の短いシングルパルスが出力される(superradiance)、 $\delta L<0$ では複数のパルスが発振する(spiking)。さらに共振器長が短くなると(δL が $-100\mu\text{m}$ のオーダー)光パルスは時間幅の長い1つのパルスとして出力される(single-supermode)^[2,3]。

これまで、こうしたパルス波形は倍波発生(SHG)による強度自己相関やスペクトルの計測によって確認してきた^[2]。しかしSHG自己相関やスペクトルの測定では正確なパルス波形やパルス中の位相情報が得られなかった。そこで我々はテルルからのSHGを利用した周波数分解光ゲート法(FROG)^[4]による測定装置を構築した^[5,6]。本計測実験では完全同期長付近でのパルス計測を行い、この結果とシミュレーションを比較した。

2. SHG-FROGの計測条件

構築したSHG-FROG装置の詳細は参考文献[5,6]で述べている。我々の加速器室と実験室は光路長24mの光輸送系によって結ばれている。これまでは、光輸送系での水による吸収の効果が大きく、パルス内の位相変化の議論ができなかった^[5]。今回、光輸送系の改良により真空度が $7 \times 10^{-1}\text{Pa}$ まで改善され、水の吸収の効果が無視できるようになった。

計測時の加速器のパラメータは、電子ビームエネルギー16.5MeV、バンチ幅7ps (FWHM)、マイクロパルスの繰り返し20MHz、マクロパルス幅230 μs 、繰り返しは10Hzとし、FEL共振器は完全同期長にして計測を行なった。また我々の加速器からの電子ビームはマイクロパルスの先頭から50 μs まで揺らぎが大きく、この間でFELの出力が一旦0近くまで落ちてしまい、その後再度飽和状態に達する。このためFROGによる測定は、マイクロパルスの先頭

¹ E-mail: iijima.hokuto@jaea.go.jp

から100 μ sの位置に10 μ s幅のゲートをかけて4パルスを積算した。FROG traceの計測範囲は、16ps幅の光学遅延を32分割、37.7THz幅の周波数範囲を24分割して計測した。この32 \times 24点の測定に約15分かかっている。したがって測定結果はこの間のパルスの平均を示している。FROG traceからのパルス再生時にはtraceデータを96 \times 96点に補完し、trace強度のピーク値の1%をバックグラウンドノイズとして差し引いた。

3. 測定結果

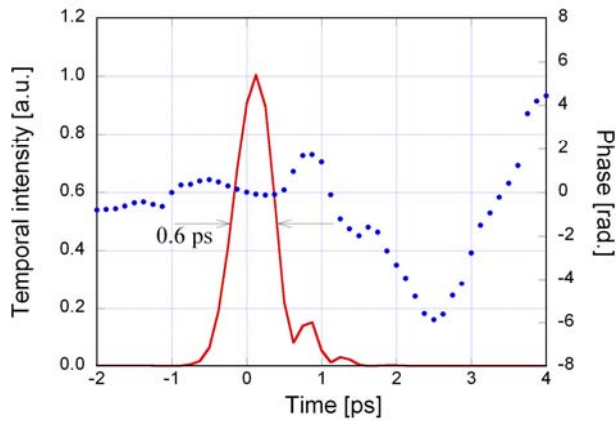


図2:測定したパルスの時間領域表示。赤線は時間波形、青の点は位相を示す。時間波形の半値幅は0.6ps。

以下に測定の一例を示す。図2は計測したFROG traceから再生したパルスの時間領域表示である。パルス再生時のFROG error^[4,6]は2%であった。図中赤線がパルスの時間波形を示し、青点は位相を示している。SHG-FROGではパルスの前後が決定できないが、ここでは後述するシミュレーションの結果に合うようにパルスの前後を決めている。この計測でのパルスの半値幅は0.6psであった。また、メインパルスの後方にサブパルスが存在しているのが確認できる。

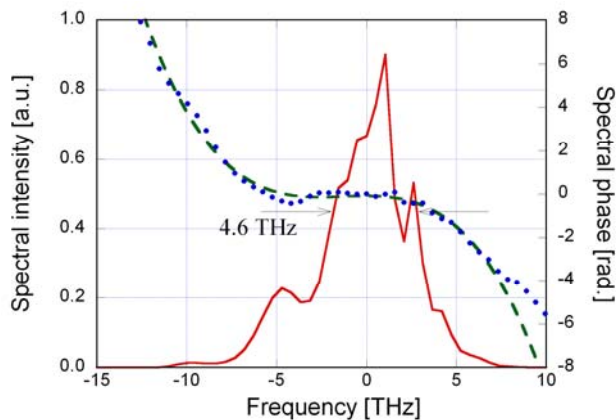


図3:測定したパルスの周波数領域表示。0THzは波長22 μ mに相当する。赤線はスペクトル、青点は位相を示す。緑の破線は位相を三次関数でfittingした結果を示している。スペクトルの半値幅は4.6THz。

図3は測定したパルスの周波数領域表示で、赤線がスペクトル、青点が位相を示している。図中の周波数0THzは波長22 μ mに相当する。この測定のスペクトル幅は半値幅で4.6THzであった。

位相の変化は、図から明らかなように周波数に対して三次関数に従うように変化している。そこで測定された位相に対して-12から7 THzの範囲で三次関数によるfittingを行なった。図中の緑の破線はその結果を示している。図3は0次項(ϕ_0)と1次の項(群遅延)が0になるようにプロットしている。そのため意味をなすのは2次(second-order-dispersion, SOD)と3次(third-order-dispersion, TOD)の項で、fittingの結果はそれぞれ、SOD= -2×10^{-3} ps²、TOD= -6×10^{-3} ps³であった。また、 $\chi^2=7 \times 10^{-2}$ であった。

4. シミュレーション

FROGによるパルス計測と比較を行なうためシミュレーションを行なった。シミュレーションはFEL共振器中における、パルスの進行方向に対する一次元のマクロ粒子モデルのシミュレーションで、電子エネルギー、FELの複素振幅、FELとアンジュレーター場が作り出すポテンシャル位相の連立微分方程式を座標に対してステップ毎に解くことで行なっている。このシミュレーションに関する詳細は文献[3]を参照してほしい。

シミュレーションの条件は、電子バンチ幅7ps(FWHM)、無次元電流 $j_0=29$ 、 $\delta L=0\mu$ m、電子エネルギー拡がり3%とした。

シミュレーションの結果の周波数領域を図4に示す。この結果はシングルショットパルスに相当する。赤線、青点が示すものはそれぞれ図3と同じで、位相の変化はおおよそ測定結果と一致するが、スペクトルが「楕」のような構造を持っている。この楕構造は出現位置と強度がショット毎にランダムである。これに対応する時間領域でのパルス表示では半値幅5psでメインパルスの後方に現れるサブパルスは実測よりもやや大きく広い時間範囲にわたっていた。

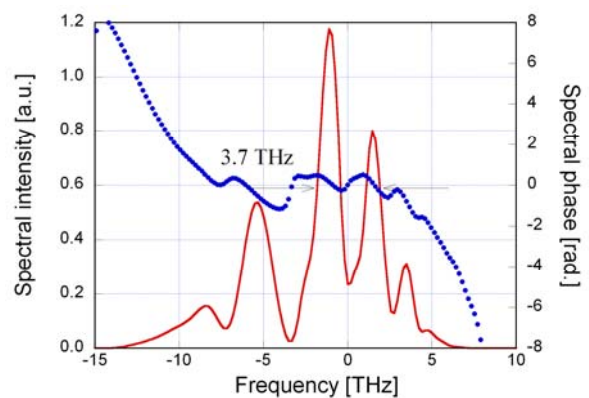


図4:シミュレーション結果(single-shot)の周波数領域表示。赤線、青点が示すものはそれぞれ図3と同じ。スペクトル幅は3.7THz。

先に述べたようにFROG traceの取得には15分程度かかっており、測定結果はこの間のパルスの重ね合わせである。そこで、パルスの重ね合わせの効果を考慮するため、同一条件における10回のシミュレーションの結果の、マクロパルス30~40 μ sの区間におけるパルスを周波数領域で平均化した。

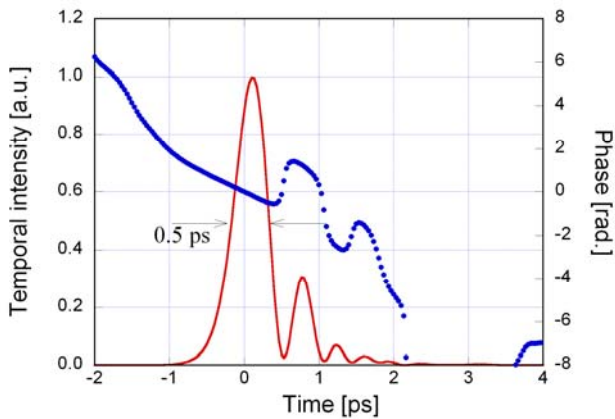


図5:シミュレーション結果(average)の時間領域表示。サブパルスの強度が弱くなり、パルス形状や位相の変化がより計測結果に近い。時間波形の半値幅は0.5ps。

図5は平均化した結果の時間領域表示である。シングルショットの結果と比べるとサブパルスの強度が弱くなり、より実測に近い結果となる。パルスの半値幅は0.5ps。

図6は図5の結果の周波数領域表示で赤線、青点、緑の破線が示すものはそれぞれ図3と同じである。スペクトルの櫛構造は平均化することで小さくなり、スペクトル形状はより計測結果に近くなる。スペクトルの半値幅は4.4THzで、位相に対するfittingの結果は $\chi^2=2 \times 10^{-2}$ 、 $SOD=-5 \times 10^{-3} \text{ ps}^2$ 、 $TOD=-7 \times 10^{-3} \text{ ps}^3$ であった。

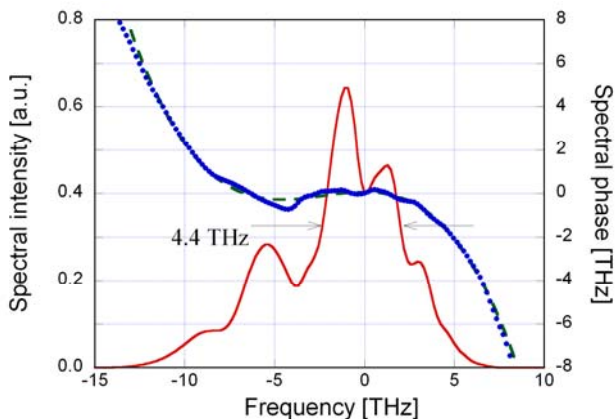


図7:シミュレーション結果の周波数領域表示。赤線、青点、緑の破線が示すものはそれぞれ図3と同じ。スペクトル幅は4.4THz。

5. パルスの位相に対する議論

測定したパルスの周波数領域における位相の変化は明確で、周波数に対して三次関数に従う変化をしている。これはFELのパルスが三次分散(チャープとしては二次)を持っていることとなり、時間領域に見られるサブパルスは、いわゆるcoherent ringingとして説明できる。

シングルショットのシミュレーションによるパルス幅の平均とばらつきはそれぞれ、時間幅が $0.48 \pm 0.05 \text{ ps}$ 、スペクトル幅が $4.5 \pm 1.3 \text{ THz}$ であった。スペクトル幅の揺らぎが大きいのは「櫛構造」によるため、詳細な解析は行っていないが、櫛の頂点を結ぶ緩やかなエンベロープで半値幅を定義すれば幅の揺らぎは小さくなると思われる。このことは時間幅のばらつきが小さいことからもうかがえる。また、fittingによる係数のばらつきは $SOD=(-4.9 \pm 1.0) \times 10^{-2}$ 、 $TOD=(-7.2 \pm 1.3) \times 10^{-3}$ であった。これら1パルスごとの揺らぎを考慮すれば、図2、3の測定結果と図5、6のシミュレーションの結果はよく一致している。

FELの物理として興味深いことは、このチャープが分散材質や電子バンチのエネルギーチャープによって引き起こされたものではなく、FELの発振過程において生じた、いわゆる「自己チャープ」ということである。実験では光輸送系に厚さ5mmのKRS-5 windowを2枚使用している。これは測定した波長域に対して分散を持つが、計算した値はおおむね測定値より1桁小さかった。また以前に行なったシミュレーションでは、完全に電子のエネルギーがそろっている状態でもFELがチャープするという結果を得ている^[7]。

6. まとめ

周波数分解光ゲート法によって完全同期長におけるERL-FELのパルス測定を行なった。計測したパルスの周波数領域における位相は三次関数に従う変化をしていた。この結果はシミュレーションによる結果とよく一致した。このパルスの位相変化はFEL発振過程において生じる自己チャープである。

なお本研究は一部、科学研究費補助金(若手(B))18740265の援助を受けた。

参考文献

- [1] N. Nishimori, et al., Nucl. Instrum. and Meth. A, 475 (2001) 266
- [2] R. Nagai, et al., Nucl. Instrum. and Meth. A, 483 (2002) 129
- [3] R. Hajima, et al., Nucl. Instrum. and Meth. A, 475 (2001) 270
- [4] R. Trebino, et al., Rev. Sci. Instrum., 68(1997)3277.
- [5] H. Iijima, et al., Proc. of the 3rd Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, 738(2006).
- [6] H. Iijima, et al., Proc. of the 4th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, 151(2007).
- [7] R. Hajima and R. Nagai, Phys. Rev. Lett., 91 (2003) 024801