

## Femtosecond electron bunch generation at photocathode RF gun

Koichi Kan<sup>1</sup>, Jinfeng Yang, Takafumi Kondoh, Kimihiro Norizawa, Atsushi Ogata, Takahiro Kozawa, Yoichi Yoshida  
The Institute of Scientific and Industrial Research (ISIR) Osaka University Mihogaoka 8-1, Ibaraki, Osaka, 567-0047

### Abstract

Pulse radiolysis, which is a stroboscopic measurement technique, employs a short bunch electron beam and a short-pulse light; this technique is a powerful tool that can be used for the observation of ultrafast electron-induced phenomena involving the mechanical motions of electrons and atomic nuclei in reaction mechanisms in physics, chemistry and biology. The time resolution of pulse radiolysis depends on the electron bunch length and the pulse width of the probe light. In order to improve the time resolution, femtosecond electron bunch generation at photocathode RF gun was studied. In this paper, UV laser pulse (266 nm) was generated with third-harmonic-generation (THG) of Ti:Sapphire femtosecond laser (800 nm). The UV laser pulse was injected into the photocathode RF gun.

## フォトカソードRF電子銃におけるフェムト秒電子線パルスの発生

### 1. はじめに

阪大産研では、レーザーフォトカソードRF電子銃、S-バンド加速管、磁気パルス圧縮器を導入し、フェムト秒電子線パルスの発生とフェムト秒パルスラジオリシスの開発を行っている。パルスラジオリシスは、量子ビームにより誘起される中間活性種の時間挙動を時間分解で追跡することができる方法である。フェムト秒電子線パルスの発生においては、ピコ秒レーザーとフォトカソードRF電子銃を用いて低エミッタンスのピコ秒電子線パルスを発生し、ライナックにより加速と共にパルス圧縮時高次効果を補正するための非線形エネルギー変調を行い、最短98 フェムト秒の電子線パルスの発生に成功した<sup>[1]</sup>。また、フェムト秒パルスラジオリシスの開発においては、そのようなフェムト秒電子線パルス発生技術を用いて、フェムト秒電子線パルスを発生し、クリーンブースの導入により分析光となるフェムト秒レーザーを安定化し、750 フェムト秒の時間分解能に達した<sup>[2]</sup>。さらに、サンプルセルの改良などにより、現在では、数100 フェムト秒の時間分解能をもつパルスラジオリシスの開発に成功している<sup>[3]</sup>。

このように、超短パルス電子線は、パルスラジオリシスの時間分解能向上のために不可欠である。しかし、時間分解能を向上するためには、さらに短いフェムト秒、さらにはアト秒のパルス幅を持つ電子ビームの発生を行う必要がある。そのために、電子銃においてフェムト秒電子線パルスを発生し、フェムト秒電子線ビームを磁気パルス圧縮することにより、フェムト秒・アト秒電子線パルスの発生方法を検討している。また、電子銃におけるフェムト秒電子線パルスの発生は、超高速電子線回折<sup>[4]</sup>においても不可欠であり、時間分解能の向上に繋がると考えている。

そこで、フェムト秒・アト秒パルスラジオリシス

の達成を目的として、フェムト秒レーザーによる、フォトカソードRF電子銃におけるフェムト秒電子線パルス発生の研究を行った。本研究では、フェムト秒レーザーから3倍高調波を発生した。その3倍高調波を、RF電子銃のカソードに入射し、RF電子銃での加速位相を変化させ、発生電荷量の変化を計測した。

### 2. フォトカソードRF電子銃ライナック

図1に、フォトカソードRF電子銃ライナックの構成を示す。本ライナックは、フォトカソードRF電子銃、S-バンド進行波型ライナック、磁気パルス圧縮装置、40 MWクライストロンから構成されている。RF電子銃はS-バンドの1.6 セルの加速空洞をもち、カソードの材質は無酸素銅である。電子ビームの発生には、クライストロンからのマイクロ波と同期したフェムト秒レーザーを用いた。フェムト秒レーザーからの基本波(800 nm)は、3倍高調波発生光学系(TPH Tripler)によって、3倍高調波(266 nm)に変換し、銅カソードに入射した。これは、銅カソードにおける仕事関数が4.6 eV程度であり、光電効果を起こすためには、カソード表面状態にも依存するが、279 nm以下の波長の光が必要となるためである。レーザーをカソードに照射すると、光電効果により発生した電子は電子線パルスとなり空洞内の高電場で加速される。電子線パルスの電荷量は電子銃出口に設置してあるCurrent Transformer(CT)により測定を行った。本研究では、パルス圧縮の測定は行っていないが、パルス圧縮を行うときは、ライナックを用いてさらに32 MeVまで加速され、エネルギー変調をかけられる。加速された電子ビームは偏向電磁石2台(B1、B2)、四極電磁石4台(Q3~Q6)からなる磁気パルス圧縮装置に入り、パルス圧縮される。

<sup>1</sup> E-mail: koichi81@sanken.osaka-u.ac.jp

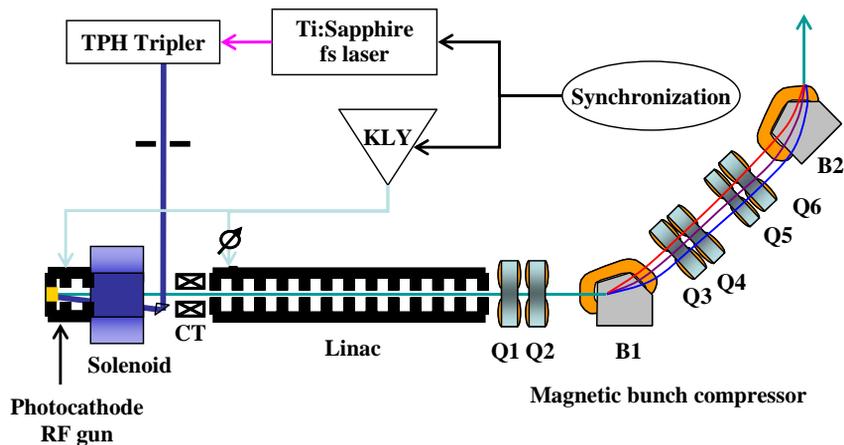


図1. フォトカソードRF電子銃ライナックの構成

### 3. 測定結果

#### 3.1 フェムト秒レーザーの3倍高調波発生

本研究では、Ti:Sapphireフェムト秒レーザー(<800 mW @ 1 kHz)からの光を、3倍高調波変換光学素子 (TPH Tripler, Minioptic Technology社製)により、3倍高調波(266 m)への変換を行った。TPH Triplerの特徴は、Timing Plateと呼ばれる1つの素子を用いて基本波と2倍波のタイミングを調整することができることである。通常、Beta-Barium Borate(BBO)を用いて2倍高調波を発生するとき、屈折率により出てくる基本波と2倍高調波のタイミングが異なる。そのため、光学ディレイなどを用いて、基本波と2倍波のタイミングを同じにして3倍高調波に変換する。しかし、TPH Triplerにおいては光学ディレイの代わりに、Timing Plateを用いているため、非常にコンパクトな装置となっている。

図2に、TPH Triplerを用いた3倍高調波発生時の測定結果を示す。フェムト秒レーザー再生増幅器の結晶を励起するレーザーの出力を変化させ、フェムト秒レーザーの出力(<800 mW @ 1kHz)を変化させた。フェムト秒レーザーの入力が800 mWのとき、3倍高調波の出力は180 mWとなった。そのときの3倍高調波のパルスあたりのエネルギーは、180 uJ/pulse、変換効率は、23%と得られた。また、変換効率はフェムト秒レーザーのコンプレッサーの条件に大きく依存することも分かった。入力するフェムト秒レーザーのパルス幅が短くなると、光子密度が高くなる。その結果、非線形光学結晶を用いているTPH Triplerでは変換効率が大きくなるためである。測定結果は、3倍高調波の出力が最大となるようにコンプレッサーにおける光学ディレイ長の最適化を行った結果である。

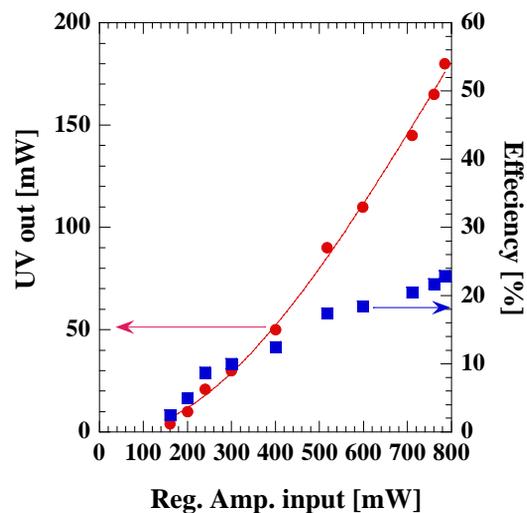


図2. 3倍高調波発生時の測定結果  
3倍高調波の出力(●)と変換効率(■)

#### 3.2 3倍高調波による電子線パルスの発生

TPH Triplerによって発生した3倍高調波(266 m)をカソードに入射し、電子線パルスの発生を行った。発生した3倍高調波の直径は8 mmであったため、アパーチャーで絞ってカソードへ入射した。発生した電子線パルスの電荷量はCTのpeak to peakの電圧により測定を行った。カソード等価位置におけるレーザーの直径は4 mmとした。これは、電子銃におけるRF電場と高強度の3倍高調波による放電で、カソードが損傷するのを防ぐためである。また、プロファイルではアパーチャーによる干渉が起こっているが、分布はガウス分布よりは矩形分布に近いことが確認された。

図3に、3倍高調波を入射したタイミングでの電子銃における加速位相に対する発生電荷量の測定結果を示す。カソードに入射する3倍高調波のパルスあたりのエネルギーの違いでプロットしている。ショットキー効果により発生電荷量は変化した。

ショットキー効果とは、加速電場により表面近傍におけるポテンシャルが曲がり、真空中に引き出される電荷量が増加する現象である。加速位相が最大(90 degree)になると、加速電場は最大となる。そのため、カソードにおけるポテンシャルが曲がり、トンネル電流として電子を発生しやすい状況を作ることになる。ただ、電子発生直後の電子銃における電子線パルスの速度と加速電場の位相速度は異なるため、3倍高調波の入射位相と電子銃を出るときの加速位相は異なるため、位相スリップの詳細な解析を行う予定である。40 uJ/pulseの3倍高調波を入射したときの最大電荷量は、170 pC/pulseとなり、電子線パルスの発生を確認することができた。

図4に、入射した3倍高調波のエネルギーに対する量子効率の測定結果を示す。3倍高調波を入射したタイミングでの電子銃における加速位相の違いでプロットしている。その結果、加速位相が33 degreeのときの量子効率は約 $1 \times 10^{-5}$ 、加速位相が75 degreeのとき約 $2 \times 10^{-5}$ が得られた。いずれの加速位相においても、入射3倍高調波のエネルギーの増加に伴い、量子効率の減少が見られた。この理由としては、空間電荷制限電流密度<sup>[5]</sup>が原因である。空間電荷制限電流密度とは、カソードから光電効果によって電子が引き出されるとカソードは正に帯電することになる。その結果、電子はカソードから減速の電場を受け、発生(加速)できる電荷量が制限されるという現象である。本研究においては、レーザーの直径:4 mm、パルス幅:200 fs、により空間電荷制限電流密度<sup>[5]</sup>を見積もると、10 nC/pulseと得られた。発生した電荷量は空間電荷制限電流密度よりも2桁ほど低いが、空間電荷効果による量子効率の減少が確認された。今後は、カソードの作る減速電場とショットキー効果を含めた解析を行っていく予定である。また、3倍高調波をアパーチャーで大幅にカットしているため、発生電荷量も170 pC/pulseほどしか発生できなかった。3倍高調波のビーム径縮小光学系により、3倍高調波のフルエンスを増加させると共に、より高い電荷量を発生させることも検討している。

#### 4. まとめと今後の展望

フェムト秒・アト秒領域の量子ビーム誘起高速反応の解明のために、電子銃におけるフェムト秒電子線パルス発生の研究を行った。フェムト秒レーザー(800 nm)の入力が800 mWのとき、3倍高調波(266 nm)のパルスあたりのエネルギーは、180 uJ/pulse、変換効率は、23%と得られた。40 uJ/pulseの3倍高調波を電子銃に入射したとき、ショットキー効果により、最大電荷量は170 pC/pulseとなった。量子効率は、電子銃における加速位相が33 degreeのときの約 $1 \times 10^{-5}$ が得られた。入射3倍高調波のエネルギーの増加に伴い、空間電荷制限電流密度による量子効率の減少が見られた。

今後は、ショットキー効果、空間電荷制限電流密度による発生電荷量および量子効率変化の詳細な解析を行う。また、ストリークカメラによるパルス幅

の測定、Qスキャン法によるエミッタンスの測定を行う。

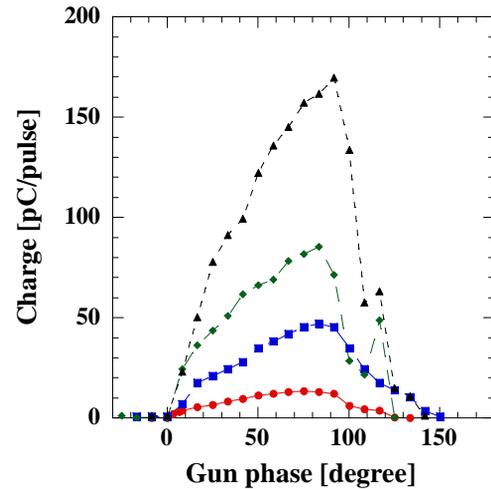


図3. 加速位相に対する発生電荷量の測定結果  
3倍高調波のパルスあたりのエネルギー:  
3 uJ(●)、10 uJ(■)、20 uJ(◆)、40 uJ(▲)

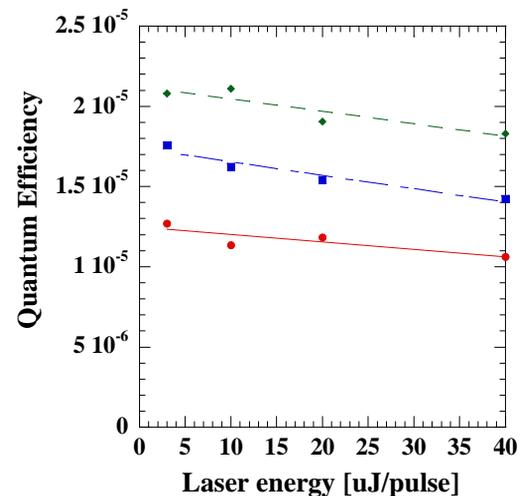


図4. 3倍高調波のエネルギーに対する量子効率の測定結果  
電子銃における加速位相: 33 degree(●)、50 degree(■)、75 degree(◆)

#### 参考文献

- [1] J. Yang et al., Nucl. Instr. and Meth. A 556 (2006) 52.
- [2] 田中治輝 等、第51回放射線化学討論会。
- [3] 楊金峰 等、第6回日本加速器学会年会。
- [4] Michael Wulff et al., Nucl. Instr. and Meth. A 398 (2003) 69.
- [5] C. Travier, Nucl. Instr. and Meth. A 340, 26.