

# DEVELOPMENT OF MULTI-BUNCH ELECTRON BEAM GENERATION SYSTEM BASED ON CS-TE PHOTOCATHODE RF-GUN AT WASEDA UNIVERSITY

Tatsuya Suzuki<sup>1,A)</sup>, Junji Urakawa<sup>B)</sup>, Shigeru Kashiwagi<sup>C)</sup>, Ryunosuke Kuroda<sup>D)</sup>, Kazuyuki Sakaue<sup>A)</sup>  
Toshikazu Takatomi<sup>B)</sup>, Nobuhiro Terunuma<sup>B)</sup>, Hitoshi Hayano<sup>B)</sup>, Junichiro Yokose<sup>A)</sup>  
Yukihiya Yokoyama<sup>A)</sup>, Masakazu Washio<sup>A)</sup>

<sup>A)</sup> Research Institute for Science and Engineering, Waseda University (RISE)  
3-4-1, Okubo, Shinjuku, Tokyo, 169-0072

<sup>B)</sup> High Energy Accelerator Research Organization (KEK)  
1-1, Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801

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

<sup>D)</sup> National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST)  
1-1-1, Umezono, Tsukuba, Ibaraki, 305-8568

## Abstract

At Waseda University, we have been developing a high quality electron accelerator based on a photo-cathode RF-gun and performing application experiments. In 2007, we have installed a Cs-Te cathode which has higher quantum efficiency to generate a higher current electron beam. At single bunch operation, long-term stable generation of high current electron beam has been achieved. In order to generate a multi-bunch electron beam, we have been developing multi-pulse UV laser and multi-bunch electron beam diagnostics system which enables us to measure of beam parameter bunch by bunch. In addition, we are planning to compensate the energy difference by RF amplitude modulation method. In this paper, the present status and forward planning of multi-bunch electron beam generation system will be described.

## 早稲田大学Cs-TeフォトカソードRF電子銃を用いた マルチバンチ電子ビーム生成システムの開発

### 1. はじめに

早稲田大学では、フォトカソードRF電子銃を用いた高品質電子ビームの生成とその応用研究として逆コンプトン散乱を用いた軟X線生成実験<sup>[1]</sup>、放射線化学反応初期過程解明のためのパルスラジオリシス実験<sup>[2]</sup>を行っている。

2007年度にこれまで使用されていたCuカソードに代えて、2桁程度高い量子効率を持つCs-Teカソードの導入を行い、シングルバンチ運転における高電荷量ビームの長時間安定生成を達成している<sup>[3]</sup>。また、Cs-Teカソードの導入により、マルチバンチ電子ビームの生成が可能になることが期待され、現在このシステムを開発中である。応用研究として行っている逆コンプトン散乱を用いた軟X線生成実験においては、電子ビーム、衝突レーザー双方のマルチバンチ化を行うことにより単位時間当たりの衝突回数の上が見込まれ、約2桁程度の生成光子数の増大が期待される。

本講演では、早稲田大学におけるCs-TeフォトカソードRF電子銃を用いたマルチバンチ電子ビーム

生成システム開発の現状と今後の展望について報告する。

### 2. マルチバンチ電子ビーム生成システムの開発と現状

マルチバンチ電子ビーム生成にむけて主に三つのシステムの開発が要求される。

まず、マルチバンチ電子ビームの生成のためにカソード照射用マルチパルスUVレーザー生成システムの構築が必要となる。また、生成したマルチバンチ電子ビームの評価として、バンチ毎のビームパラメータ測定が可能なマルチバンチ電子ビーム診断システムが必要となる。三つめに、バンチ間エネルギー差の少ない高品質なマルチバンチ電子ビーム生成のため、これを補正するバンチ間エネルギー差補正のシステムが必要となる。現在早稲田大学では、マルチバンチ電子ビーム生成システムの開発としてこれら三つのシステムの設計、構築を並行して行っている。

<sup>1</sup> E-mail: t-ricky@fuji.waseda.jp

## 2.1 カソード照射用マルチパルスUVレーザー生成システム

マルチパルスレーザー生成システムは、パルストレーンを生成するパルストレーン切り出し部、LD励起の増幅モジュールによる増幅部、そして非線形光学結晶を用いてIRレーザーからUVレーザーを生成する波長変換部の3つのパートから成る。図2.1にマルチパルスレーザー生成システム全体の設計を示す。

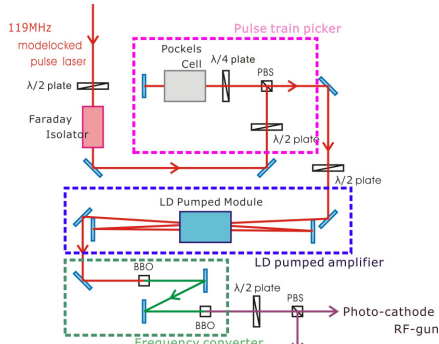


図2.1 マルチパルスレーザーシステム

マルチパルスレーザーシステム設計の上で重要な部分となるLD励起増幅システムの導入に当たっては、目標とするレーザー出力を得るために必要なgainを計算し、各パラメータの検討を行った。

まず、レーザー増幅で最も基本的な指標となる small signal gain  $g_0$  に飽和による影響を加味した実際に得られるgain  $g$ が、

$$g = \frac{g_0}{1 + I_0 / I_s} \quad (1)$$

で与えられる。 $I_s$ は飽和強度密度を表し、 $I_s = h\nu / \sigma\tau$ である。ここで、 $h$ 、 $\nu$ 、 $\sigma$ および $\tau$ はそれぞれプランク定数、レーザー光の周波数、吸収断面積および媒質の励起寿命である。Nd:YLFにおけるパラメータの詳細な値は以下の表1を参照いただきたい。また、増幅後のレーザー強度密度 $I$ は増幅前の強度密度 $I_0$ とレーザー媒質の長さ $L$ を用いて、 $I = I_0 e^{gL}$ で表される。これらの式を用いて要求されるgainを実現するLD励起増幅システムの設計を行った。また、要求される出力を、目標とする電子ビームの電荷量800pC/bunchから逆算するとCs-Teカソードの量子効率を1%に対し必要な入射UVレーザーの出力はおよそ0.4  $\mu$  J/pulseであり、光学系等でのロスを考慮し目標出力を1.0  $\mu$  J/pulseとした。2つの非線形結晶の変換効率(SHG:70%、FHG:50%)から波長変換部全体での変換効率は35%であるので波長変換前のIRレーザーの目標出力はおよそ3  $\mu$  J/pulseとなる。表2.2の条件でLD増幅モジュールを3pass後のレーザー出力を算出すると約7  $\mu$  J/pulseと求められ、システム中の光学系各部での損失を考慮しても十分な増幅が見込まれた。

以上のように設計したマルチパルスレーザー生成システムを用いて実際にマルチパルスレーザーの生成試験を行った。

表2 LD増幅システムパラメータ

Lifetime of upper level	520 [ $\mu$ S]
Cross section	$1.8 \times 10^{-19}$ [ $\text{cm}^2$ ]
Absorption efficiency	20 [ $\text{m}^{-1}$ ]
Laser wavelength	1047 [nm]
Pump up power	1.142 [kW]
Mean value of pump area	0.32 [ $\text{cm}^2$ ]
Laser spot size	0.283 [ $\text{cm}^2$ ]
Laser rod length	12.6 [cm]
Seed laser Power	200 [mW]

今回は、性能試験としてパルストレーンの長さをおよそ200ns程度(20pulses/train相当)とし、マルチパルスレーザーの生成を行った。現在までにマルチパルスGreenレーザーの生成を確認することは出来たが、その後の波長変換によるマルチパルスUVレーザーの生成を確認することはできなかった。原因としては、波長変換前での出力不足や波長変換部でのアライメント不足などが考えられる。出力を大きくするためには、LD励起増幅システムでのgainをさらに向上させる必要がある。式(1)に示すように、gain  $g$ の飽和は、入射レーザーの強度密度 $I_0$ に依存する。従って、レーザースポットサイズを拡大した後に増幅を行えば、さらに大きなgainを得ることが可能であると考えられる。今後は波長変換部のアライメントの向上と共に、レーザースポットサイズの拡大によるgainの増加を行い、再度マルチパルスレーザーの生成に取り組む予定である。

## 2.2 マルチバンチ電子ビーム診断システム

マルチバンチ電子ビームの生成にあたり、これを評価するためのシステムとしてバンチ毎のビームパラメータ測定が可能なマルチバンチ電子ビーム診断システムの導入を行った。図2.2に旧ビームラインと新ビームラインの比較を示す。

旧ビームラインでは電荷量の測定をsolenoid Magnet下流のファラデーカップにより行っていた。しかし、時間分解能の関係でバンチ毎の電荷量を測定することはできない。そこで新ビームラインではFCTを導入し、各バンチの電荷量を測定することを考えている。

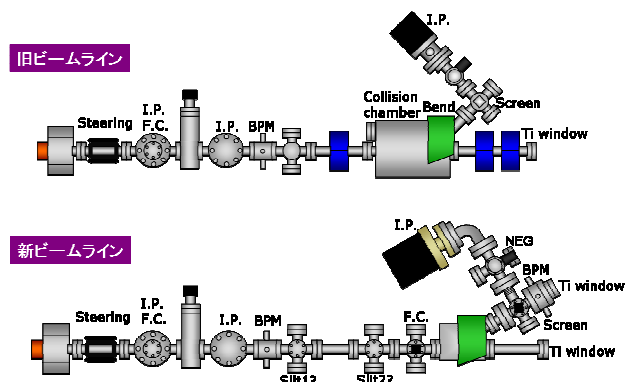


図2.2 新旧ビームライン比較

また、エネルギーの測定に関しては、旧ビームラインではBending Magnetで電子ビームの軌道を曲げ、下流のスクリーンモニタによってエネルギーの測定を行っていたが、こちらもバンチ毎のエネルギー測定を可能にするため、BPMの導入を行った。

また、新ビームラインにおける利点として、電荷量の測定装置をファラデーカップからFCTに代えることにより、ビームを非破壊的に測定することが可能となり、下流での応用実験時にも常時電荷量をモニターすることが可能となった。

### 2.3 バンチ間エネルギー差補正システム

マルチバンチ電子ビーム加速時に生じる問題としてバンチトレイン内でのエネルギー差があげられる。エネルギー差が生じる原因としては、ビームローディング効果による後方バンチの加速電場の低下や早稲田大学の加速空胴のフィリングタイムが長く、加速電圧が均一でないことなどがあげられる。早稲田大学ではマルチバンチ電子ビーム生成時の電荷量が比較的少なくバンチ間隔が8.4ns(119MHz)と長いいため、前者の影響はそれほど大きくない。しかし、早稲田大学のクライストロンでは入射RFパルスの幅が最大4μsに制限されてしまうため、後者の影響は大きくなってしまふ。そのため後者の原因によるエネルギー差の補正に有効であるRF振幅変調法によりエネルギー差の補正を行うこと考えている。

印加RFとして矩形のパルスを入射した際に、これにより生じる空胴内の加速電圧 $V_g(t)$ は次式で表される。

$$V_g(t) = \frac{2\sqrt{\beta R_{sh} P_0}}{1+\beta} \left( 1 - \exp\left(-\frac{t}{t_f}\right) \right) \quad (2)$$

早稲田大学のRF電子銃空胴の各パラメータ(表3)を用いて空胴内の加速電場を計算した結果を図2.2に示す。

表3. 早稲田大学RF電子銃空胴パラメータ

Resonant Frequency ( $f_0$ )	2856 [MHz]
Q Value ( $Q_0$ )	12200
Shunt Impedance (R)	4.51 [MΩ]
Effective Shunt Impedance ( $R_{sh}$ )	2.91 [MΩ]
Coupling factor ( $\beta$ )	1
Filling Time ( $t_f$ )	0.68 [μs]

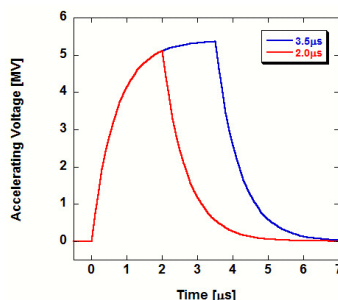


図2.2 RF電子銃空胴内加速電圧

入射RFのパルス幅を通常運転時の2μsから3.5μsに広げても、加速電圧の立ち上がりが遅く、バンチトレイン加速時に前方のバンチと後方のバンチでエ

ネルギー差が生じてしまう。そこで、入射RF波形を変調することにより、加速電圧が均一な部分でバンチトレインの加速が可能となるような補正を考える。式(2)における入射RFパワー $P_0$ を時間依存する項 $P(t)$ とし、空胴内加速電圧 $V_g(t)$ がなるべく高い値、かつ十分長い時間領域でフラットとなる変調を考える必要がある。そこで、十分な加速電圧に達するまではクライストロンの最大出力を印加、そこから、空胴のロスと釣り合うようなRFを印加することを考える。式(2)より、変調領域のRFパワーの式は

$$P(t) = \frac{P_1}{(1 - \exp(-t/t_f))^2} \quad (3)$$

で与えられる。ここで、 $P_1$ は変調開始時刻における最大加速電場を誘起するRFパワーを満たす値である。変調開始時刻を1μs、RFパルス幅を3.5μsとすると、入射RFの波形は図2.4左のようになり、これによる空胴内の加速電圧は図2.4右のようになる。

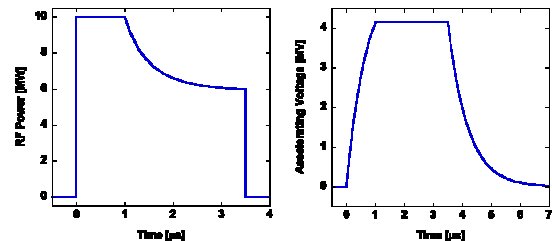


図2.4 RF振幅変調による入射RF(左)および空胴内加速電圧(右)

以上のように、数値シミュレーションではフラットな加速電圧を持つ時間領域として2.5μsが得られ、119MHz繰り返しのマルチバンチ電子ビームの場合、300バンチ近くのバンチトレインの加速が可能となる。

## 4. まとめと今後の予定

マルチバンチ電子ビームの生成に向け、カソード照射用マルチパルスUVレーザー生成システム、マルチバンチ電子ビーム診断システム、バンチ間エネルギー補正システムの設計・構築を行っている。今後はゲインの増加、アライメントの向上により、マルチパルスUVレーザーの生成を行い、マルチバンチ電子ビームを生成する。マルチバンチ電子ビーム生成後はビームパラメータの測定、エネルギー差の補正を行い、より高品質なマルチバンチ電子ビームの生成を行う予定である。

## 参考文献

- [1] K. Sakaue et al., "Recent Progress of a Soft X-ray Generation System based on Inverse Compton Scattering at Waseda University", Radiation Physics and Chemistry, 77, pp.1136, 2008
- [2] A. Fujita et al., "Improvement of Compact Pico-Second and Nano-Second Pulse Radiolysis Systems at Waseda University", Proceedings of PAC'09, TU6PFP027, 2009
- [3] 坂上和之他, "早稲田大学RF電子銃加速器システムの現状と今後の展望", 本研究会WPLSA18