

PRESENT STATUS OF S-BAND ELECTRON LINAC IN OSAKA UNIVERSITY

Y. Yoshida¹, J. Yang, T. Kondoh, H. Honda, T. Kozawa, T. Yamamoto, S. Tagawa, T. Majima
The Institute of Scientific and Industrial Research, Osaka University,
8-1 Mihogaoka, Ibaraki, Osaka, 567-0047, JAPAN

Abstract

An S-band photocathode electron linear accelerator was developed in Osaka University for the study of radiation-induced ultrafast physical and chemical reactions. A 32 MeV single electron pulse with pulse width of 98 fs in rms was generated successfully in the linac with a magnet bunch compression system. By using the femtosecond electron bunch, an equivalent velocity spectroscopy with a synchronized femtosecond laser, as a new method with high time-resolution, was developed for study of the ultrafast reactions or phenomena on femtosecond time scale. Moreover, a femtosecond electron source based on the photocathode rf gun is proposed for the time-resolved pulse radiolysis and the time-resolved electron diffraction. The simulation indicates that an MeV sub-100-fs electron beam with the normalized transverse emittance of less than 0.1 mm-mrad (without thermal emittance of the cathode) and the relative energy spread of 10^{-4} at bunch charge of 0.1-1pC is achievable in the photocathode rf gun driven by a femtosecond laser light.

阪大産研Sバンド電子ライナックの現状報告

1. はじめに

大阪大学産業科学研究所産業科学ナノテクノロジーセンター・加速器量子ビーム実験室では、40MeV Sバンド電子ライナックのほかに、150MeVのSバンド電子ライナック、40MeVのレーザーフォトカソードRF電子銃ライナックの2台のSバンド線形加速器の維持・運転も行っている。150MeVのSバンド電子ライナックは低速陽電子発生のための装置として利用され、40MeVのレーザーフォトカソードRF電子銃ライナックはナノ空間内高速現象の解明を目指して平成14年度に設置された。

現在、主にフォトカソードRF電子銃ライナックを用いて、以下のようなさまざまな研究開発とビーム利用を行っている。

①サブフェムト秒・アト秒短パルス電子ビーム発生の研究

②フェムト秒短パルス電子ビームを利用した超高速反応現象の解明（フェムト秒パルスラジオリシス）

③ビームの高精度制御、濃淡電子ビームの開発と新規放射線の医療応用

④さらに、今年度に、KEKとの共同研究として、新たな100フェムト秒短パルスフォトカソードRF電子銃の開発をスタートした。実現すれば、次世代の高輝度電子源として、フェムト秒時間分解電子線回折の実現が期待でき、物質科学においてさまざまな新しい発見が期待される。

2. サブフェムト秒・アト秒短パルス電子ビーム発生の研究

阪大産研では、レーザーフォトカソードRF電子

銃ライナックを導入し、フェムト秒電子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。図1に、SバンドフォトカソードRF電子銃ライナックを示す。本ライナックは、レーザーフォトカソードRF電子銃、Sバンド加速管、磁気パルス圧縮器から構成されて、短パルス電子ビームの発生にはピコ秒Nd:YLFレーザーを利用している。現在までは、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パルスを発生し、ライナックより加速の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、98フェムト秒の短パルス電子ビームの発生に成功した。

平成19年度から、パルスラジオリシスの時間分解能の向上と利用実験の拡大を目指して、サブフェムト秒・アト秒電子パルス発生技術の開発を始めた。つまり、パルス圧縮における磁場中高次効果、空間電荷効果とエミッタンスによるパルス幅への影響を理論的に解明し、スリットや6極電磁石による

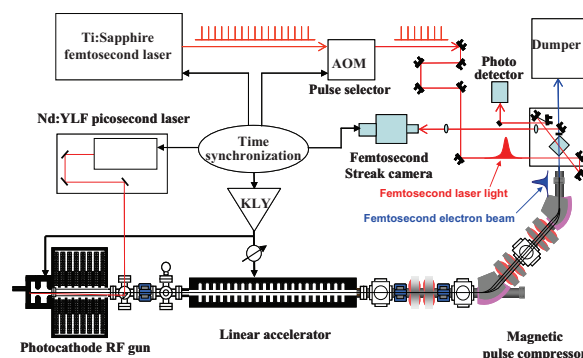


図1 阪大産研SバンドフォトカソードRF電子銃ライナックとフェムト秒電子パルスを利用したフェムト秒パルスラジオリシスシステム。

¹ E-mail: yoshida@sanken.osaka-u.ac.jp

パルス圧縮における磁場中高次効果の低減を利用した。また、フォトカソードRF電子銃やライナックによる電子パルスのエネルギー変調を最適化して、シミュレーションではサブフェムト秒電子ビームの発生を確認した。図2に、スリット (a) と6極電磁石 (b) によるパルス圧縮における磁場中高次効果を低減し、シミュレーションで得られたフェムト秒・サブフェムト秒短パルス電子ビームの結果である。図2 (a) に、フォトカソードRF電子銃からフェムト秒電子パルスの発生を利用した。

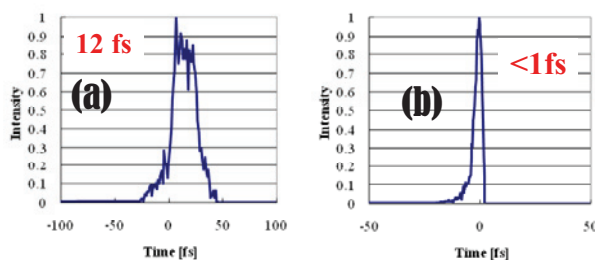


図2 スリット (a) と6極電磁石 (b) によるパルス圧縮における磁場中高次効果を低減し、シミュレーションで得られたフェムト秒・サブフェムト秒短パルスの結果。

3. フェムト秒パルスラジオリシスの研究

フェムト秒時間分解能を達成するためには、フェムト秒電子パルスとフェムト秒分析光パルスが必要であるほかに、サンプル中での光と電子が通過する速度の違いによる時間分解能の劣化の防止が必要である。そこで、我々は、図1に示すような等価速度分光法と呼ばれる方式を開発した。これは、電子線パルスと光パルスを屈折率に応じて角度をつけてサンプルに入射する方法である。その際に、磁気パルス圧縮器で電子線パルスの波面を光パルスと同じになるように調整を行う。そうすることにより、サンプル中での光路長による時間分解能劣化を原理的にはゼロにまですることが可能である。また、光路長も電子ビームの径に応じて大きくとることが可能であり、吸収強度も格段に大きくなる。

電子線パルスの波面制御は、電子加速のRF位相と、2台の偏向電磁石と4台の四極電磁石から構成された磁気パルス圧縮器での磁場分布の調整により行われ、電子線パルスの波面測定はフェムト秒ストリークカメラを用いて行われた。図3に、ライナックのRF位相を変えたとき測定した電子線パルスの形状と等価速度分光法によるパルスラジオリシスの時間分解能向上の実験結果を示す。

また、フェムト秒電子パルスとフェムト秒分析光パルスの時間ジッターを減らすために、1台のライナックで上下2つ電子パルスの発生と加速を実現

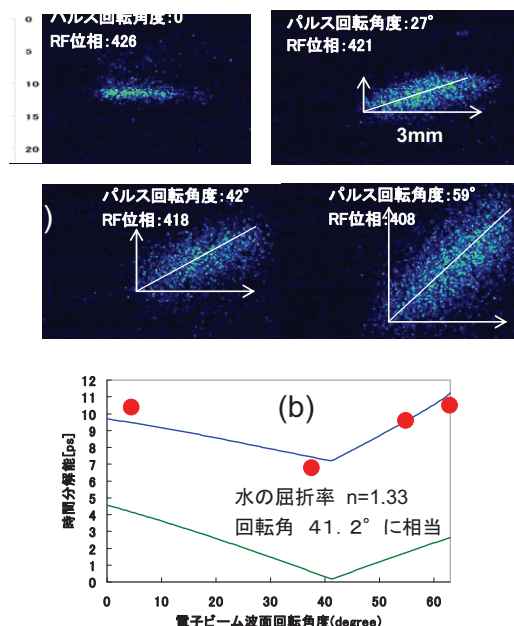


図3 (a)ライナックのRF位相を変えたとき測定した電子線パルスの形状と (b) 等価速度分光法によるパルスラジオリシス時間分解能向上の実験結果

するダブルデッカー電子ビーム加速器を開発し、ダブルデッカー電子ビームを利用したパルスラジオリシス実験も開始した。

4. 濃淡電子ビームの発生と医療応用

フォトカソードRF電子銃は、レーザー光パルスを用いて、低エミッタンス電子線パルスを発生させることができる。我々は、フォトカソードRF電子銃は、入射光学系での光学的変調によって、強度変調電子ビームを発生し、動的な制御ができるだろうと考えた。また低エミッタンスなので、強度変調電子ビームパルスは、形状を保ったまま加速することができると考えた。たとえば呼吸など、人体は常に動いているので、がんもまた動く。それ故に、現在のIMRTでは、不随意筋により絶えず動く部位へは適用されていない。フォトカソードと光学変調系を用いれば、呼吸、脈動、不随意筋などの人体の運動程度には完全に追従できるような高速・高精度の動的な空間分布制御が可能である。放射線治療のためには、電子ビームは、呼吸やその他の人体の動きに同期しなければならない。

そこで、阪大産研では、小型加速器を用いた強度変調放射線治療の高機能化（高速化・高空間分解能化）を目指して、フォトカソードRF電子銃加速器を用いた光学的制御による電子ビームの動的強度変調を研究している。電子ビームの動的な光制御が可能であるということを示すために、単純な仮想的な実験系を用いて、基礎的な実験を行った。レーザー光は、二つの光路に分岐され、一つはフィルターにより光強度を小さくした。そして、他方はマスクに

より、サイズを小さくした。小さく高強度の光路中にリモートミラーを使用した。高強度の小さいスポットが、低強度の大きなスポットの周りぐるぐる動いた。電子ビームの動的光学変調のデモンストレーションとして、簡単な電子ビームムービーを測定・撮影した。図4に、電子ビームムービーのスナップショットを示した。従来の方ではこのような電子ビームの変調はできなかった。電子ビームの光学変調の第二段階として、入射光学系中のリモートミラーによる電子ビームの動的な加工に成功した。

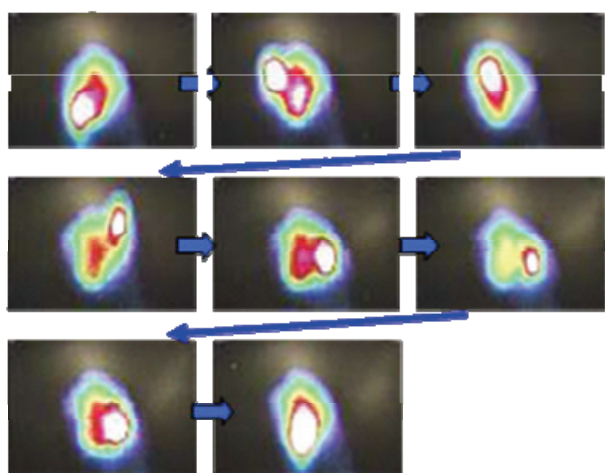


図4 電子ビームムービーのスナップショット。電子ビームモニターにはアルミナ蛍光板(Desmarquest:AF995)を用いて、電子ビームによる発光をCCDカメラで観測し、トリガーシンクロビデオボードでキャプチャした。

5. 時間分解電子線回折用フェムト秒フォトカソードRF電子銃の開発

フェムト秒時間領域でのダイナミクスの解明は、新しい物質の創製や物質科学にとって極めて重要である。ここ数年、フェムト秒超短パルスレーザービームの登場により、フェムト秒での時間分解・構造変化が追跡可能となり、「フェムト秒短パルス電子ビーム」は今まさに物質科学の新しい時代を切り開き始めている。同様に、加速器から生成した短パルス電子ビームも、物質内超高速反応・現象の解明などのさまざまな先端的な研究に欠かせない道具となっており、また、荷電粒子性といった見地からレーザーと異なった短パルス電子ビームとして注目されている。

阪大産研では、フォトカソードRF電子銃の利点(低エミッタンス・短パルス)を生かし、高エネルギー加速器研究機構との共同研究として、新規なフォトカソードフェムト秒短パルス電子銃の開発をスタートした。目標のビームは、パルス幅が100フェムト秒、エミッタンスが1mm-mrad以下、エネルギー分散が 10^{-3} 以下、パルス当りの電荷量は0.1pC以上である。実現すれば、従来のバンチ圧縮が要らな

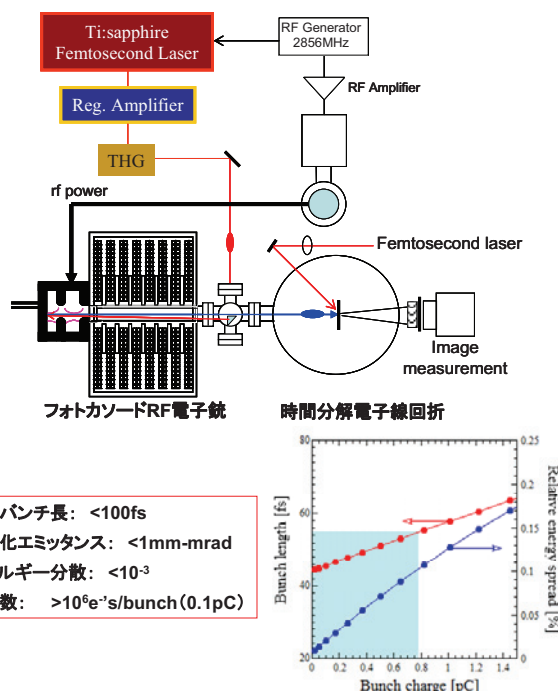


図5 フォトカソードRF電子銃を利用したフェムト秒時間分解電子線回折システムとフォトカソードRF電子銃におけるフェムト秒短パルス電子ビーム発生シミュレーション結果。

くなり、フォトカソードRF電子銃を利用することで、低エミッタンスのフェムト秒電子ビームを得ることが可能となり、次世代の高輝度電子源として、フェムト秒時間分解電子線回折の実現が期待でき、物質科学においてさまざまな新しい発見が期待される。図5に、フォトカソードRF電子銃を利用したフェムト秒時間分解電子線回折システムとフォトカソードRF電子銃におけるフェムト秒短パルス電子ビーム発生シミュレーション結果を示す。

参考文献

- [1] J. Yang, T. Kondoh, K. Kan, T. Kozawa, Y. Yoshida, S. Tagawa, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 556(2006)52-56.
- [2] 楊金峰、「フォトカソードRF電子銃の開発」、本加速器学会。
- [3] 近藤孝文、「強度変調放射線治療を目指したフォトカソードRF電子銃における電子ビームの光学変調」、本加速器学会。
- [4] 菅晃一、「パルス圧縮における空間電荷効果とエミッタンスの影響」、本加速器学会。
- [5] 加嶋宏章、「医療応用のための電子ビームの光学的制御技術開発」、本加速器学会。