

RECENT PROGRESS IN DEVELOPMENT OF THE FAR-INFRARED FEL AND IN BASIC STUDY OF THE SASE-FEL AT ISIR, OSAKA UNIVERSITY

Ryukou Kato^{1,A)}, Shigeru Kashiwagi^{A)}, Tetsuya Igo^{A)}, Yutaka Morio^{A)}, Shoji Suemine^{A)}, Goro Isoyama^{A)},
Shigeru Yamamoto^{B)}, Kimichika Tsuchiya^{B)}, Hiroyuki Sasaki^{B)}

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

^{B)} Institute of Materials Structure Science, KEK, 1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801

Abstract

We have been developing a far-infrared FEL since late 1980s based on the 40 MeV, L-band electron linac at the Institute of Scientific and Industrial Research (ISIR), Osaka University. The first lasing was obtained at 32~40 μm in 1994 and since then we progressively modified the FEL system and continued experiment in between to expand the wavelength region toward the longer wavelength side beyond 100 μm . We finally obtained lasing at 150 μm in 1988, which was, at that time, the longest wavelength obtained with FELs based on RF linacs. We could not obtain power saturation because the macro-pulse duration is 2 μs , though the RF pulse is 4 μs long, due to a long filling time of the acceleration tube of the L-band linac and the number of amplification times is limited to 50 only. The linac was constructed approximately 30 years ago and it was not suitable for stable and high power operation of FEL, so that we suspended the development of the FEL. In 2002, we had an opportunity to remodel the linac largely for higher stability and reproducibility of operation. We also added a new operation mode for FEL in which the macro-pulse duration can be extended to 6 μs . I took time to remodel the linac and commission it, but finally the operation mode for FEL is being commissioned and we are resuming the FEL again after the long suspension. We will report the progress and the current status of the re-commissioning of the FEL.

阪大産研における遠赤外FEL開発とSASE基礎研究の現状

1. はじめに

大阪大学産業科学研究所では、Lバンドライナックを用いた遠赤外FELの研究開発を行っている。1994年に最初の発振を確認した後[1]、1998年には当時のRFライナックベースのFELとしては最長波長の150 μm での発振に成功した[2]。しかし、Lバンド主加速管の約2 μs に及ぶフィリングタイムと限られたRFマクロパルス長のために、実際の光パルスの増幅回数が50回に制限されており、FELの出力飽和に到達することはできなかった。

2002年にライナックの高安定化と電子ビームの再現性向上を目指した改造が認められ、クライストロン及びクライストロン用モジュレータ、サブハーモニックバンチャー用RF源、冷却水装置などの機器更新とこれらを統括する計算機制御システムの導入が行われた[3]。このときのクライストロン・モジュレータの更新では、通常利用される最大出力30 MWでRFパルス長4 μs のノーマルモード以外に、25 MW、8 μs のロングパルスモードという動作モードが追加された。FEL専用のマルチバンチビームモードでは、これとSHBシステムの協調動作により9.2 ns間隔で（フィリングタイムの2 μs を除く）6 μs の連続したビームが加速できる。光パルスの増幅回数が3倍に増加されることから、FEL出力の飽和が期待される。また、Lバンド電子ライナックの改造と並行して、

我々は磁石のエッジ角による集束効果を利用した強集束ウィグラーを開発した[4]。ライナックの改造終了後にこのウィグラーはFELビームラインに設置され、共同利用が開始された単バンチビームを用いてSASEの発生実験が行なわれ、SASEの基本波のみならず2次と3次の高次高調波も観測された。

現在、Lバンド電子ライナックは短パルスモードである過渡モードと単バンチモードを共同利用に供しながら、ロングパルスモードを用いたマルチバンチビームのコミッションングを行なっている。

2. 強集束ウィグラーを用いたSASE研究

単バンチビームを用いたSASE実験では、新たにエッジフォーカスを利用した強集束ウィグラーを開発し、これを用いたSASEの特性測定を行なっている。強集束作用によりウィグラー内でのビームサイズを従来よりも小さく維持できることから、基本波の出力パワーは以前のウィグラーと比較して倍以上になっている。非線形高調波発生に起因すると考えられる2次と3次の高調波も、強集束ウィグラーによる強度増加と、ライナックの安定化の相乗効果により、以前よりも安定に観測されるようになった。今後は偏光特性等を測定することによりSASE高調波理論の検証を行なっていく。

¹ E-mail: kato@sanken.osaka-u.ac.jp

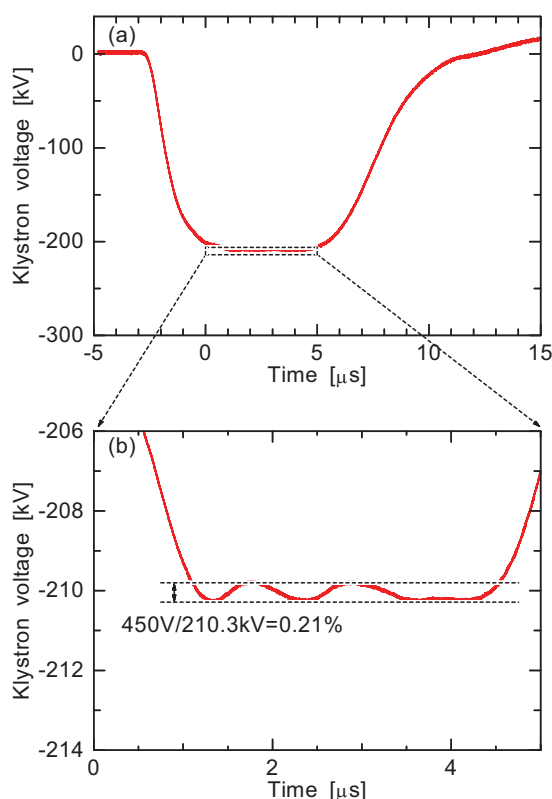


図1：クライストロン電圧波形。(a) 全体波形と(b) 平坦部の拡大。ノーマルモード時の測定で、ロングパルスモード時には後半のリップルの小さな部分が後ろに伸びていく。

3. FEL用マルチバンチビームの調整

モジュレータの高電圧源はIGBTを用いた高周波インバータ電源であり、設定電圧近傍で充電パルス幅を変えることでより安定度の高い充電を可能にしている。充電電圧のパルス毎の安定性は0.1% (peak-peak)、パルス内の電圧平坦度はpeak-peakで、0.21% @8μs (後半5.5μsでは0.12%) を達成している。ノーマルモード時の電圧波形を図1に示す。しかしながら、前述のような電圧平坦度が実現されているにもかかわらず、改修後のRFパルスでは、10%以上の振幅変動と10度以上の位相変動が確認され、ビーム調整の妨げとなっている。この変動を抑制しエネルギーの揃ったビームを実現するために、ローレベル側でのフィードフォワードによる位相振幅補正システムを開発している[5]。現在は、電圧制御移相器 (R&K社、PS-3-1300MHz) とIQ変調器 (Analogue device社、ADL5390) を用いて位相と振幅を独立に制御している[6]。このシステムを用いた位相と振幅の補正例を図2に示す。補正無しの状態では15%近かった振幅変動が0.5%以内に、13.5度あった位相変化が0.3度以内に抑えられているのがわかる。このシステムによりRF出力の位相と振幅の平坦化が実現され、長パルスビームの調整に進むことができる

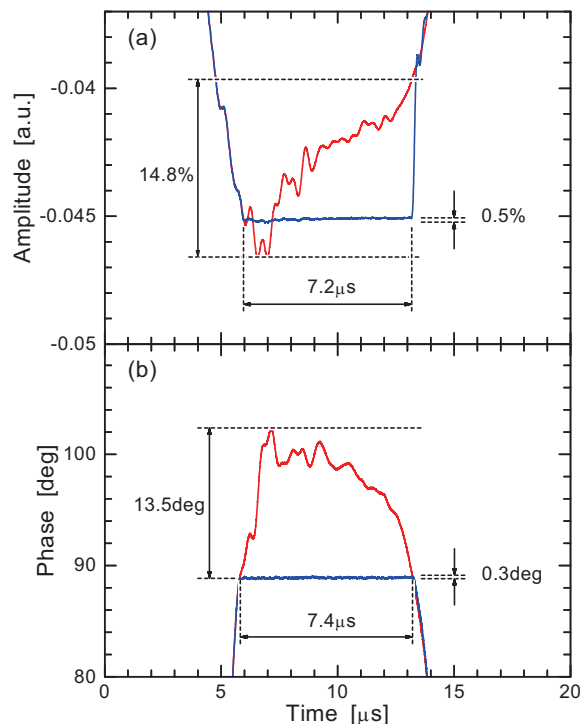


図2：クライストロンRF出力の(a) 振幅波形、(b) 位相波形。両者とも赤線は位相振幅補正前の波形、青線は補正後のもの。

ようになった。

FEL発振に必要とされるマルチバンチビームでは、108MHzと216MHzの2台のサブハーモニックバンチャー (SHB) 空洞と、1.3GHzのプリバンチャー、バンチャー、主加速管に供給されるRFの位相と振幅、それにSHB空洞のトリガータイミングの調整が必要となる。パラメータ数が多くなることによって、調整時の物理的なイメージが掴み難くなる事を考慮して、最初はSHB空洞の励振タイミングをずらして、空洞にRFパワーが入っていない状態でビーム調整を行なうことにした。

ビームパルス長を段階的に変えながら測定したエネルギースペクトルを図3 (a) に示す。ビームはFEL用マルチバンチモードからSHB空洞のパワーのみをOFFした定常モードビームで、ビームの時間幅は0.74 μs刻みで4.4 μsまで変化させている。このときのビーム電流は40 mAであった。ビーム入射のタイミングは、主加速管のフィリングタイムとRFパワーが加速管内を伝播するときの振幅変調を考慮して、RF平坦部の先頭から3 μs分だけ遅らせている。結果的にパルス長を4.4 μsまで伸ばしたときは、ビームの最後尾はRFパワーの減少領域に入りかけている。このビームのエネルギースペクトル測定はFELビームラインにある蛍光セラミック板を用いたプロファイルモニターで行なった。取得したプロファイル画像を縦方向に積算してエネルギースペクトルを評価している。横軸は運動量分析電磁石での

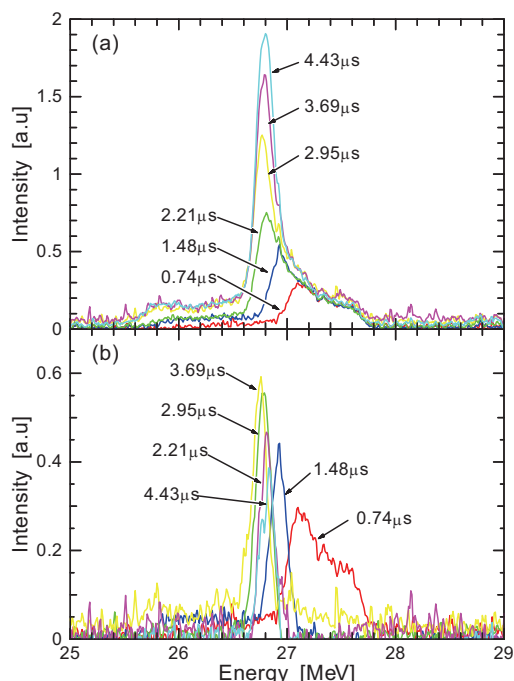


図3：蛍光スクリーンの画像から評価された長パルスビームのスペクトル。(a) パルス長を0.74~4.43 μsまで段階的に変化させたときのエネルギースペクトル。(b) 各々のスペクトルからそれよりも0.74 μs時間幅の短いスペクトルを差し引いた差分スペクトル。横軸は運動量分析電磁石での測定結果を用いて較正している。

測定結果を用いて較正し、電子のエネルギーに換算している。ビームパルス長が長くなるにしたがって、ビーム先頭の過渡的な部分から徐々に定常状態に移行しているのが理解できる。図3 (b)は (a)の各々のスペクトルからそれよりも0.74 μs時間幅の短いスペクトルを差し引いた差分スペクトルであり、0.74 μs時間間隔でスライスされたエネルギースペクトルを表している。図4はこの時間スライスエネルギースペクトルのピーク値をプロットしたもので、正(負)の誤差棒はピーク値に対してエネルギーの高い側(低い側)のHWHM幅を表している。ビームが定常状態に入った後半のエネルギー拡がりにはほぼ0.5%程度に抑えられており、ライナック改造前のFEL発振実験時に測定された時間スライスエネルギースペクトルと比較して半分以下に改善されている。

4. 結論とまとめ

位相振幅補正システムの実現により、これまで問題となっていた振幅と位相の変動は十分無視しえるところまで抑えられるようになった。これにより理想的な定常状態ビームを実現するところまでビーム調整を進めることができた。次のステップはSHB空洞2台を含めたマルチバンチビームの調整となり、

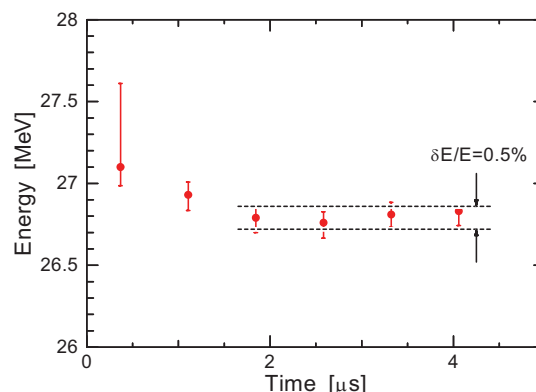


図4：ビームパルス内でのエネルギー変化。赤丸は0.74 μs時間間隔毎のエネルギースペクトルのピーク値で、誤差棒は各々のHWHMを示している。ビームが定常状態に入った後半のエネルギー拡がりにはほぼ0.5%程度である。

さらにFELの再発振と出力飽和に向けた開発研究の再開へとつながる。

この位相振幅補正の手法は単に位相と振幅の平坦部を実現できるだけではない。フィリングタイムにより従来FEL発振に寄与することができなかった電子ビーム先頭の過渡的部分も、適切な振幅スロープを設けることによってエネルギーが補正され、6 μsの電子ビームパルス全体を発振に寄与するように調整することができるようになると期待される。

謝辞

本研究の一部はKEK共同開発研究(2003-17, 2005-18, 2006-15)によりサポートされております。

参考文献

- [1] S. Okuda, et al., Nucl. Instr. and Meth. A358, 244-247, 1995.
- [2] R. Kato, et al., Nucl. Instr. and Meth. A445, 169-172, 2000.
- [3] G. Isoyama, et al., "Remodeling of the L-band Linac at ISIR, Osaka University", Proceedings of the 27th Linear Accelerator Meeting in Japan, Kyoto, Aug. 7-9, 2002.
- [4] S. Kashiwagi, et al., "Study of Focusing Properties of a New Type Wiggler on the ISIR FEL at Osaka University", Proceedings of the 28th International Free Electron Laser Conference, Berlin, Germany, August 27 - September 1, 2006.
- [5] Y. Kon, et al., "Measurement of phase and amplitude variations in RF pulse and evaluation of that measured with electron beam of a Linac", Proceedings of the 3rd Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan and the 31st Linear Accelerator Meeting in Japan, Sendai, Japan, August 2-4, 2006.
- [6] Y. Morio, et al., "Phase and Amplitude Control of the RF Pulse for an Electron Linac and its Evaluation with the Electron Beam", 本学会発表, TP38.