

DEVELOPMENT OF A MULTI-BUNCH ELECTRON BEAM LINAC BASED ON A CS-TE PHOTOCATHODE RF-GUN AT WASEDA UNIVERSITY*

Yukihisa Yokoyama^{†A)}, Tatsuro Aoki^{A)}, Junji Urakawa^{B)}, Shigeru Kashiwagi^{C)}, Ryunosuke Kuroda^{D)}, Kazuyuki Sakaue^{A)}, Tatsuya Suzuki^{A)}, Nobuhiro Terunuma^{B)}, Hitoshi Hayano^{B)}, Masakazu Washio^{A)}

^{A)}Research Institute for Science and Engineering, Waseda University (RISE)

3-4-1, Okubo, Shinjuku, Tokyo, 169-0072

^{B)}High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

1-1, Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801

^{C)}Research Center for Electron Photon Science, Tohoku University (LNS)

1-2-1, Mikamine, Taihaku, Sendai, Miyagi, 982-0826

^{D)}National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST)

1-1-1, Umezono, Tsukuba, Ibaraki, 305-8568

Abstract

At Waseda University, we have been studying a high quality electron beam generation and its application experiments with Cs-Te photocathode RF-Gun. We have already succeeded in generating a stable high-charged single-bunch electron beam. To generate more intense electron beam, we designed a multi-bunch electron linac and developed the multi-pulse UV laser which irradiates to the cathode. On the other hand, we adopted the method of the amplitude modulation of the incident RF pulse to the S-band klystron in order to compensate the energy difference in each bunch. Furthermore, considering the results of beam diagnosis, we are planning to improve the UV laser system to achieve higher intensity and to stabilize the intensity. In this conference, we will report design properties of our multi-bunch electron linac, the results of the beam diagnosis, and present status of the improvement.

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の開発

1. はじめに

フォトカソード RF 電子銃は、高輝度・短パルス・低エミッタンスが実現できる高品質電子源として期待され、世界各国で研究開発されている。早稲田大学では、ビーム利用の汎用化という観点から、より自由度のある小規模なテーブルトップサイズ (2m × 2.5m) で電子を相対論領域まで加速できる高品質電子ビーム源の開発と、その応用研究としてレーザーコンプトン散乱を用いた軟 X 線生成実験及び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を行っている^{[1][2]}。これまでの研究では、以前使用されていた Cu カソードよりも高量子効率を持つ Cs-Te カソードの導入と、それに伴う RF 空洞構造の改善を行い、以前よりも高い電荷量・エネルギーを持ったシングルバンチ電子ビームの安定した生成に成功している^[3]。しかし、我々の応用研究のひとつである軟 X 線生成実験において、生体観測用軟 X 線顕微鏡などへ応用するために十分な収量が得られておらず、軟 X 線の収量増加が課題として挙げられている。そこで我々は、レーザーコンプトン散乱のマルチパルス化を行い、単位時間当たりの衝突回数を増やすことで収量増大を実現することを計画した。レーザーコンプトン散乱のマルチパルス化には、電子ビームと衝突用レーザー双方のマルチ化が必要であり、我々はまず

電子ビームのマルチバンチ化を試みるために、カソード照射用マルチパルス UV レーザーシステム及びマルチバンチ電子ビーム診断システムの開発に取り組んだ。

一方でマルチバンチ電子ビーム加速の場合、RF 空洞内の電子ビーム加速過程において RF 電子銃空洞の過渡状態を用いることによる加速電圧差やビームローディング効果が原因となって、バンチ毎にエネルギー差が引き起こされる^[4]。そのエネルギー差を補正するために、我々は ΔA Method と呼ばれる、クライストロンへの入力 RF パルスの振幅を変調し加速電圧の立ち上がりフラットな領域を作り出す手法^[5]を採用し、RF 振幅変調システムの構築を行った。

また、電子ビーム診断結果から得られた改善点を基に光ファイバ増幅器の導入を行い、IR レーザー強度の増幅を試みた。これにより波長変換したカソード照射用 UV レーザーの更なる高輝度化、高安定化が期待される^[6]。

この講演ではマルチバンチ電子ビーム生成システム構成、ビーム診断結果及びシステム改良の進捗状況について報告する。

2. マルチバンチ電子ビーム生成システム

マルチバンチ電子ビーム生成にむけて要求されるのは、以下の三つのシステムの開発である。

- マルチバンチ電子ビームの生成のためのカソード照射用マルチパルス UV レーザー生成システム

* Work supported by JSPS Grant-in-Aid for Scientific Research (B) (2) 16340079 and a Quantum Beam Technology Program of JST

[†] trp-gill@asagi.waseda.jp

- 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を生成するためのバンチ間エネルギー差補正システム
- 生成したマルチバンチ電子ビームのバンチ毎のビームパラメータが測定可能なマルチバンチ電子ビーム診断システム

我々はこれら三つのシステムを並行して設計、構築を行った。

2.1 マルチパルス UV レーザー生成システム

我々のシステムでは、Pulrise-V と呼ばれる Nd:YLF モードロックレーザーから発生した 119MHz の IR パルスレーザーを、パルストレイン切り出し部、増幅部、波長変換部の三つのパートによってパルストレイン状の UV レーザーに変換し、カソードに照射する。図 1 にマルチパルス UV レーザー生成システムの概念図を示す。

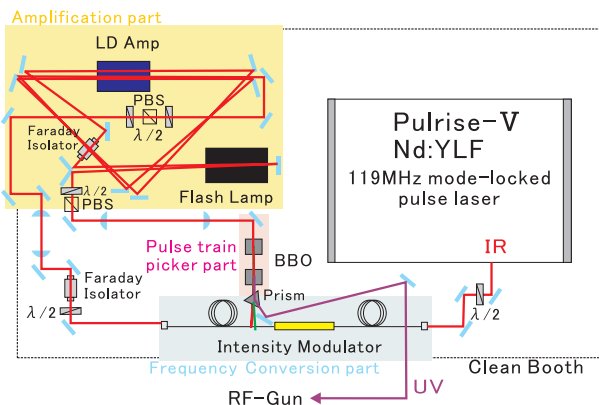


図 1: マルチパルス UV レーザー生成システムの概念図

パルストレイン切り出しには、これまで用いていたポッケルスセルの代わりに、LN 光変調器を用いた。レーザーをファイバに収める必要があるが、高価な高圧電源などが不必要になるとともに、高圧スイッチのノイズの削減に有効である。また LN 光変調器では、シングルパルスの切り出しが可能である。

増幅部では UV レーザー生成のために十分な増幅を得るため、我々は LD 励起増幅装置を三回通過させ増幅を行う LD3-pass 増幅システム、FL 励起増幅装置を二回通過させ増幅を行う FL2-pass 増幅システムを構築した。IR レーザーの強度は増幅前では 8.4pJ/pulse であったが、LD3-pass 後で 1.26μJ/pulse、FL2-pass 後で 25.2μJ/pulse となり、それぞれ約 1.5×10^5 倍、20 倍の増幅率が得られた。増幅器は特定の直線偏光のみを最も効率よく増幅するので、それぞれの増幅器の手前には偏光方向を最適化するための波長板を設置した。

波長変換部では、一つ目の非線形光学結晶で基本波である 1047nm の IR 光から波長 523.5nm (Green) の第二高調波生成を、二つ目の非線形光学結晶で Green から波長 262nm (UV) の第四高調波生成をそれぞれ行っている。また、二つの非線形光学結晶通過後には IR、Green、UV が混在して存在しているため、プリズムを用いて三つの光を分離し、それぞれを出力している。非線形光学結晶には BBO(BaB₂O₄) 結晶を用いており、それぞれの

変換効率の設定値は 70%、50% である。しかし実際には IR 強度の見積もりが甘かった点やアライメントが不十分であったため、UV レーザーの強度は全変換効率が 1% 程度の 0.25μJ/pulse であった。

2.2 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の一つとして、バンチトレイン内にビームエネルギー差が生じてしまうことが挙げられる。エネルギー差が生じてしまう原因としては、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と、加速電圧の遅い立ち上がり時間がある。ビームローディング効果については、我々のシステムでは 1 バンチ当たりの電荷量が比較的少なく、バンチ間隔が 8.4ns (119MHz) と長いため、現時点ではほとんど影響がない。しかしながら、RF 空洞のフィリングタイムが長いために空洞内の加速電圧が定常状態に達するまでに時間を要し、クライストロンの RF パルスの幅の最大値である最大 4μs を効率的に利用できない。図 2(a) 青線のような矩形 RF パルスを入射した場合の加速電圧の時間変化を図 2(b) 青線に示す。この場合、過渡状態の電圧で電子ビームを加速させることになり、エネルギーに差が生じる原因となる。そこで、我々はエネルギー補正法として、ΔA Method と呼ばれる、入射 RF パルスに図 2(a) 赤線のような振幅変調を行うことによって加速電圧に図 2(b) 赤線のようなエネルギー的にフラットな領域を作り出す手法を検討した。変調 RF パルス波形は次式で与えられる。

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

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り、 t_f は空洞のフィリングタイムである。

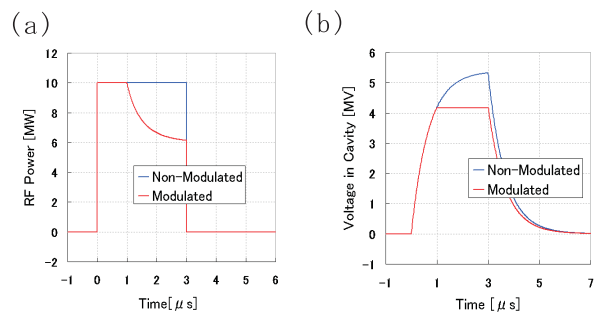


図 2: (a) 印加 RF パルスと (b) 空洞内加速電圧

RF の振幅に変調を施すために、我々は RF 制御システムに新しく振幅変調器を導入した。振幅変調器は、任意信号発生器で式 (1) を用いて任意作成した波形を変調波として、上流からの RF の振幅を変調して出力する。しかし、他の増幅器などの装置はそれぞれ入出力特性が異なるので、各々のそれを測定し、その結果と要求している波形から変調波形を逆算した。変調前と変調後の空洞内電圧の観測波形を図 4 に示す。RF ピックアップポートの空洞とのカップリングが小さいためにノイズの影響大きく受けているが、約 2μs のフラットな領域を作り出すことに成功したことが確認できる。

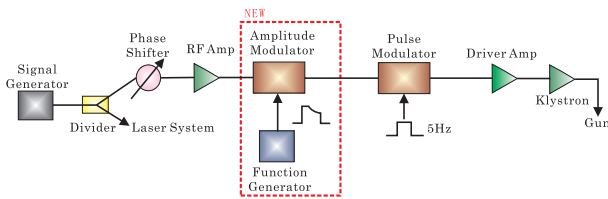


図 3: RF 制御システム

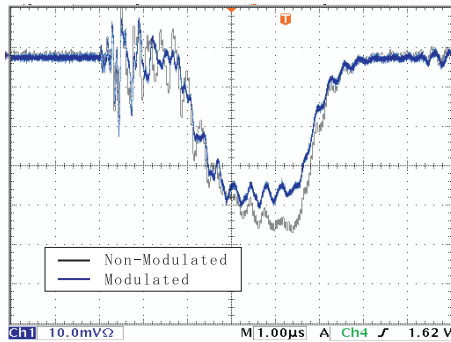


図 4: 空洞内加速電圧観測波形

2.3 マルチバンチ電子ビーム診断システム

以前のビームラインで用いていた電荷量測定用のフラデーカップやエネルギー測定用のスクリーンは、マルチバンチ電子ビームのバンチ毎のパラメータを測定することが可能な装置ではなかった。そこで我々はFCT (Fast Current Transformer) や BPM (Beam Position Monitor) をビームラインに新しく導入することによって、それを可能にした。新しい実験設備を図5に示す。また FCT と BPM の導入によって、ビームの電荷量とエネルギーを非破壊的に測定することができるため、ビーム利用の際にも常時電荷量をモニターすることができるようになった。

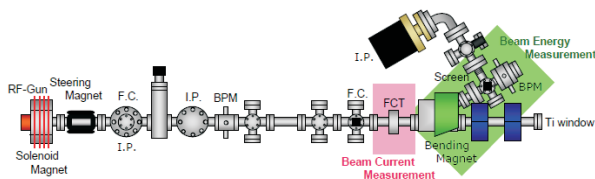


図 5: ビームラインの概観

3. 電子ビームパラメータ測定

上記のシステムを用いて 100 バンチのマルチバンチ電子ビームのバンチ毎の電荷量とエネルギーを測定した。その結果をそれぞれ図6と図7に示す。

電荷量に関しては、最大 116.9pC/bunch、最小 65.7pC/bunch と測定された。このバンチ間電荷量差は、照射 UV レーザーの強度揺れが原因と考えられる。また、カソードの量子効率 は 0.2% と算出された。結果として目標としていた 800pC/bunch には到達できていないのが現状である。これは UV レーザーの強度不足が原因であると考えており、次節で述べる光ファイバ

増幅器の導入によって今後解決する予定である。

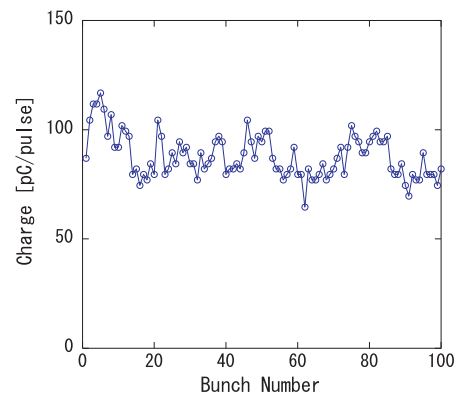


図 6: バンチ毎の電荷量測定結果

一方エネルギー測定では、図7にみるように、RFの振幅変調によって明らかにバンチ間のエネルギー差が補正されているのが分かる。エネルギー差は変調なしの場合で 5.6% $p-p$ であったところを、 ΔA Method によって 1.0% $p-p$ に抑えることができた。変調波形を自由に変えることが可能であるため、ビームローディング効果を含めた補正や本システム以外の繰り返しの高いマルチバンチビームにも適用が可能である。

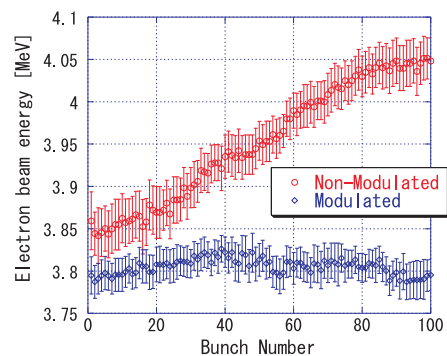


図 7: バンチ毎のエネルギー測定結果

4. 光ファイバ増幅器の導入

光ファイバ増幅器は、光励起によって光ファイバ中の希土類イオンを反転分布させることによって誘導放出を可能にし、増幅させる。我々はより十分な増幅率を得るとともに安定な出力の UV レーザーを構築するために、希土類に Yb を用いた高濃度 Yb 添加コア励起シングルモード光ファイバ (YB1200/4-125, THORLABS) とその導入のための各ファイバ型光デバイスを、図8のように LN 光変調器後に設置した。LN 光変調器によってパルスレインに切り出された IR 光と LD モジュールから出力した励起光は、それぞれアイソレータを通過後、波長合波器 (WDM) によって合波し、光ファイバ増幅器に送られる。LD 励起光の制御には、他システムとタイミング同期した 5Hz の矩形パルスを用いる。過度の自然放光を抑えるために、矩形パルスのパルス幅は 0.6ms とした。また、増幅した IR 光の一部を常にモニ

ターできるよう、Yb ファイバ後に光ファイバカプラを設置した。

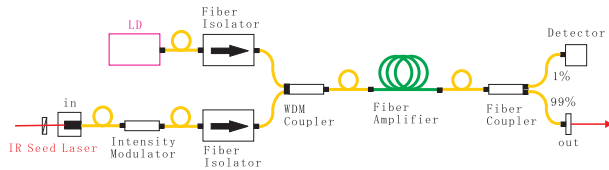


図 8: ファイバシステムの概観

増幅用 Yb ファイバは最適な長さを求めるために、10cm、30cm、50cm、75cm、100cm、300cm のものを用意した。図 9 にそれぞれについての励起光強度依存増幅率測定結果を示す。図にみるように、ファイバ長が 75cm のときに入射 IR 強度 6mW の約 80 倍である 480mW の最大増幅が得られた。また、Yb ファイバが短い場合は、励起光を強くしても励起光の吸収断面積によって励起光が十分吸収されず、増幅率が飽和していることが分かる。逆に Yb ファイバが長過ぎる場合は、ファイバ後半で反転分布が形成されていない状態になり信号光の再吸収が起こるため、実効的な増幅率は低下することが見て取れる。

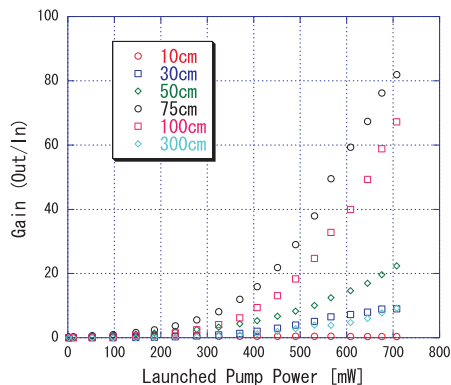


図 9: 励起光強度依存増幅率測定

5. まとめと今後の予定

マルチバンチ電子ビーム生成システムの開発のために、マルチパルス UV レーザー生成システム、エネルギー差補正システム、マルチバンチ電子ビーム診断システムの三つのシステムの開発を行った。マルチパルス UV レーザー生成システムでは、パルストレイン切り出し部と増幅部の改良によって、 $0.25\mu\text{s} \times 1 \sim 1000$ pulse の安定した生成に成功した。エネルギー差補正システムでは、 ΔA Method を用いて 5.6% $p-p$ のバンチ間エネルギー差を 1% $p-p$ に抑えることができた。また、マルチバンチ電子ビーム診断システムでは、FCT と BPM の導入によってバンチ毎のパラメータ測定が可能になった。その結果、電荷量は目標としていた 800pC/bunch に至らなかったため、UV の更なる高輝度化、高安定化のためにレーザーシステムにファイバ増幅器を導入した。最適なファイバ長では、約 80 倍の増幅が得られた。今後は LD4-pass 増幅システムを構築して充分な増幅を得た後、UV 波長変換を行う予定である。これまでの UV

レーザーの強度揺れの原因として挙げられていたフラッシュランブ励起の増幅モジュールは取り外し、ファイバベースの増幅器に置き換える。また電荷量増大に成功した際には、ビームローディング効果が無視できなくなることが予想されるので、それを加味したエネルギー補正法を検討する予定である。

参考文献

- [1] 坂上和之他, "早稲田大学フォトカソード RF 電子銃における応用研究の現状と今後の展望", 本研究会 THPS105
- [2] Y.Hosaka et al., "Pulse Radiolysis with Supercontinuum Probe Generated by PCF", Proceedings of IPAC'10, pp.145-147, 2010
- [3] Y.Kato et al., "Development of a Cs-Te Cathode RF Gun at Waseda University", Proceedings of LINAC'08, pp.624-626, 2008
- [4] A.Masuda et al., "Design of Linac Based Compact X-ray Source via Inverse Compton Scattering at Waseda University", Proceedings of EPAC'08, pp.166-168, 2008
- [5] S.Kashiwagi et al., "Beam Loading Compensation Using Phase to Amplitude Modulation Method in ATF", Proceedings of LINAC'98, pp.91-93, 1998
- [6] I.Ito et al., "Development of an Yb-doped Fiber Laser System for an ERL Photocathode Gun", pp.2141-2143, 2010