

レーザープラズマ航跡場入射用極短パルス線型加速器の 低電力高周波システム試験

TEST OF A LOW POWER RF SYSTEM FOR A LINAC FOR ULTRASHORT PULSED ELECTRON BEAMS INJECTION INTO LASER PLASMA WAKEFIELDS

増田剛正^{#, A, B)}, 益田伸一^{B)}, 熊谷教孝^{B)}, 大竹雄次^{B)}

Takemasa Masuda^{#, A, B)}, Shinichi Masuda^{B)}, Noritaka Kumagai^{B)}, Yuji Otake^{B)}

^{A)} SANKEN, Osaka University

^{B)} Japan Synchrotron Radiation Research Institute (JASRI)

Abstract

We have developed a C-band linac to generate ultrashort pulsed electron beams for injection into subsequent laser-plasma wakefields. The allowable pulse length of the electron beams is approximately 30 fs(rms) at a maximum even if the laser intensity for the plasma waves is reduced, and it is desirable for it to be 10 fs(rms) or less. In this paper, we report on the test results of a low-power rf system for our linac that combines of a master oscillator (MOSC), a low-level rf (LLRF) control unit, a C-band klystron driver amplifier and a master trigger unit (MTU) that we designed and developed. In the low-power rf system, the LLRF control unit receives the 5712MHz continuous wave (cw) rf signal from the MOSC, controls amplitude and phase of the pulsed output rf signal by IQ modulation. Then the 800W GaN solid-state amplifier amplifies the 1 mW rf signal with a pulse width of 2.5 μ s from the LLRF control unit to a power level capable of driving a C-band 50 MW klystron. The LLRF control unit and the klystron driver amplifier are activated by 30 Hz trigger signals generated by the MTU which are synchronized with both the 79.3 MHz reference signal from the MOSC and the 60Hz commercial ac power. We measured the 850 W output signal with a pulse width of 2.5 μ s by using monitor functions of the LLRF control unit. A phase shift within a pulse flat-top without a rise time part of 1 μ s was about 1.3 degree, amplitude and phase jitter were 0.03%(rms) and 0.04 degree (rms), respectively. Temporal jitter obtained from the phase jitter measurement result is less than the allowable pulse length of 30 fs (rms).

1. はじめに

科学技術振興機構の未来社会創造事業[1]では、高強度極短パルスレーザーをガスターゲットに照射することで励起されるプラズマ波(レーザー航跡場[2, 3])が作る高い加速勾配を利用して電子を加速するレーザープラズマ電子加速法の実用化を目指して研究を進めている。レーザープラズマ加速はフェムト秒領域の極限現象であり、その詳細な物理は明確になっていない。この新たな加速法の実用化のためには、その加速特性の解明が必要である。この目的のため、本事業の実施機関の一つであった高輝度光科学研究センター(JASRI)では、既に確立された技術である高周波加速技術を用いて安定で再現性の高い極短バンチ電子ビームを生成し、それをプローブとしてプラズマ波の時間・空間位相に対して精密に入射を行なうためのCバンド線型加速器の開発を進めてきた。本加速器では、プラズマ波の横方向サイズ(~100 μ m)よりも小さく、縦方向サイズ(10 ~ 100 fs)よりも短い電子ビームを安定に生成し、プラズマ波を励起するレーザーと精密に同期して入射する必要がある。従って、許容される電子ビームのパルス長はプラズマ加速のレーザー強度を落としたとしても30 fs程度が最大であり、10 fs以下であることが望まれる。

我々はこれまでに、上記の性能を実現するための加速器の基本設計を行ない、シミュレーションによりその実現性(横方向サイズ<数10 μ m、縦方向サイズ<10 fs)を

示した[4]。入射電子ビームとプラズマ励起レーザーとの10 fs以下の同期精度を実現するための低位相ノイズのRFマスターオシレーター(MOSC)の開発を行ない、世界最高水準の性能(5712MHz信号の側波帯位相ノイズ:-80 dBc/Hz@10Hz、-150 dBc/Hz@10MHz)を有していることを示した[5, 6]。また我々は、開発したパルスモジュレータとPFN充電用インバータの大電力試験を行ない、世界最高水準の電圧安定度(PFN充電電圧の電圧ジッター:3.16 ppm)であることを示した[6]。加えて、限られた時間ではあったが、製作した光陰極高周波電子銃およびバンチャー加速管の大電力試験を行ない、パルス幅や繰り返し周期などの要求される運転条件を達成できることを示した(電子銃:入力2 MW、パルス幅2 μ s、繰り返し10 pps、バンチャー管:入力18 MW、パルス幅1 μ s、繰り返し10 ppsまで実現)[7]。

今回、高周波電力・位相制御装置(LLRF制御装置)の改良が完了し、MOSCからCバンドクライストロンを駆動するための半導体増幅器までの低電力高周波システムの組み合わせ動作試験ができるようになった。ここでは本プロジェクトで開発を行なった低電力高周波システムの構成機器と組み合わせ試験の結果について述べる。

2. 低電力高周波システム

低電力高周波システムは、基準RF信号を生成するMOSC、MOSCからの基準RF信号のパルス化と電力レベル・位相の制御を行なうLLRF制御装置、LLRF制御装置からのRFパルス信号を受けクライストロンを駆動で

[#] masuda@spring8.or.jp

きる信号レベルまで増幅する半導体増幅器、およびこれらの機器を起動するための基本繰り返しパルス信号を生成するマスタートリガーユニット(MTU)から構成される。

2.1 マスターオシレータ(MOSC)

MOSCは本線型加速器の基準RF信号(5712 MHzおよび79.3 MHz)を生成する。既に報告した通り、我々は世界最高水準の低位相ノイズ性能を有する MOSC を開発済みである[5, 6]。

2.2 高周波電力・位相制御装置(LLRF 制御装置)

LLRF 制御装置は、C バンドクライストロンを駆動するための半導体増幅器の前段に置かれ、MOSC からの5712 MHz の基準 RF 信号のパルス化、電力レベル・位相の調整を行なう機器である。本加速器で必要となるフェムト秒領域の高い安定度の実現を目指して本プロジェクトにおいて新たに開発を行なった。

開発した LLRF 制御装置は、我々のような小型の実験加速器でも使いやすいよう、19 インチラックにラックマウント可能な高さ 4U の独立ユニットとして製作した。制御装置のフロントパネルには 7 インチタッチディスプレイ付きの Raspberry Pi Raspberry Pi 3 Model B を実装し、GUI により現場での調整を行なうことができる。また遠隔からは EtherCAT で制御可能である。本装置の写真と機器構成をそれぞれ Fig. 1、Fig. 2 に示す。



Figure 1: Picture of the LLRF control unit.

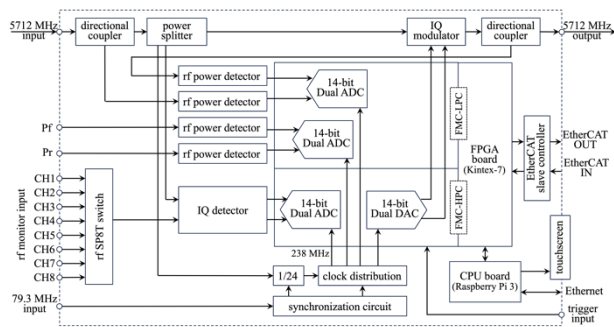


Figure 2: Block diagram of the LLRF control unit.

5712 MHz の RF 基準信号のパルス化、および電力・位相の制御は IQ 変調によって行なう。EtherCAT 経由で渡される電力と位相の波形データをもとに、238 MHz クロックで動作する 2 チャンネルの 14bit DAC 出力が IQ 変調器に渡されることで出力パルス波形の制御が行なわれる。

一方、モニターポートとして、4 チャンネルの電力検出ポート(5712 MHz 基準信号の入出力電力、クライストロン

出力の進行波・反射波電力)と 8 チャンネルの電力・位相モニターポートが用意されている。前者は 238 MHz クロックで動作する 4 チャンネルの 14bit ADC によって、後者は 8 チャンネルの高速スイッチを介して IQ 検出器によって検波した後、238 MHz で動作する 2 チャンネルの 14bit ADC によって波形データとして読み込まれる。読み込まれた波形データは、最大 512 波形分内部メモリ上に構築されたリングバッファに溜め込まれ、EtherCAT 経由で読み出すことができる。

238 MHz のクロックは、5712 MHz 基準信号を分岐し、それを 24 分周して生成している。分周はレーザーパルス同期のために使用される 79.3 MHz クロック入力に同期して行なわれる。

単体で測定した LLRF 制御装置の出力パルスの短時間の時間ジッターは 870 fs(rms)、出力レベルの短時間ジッターは 0.13%(rms)、出力位相の短時間ジッターは 0.03 deg(rms)であった。なお、周囲温度の変化による変動を抑えるため、温度変化に感度の高いデバイスは水冷プレート上に実装している。

2.3 クライストロン駆動用半導体増幅器

前述の通り本加速器はフェムト秒領域の位相安定度が必要となるため、C バンドクライストロンを駆動するための半導体増幅器においても 10^{-4} 以上の電力安定度とそれに相当する位相安定度の実現を目指して新たに開発を行なった。

本増幅器では、前段の LLRF 制御装置からの 1 mW 程度の出力を受けて、800 W の高周波パルスを最大 60Hz の繰り返し周期で出力する。高バンドギャップ半導体である窒化ガリウム(GaN)を用いた AB 級の高周波増幅素子を採用することで、使用する半導体の数を減らし、装置の大きさや消費電力を減らしている。Figure 3 に開発した半導体増幅器の写真を示す。増幅器本体(Fig. 3 上側)は 19 インチラックにマウント可能な高さ 3U サイズに収まっている。また半導体増幅器のブロック図を Fig. 4 に示す。

目標とする高周波電力と位相の安定度を実現するために、冷却水によって温度制御された温調銅板上に増幅素子などを設置することで素子の温度安定化を図っている。また高周波出力ノイズの低減のために、半導体増幅機用の DC 電源にはドロップ方式の電源を使用している。DC 電源は本体とは切り離し、高さ 4U の別ユニット



Figure 3: Photo of the 800W solid-state amplifier for a C-band klystron. The top is an amplifier unit, and the bottom is a low-noise power supply unit.

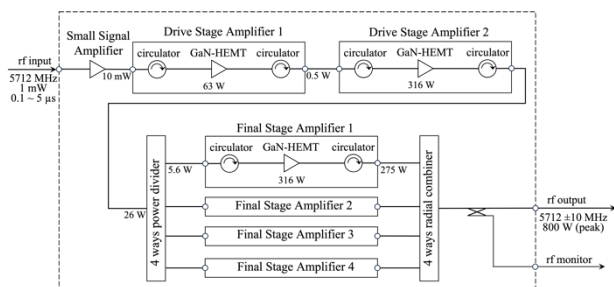


Figure 4: Block diagram of the solid-state amplifier, which comprises of a small signal amplifier, two drive-stage amplifier modules and four final-stage amplifier modules.

となっている (Fig. 3 下側)。

半導体増幅器単体で測定した結果、繰り返し周期 60 Hz で 800 W 出力時の電力ジッターは 0.9%(p-p)、位相ジッターは 0.4 degree (p-p)であった。

上位制御装置とのインターフェースは EtherCAT を使用している。

2.4 マスタートリガーユニット (MTU)

商用電源の周波数変動による電子ビームへの影響を抑えるため、商用電源の 50Hz/60Hz と MOSC からの 79.3 MHz クロックとに二重同期した、機器を起動するための基本繰り返しパルス信号を正確なタイミングで生成する装置である。詳細についてはこちらを参照のこと[8]。

3. 試験

今回行なった低電力高周波システムの動作試験の構成を Fig. 5 に示す。また実際のテストシステムの写真を Fig. 6 に示す。

半導体増幅器は RF 信号の入力よりもおよそ 5 μs 前に起動する必要がある。そのため MTU からのトリガー信号を DG535 に入力し、LLRF 制御装置へのトリガー信号に 6 μs のディレイを、半導体増幅器に送るトリガー信号に対して 1 μs のディレイを加えることでこれを実現した。LLRF 制御装置と半導体増幅器のトリガー入力信号レベルは LVDS である必要があるため、LVPECL-LVDS レベル変換器を通して LVDS レベルでトリガー信号が出力されるよう DG535 の出力信号レベルを調整した。

Figure 7 にオシロスコープ (Keysight DSOV134A) で観測した半導体増幅器からの出力 850 W のパルス高周波

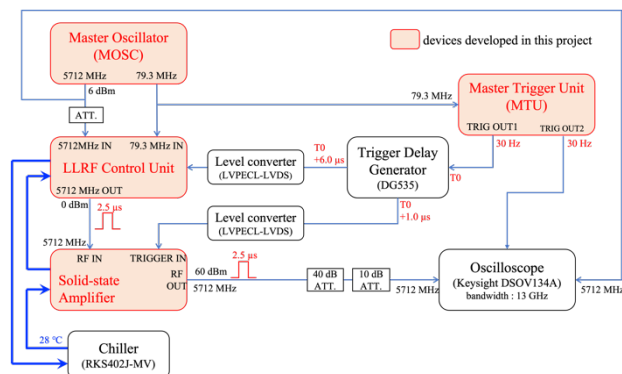


Figure 5: Configuration diagram of a performance test for the low-power rf system.

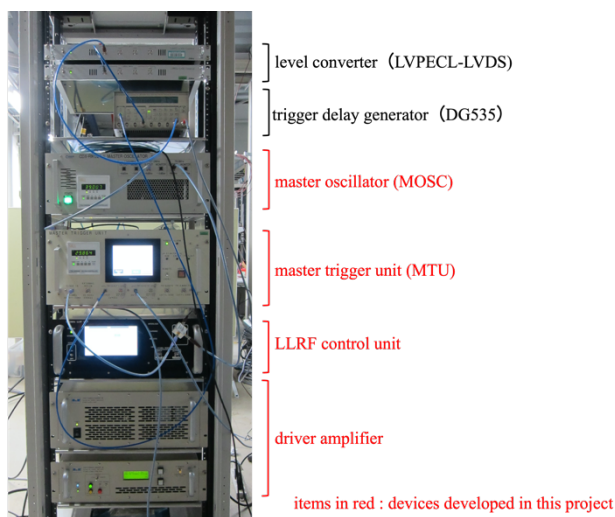


Figure 6: Photo of a performance test system for the low-power rf system.

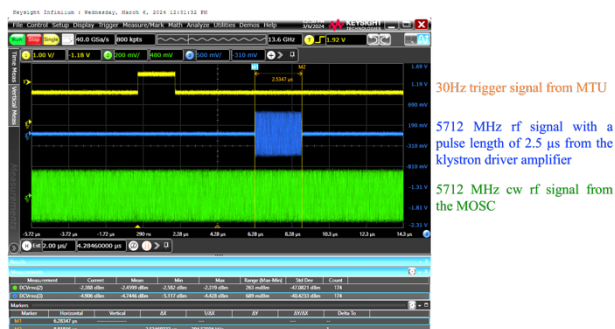


Figure 7: Waveform of an 850W pulsed rf output signal from the C-band klystron driver amplifier after passing through 50dB attenuation.

波形の様子を MOSC からの 5712 MHz 連続波と共に示す。この際、LLRF 制御装置からの RF 出力のパルス幅と出力レベルはそれぞれ 2.5 μs、0 dBm に、MTU の出力周期は 30 Hz に設定した。また LLRF 制御装置と半導体増幅器を冷却するためのチラーの出口温度は 28 度に、MOSC と MTU に内蔵されているペルチェントローラの温度はそれぞれ 39 度、33 度に設定した。特に断らない限り、以下の試験においても同じ設定である。

3.1 時間ジッター

この構成で MOSC からの 5712 MHz 信号に対する半導体増幅器からのパルス高周波の時間ジッターをオシロスコープにより測定したところ、およそ 430 fs(rms)であった (Fig. 8)。時間ジッター測定は、半導体増幅器からのパルス高周波に対する MOSC の CW 信号のばらつきを測定したものである。この 430 fs(rms)という値は使用したオシロスコープの測定限界に近い値であったと思われる。またこの値は LLRF 制御装置のパルス高周波出力信号の MOSC に対するジッター測定値 870 fs(rms)よりも良い値となっている。

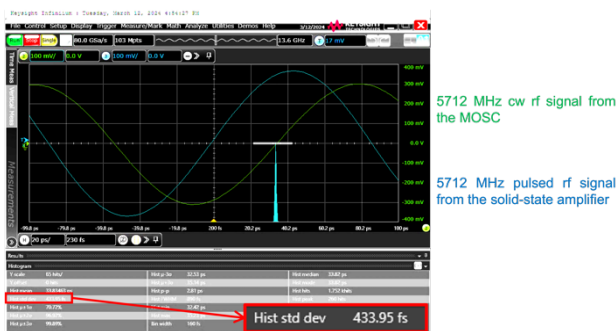


Figure 8: Jitter measurement of a pulsed rf output signal from the klystron driver amplifier relative to a 5712 MHz cw signal from the MOSC.

3.2 半導体増幅器の入出力特性

次に半導体増幅器の出力を LLRF 制御装置の IQ 検出モニターポートに接続し、LLRF 制御装置の出力レベルを変えた時の半導体増幅器からの出力レベルのモニター値の変化を測定した。その結果を Fig. 9 に示す。ある程度の線形性を持つ AB 級増幅器の入出力特性を示している。

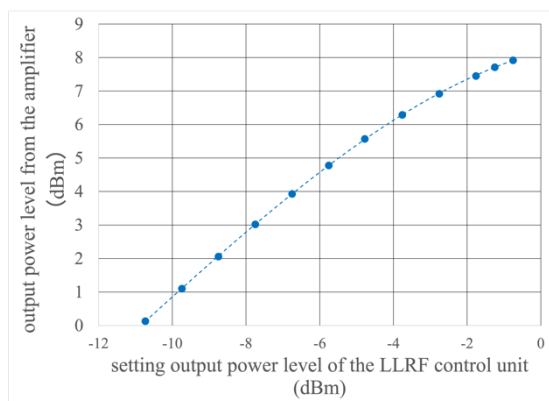


Figure 9: Correlation between the setting output power level of the LLRF control unit and the output power level from the klystron driver amplifier. 7.9 dBm on the vertical axis corresponds to 850 W output from the amplifier.

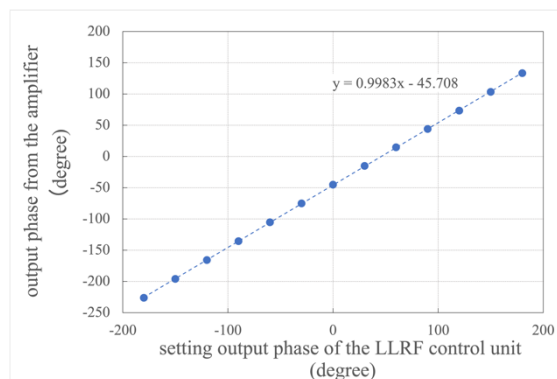


Figure 10: Correlation between the setting output phase of the LLRF control unit and phase of the output RF signal from the klystron driver amplifier. This result indicates there is very high linearity between them.

また LLRF 制御装置の出力信号の位相を変えた時の半導体増幅器からの出力位相のモニター値の変化を測定した結果を Fig. 10 に示す。半導体増幅器の入力高周波信号の位相と出力高周波信号の位相の間には非常に高い線形相関があることがわかる。

3.3 半導体増幅器出力信号のパルス内振幅・位相平坦度

続いて半導体増幅器の出力パルス高周波信号のパルス内振幅・位相平坦度を測定した。半導体増幅器からのパルス高周波を LLRF 制御装置の IQ 検出モニターポートに接続し、トリガー毎に取得される波形データを取り込み、パルス内の振幅・位相平坦度を求めた。LLRF 制御装置の IQ 検出モニターポートでは、238 MHz のクロックで動作する 2 つの 14bit ADC により、トリガー入力より指定された遅延時間経過後から(実際にはその 0.5 μ s 前から)1024 点分、約 4.3 μ s 間の振幅と位相の波形データを 8 チャンネル分取得できる。それを FPGA の内部メモリに用意されたリングバッファに各チャンネル 512 波形分蓄積できる。

取得した振幅と位相の波形を Fig. 11 に示す。それぞれの波形データは 24 点の移動平均を取っており、10 MHz のローパスフィルターを通したものと同等である。振幅がピーク値の 90%となる時間を立ち上がり時間とし (Fig. 11 では時刻 $t=0.72 \mu$ s)、立ち上がり時間から 1 μ s 後の $t=1.72 \mu$ s ~ $t=3 \mu$ s 間の振幅と位相の平坦度を測ったところ、それぞれ 0.6%、1.3 度であった。MOSC からの 5712 MHz 連続波に対する半導体増幅器高周波出力の時間ジッターが 430 fs (rms)であることを考えると、この時間ジッターによるパルス内の位相変動は 0.5×10^{-6} 度程度と極めて小さい、これは 2×10^{-4} fs 以下の変動に相当し、許容される電子ビームのパルス長に比べると問題にならない量である。

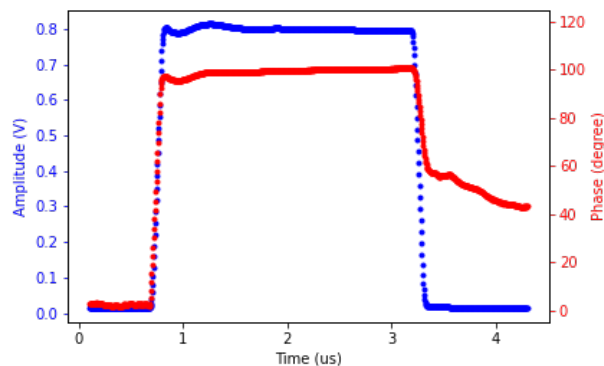


Figure 11: The blue and red solid circles indicate the amplitude and phase waveforms filtered with 24-times running average filter, respectively, of the pulsed rf output from the klystron driver amplifier.

3.4 半導体増幅器出力信号の振幅及び位相ジッター

続いて半導体増幅器の出力パルス高周波信号の短時間での振幅ジッターと位相ジッターの測定を行なった。30 Hz のトリガー毎に取得されるモニターポートの波形データを 511 波形分(およそ 17 秒間)取り込み、24 点の移

動平均を取った上で $t=2.9 \mu\text{s}$ (パルスの立ち上がりから $2.2 \mu\text{s}$ 後) の振幅データと位相データのばらつきを評価した。振幅のばらつきの様子を拡大したグラフを Fig. 12 に、位相のばらつきの様子を拡大したグラフを Fig. 13 に示す。

評価の結果、振幅ジッターは 0.03% (rms)、位相ジッターは 0.04 度 (rms) であった。この位相ジッターは 19 fs の時間ジッターに相当するので、許容される最大の電子ビームのパルス長 30 fs (rms) 以内に収まっていることがわかる。

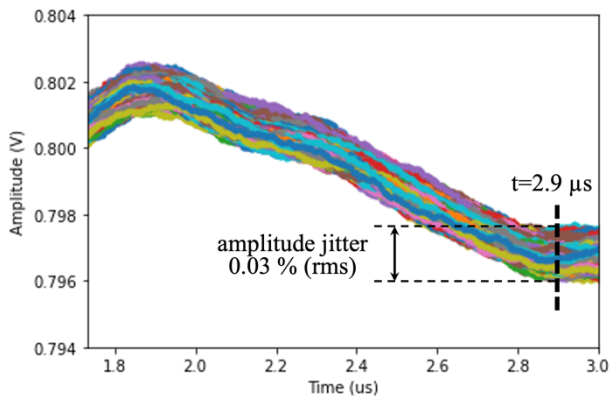


Figure 12: Amplitude jitter of the pulsed rf output from the driver amplifier. This graph represents 511 amplitude waveforms filtered with 24-times running average filter from $t=1.72 \mu\text{s}$ to $t=3.0 \mu\text{s}$. The trigger cycle was 30 Hz.

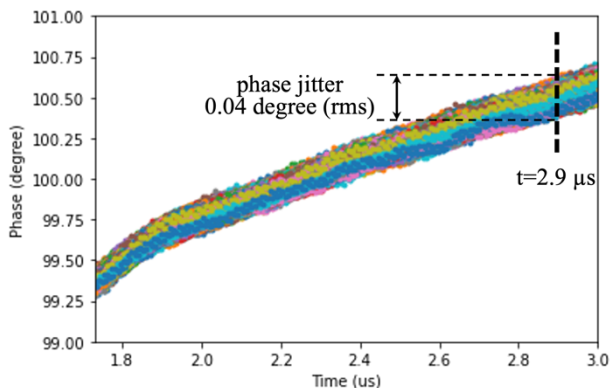


Figure 13: Phase jitter of the pulsed rf output from the driver amplifier. This graph depicts 511 phase waveforms filtered with 24-times running average filter from $t=1.72 \mu\text{s}$ to $t=3.0 \mu\text{s}$. The trigger cycle was 30 Hz.

4. まとめ

本プロジェクトで製作した MOSC、LLRF 制御装置、クライストロン駆動用半導体増幅器、MTU を組み合わせて低電力高周波システムの動作試験を行ない、期待通りの動作をしていることが確認できた。また C バンドクライ

ストロンを駆動するための低電力高周波システムとして必要とされる性能を有していることが確認できた。位相ジッターが 0.04 度 (rms) という結果から算出される時間ジッターは 19 fs 程度であり、後段のプラズマ波に追加速入射する線型加速器として許容される電子ビームの最大パルス長 $\sim 30 \text{ fs}$ (rms) よりも短く抑えられることが示された。

JASRI グループの C バンド線型加速器の研究開発は、プロジェクトのステージ 3 への移行を機に終了した。ステージ 3 での研究開発は大阪大学が引き継いでいる。これまで JASRI で開発した線型加速器コンポーネントは大阪大学・産業科学研究所に順次移設され、電子ビームを用いた創薬・医療分野への応用開発プラットフォームとして活用される予定である。

謝辞

本研究は、JST、未来社会創造事業、JPMJMI17A1 に支援を受けたものである。

LLRF 制御装置の製作にあたっては日本高周波株式会社の皆様にご多大なご協力を頂きました。また C バンドクライストロン駆動用高周波増幅器の製作にあたっては、株式会社アールアンドケーの皆様にご尽力頂きました。ここに謹んで感謝の意を表します。

本低電力高周波試験にあたっては SACLA 関係者の皆様にご協力を頂きました。特に、大島隆氏、中澤伸侯氏には測定機材をご準備頂き、測定に関するご助言を頂きました。この場を借りて心より感謝申し上げます。

参考文献

- [1] JST-Mirai Program website, <https://www.jst.go.jp/mirai/jp/>
- [2] 小方厚 他、“レーザーとプラズマと粒子ビーム”、大阪大学出版会、2012.
- [3] E. Esarey *et al.*, “Physics of laser-driven plasma-based electron accelerators”, *Rev. Mod. Phys.* 81, 2009, pp. 1229-1285.
- [4] Y. Otake *et al.*, “Basic Design of a Linac to Inject Ultra-short Pulse Electron Beams into Laser Plasma Wake Fields”, *Proc. PASJ2019*, Kyoto, Japan, Jul. 31-Aug. 3, 2019, pp. 1176-1180.
- [5] S. Masuda *et al.*, “Development of a Low Jitter Synchronization between an Ultrashort Electron Bunch Linac and a Laser Plasma Electron Accelerator”, *Proc. PASJ2020*, Online, Sep. 2-4, 2020, pp. 188-192.
- [6] S. Masuda *et al.*, “Current Status of the Development of a Linac to Inject Ultra-short Pulse Electron Beams into Laser Plasma Wakefields”, *Proc. PASJ2021*, QST-Takasaki Online, Aug. 9-12, 2021, pp. 97-101.
- [7] S. Masuda *et al.*, “High Power RF Test of a Linac to Inject Ultrashort Pulsed Electron Beams into Laser Plasma Wakefields”, *Proc. PASJ2023*, Funabashi, Japan, Aug. 29-Sep. 1, 2023, pp.632-635.
- [8] T. Masuda *et al.*, “Development of a Trigger System for a Linac to Inject Ultrashort Pulsed Electron Beams into Laser Plasma Wakefield”, *Proc. PASJ2023*, Funabashi, Japan, Aug. 29-Sep. 1, 2023, pp.209-213.