

DEVELOPMENT OF A THERMIONIC ELECTRON GUN WITH A HIGH-REPETITION-RATE GRID-PULSER (II)

Naoya Sugimoto^{A)}, Keigo Kawase^{#,A)}, Jie Shen^{A)}, Shigeru Kashiwagi^{B)}, Ryukou Kato^{A)}, Akinori Irizawa^{A)},
Yoshikazu Terasawa^{A)}, Sho Hirata^{A)}, Masaki Fujimoto^{A)}, Fumiyoshi Kamitsukasa^{A)}, Hiroki Osumi^{A)},
Akira Tokuchi^{A)}, Shoji Suemine^{A)}, Goro Isoyama^{A)}

^{A)} Institute of Scientific and Industrial Research, Osaka University
8-1 Mihogaoka, Ibaraki, Osaka, 567-0047

^{B)} Research Center for Electron Photon Science, Tohoku University
1-2-1 Mikamine, Taihaku, Sendai, Miyagi, 982-0826

Abstract

The study of an infrared free-electron laser (FEL) is being conducted by using the macropulse beam with the duration of 8 μ s generated by the L-band electron linac at the Institute of Scientific and Industrial Research, Osaka University. At present, the electron beam is generated from the electron gun with the duration of 8 μ s, and bunched into the micropulses with the bunch interval of 9.2 ns by using a sub-harmonic buncher cavity with the RF frequency of 108 MHz. On the other hand, the mirror spacing of the FEL resonator is equal to the round-trip time for the light of 48 ns, thus, there are 4 electrons and lights bunches in this time. By changing the electron bunch interval to 37 ns, it is possible to increase the charges of an electron bunch in 4 times keeping the present average beam loading. We expect, therefore, increasing the FEL gain, because it depends on the charges of an electron bunch. For that purpose, we construct a test bench of the thermionic electron gun and are developing a grid pulser which drives the electron gun to generate the electron beam with the pulse duration of 5 ns, the interval of 37 ns, and the macropulse duration of 8 μ s. Continuing with the previous meeting, we present the status of the test bench of the electron gun and the results of the electron beam generation.

高繰り返しグリッドパルサーを用いた熱電子銃の開発(II)

1. はじめに

大阪大学産業科学研究所量子ビーム科学研究施設では、Lバンド電子ライナックで発生させたパルス幅 8 μ s のマクロパルスを用いて遠赤外自由電子レーザー(FEL)の研究開発を実施している^[1,2]。現在、FELの研究のためには電子銃から 8 μ s の電子ビームをDC的に発生させ、108 MHzのサブハーモニックバンチャーRF空洞を用いて9.2 ns間隔の電子バンチを生成している。一方、FEL共振器のミラー間隔は光パルスの往復時間で37 nsであり、よってこの時間内に電子パルス、すなわち光パルスは4個存在することとなる。FELの増幅率はバンチ当たりの電荷に依存して増大するので、電子バンチ間隔を37 nsにすることでRFへの平均ビーム負荷を現状のままにバンチ電荷を4倍にすることが可能となり、結果、FELの増幅率の増大が期待できる。増幅率を増大させることにより、より長波長側でのFEL発振が期待できる。そのため、27 MHz(周期37 ns)のグリッドパルサーの開発を進めている^[3]。

この27 MHzグリッドパルサーを開発するために、電子銃テストベンチを構築し、現在100 kVまで加速電圧を印加、ビーム発生試験を実施している。本発表では、この電子銃テストベンチ現状と27 MHzグリッドパルサー、およびそれらを用いた電子ビー

ム発生試験の結果について報告する。

2. 電子銃テストベンチの現状

電子銃開発を実施するために、図1に記したような電子銃テストベンチを構築した。高圧電源はコッククロフト型で250 kVまで印加できる。Lバンド電子ライナック電子銃実機で利用されている100 kVの高圧印加は、テストベンチにおいて問題なく印加できることを確認している。グリッドパルサーや電子銃カソード用ヒーター電源、グリッドバイアス電源などは高圧デッキ上に設置され、グリッドパルサーへ入力するトリガーは接地された制御系から光ファイバーを通じて高圧デッキ上へ伝送される。

カソードはEIMAC製YU156を用いている。これは以前、Lバンド電子ライナック実機へ利用されていたもので、現在実機に取り付けられているものと同型器であるが、電子放出能は低下している。しかしながら、本研究における電子銃開発試験に利用可能な電子発生が実現できている。

ビーム伝送系は、アノード下流に磁気集束コイル、さらにその下流にコアモニターが設置されており、発生させた電子ビームの計測を実施している。電子銃および伝送系はイオンポンプにより真空が保たれており、現在真空度 1.0×10^{-5} Pa程度で試験を実施している。

kawase@sanken.osaka-u.ac.jp

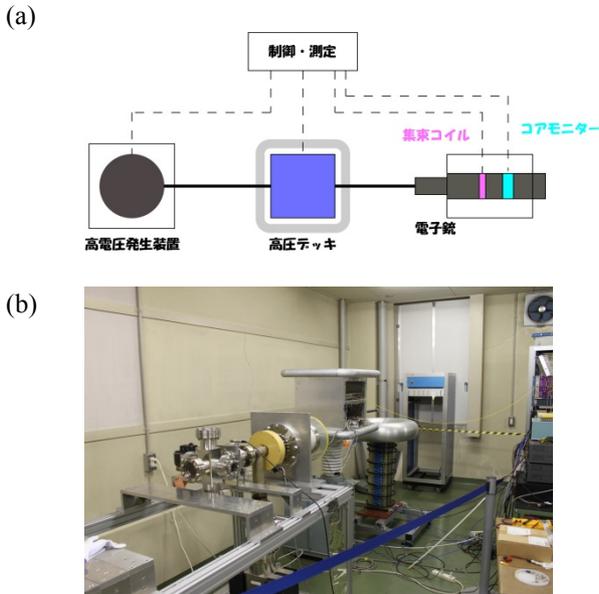


図 1 : 電子銃テストベンチの概要(a)と概観写真(b).

電子銃テストベンチの動作は、アバランシェパルサーを用いたシングルパルスビーム発生試験で評価している。このパルサーは L バンド電子ライナック実機において、シングルパルスビーム生成のために利用しているパルサーと同型器である。

シングルパルスビーム発生試験の結果を図 2 に記す。カソード - グリッド間にバイアス電圧として 60.8 V を印加し、グリッドパルサーから高圧パルス (本アバランシェパルサーの場合は -300 V 程度でパルス幅 4.5 ns) が入力されることで電子ビームを発生し、加速電圧によってアノード側へ引き出される。ヒーター電圧を調整してやることにより、加速電圧 100 kV においても空間電荷制限領域においてビーム発生が可能であることがこの評価により確認できた。

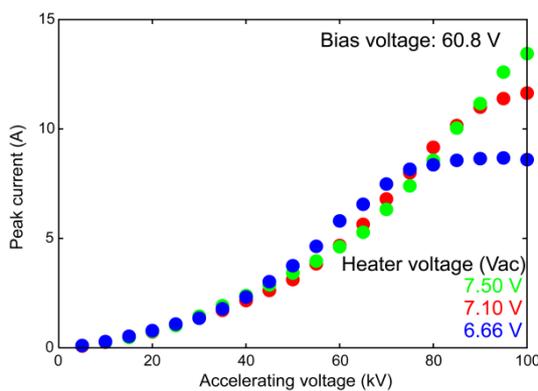


図 2 : シングルパルスビーム試験における加速電圧に対するビーム電流の変化。

3. 27 MHz グリッドパルサー

FEL の増幅率増大のために、27 MHz、パルス幅 5 ns、マクロパルス幅 8 μ s のグリッドパルサーを開発している。このグリッドパルサーを駆動するトリガーシステムの概要を図 3 に記す。1.3 GHz のサイン波をシンセサイザで発生させ、シグナルデバイダで 27 MHz の方形波信号を生成する。この信号を増幅し、RF スイッチにより 8 μ s のマクロパルス幅で切り出し、電気/光-光/電気変換器を通して高圧デッキへ送る。この信号でグリッドパルサーを駆動する。

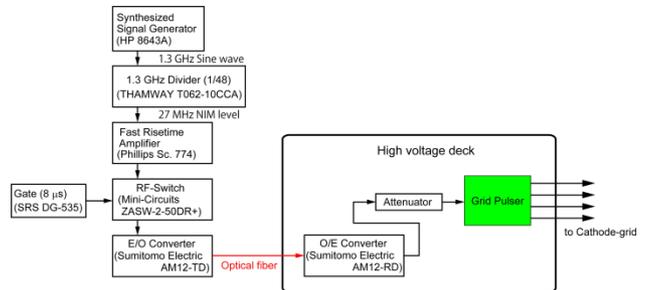


図 3 : 27 MHz, 8 μ s トリガーシステムの概要

グリッドパルサーでは、高圧デッキへ送られてきた信号の立ち上がり速度を向上するために、前段に設置した増幅器を用いてパルス整形している。電子銃を駆動するためには、比較的高い電圧のパルスを高速で発生させる必要があり、FET を最終段に用いてパルスを発生させている。FET 出力パルスの立ち上がりは入力パルスの立ち上がりでほぼ決定されるが、立ち下りは FET の入力容量で決まる。そのため、ここでは FET ゲートへトリガーよりも遅延させたパルスを入力し、ゲートを強制的に短絡することで立ち下りを高速化している (図 4)。

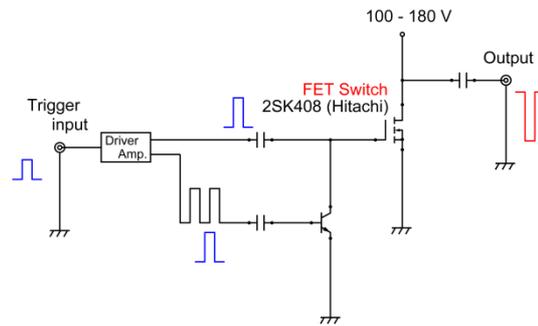


図 4 : FET グリッドパルサーの概要

本グリッドパルサーシステムで発生させた 27 MHz, 8 μ s の出力パルス波形を図 5 の(a)の記している。ここで、FET へのバイアス電圧は -160 V で駆動し、-140 V 程度の出力波形が得られている。

図 5 (b)には、グリッドパルサーにおいて FET ゲートの短絡のタイミングを変化させた時の出力波

形が記されている。これにより、パルス波高が最大かつパルス幅最小となる遅延パラメータを選択しており、パルス幅 5 ns 程度で波高-140 V のパルスが本グリッドパルサーにより得られている。

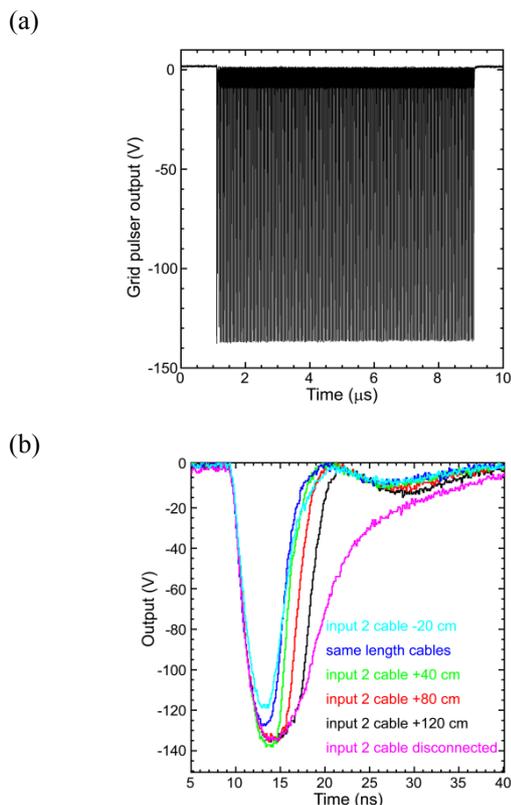


図5：27 MHz グリッドパルサーの出力(a)と FET 短絡のトリガー遅延時間を変化させた時のパルサー出力の様子(b)。

4. ビーム発生試験

上記のグリッドパルサーを高圧デッキ上へ設置し、電子ビームの発生試験を実施した。その結果、27 MHz、8 μ s の電子ビームパルスが発生できることを確認した (図6 (a))。発生させたビームマイクロパルスの幅は 4.4 ns であり、目標としていた 5 ns 以下のパルス幅を達成している (図6 (b))。これは 108 MHz サブハーモニックバンチャ空の RF の半周期以下であり、効率のよいビーム入射が実現できる。

現在のところ、ビーム伝送系の制限により、8 μ s のマクロパルスでのビーム発生試験では加速電圧が 60 kV までに制限されているが、今後伝送系を改善することにより、100 kV までの試験を実施する。

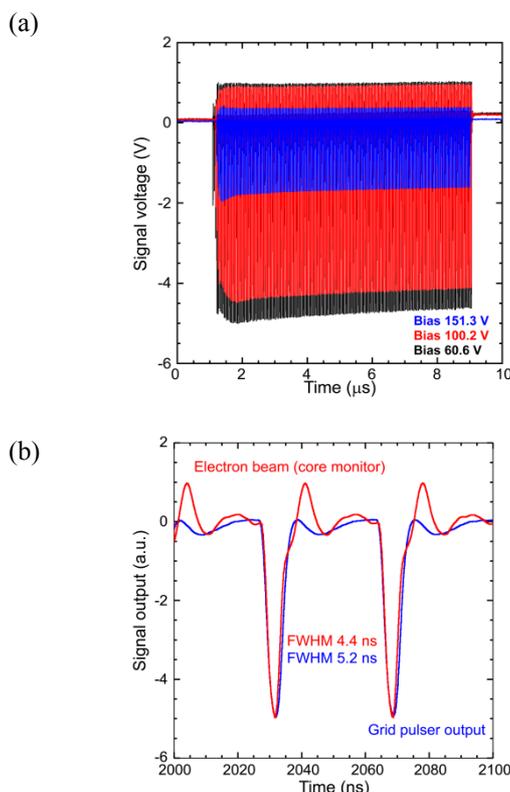
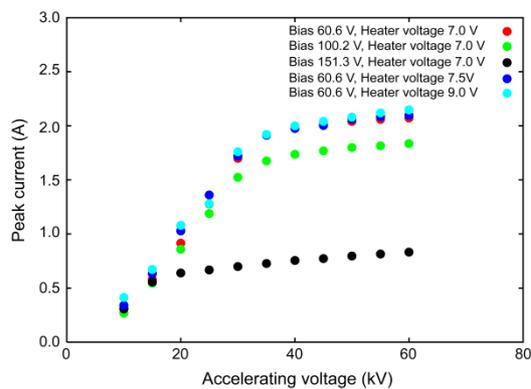


図6：8 μ s マクロパルスで発生している電子ビームのコアモニターによる波形。(a) バイアス電圧を変化させた時のビーム強度を比較。(b) グリッドパルサーの波形と電子ビームの波形の比較 (比較のために縦軸は任意)。

現在 L バンド電子ライナックにおいて 0.6 A の電子銃ビーム電流で FEL 実験を実施しており、27 MHz グリッドパルサーシステムによる発生ビーム量の目標は、この 4 倍の 2.4 A としている。本テストベンチにおける 8 μ s マクロパルスの出力電子ビーム電流の加速電圧依存性を図7に記しており、ピーク電流は 2 A 以上を達成している。現在のところ、シングルパルスビーム試験とは異なり、加速電圧 30 kV 付近から発生ビーム量の電圧飽和が見られている。カソードヒーター電圧依存性は小さいので、今後、この原因を検討し、改善する必要がある。しかしながら、本テストベンチで利用しているカソードは電子放出能が実機よりも低下していることから、本グリッドパルサーシステムを実機に搭載することで、2.4 A 以上の出力を得ることは十分に期待できる。

カソード-グリッド間のバイアス電圧に対するビーム発生量の依存性は図6 (a)および図8に記されている。図8より、現在の設定であるバイアス電圧 60 V はほぼ最適であると考えられる。



- [2] R. Kato, et al., “High power terahertz FEL at ISIR, Osaka University”, Proceedings of the 1st International Particle Accelerator Conference, Kyoto, Japan, May 23-28, 2010
- [3] N. Sugimoto, et al., “Development of a thermionic electron gun with a high-repetition-rate grid-pulser”, Proceedings of the 7th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Himeji, Aug. 4-6, 2010

図 7 : 出力電子ビーム電流の加速電圧依存性。

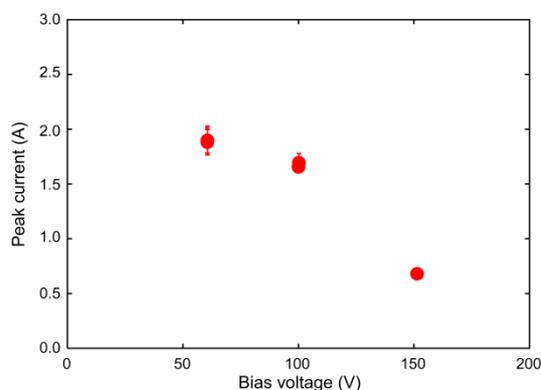


図 8 : 電子ビーム電流のバイアス電圧依存性。

4. まとめ

FEL 増幅率増大を目指して構築した加速電圧 100 kV の熱電子銃テストベンチは順調に稼働している。これを用いて、27 MHz グリッドパルサーによる 8 μ s マクロパルス電子ビーム発生試験を実施し、ミクロパルス幅 5 ns 以下の電子ビーム発生を確認した。シングルパルス試験と比較して 27 MHz マクロパルスビーム試験では加速電圧に対して早期に電圧飽和に至っており、この原因を究明することが今後の課題である。また、ビーム伝送系を改善し 100 kV でのマクロパルス試験を実施可能とするとともに、ビームプロファイル計測系などの整備を実施する予定である。

さらに L バンド電子ライナック電子銃実機への本システムの導入準備も並行して進めている。

参考文献

- [1] G. Isoyama, et al., “Development of FEL and SASE in the far-infrared region at ISIR, Osaka University”, Infrared Physics & Technology **51** (2008) 371.