

DEVELOPMENT OF A LASER PHOTOCATHODE RF GUN LINAC

J. Yang¹, K. Kan, H. Tomosada, K. Takeya, T. Yamamoto, T. Kozawa, Y. Honda, Y. Yoshida, S. Tagawa

The Institute of Scientific and Industrial Research, Osaka University

8-1 Mihogaoka, Ibaraki, Osaka 567-0047, Japan

Abstract

A new S-band femtosecond electron linear accelerator was developed in Osaka University for the study of radiation-induced ultrafast physical and chemical reactions. The femtosecond electron accelerator was constructed with a laser driven photocathode RF gun, a linear accelerator (linac) and a magnetic pulse compressor. The picosecond electron pulse produced from the photocathode RF gun was accelerated by the linac with energy modulation and compressed into a few tens femtosecond by the magnetic pulse compressor. The femtosecond electron pulse is expected for the study of femtosecond pulse radiolysis with a femtosecond laser light.

フォトカソードRF電子銃ライナックの開発

1. はじめに

パルスラジオリシス法は、量子ビーム誘起現象を直接的に測定する手法であり、これまでに量子ビーム誘起現象の超高速現象の解明に大きく貢献してきた。その時間分解能は、短パルス電子線と短パルスのレーザー分析光を組み合わせた方式によりサブピコ秒にとどまっている。

阪大産研では、1999年より本格的なサブピコ秒パルスラジオリシスシステムの整備および利用実験を開始した[1-2]。そのサブピコ秒パルスラジオリシスシステムでは、励起源として阪大産研Lバンドライナックからの電子線を磁気パルス圧縮法によって圧縮したフェムト秒電子線パルスを用い、分析光源としてLバンドライナック用のRFと同期したフェムト秒チタンサファイアレーザーパルスを用いている。電子線パルスとレーザーパルスの間の時間ジッターによる時間分解能の劣化に対しては、フェムト秒ストリークカメラを用いて電子線パルスと分析レーザーパルスの時間差を正確に測定し、両パルス間の時間ジッターの影響をストリークカメラの時間分解能（185fs）までに低減することが可能になった。

2002年からは、時間分解能の向上と利用実験の拡大を目指してレーザーフォトカソードRF電子銃と新しいS-バンドライナックを導入し、レーザーフォトカソードRF電子銃を用いた低エミッタンスフェムト秒電子線の開発を開始した。レーザーフォトカソードRF電子銃ライナックの特徴として、

電子線が短パルス（数ps）である。その電子パルスをRF電子銃下流に設置されたライナックのRF位相を調整することによってエネルギー変調させ、最後に磁気パルス圧縮法によりフェムト秒電子パルス発生が期待できる。低エミッタンスのため高輝度になる。従って、高S/N光吸収分光の実現が期待できる。電子線パルスとレーザー光パルスが高精度で時間同期でき、時間ジッターによる

パルスラジオリシス時間分解能の劣化を減らすことも期待できる。

2. フォトカソードRF電子銃ライナック

2.1 レーザーフォトカソードRF電子銃

本レーザーフォトカソードRF電子銃は、住友重機械製のBNL - GunIVタイプである[3-4]。加速空洞はS-バンドの1.6セルと採用され、電子発生用の光カソードの材質は無酸素銅を用いられている。

本RF電子銃では、レーザー入射角度68°の入射ポートが取り付けられているが、レーザー光をそのままに入射するとカソード面でのレーザー光形状が楕円になり、発生した電子ビームの形状も楕円になり、エミッタンス増大の原因になる[2]。そのエミッタンス増大を避けるために、本システムではRF電子銃下流の真空チェンバーに光反射用のプリズムを設置し、図1に示すようなカソード面に対して垂直のレーザー照射方法を採用した。

RF電子銃から発生した電子ビームのエネルギー（4MeV）が低いため、ビーム輸送中空間電荷効果によるエミッタンスの増大を生じる。これに対しては、電子銃出口にソレノイド磁石を取り付けられ、ソレノイド磁場強度を最適化し、空間電荷効果によるエミッタンスの増大を補正する。

2.2 電子線発生用のピコ秒レーザー

光カソードの光源としては、全固体Nd:YLFピコ秒レーザーを用いた。本レーザーは、Nd:YLF発振器（波長：1053nm）、再生増幅器と波長変換器により構成される。発振器は、電子線発生と加速用の2856MHzRFを1/36に分周した79.3MHzのRFに同期してモードロック発振を行っている。オシレータからの高い繰り返し（79.3MHz）のレーザー光は、

¹ E-mail: yang@sanken.osaka-u.ac.jp

ポッケルセルによって、1つの光パルスが選択され、再生増幅器の共進器に導入される。ポッケルセルの繰り返しは、1から30Hzまで可能となっている。再生増幅器で3 mJまで増幅された光は、非線形結晶を2つ配置したSHGによって赤外光(262nm)を波長変換され、カソードに照射される。

ポッケルセル、励起レーザーなどの発熱部に対して、温度コントロールを行うとともに、筐体部の熱膨張なども考慮し、出力パルスエネルギー安定度を0.5%に達成し、オシレータ出力パルスの時間ジッターは0.3ps (rms)以内に抑えられた。赤外光パルスの幅は、フェムト秒ストリークカメラにより測定され、5ps (FWHM) (図2)であった。カソード表面のレーザー光のビーム径は3mm (直径)であった。

2.3 進行波型ライナック

電子ビーム加速用のライナックは、三菱重工製の長さ2mのS-バンド進行波型ライナックを採用し、カソード表面から1.2mの位置に設置されている。ライナックとRF電子銃には、同一クライストロンから2分配されたRFがそれぞれ供給される。ライナックとRF電子銃に供給されるRFピークパワーはそれぞれ25MWと10MWであり、RFパルス幅は4 μ sで、運転繰り返しは10Hzである。ライナックのRF位相調整は、ハイパワーRF伝送ラインに取り付けたフェーズシフターによって行う。ライナックでは、電子ビームを加速するとともに、RF位相調整により電子パルスがエネルギー変調される。

2.4 磁気パルス圧縮装置

電子パルス圧縮は、2台の45°偏向磁石と4台の四極電磁石から構成された磁気パルス圧縮システムを用いて行われている(図1に示す)。すなわち、ライナックでエネルギー変調された電子パルスが磁気パルス圧縮システムを通過させることに

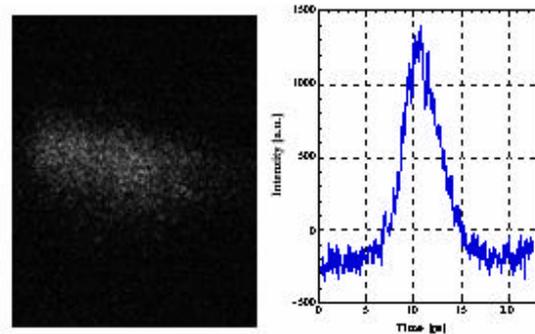


Figure 2: The UV light pulse measured by a femtosecond streak camera

よってエネルギー違い電子の軌道長の差を利用してパルスを圧縮する。磁気パルス圧縮法によって圧縮されたパルスの幅は、入力ビームのエミッタンスとエネルギー分散に依存している。阪大産研では、磁気パルス圧縮法を用いてL-バンドライナックから発生した電子パルス圧縮実験を行った。L-バンドライナックから発生したエネルギー19.1MeV、規格化エミッタンス100mm-mrad、パルス幅6.6psの電子パルスを850fsに圧縮することに成功した。本システムでは、レーザーフォトカソードRF電子銃を利用しているため、L-バンドライナックに比べてビームのエミッタスが1/数10から1/100まで改善でき、シミュレーション[5]により本システムでは電子パルスの圧縮は数十フェムト秒まで可能である。

2.5 クライストロンパルス電源と冷却系

電子ビームを安定化させるためには、クライストロン出力の安定化と、RF電子銃とライナックの温度安定化が必要である。そのため、本ライナックシステムには、新たに日新電機(株)製のクライストロンパルス電源を導入した。クライストロンパルス電源の出力としては、パルスの電圧は265kVであり、電流は300A、半値幅とフラット

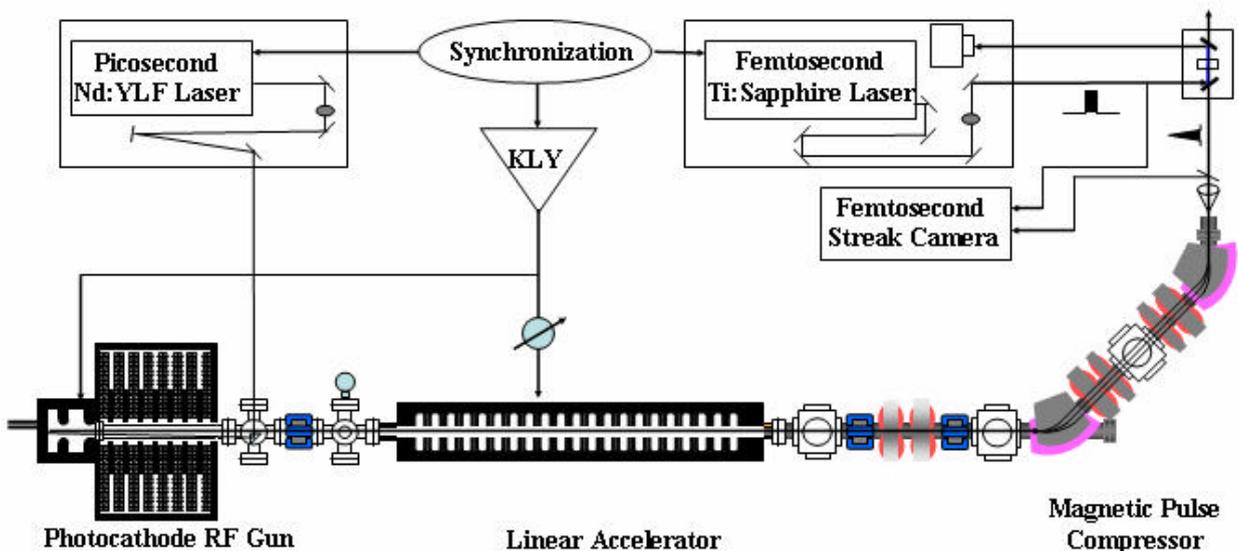


Figure 1: A femtosecond electron linac based on a photocathode RF gun

トップ幅はそれぞれ9 μ sと4 μ sである。パルス発生部には、PFNを10段に採用するとともに、充電用の直流電源の安定化を図った。パルス電源の単体試験には、出力パルス電圧の安定度は0.08% (peak-to-peak) と得られた。

RF電子銃とライナックの温度安定化については、新たに高精度冷却装置を導入した。電磁石とRF関係の装置の冷却用の一般系と、RF電子銃とライナックの空洞の冷却用の精密系を2系統に分けている。精密系は、一般系の上にヒーターを取り付けて更に温度コントロールを行った。一般系と精密系の冷却水の温度変動は、無負荷時、それぞれの0.1 と0.05 以内に抑えられた。

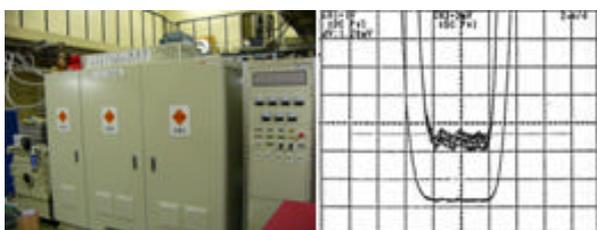


Figure3: Klystron modulator and stability of pulse

3 . パルスラジオリシスとタイミング系

3.1 パルスラジオリシス

レーザーフォトカソードRF電子銃を用いたフェムト秒パルスラジオリシスシステムを図1に示す。分析光としてチタンサファイアレーザーから発生したフェムト秒光パルスを用いている。チタンサファイアレーザーの発振器は、RF電子銃用レーザーと同様に電子線加速用の2856MHzのRFを1/36に分周した79.3MHzRFに同期し、モードロック発振を行っている。発振器からの光パルスをポッケルセルにより1kHzに切り出し、再生増幅器で増幅する。再生増幅器の下流側にOPOを取り付け、出力パルス波長が300から1200nmまで可変となり、違った波長での過渡吸収の測定も可能となる。

また、時間分解能を向上させるために、以下の3つの方法を取り込んだ。電子線パルスとレーザーパルスの間の時間ジッターによる時間分解能の劣化に対しては、従来阪大産研開発したフェムト秒ストリークカメラを用いた時間ジッター補正法を取り込んだ。光伝搬による光強度の揺らぎを抑えるため、分析用フェムト秒レーザーの繰り返しを1kHzに上げ、レーザーマルチパルスの入射方法を採用した。さらに、サンプル中での光パルスと電子パルスの速度の違いから生じる時間分解能の劣化を避けるため、電子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斜め入射法と呼ばれる方式も考案した。

3.2 RFとトリガー系

RF信号系には、1台の2856MHzのオシレータを用いた。オシレータ出力の2856MHzのRF信号を、ク

ライストロンに供給し、1/36に分周した79.3MHzRF信号を電子発生用Nd:YLFレーザーと分析用のチタンサファイアレーザーのモードロック信号としている。

レーザーパルス切り出しのポッケルセル、クライストロンパルス電源に79.3MHzRFと同期したトリガーを供給している。フェムト秒レーザー用のトリガーは1kHzであり、電子発生用のNd:YLFレーザー、クライストロンと計測には、1kHzから分周したトリガーを用いた。

レーザーパルスと電子線パルスの時間同期システムを図2に示す。トリガー信号と79.3MHzのRF信号の時間ジッター、79.3MHzのRF信号と2856MHzのRF信号の時間ジッターを、高速デジタルサンプリングオシロスコープより測定した。トリガー信号と79.3MHzのRF信号の時間ジッターは10ps以内に抑えられ、9.3MHzのRF信号と2856MHzのRF信号の時間ジッターはデジタルサンプリングオシロスコープの測定限界(2ps)以下であることを確認した。

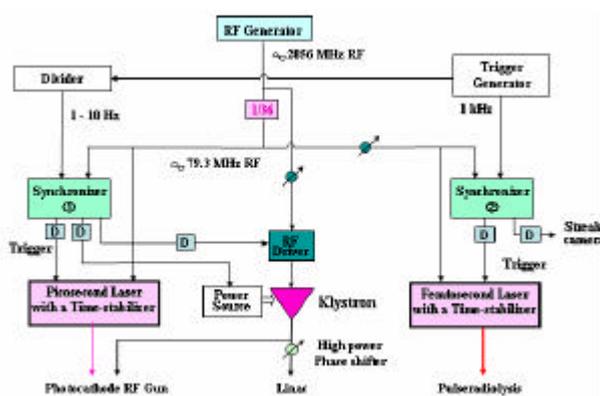


Figure 4: Time synchronization between the lasers and RF

4 . 今後の予定

RF電子銃、ライナック、パルス圧縮装置、クライストロンとRF系、同期系、レーザーなどすべての装置の設置を完了し、動作確認を行った。パルスラジオリシス用分析レーザー光伝搬ビームラインも取り付けました。今年秋から電子パルス発生や測定などビームスタディを開始し、パルスラジオリシスの実験を行う予定である。

参考文献

- [1] Y. Yoshida, et al., Radit. Phys. Chem., **60** (2001), 313-318.
- [2] K. Kozawa, et al., Nucl. Instrum. Meth. A **440** (2000), 251-254.
- [3] J. Yang, et al., Nucl. Instrum. Meth. A **491** (2002), 15-22.
- [4] J. Yang, et al., J. Appl. Phys., **92** (2002), 1608-1612.
- [5] H. Billen, PARMELA User's Manual, Los Alamos Accelerator Code Group, LA-UR-96-1835.