

フォトカソード RF 電子銃ライナックを用いた超短パルス電子バンチ発生の研究

STUDY OF THE ULTRA-SHORT ELECTRON BUNCH GENERATION BY A LASER PHOTO-CATHODE RF GUN LINAC

野澤 一太[#], 菅 晃一, 楊 金峰, 近藤 孝文, 神戸 正雄, 吉田 陽一(阪大産研)

Itta Nozawa[#], Koichi Kan, Jinfeng Yang, Takafumi Kondoh, Masao Gohdo, Yoichi Yoshida

The Institute of Scientific and Industrial Research (ISIR), Osaka University

Abstract

Generation and bunch length measurement of ultra-short electron bunches were investigated using an S-band photo-cathode RF gun linac and an arc-type magnetic bunch compressor at ISIR, Osaka University. In this study, beam tracking simulation was carried out to search conditions of the bunch compression. The bunch length measurement was also performed to check reproducibility of generation of femtosecond electron bunches using the relocated linac system.

1. はじめに

近年、フォトカソード RF 電子銃やレーザープラズマ加速などの加速器技術の発展に伴い、フェムト秒領域のパルス幅を持つ電子ビームの発生が可能となってきた[1,2]。このようなフェムト秒・アト秒領域の極めて短いパルス幅を持つ電子ビーム(以下、超短パルス電子ビーム)は、電子ビームの高輝度化に不可欠であるのみならず、放射線化学やテラヘルツ波発生などでの研究利用においても注目を集めている。一方で、発生可能な電子ビームのパルス幅が短くなってきたため、従来のストリークカメラを用いたパルス幅測定のみでなく、EO サンプリング[3]やフーリエ分光法[1]などを利用したパルス幅測定技術についても研究が進展している。

阪大産研では、パルスラジオリンス法の時間分解能を向上するために、Sバンドレーザーフォトカソード RF 電子銃ライナック・磁気パルス圧縮器を用いた超短パルス電子ビームの発生に取り組んできた。これまでに、電荷量 2.1 pC で <10 fs 電子ビームの発生と計測に成功している[1]。

本研究では、より短いパルス幅の電子ビーム発生を行

うために、GPT (General Particle Tracer) を用いて電子ビームの軌道を計算し、電子ビーム圧縮条件について検討した。また、利用拡大を目的にライナックの移設を実施したため、移設後のライナックについて超短パルス電子ビーム発生・計測実験を行った。

2. フォトカソード RF 電子銃ライナック

Figure 1 に、移設後の阪大産研の S バンドフォトカソード RF 電子銃ライナック及び磁気パルス圧縮器の概略図を示す。本ライナックは、1.6 セルフォトカソード RF 電子銃、ソレノイド・進行波型線形加速空洞・アーク型磁気パルス圧縮器から構成されている。銅カソードの励起には、Ti:Sapphire フェムト秒レーザーの三倍高調波 (266 nm) を使用し、電子銃で短パルス・低エミッタンスの電子ビームを発生することができる。発生した電子ビームは、電子銃出口で ~4 MeV、加速管出口で ~35 MeV まで加速される。加速管では、電子ビームに対して磁気パルスに最適なエネルギー変調を行う。アーク型の磁気パルス圧縮器は、2 台の偏向電磁石 (B1, B2) と 4 台の四極電磁石、2 台の六極電磁石から構成されており、偏向電磁石及び四極電磁石の漏れ磁場による二次効果を補正す

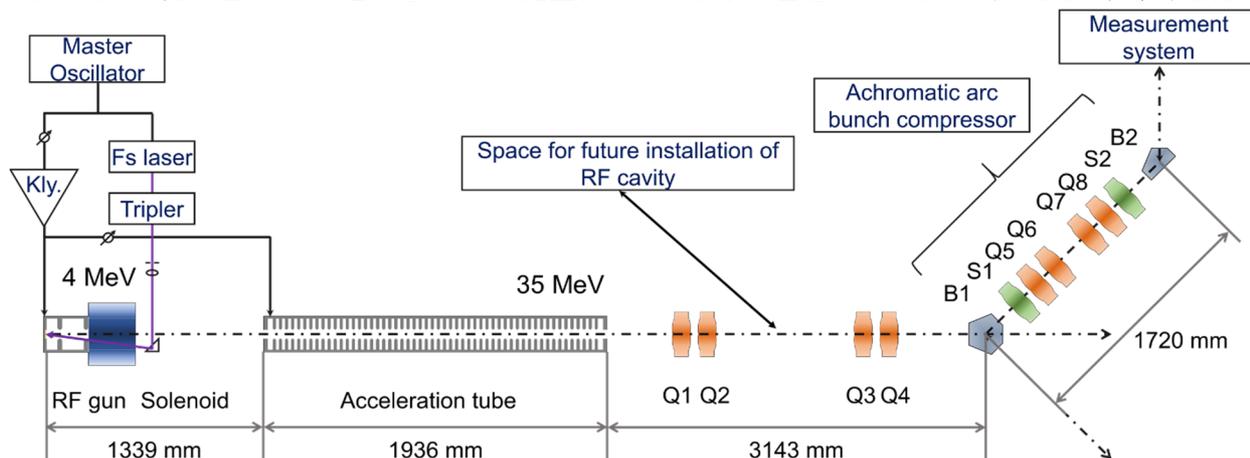


Figure 1: Schematic of photo-cathode RF gun linac and magnetic bunch compressor. Q: quadrupole magnet, S: sextupole magnet, B: bending magnet.

[#]nozawa81@sanken.osaka-u.ac.jp

ることができる。最終的に、電子ビームはエネルギー分散に基づく縦方向位相空間分布の回転によってフェムト秒領域まで圧縮される。これまでに実施したライナックの移設により、加速器を構成する各コンポーネントの配置が変更された。また、新たに四極電磁石が2台配置されるとともに、利用の拡大を目指し、2本のビームラインが追加された。

3. ビーム軌道計算

3.1 計算体系

本研究では、Figure 1 に示したフォトカソード RF 電子銃ライナックを対象に、General Particle Tracer (GPT)[4]を使用したビーム軌道計算を実施した。GPT では、加速器を構成する要素を座標指定して配置するため、設計図に従った配置を指定した。また、組み込み関数以外に他のソフトウェアで計算した電磁場をフィールドマップとして読み込むことができるため、RF 電子銃・ソレノイド・加速管の電磁場に関しては、Poisson Superfish[5]で計算した電磁場を採用した。

3.2 計算結果

電子ビームが設計軌道を通ることを確認した後、パラメータの最適化を図った。最適化の基準として圧縮器出口から 0.15 m 下流の地点での rms パルス幅が最短となるという条件を設け、GPT のビルドインソルバーを使用して圧縮器のパラメータについて最適化を行った。

Figure 2 に電子ビーム軌道計算で得られた(a)電子銃出口、(b)加速管出口、(c)圧縮器中間、(d)圧縮器出口での縦方向位相空間分布を、Table 1 に測定条件を示す。Table 1 に示したシミュレーション条件での最短パルス幅は 3.92 fs であった。更に短いパルス幅を発生させるためには、電子銃出口で短パルス・低エミッタンス電子ビームを得る必要があるため、RF 電子銃・加速管のパラメータを含む、最終的なパンチ長が最短となる初期条件を求める必要があると考えられる。

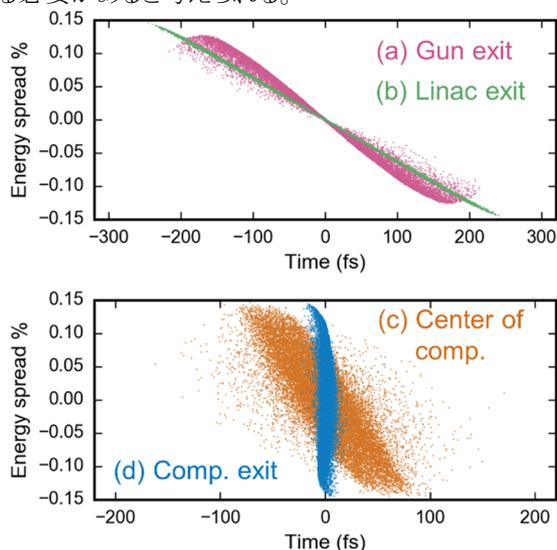


Figure 2: Longitudinal phase space distributions (a) the gun exit (pink), (b) the linac exit (green), (c) the middle plane of the bunch compressor (orange) and (d) the exit of the bunch compressor (blue).

Table 1: Parameters Used for the GPT Simulation

Parameters	Value
Number of macro particles	20000
Bunch charge (pC)	0.1
Laser pulse width in rms (fs)	60
Laser spot size (mm)	0.06
RF phase of gun (deg.)	26
RF phase of linac (deg.)	110
Magnetic field of Q5 and Q8 (T/m)	1.78
Magnetic field of Q6 and Q7 (T/m)	-3.62
Magnetic field of S1 and S2(T/m ²)	78.2

4. 電子ビームパルス幅測定

4.1 測定原理

パルス幅測定は電子ビームが放射するコヒーレント遷移放射(CTR)を Figure 3 の模式図に示すようなマイケルソン干渉計で測定することにより実施した。電子ビームはパルス幅が短くなるほど高周波数の電磁波を高強度で放射することができるため、CTR の周波数スペクトルからパルス幅の情報を得ることができる。本研究では、実験的に得た干渉波形(インターフェログラム)を感度モデル[1]で解析することにより、パルス幅を計算している。マイケルソン干渉計を構成するビームスプリッタとしては、高抵抗シリコンを、検出器としては MCT 検出器(mercury cadmium telluride detector, P5274-01, 浜松ホトニクス)及び液体ヘリウム冷却シリコンボロメータ(Infrared Laboratories)をそれぞれ使用した。

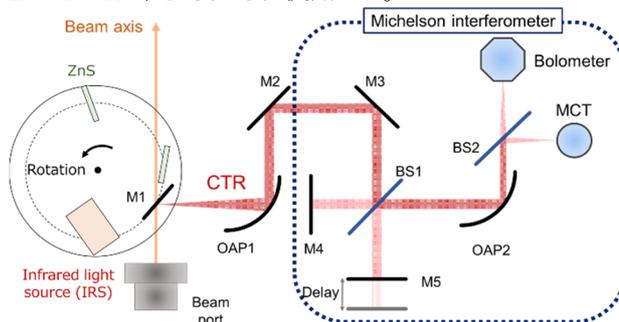


Figure 3: Bunch length measurement system based on Michelson interferometer. M: mirror, OAP: off axis parabolic mirror, BS: beam splitter, MCT: photoconductive mercury cadmium telluride detector.

4.2 実験結果

Figure 4 に MCT を用いて測定した CTR のインターフェログラムを示す。実験条件としては、加速管加速位相、電荷量、平均回数をそれぞれ 110 deg.、1.38 pC、5 回とした。Figure 4 に示したインターフェログラムは MCT とボロメータで同時計測を行い、曲線は感度モデルを測定値に対して最小二乗法でフィッティングしたものである。

MCT を用いて測定した CTR のインターフェログラムに対して感度モデルをフィッティングした際には、パルス幅が 8.7 fs と求められた。一方で、ボロメータを用いて測定

したCTRのインターフェログラムに対して、感度モデルをフィッティングすることにより、パルス幅が47 fsと求められた。得られたパルス幅の違いは、MCTとボロメータの周波数帯域の違いによるものと考えられる。MCTはボロメータに比べて高周波数の赤外光に感度があるため、フェムト秒オーダーの電子ビームを計測するために適切であると考えられる。しかしながら、検出帯域の観点から、数十フェムト秒オーダーの電子ビームの計測においては、ボロメータがより適切であろうと考える。また、センターバーストの左右に存在する減衰振動は低周波数側のスペクトル形状に依存しており、感度モデルを用いて表現することが可能であることがわかった。今回の実験結果は移設前の結果を再現するものであり[1]、本ライナックを用いて<10 fsの超短パルス電子ビーム発生が可能であることを確認した。

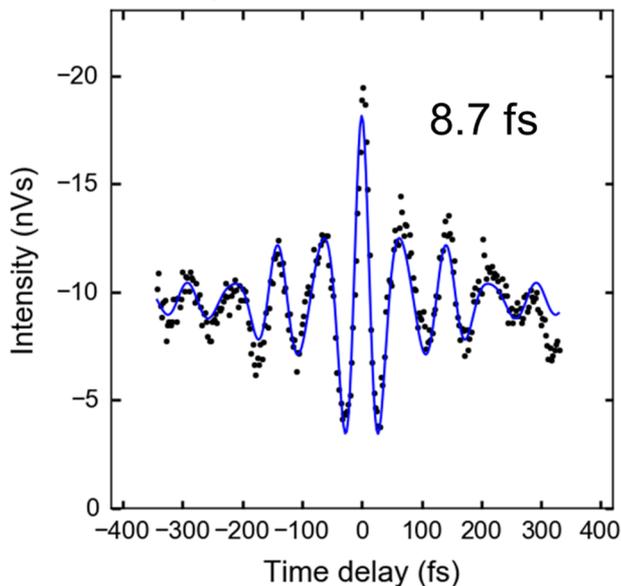


Figure 4: An averaged interferogram of the CTR measured using the MCT detector.

5. 結論

移設後のライナックに対してGPTを利用したビーム軌道計算を実施し、<10 fs電子ビームが発生可能であることを示唆した。今後はアト秒領域の電子ビーム発生について検討を行う。

また、異なる周波数帯域を持つ2つの検出器を備えたマイケルソン干渉計を用いて、フォトカソードRF電子銃ライナックから発生した超短パルス電子ビームのパルス幅測定を実施した。インターフェログラムを解析することにより、移設後のライナックに関しても<10 fs電子ビームの発生を確認した。今後はより短パルスの電子ビームの発生を図るとともに、アト秒パルスラジオリシスや集団励起効果の実証などの応用研究へ展開する。

謝辞

大阪大学産業科学附属量子ビーム科学研究施設の教員および職員の方々に実験装置の立ち上げや運転

においてご支援頂いた。また、GPTの使い方についてご教授頂いた、高エネルギー加速器研究機構の宮島司先生に感謝申し上げたい。本研究の一部は科研費(26249146・15J02667)によりご支援頂いた。

参考文献

- [1] I. Nozawa *et al.*, Phys. Rev. ST Accel. Beams 17, 072803 (2014).
- [2] S. Inoue *et al.*, Phys. Rev. Lett. 109, 185001 (2012).
- [3] G. Berden *et al.*, Phys. Rev. Lett. 99, 164801 (2007).
- [4] <http://www.pulsar.nl/gpt/>
- [5] J.H. Billen, L.M. Young, Proc. PAC93 (1993), p. 790.