

27 MHz 電子ビームによる THz-FEL 発生試験

STUDY OF THz-FEL WITH 27 MHz ELECTRON BEAM OPERATION

川瀬啓悟^{#, A)}, 末峰昌二^{A)}, 加藤龍好^{A)}, 入澤明典^{A)}, 藤本将輝^{A)}, 大角寛樹^{A)}, 矢口雅貴^{A)},
船越壮亮^{A)}, 堤亮太^{A)}, 古川和弥^{A)}, 久保久美子^{A)}, 徳地明^{A)}, 磯山悟朗^{A)}
Keigo Kawase^{#, A)}, Shoji Suemine^{A)}, Ryukou Kato^{A)}, Akinori Irizawa^{A)}, Masaki Fujimoto^{A)}, Hiroki Osumi^{A)},
Masaki Yaguchi^{A)}, Sousuke Funakoshi^{A)}, Ryota Tsutsumi^{A)}, Kazuya Furukawa^{A)}, Kumiko Kubo^{A)},
Akira Tokuchi^{A)}, Goro Isoyama^{A)}

^{A)} Institute of Scientific and Industrial Research, Osaka University

Abstract

Studies of the free electron laser in the THz region are conducted by using the L-band electron linac at the Institute of Scientific and Industrial Research, Osaka University. At present, the dc electron beam is injected into the subharmonic buncher with the RF frequency of 108 MHz to make pulses to every 9.2 ns, and the beam pulses are accelerated to 15 MeV with the linac. On the other hand, the optical round trip time of the resonator of the FEL is 37 ns, which corresponds to the 27 MHz in frequency, thus, four FEL pulses are generated independently. Although the FEL gain depends on the bunch charge of the electron beam, it is difficult to increase the beam current because the beam loading at the accelerator structure has already been very large. To solve this difficulty, we are developing the 27 MHz burst operation of the electron-gun grid pulser and accelerator system. By operating the beam with 27 MHz, it is possible to increase the bunch charge four times more than the present operation. Therefore we expect to increase the FEL gain and then increase the operation range of the FEL to longer region.

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 μ s のマクロパルスを用いて THz 領域の発振型自由電子レーザー(FEL)の研究開発を実施している^[1-3]。これまでのところ、FEL の研究のためには 100 kVdc 熱電子銃から 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 間隔のマイクロパルス電子バンチ列を生成している。しかしながら、FEL 光共振器は 37 ns の光周回間隔で、そのために FEL 光パルスは 4 個が独立に成長することになる。FEL ゲインは電子ビームマイクロパルスのバンチ電荷に依存して増大するが、すでに加速管 RF パワーへのビームローディングが大きく、これ以上単純にビーム入射電流を増大させることは困難である。そこで電子ビームの入射を 37 ns 間隔(27 MHz)で駆動することにより、平均ビーム電流を現状のままバンチ電荷を 4 倍まで増大させることが可能となる。これにより、FEL ゲインの増大が期待でき、結果、回折損失が大きくなるより長波長側への FEL 発振領域の拡大が期待できる。

本研究では、27 MHz で電子銃を駆動するためにグリッドパルサーを新しく開発し、その特性とそれを用いた電子ビームの発生、加速、および FEL の発生の最適化研究を実施している^[4-6]。本発表では、開

発したグリッドパルサーの概要と電子ビーム加速試験、FEL 発生試験の現在までの結果と今後の展望を報告する。

2. 実験装置

2.1 L バンド電子ライナックと FEL 装置

大阪大学産業科学研究所量子ビーム科学研究施設にある 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 サブハーモニックバンチャー(SHB)定在波空洞と 1 台の 216 MHz の SHB 空洞、1.3 GHz の進行波プリバンチャー、バンチャー、3 m 加速管から構成されており、すべての RF 空洞はヘルムホルツコイル列の軸中心に設置されている(図 1)。これまでの FEL 実験では 2 台目の 108 MHz SHB 空洞と 216 MHz SHB 空洞を用いてパルス長 8 μ s で 0.6 A の dc ビームをバンチ化・圧縮し、後段の各 1.3 GHz RF 空洞で、圧縮・加速し、15 MeV の電子ビームを生成する。加速された電子ビームは 1.92 m の長さのウィグラーとおよそ 5.5 m の間隔の光共振器を持つ FEL ビームラインへ導入され、THz 領域の FEL を発生する。

これまでの 0.6 A 入射の 108 MHz のマイクロパルス列電子ビーム加速においては、加速管における RF のビームローディングがすでにおよそ 50%に達しており(図 2)、これ以上の入射電子ビーム電流の増大は困難である。

[#] kawase@sanken.osaka-u.ac.jp

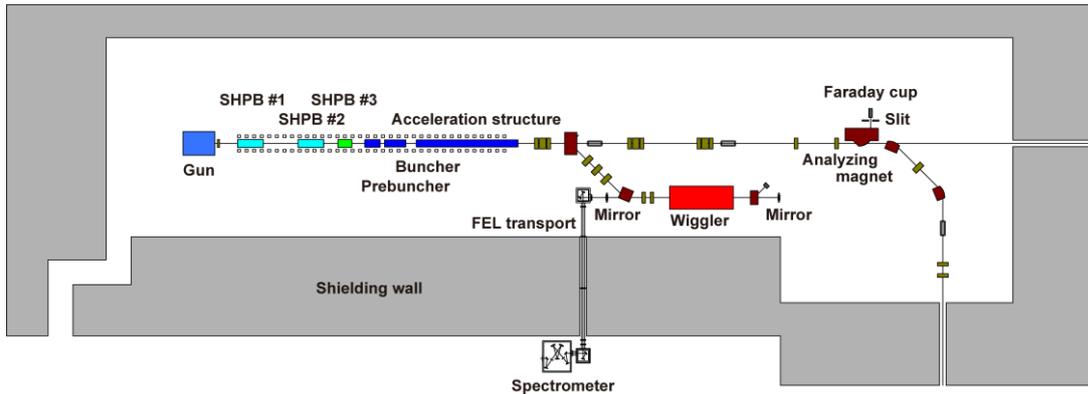


Figure 1: Schematic diagram of the L-band linac and FEL system at the ISIR, Osaka University.

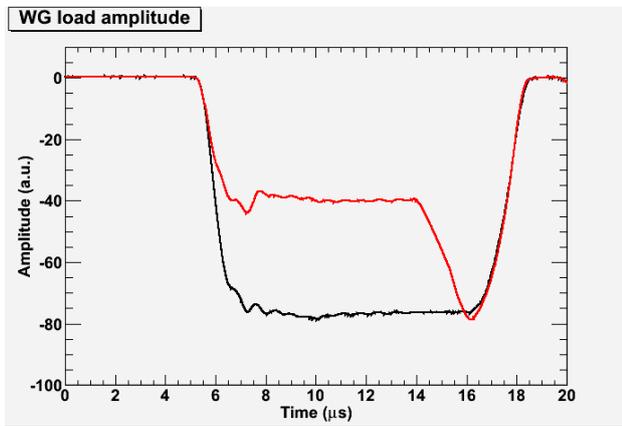


Figure 2: Beam loading at the accelerator structure, when the electron beam is operated in 108 MHz (red line). The black line shows the amplitude signal from the accelerator structure without the beam.

2.2 27 MHz 電子銃グリッドパルサー

入射電流増大の困難を克服するために、電子銃を 27 MHz で駆動するグリッドパルサーを開発した。FEL 光共振器の周回間隔は 27 MHz に相当し、これまでは 4 つの FEL パルスが独立に成長していたところを、27 MHz で電子ビームを入射することにより、単一の FEL パルスのみを成長させることとなる。これにより、加速管 RF パワーへの平均ビームローディングは同等に保ったまま、これまでよりも 4 倍の電荷をもつ電子バンチで FEL を発生させるために、より高い増幅率で FEL 発生を実施できるようになる。グリッドパルサーへの要求は、108 MHz SHB 空洞で効率的にバンチ化するために 5 ns 以下の電子ビームパルスを発生させ、最大 2.4 A の電子ビームをマイクロパルス長 8 μs にわたって一様に発生できることである。そこで本研究では、比較的高速で高電圧（パルス幅 5 ns 程度、波高 180 V 程度）なパルスを生成するために、パルサー出力段においては FET を利用している。図 3 にパルサー出力段の概要を示す。

単に FET からパルスを取り出した場合、立ち上がりは期待通り要求を満たすだけの速さを持っているが、FET ゲート段の残留電荷により、立下りの遅いパルスとなる。この問題を解決するためにここでは、FET へのトリガーパルスから適当に遅延させたパルスを生成し、そのパルスを用いて FET ゲート段を短絡させることで、立下りの高速化を実現している（図 4）。

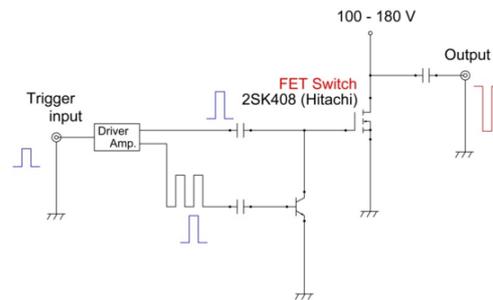


Figure 3: Schematic diagram of the grid pulser with the short circuit on the FET-gate.

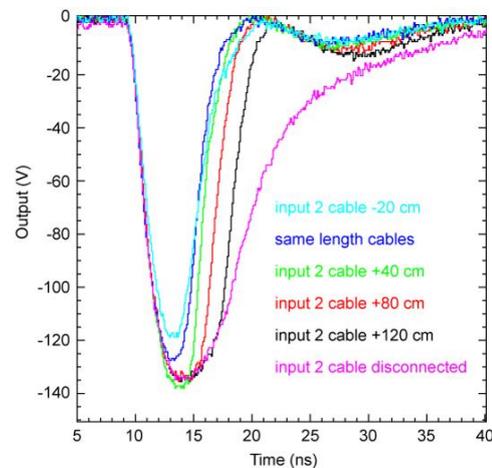


Figure 4: Results of the pulse shortening by changing the delay-line length of the short circuit.

これまでに実機を模擬した試験システムにおいて動作確認を実施した後、Lバンドライナック実機へ新しいグリッドパルサーを導入した。現在のところ、Lバンドライナック電子銃システムは 5 ns、8 ns の短パルス用パルサーと FEL 実験用の 8 μ s dc ビームパルサーが共存した状態で運用されている。そこでここでは、これまでのシステムに追加する形で 27 MHz グリッドパルサーを導入し (図 5)、実際にビーム加速および FEL 発生試験を実施している。

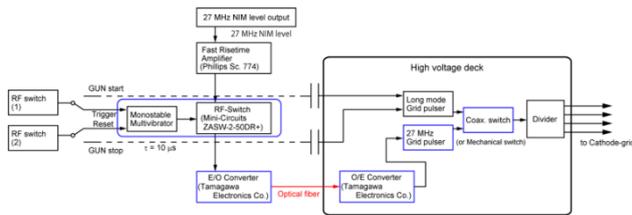


Figure 5: Schematic diagram of the 27 MHz and dc beam grid pulser system installed in the L-band linac.

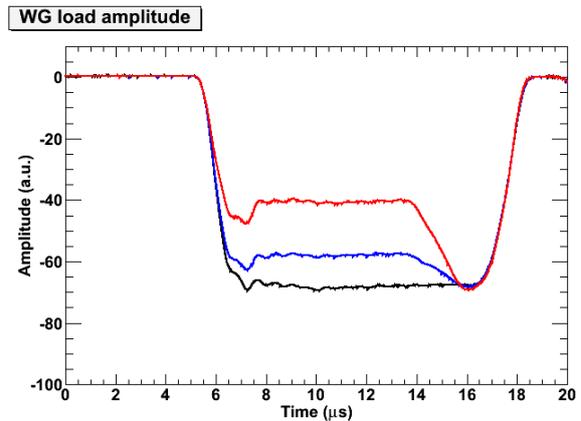


Figure 6: Beam loading at the accelerator structure, when the electron beam is operated in 27 MHz. The red line shows the amplitude signal from the accelerator with the electron beam of 2.0 A. The blue line shows of 0.9 A. The black line shows without the beam.

3. 結果

3.1 ビーム発生および加速試験

これまでの FEL 実験では 3 台の SHB 空洞のうち、後段 2 台を利用して、バンチ化・圧縮をおこなっている。この場合、入射ビームは dc であるから、RF パワーが入っていない空洞はビームに影響を与えない。しかしながら 27 MHz で 5 ns の電子ビームを入射する場合、使用していない初段の SHB 空洞をビームが励起してしまう。そのために、ここでは 3 台の SHB 空洞すべてを駆動し、ビーム加速のために最適な調整を実施しなければならない。

電子銃から 27 MHz のマイクロパルス構造を持つ 8 μ s マクロパルスビームを発生させることができ、このビームを SHB 空洞へ入射し、電子ビームを加速するために空洞パラメータを最適化し、下流の 1.3 GHz 系 RF 空洞システムへビームを導入・加速した時の加速管のビームローディングの様子を図 6 に示し、電子ビームのエネルギースペクトルを図 7 に示す。期待した通り、加速管におけるビームローディングを現状に保ったまま、電子ビームのバンチ電荷を増大させることができ、エネルギースペクトルに関してもこれまでの結果と遜色のないものが得られている。

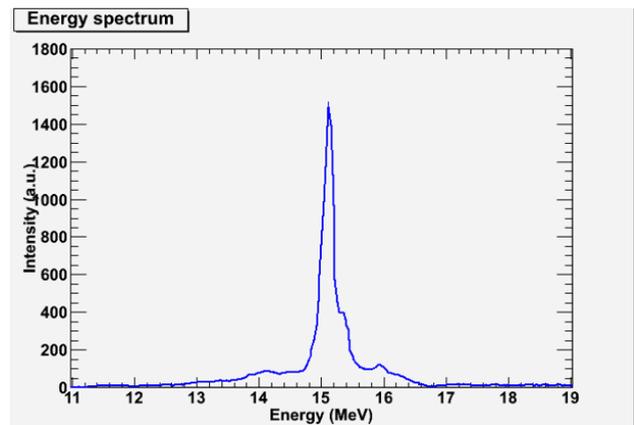


Figure 7: The electron beam spectrum in the 27 MHz operation.

3.2 FEL 発生試験

15 MeV に加速した 27 MHz 間隔の電子ビームを FEL ビームラインへ導入し、FEL の発生試験とその特性評価を実施した。その結果、これまでの 108 MHz での運転と比較して、おおよそ 2 倍程度のマクロパルスエネルギーの FEL 強度が達成された。マイクロパルスエネルギーに換算すると 8 倍の増大となる。図 8 に 27 MHz でのマクロパルスエネルギーと 108 MHz でのものについて、ウィグラーギャップを変化させた時、すなわち FEL 発振周波数を変化させた時の測定結果を示す。

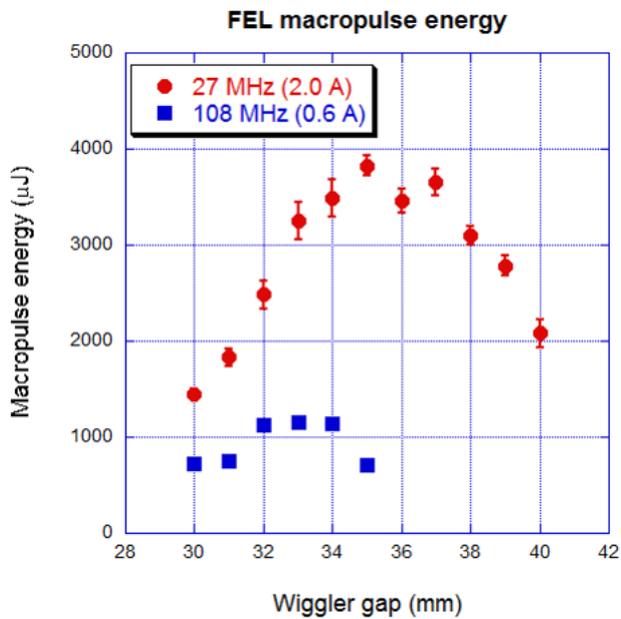


Figure 8: The macropulse energy in the 27 MHz and 108 MHz operation by changing the wiggler gap.

4. まとめ

新しく導入した 27 MHz 電子ビーム発生システムの期待通りの動作を確認した。FEL の発生については、当初の予想では、マクロパルスエネルギーの大きな増大を見込んではいなかったが、結果として大きな増大が確認された。この原因としては、FEL ゲインが増大したことによる飽和状態への早期の到達によりマクロパルス強度が増大したと考えられる。詳細については、FEL スペクトルや FEL パルスの時間発展等を解析することにより、明らかにする必要がある。

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.
- [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] K. Kawase, et al., “The high-power operation of a terahertz free-electron laser based on a normal conducting RF linac using beam conditioning”, *Nucl. Instrum. And Meth. Phys. Res. A* 726 (2013) 96.
- [4] 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.*
- [5] 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.*
- [6] K. Kawase, et al., “Macropulse Electron Beam Production with a High-Repetition-Rate Grid-Pulser”, *Proceedings of the 9th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Toyonaka, Aug. 8 – 11, 2012.*