

# Macropulse Electron Beam Production with a High-Repetition-Rate Grid-Pulser

Keigo Kawase <sup>#,A)</sup>, Ryukou Kato<sup>A)</sup>, Akinori Irizawa<sup>A)</sup>, Masaki Fujimoto<sup>A)</sup>, Fumoyoshi Kamitsukasa<sup>A)</sup>, Hiroki Ohsumi<sup>A)</sup>, Masaki Yaguchi<sup>A)</sup>, Akira Tokuchi<sup>A)</sup>, Shoji Suemine<sup>A)</sup>, Goro Isoyama<sup>A)</sup>

<sup>A)</sup> Institute of Scientific and Industrial Research, Osaka University, 8-1 Mihogaoka, Ibaraki, Osaka, 567-0047

## Abstract

The study of an infrared free-electron laser (FEL) is being conducting by using the macropulse electron beam with the duration of 8  $\mu\text{s}$  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 thermionic electron gun with the duration of 8  $\mu\text{s}$  in dc, and bunched into the micropulses with the bunch interval of 9.2 ns by using subharmonic-buncher cavity with the RF frequency of 108 MHz. On the other hand, the resonator length of the FEL is equal to the round-trip time for the light of 37 ns, thus, there are 4 electron and light bunches in this time. In order to increase the FEL gain, we have to increase the bunch charges of the electron beam, but the beam loading of the RF system has been already reached to the serious level. By reducing the electron bunch repetition to 27 MHz, it is possible to increase the bunch charges in 4 times keeping the present average beam loading to the RF system. Therefore, we have been developing the grid pulser system with the repetition rate of 27 MHz. Recently we have installed this system into the L-band electron linac and started the study of the 27 MHz beam operation. In this meeting, we show the results of the beam study of this grid pulser system.

## 高繰り返しグリッドパルサーを用いたマクロパルス電子ビーム発生試験

### 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、駆動周波数 1.3 GHz の L バンド電子ライナックで発生させたパルス幅 8  $\mu\text{s}$  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 の研究のためには熱電子銃から 8  $\mu\text{s}$  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 間隔の電子バンチ列を生成している。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、そのためこの時間内には電子パルス、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、バンチ間隔を 37 ns (27 MHz) にすることで、RF への平均ビーム負荷を現状のままバンチ電荷を 4 倍にすることが可能となり、結果、FEL 増幅率の増大が期待できる。これにより、回折損失がより大きくなる長波長側への FEL 発振領域拡大が期待できる。

27 MHz のバンチ列生成のために、我々は熱電子銃を駆動するグリッドパルサーの開発を実施している[3, 4]。電子ライナック実機へこのグリッドパルサーを導入するために、これまで実機を模擬したテストベンチを構築し、電子ビーム発生試験と特性評価を実施してきた。ここで 27 MHz の電子バンチが 8  $\mu\text{s}$  のマクロパルスとして安定に生成できることを確認し、今年度、開発したグリッドパルサーをライナック実機への導入し、ビーム加速と FEL 発生の

試験を開始した。

本発表では、これまでに実施した 27 MHz 電子ビームの加速実験と FEL 発生実験の概要と得られた結果を報告し、問題点を議論する。

### 2. 実験装置

#### 2.1 L バンド電子ライナックと FEL 装置

産研 L バンド電子ライナックは、大強度短パルス電子ビームを発生させるために、2 台の 108 MHz 定在波型サブハーモニックバンチャー(SHB)空洞と 1 台の 216 MHz SHB 空洞を持ち、それらに続いて 1.3 GHz の進行波型プリバンチャー、バンチャーと 3 m の加速管から構成されている (図 1)。FEL 実験においては 1 台の 108 MHz SHB 空洞と 216 MHz SHB 空洞を用いてパルス長 8  $\mu\text{s}$  で電流 0.6 A の dc 電子ビームをバンチ化と圧縮をし、さらにプリバンチャー、バンチャーで圧縮した後、加速管で主に 15 MeV まで加速された電子ビームを利用している。

加速された電子ビームは 1.92 m のアンジュレータとおよそ 5.5 m の長さの光共振器を持つ FEL ビームラインへ輸送され、ここで FEL 発振をさせている。アンジュレータのギャップは最小 30 mm から連続的に変化させることができ、エネルギー 15 MeV の電子ビームを用いて、およそ 100  $\mu\text{m}$  から 60  $\mu\text{m}$  の遠赤外領域の FEL を発生させている。

<sup>#</sup> kawase@sanken.osaka-u.ac.jp

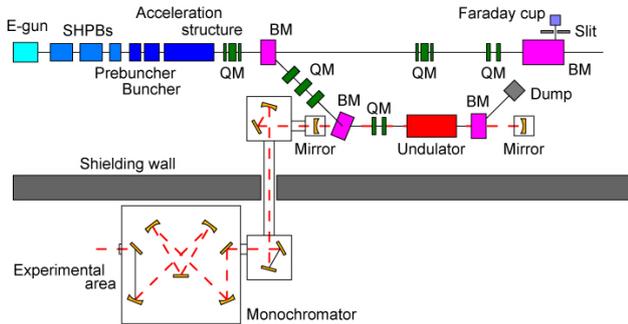


図 1 : 産研 L バンドライナックおよび FEL 装置の概要。

## 2.2 27 MHz グリッドパルサー

現在のところ、FEL 実験においては 108 MHz で 8  $\mu$ s のマクロパルスの電子ビームを用いているが、RF パワーへのビーム負荷がすでに 50%を越えており、これ以上のビーム強度の増大は難しい (図 2)。しかしながら、光共振器の間隔は繰り返し数に換算して 27 MHz である。そのため、ビームの繰り返し数を 1/4 にすることにより平均ビーム負荷を現状のまま、バンチ電荷を 4 倍に増加させることができる。これにより、FEL の増幅率の増大が期待できる。

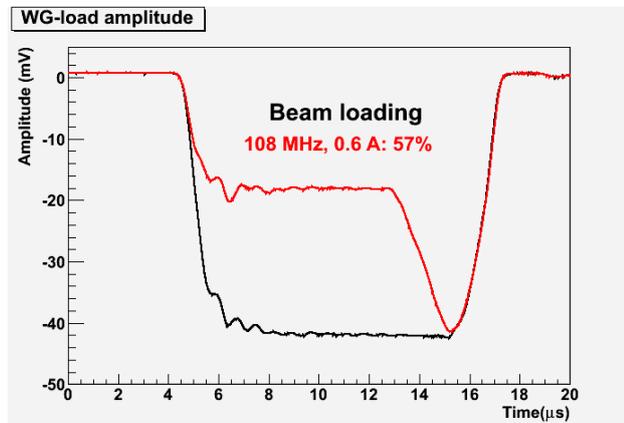


図 2 : 現在の FEL 実験における加速管 RF のビーム負荷による影響 (赤線 : ビームあり、黒線 : ビームなし)。

108 MHz の SHB 空洞で効率的に 27 MHz のビームを入射するためには、電子銃からのパルス幅が 5 ns 以下であればよい。そのために、27 MHz で電子銃を駆動するグリッドパルサーを開発している。パルサー出力段には、高速で高電圧 (定格 180 V) を利用できる FET を用いている。

単純に FET からのパルスを取り出しただけでは、立ち上がりは高速であるが、ゲートに電荷が残っているために、パルスの立ち下りは数 10 ns まで間延びしてしまい、高速なパルスを利用することはできない。そのためここでは、FET へのトリガから数

ns 遅延した信号で FET ベースに接続したトランジスタのスイッチで、ベースにたまっている電荷を強制的に短絡させる (図 3)。これにより、立ち下りの間延びを抑制した高速のパルスを生成することが可能となった。

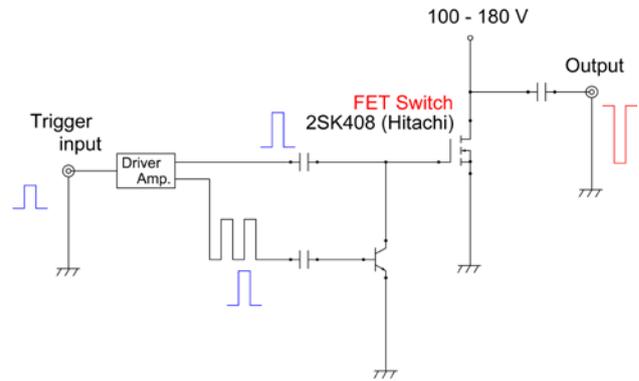


図 3 : FET 出力高速化のためのゲート短絡の概念図。

このようにして製作した高速、高電圧グリッドパルサーを図 4 に記したような信号フローチャートのように、現在利用している 8  $\mu$ s の dc ビーム用トリガシステムと共存した形で、27 MHz の電子ビーム発生用トリガシステムを今回新たに L バンド電子ライナック電子銃システムへ導入した。これまでにシステムでは平板コンデンサにより、高圧デッキへ信号を導入していたが、今回は RF 光電気信号変換器を用いて、光ファイバ接続による信号導入を採用した。これにより、簡便に高圧部との信号のやり取りが可能となった。

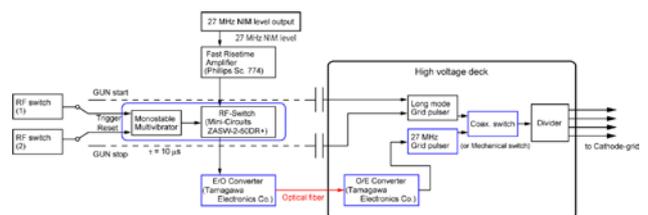


図 4 : L バンド電子ライナック電子銃実機の 27 MHz グリッドパルサーシステム信号フローの概要。

## 3. 実験結果

### 3.1 ビーム加速試験

これまでの FEL 実験では 3 台の SHB 空洞のうち、2 台を用いているが、27 MHz で電子銃を駆動する場合、使っていない空洞の影響が無視できないため、3 台すべてを利用する。これらの空洞および 1.3 GHz 系の空洞の位相と振幅を調整することにより、108 MHz において利用している電子ビームとほぼ同

等のマクロパルスエネルギースペクトルを達成できた (図5)。また RF パワーへのビーム負荷についても、入力電子ビームのピーク電流を増加させても、これまでよりも小さいあるいは同等の負荷で運転できることがわかった (図6)。

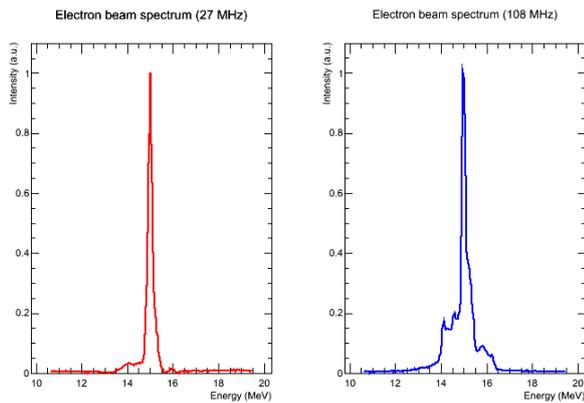


図5：27 MHz 運転と 108 MHz 運転の典型的なマクロパルス電子ビームスペクトル。

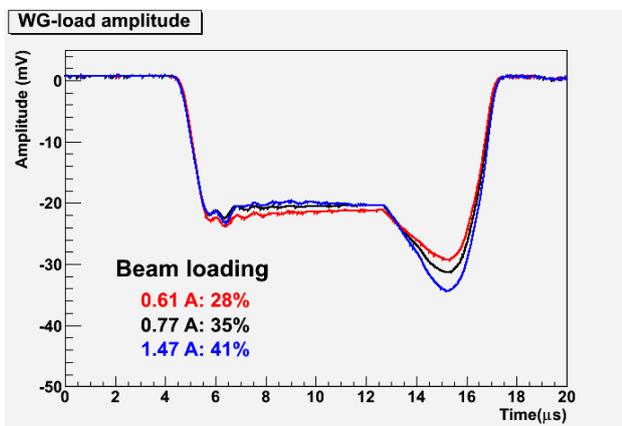


図6：27 MHz 運転時の入力ビーム電流を変化させた時の加速管 RF のビーム負荷。

### 3.2 FEL 発生試験

27 MHz 運転においても通常の FEL 実験における電子ビームと同等のエネルギースペクトルが得られたので、このビームを用いて FEL 発生の実験を実施した。

FEL の発振は確認されたが、通常運転と比較して大きな変化を確認することはできなかった。これについては、次に述べるいくつかの問題点に起因していると考えられ、今後これらの問題点を対処してから、また FEL の高増幅率の評価を実施する。

## 4. 問題点と今後の展望

### 4.1 電子銃出力におけるサテライトパルス

今回導入した 27 MHz グリッドパルサーにより電子銃を駆動させたところ、マイクロパルス間にグリッドパルサー出力とは異なるパルスが発生していることがわかった。これは以前に実施していたテストベンチにおいては見られなかった出力であり、現在のところその原因を究明中である。このサテライトパルスはグリッドパルサーの波高を小さくするとより顕著に現れてくる。

今後、RF 空洞が下流に存在することによる電子銃出力の影響の有無や、電子銃負荷とグリッドパルサー出力とのインピーダンス不整合の詳細な調査と出力波形へのその影響を詳細に調査し、安定な 27 MHz 電子ビーム発生を実現する。

### 4.2 RF パラメータの最適化

FEL 出力の大きな変化が確認できなかった原因のひとつに、RF 系の各パラメータの最適化がまだなされていなかったということも考えられる。現在のところ、SHB 系、1.3 GHz 系の各 RF システムすべての入出力特性をモニターすることができておらず、これらのモニター系を今後順次整備している予定である。関連するすべての RF 系の 27 MHz 電子ビームに対する特性を系統的に調査することで、FEL 発振のための RF パラメータの最適化を進める。

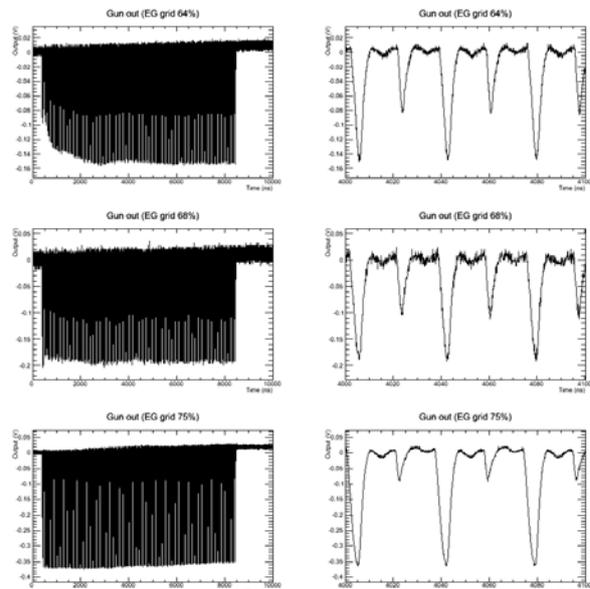


図7：27 MHz 運転時の入力ビーム電流を変化させた時の電子銃出口でのビーム波形。

## 5. まとめ

これまでに開発してきた 27 MHz グリッドパルサーを大阪大学産業科学研究所量子ビーム科学研究施設の L バンド電子ライナックの電子銃システムへ導入し、その動作を確認した。ビームの発生と加速、および FEL 発振の確認はできたが、いくつかの問題点が残っている。今後、これらの問題点を解決し、安定な FEL 発振とその特性評価と発振波長の長波長化を含めた性能向上を進めていく。

## 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.
- [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*.
- [4] N. Sugimoto, K. Kawase, et al., “Development of a thermionic electron gun with a high-repetition-rate grid-pulser (II)”, *Proceedings of the 8th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Tsukuba, Aug. 1-3, 2011*.