

# PHASE AND AMPLITUDE CONTROL OF THE RF PULSE FOR AN ELECTRON LINAC AND ITS EVALUATION WITH THE ELECTRON BEAM

Yutaka Morio, Yukiyoishi Kon, Tetsuya Igou, Ryukou Kato, Shigeru Kashiwagi, Goro Isoyama  
ISIR Osaka University  
8-1, Mihogaoka, Ibaraki, Osaka, 567-0047

## Abstract

We are conducting to develop free electron laser (FEL) in the Terahertz region using the L-band electron linac at the Institute of Scientific and Industrial Research (ISIR), Osaka University. In order to generate a micro-bunched electron beam with uniform energy, the phase and amplitude of rf pulses were repeatedly controlled using a electrical phase shifter and an I-Q modulator for low level rf pulse. We achieved the undulations of flat-top of the input rf pulse for the accelerating structure were reduced to  $0.3^\circ$  (p-p) and 0.9% (p-p) in the phase and amplitude within 7.6  $\mu\text{s}$  pulse duration, respectively. We have performed experiments to evaluate their modulation for rf pulse. The energy gain of beam was measured as a function of time in the rf pulse using an electron beam with the 5 ns duration and have found the energy gain varies only 0.4 % in 5  $\mu\text{s}$ . In this paper, we describe the system of the phase and amplitude modulation of rf pulse and its result including bean experiment.

## 電子ライナックRFパルスの位相・振幅制御と電子ビームを用いたその評価

### 1. はじめに

大阪大学産業科学研究所ではLバンド電子ライナックを用いて遠赤外領域の共振型FELの開発研究を行っている。そのためにエネルギーの揃ったマルチバンチ電子ビームが必要である。これまでに波長30~150 $\mu\text{m}$ でのレーザー発振に成功しているが、加速できるマクロバンチ電子ビームの長さが短く、FELパワーの飽和を実現するには至っていなかった<sup>[1]</sup>。これまでは、加速管のフィリングタイムが2  $\mu\text{s}$ 、RFパルス長が4  $\mu\text{s}$ であったため、正味2  $\mu\text{s}$ の幅の電子ビームしかFEL発振に用いることができず、光の増幅回数も50回に制限されていた。

2004年のLバンドライナック大規模改修の際に、RFパルスの時間幅を通常運転に使用する4  $\mu\text{s}$ に加えて、8  $\mu\text{s}$ のパルス幅を持つFEL用の運転モードを導入した。しかし、改修後の立ち上げ調整で測定したマルチバンチ電子ビームのエネルギー幅が広く、現段階ではFELの発振実験を行うに至っていない。このFEL実験に使用するロングパルスモード時のクライストロン電圧は、既に約0.1%の平坦度を実現している。しかし、加速管入口で測定したRFは、パルス平坦部での振幅変化が10%程度、位相変化が5度以上あることが確認されている。これを補正するために、クライストロン入力前のRFパルスに対して位相・振幅変調を行い、フィードフォワードによりクライストロンから出力されるRFパルス波形制御を試みた。

昨年度、手動による暫定的なシステムで位相振幅変調を行い、RFパルス波形の改善を試みた。このとき、補正後の電子ビームのエネルギースペクトルでエネルギーの変動は約3.9%であった<sup>[2]</sup>。今回、

RFマクロパルスの平坦度を向上させるために、RF位相振幅変調の反復補正システムを導入した。本研究では、位相・振幅制御システムとそのRF測定結果および電子ビームを使って行った位相・振幅制御システムの評価について説明する。

### 2. RFパルス位相・振幅変調

#### 2.1 位相・振幅変調システム

昨年度行ったRFパルスの位相・振幅変調では、加速管入口のRF位相と振幅を測定し、目標値に対してそれぞれを1度ずつ補正するものであった。本研究では、補正を繰返し反復することによって、更なるRFパルスの平坦度の向上を目指した。この繰返し補正を容易にするために、計算機より各回の位相・振幅制御およびその波形取得を自動に行えるようにした。また、これまで振幅変調器としてダブルバランスドミキサ (DBM) を使用していたがベクトル乗算器(I-Q変調器)を用いる事とした。振幅と

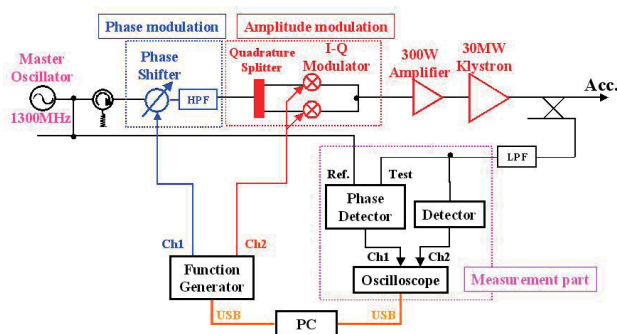


図1: 位相・振幅変調システムの概略

位相のより高速な制御をするために、クライストロンのドライバーアンプを高速なりニアアンプ(200W出力)に変更した。

今回開発した、位相・振幅変調システムの概略を図1に示す。本システムでは、加速管入力RFの位相と振幅をそれぞれ位相検出器(日本高周波製)とLPF、検波器(Agilent 423B)を用いて測定する。位相と振幅波形はオシロスコープ(Tektronix: DPO4104)を使い計算機に保存され、これらの振幅・位相波形と目標値(定数)との差を算出しそれぞれを制御する。位相変調には、高周波アナログ電圧制御型移相器(R&K社PS-3-1.3GHz)、振幅変調にはI-Qモジュレータ(アナログデバイゼス社ADL5390)を使用した。今回は、I-Q変調器のIポートとQポートに同じ電圧信号を入力し振幅変調器としてのみ使用した。また、位相器とI-Q変調器の制御電圧発生には、任意関数発生器(Tektronix: AFG3022)を使用した。オシロスコープと任意関数発生器の制御は、NI社のLabVIEWでプログラムを作成し行った。

## 2.2 位相・振幅変調の手順

位相・振幅補正は以下の手順で行う。

- ①変調前の位相・振幅波形を取り込む。
- ②測定値と設定基準値(目標値)の差分から、補正量を算出。
- ③補正量と現在の補正電圧から、変調器の制御電圧波形を計算。
- ④制御電圧波形を任意関数発生器から出力し変調器を制御。
- ⑤変調後のRF波形を再度取得。

2回目以降も同じ補正手順を繰り返して行う事によって、高い平坦度を実現する。振幅と位相の補正は、それぞれ独立に任意の回数、任意の順に自動で補正する事ができる。

## 2.3 位相・振幅変調制御の評価

振幅補正のみを複数回処理を繰り返した場合の、反復回数とRFパルス平坦部(7.6 $\mu$ s)の振幅変化を

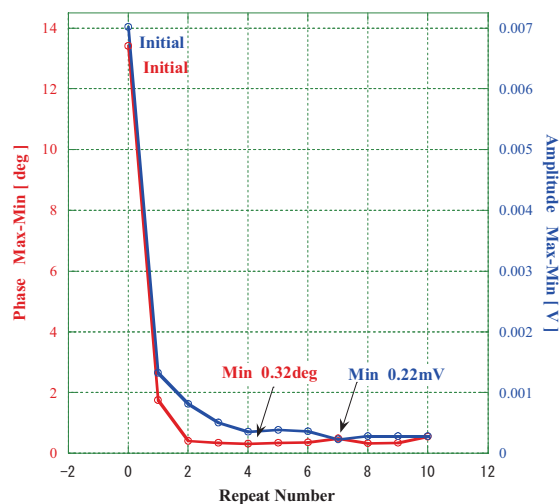


図2 補正回数と位相振幅平坦度(p-p)。

図2に示す。変調前のRF波形の振幅変化幅が7 mVであったものが1回目の変調で1.3 mVに、4回目の変調で0.3mVとなり安定状態に達していることが分かる。位相についても同様の測定を行い、約3回で定常的な状態になる。この事からも、繰り返し変調を行う事が一度きりの変調に比べてRF波形の平坦化に有効であることがわかった。

次に、変調前と反復変調後のRFパルス波形の比較を図3に示す。クライストロン出力のRFパルス平坦部の時間幅約7.6 $\mu$ sの領域に対して、補正制御なしの状態では位相変動13°、振幅変動18%であったものが、制御後に位相変動0.3°、振幅変動0.89%にまで補正することができた。補正後の振幅波形の前半に、若干周期的な変化がみられる。この周期的な変化は、振幅制御電圧を求める際に使う係数を微調整する事により改善する事ができる。

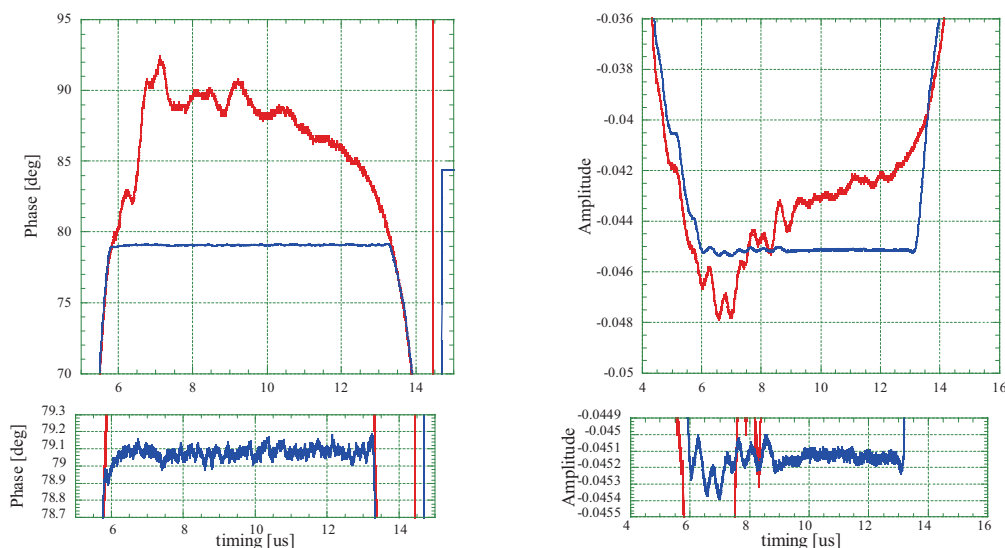


図3 RFパルスの位相波形(左上)と振幅波形(右上)、それぞれの平坦部の拡大図

### 3. 電子ビームのエネルギー測定による 位相振幅変調の評価

位相・振幅変調が電子ビーム加速に与える効果を確認するため、変調されたRFパルスを用いて実際に電子ビームを加速し、エネルギースペクトルを測定した。実験で加速した電子ビーム時間幅は、RFパルスおよび加速管のフィリングタイムに比べ十分短い5ns（過渡モード）であった。RFパルスに対してこの電子ビームを入射するタイミングを変化させてことで、RFの各部分での電子ビームエネルギー利得変化を測定した。

このエネルギースペクトル測定実験では、RF波形に対して位相・振幅変調を行った場合と行わない場合の2つのケースについて測定を行った。図4に、RFパルスに対する入射タイミングと電子ビームエネルギーの関係を示す。赤・青のプロットは、それぞれ補正無し・有りの場合の電子ビームの平均エネルギーを表わしている。また、エラーバーは測定されたビームのエネルギー拡がり（FWHM）である。

図4グラフ中の26~31 $\mu$ s（5 $\mu$ s）の範囲で、振幅・位相制御無しの場合には6.9%のエネルギー変化があったものを、振幅・位相制御する事で0.45%までビームのエネルギー変化を補正することができた。また、各タイミングでのエネルギー拡がり（エラーバー）を見ても、エネルギーが一定の5 $\mu$ sの間では、エネルギー拡がりも変化せずほぼ一定である。この事からも、この5 $\mu$ sの間では同じ条件（位相と振幅が一定）でビームが加速されているといえる。図4の25.55 $\mu$ s付近の小さなエネルギーの変化は、矩形RFパルスが加速管を通過する際に生じると考えられる。以上により、RF波形制御前・後に得られた電子ビームの測定結果から、RFパルスの平坦化が電子ビームのエネルギーを揃えるのに有効であるこ

とを確認した。

### 4. まとめと今後の予定

阪大産研Lバンド電子ライナックでの自由電子レーザーに用いる、エネルギーの揃った多バンチ電子ビームを生成するため、加速管に供給するRFパルスの振幅と位相の制御を試みた。加速管入口でのRF振幅・位相を計測し、その振幅と位相をフィードフォワードで制御する事により、RFパルス内の位相変化を約0.3度、振幅変化を0.9%以下に補正する事ができた。また、繰返し位相と振幅を制御した場合の有効性についても、測定より明らかにすることができた。現システムで、最終的な位相と振幅の変化幅の最小値は、位相に関してはオシロスコープで波形を取得した際の高周波ノイズ、振幅に関しては振幅制御電圧の解像度（1mV）である。位相変調に関しては、取り込み波形と制御電圧波形に対して適切なスムージングを施し精度を上げる。また、振幅変調に関しては、任意関数生成器からの出力電圧を大きくし、それを減衰器で適切な電圧に変換したあと、I-Q変調器に印加する事で制御電圧の解像度を上げる事を検討している。

電子ビームを用いた変調の評価では、RF振幅・位相制御によってRFパルス内での電子ビームのエネルギー利得変化幅を大幅に改善することができた。約5 $\mu$ sの時間幅にわたり、0.45%のエネルギー変化に抑えることに成功した。

今後の課題と予定として、FEL発振に最適な多バンチ電子ビームを得るために、RFマクロパルス形状を任意に制御できるように制御プログラムを変更すること、そして今回開発した振幅・位相変調のシステムを使ったFELの発振実験を行い、遠赤外領域での発振を目指すことがあげられる。

### 参考文献

- [1] R. Kato, et al. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 445 (2000) 169
- [2] 今 教禎. 第13回FELとHigh-Power Radiation研究会 プロシーディングス, Kyoto, Japan, March 5-6 (2007) 52

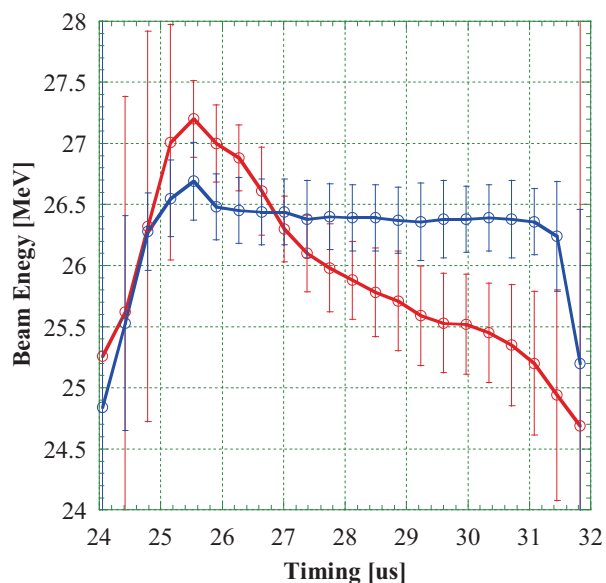


図4 電子ビーム入射タイミングと電子ビーム平均のエネルギー