

フェムト秒パルスラジオリシスの高精度制御系の開発

竹谷 考司^{A)}、友定 寛^{A)}、楊 金峰^{A)}、山本 保^{A)}、
菅田 義英^{A)}、吉田 陽一^{A)}

^{A)} 大阪大学産業科学研究所 〒567-0047 大阪府茨木市美穂ヶ丘 8-1

概要

阪大産研において S-バンドフォトカソード RF 電子銃を用いたフェムト秒パルスラジオリシスの開発を行っている。励起源にはフォトカソード RF 電子ライナックからの電子線パルスを用い、分析光源にはフェムト秒チタンサファイヤレーザーを用いた。フェムト秒の時間分解能達成の為に、電子線パルスの短パルス化、クライストロンモジュレーターのパルス性能向上、フェムト秒領域での測定系の開発を行った。パルスの高精度制御と実験の再現性のために高性能 PLC を用いた RF 電子銃とライナックの制御システムを構築し、低ジッターの同期システムの開発を行った。現在の開発状況について報告する。

1 はじめに

パルスラジオリシスは放射線によって引き起こされる現象を初期の段階で調べるのに極めて有力な方法である。パルスラジオリシス法では、放射線を瞬間的に試料に照射し、系に生成するカチオンラジカル等の中間活性種を分析光を用いてその活性種の光学吸収が検出できる。励起源には線形加速器からの電子線パルスなどが用いられ、分析光源にはキセノンフラッシュランプやレーザーパルスが使用される。これにより中間活性種の同定とその早い時間の挙動を動的に観測することが可能である。現在では、ストロボスコピック法などの手法の発展により、その時間分解能は以前より格段に高くなっており、サブピコ秒の時間分解能まで向上している。

阪大産研では、高時間分解能のパルスラジオリシスシステムを開発し続け、現在では 1 ピコ秒以下の時間分解能を持つサブピコ秒パルスラジオリシスの開発に成功している[1~4]。そのシステムにより超高速反応の放射線化学初期過程の解明において、様々な成果を挙げてきた。例えば、ドデカン溶媒分子と電子線の相互作用によって誘起されるカチオンラジカルと電子のジェミネートイオン再結合反応の直接的観測や、化学増幅型レジストの酸触媒反応の解明、さらに放射線化学において溶媒として頻繁に利用される塩化メチレン等のハロカーボンの初期反応の解明などが挙げられる。

一方、ナノテクノロジーにおいては、解像度や分解能、加工サイズなどの微小化（トップダウン）の発展により、現在では、電子線リソグラフィーによって数十ナノメートル領域での加工が可能になっている。ナノテクノロジーのトップダウンは今後も進み、また将来ナノメートル以下の加工サイズが必要と予測されている。このような領域での加工はピコ秒からフェムト秒に至る時間領域での反応によってのみ制御可能である。極限ナノ加工を完成させる為には、その反応を直接的に観測し、反応機構を解明しなければならない。

そこで、阪大産研では、新しい高性能フェムト秒電子線ライナックを用いた、フェムト秒の時間分解能を持つパルスラジオリシスシステムの開発を開始した。励起源にレーザーフォトカソード RF 電子銃を導入し、分析光源にはフェムト秒レーザーを用いている。高時間分解能のパルスラジオリシスを実現する為に、高精度で電子ライナックを制御し、実験の再現性を持つ制御システムを構築する必要がある。これらを実現する為に必要なラダープログラムによる PLC 制御、低ジッターの同期回路システムの開発を行った。同時に、光学系と測定系の構築も行った。

2 フェムト秒パルスラジオリシス

フェムト秒電子発生システムは、フォトカソード RF 電子銃、加速管、フェムト秒パルス圧縮システム及び電子パルス発生用ピコ秒レーザーにより構成されている。ピコ秒レーザーをカソードに照射し、光電効果によって電子が放出される。RF により加速された電子線パルスは、45° 偏向電磁石 2 台、四重電磁石 4 台によって構成される磁気パルス圧縮システムによりフェムト秒電子線パルスに圧縮される。偏向電磁石、四重電磁石は PLC で制御することにより高精度化した。分析光として、電子パルス発生用 RF と同期したフェムト秒チタンサファイヤレーザーを用いた。

時間分解能の向上のために、電子線パルスの短パルス化やクライストロンモジュレーターのパルス性能向上、フェムト秒時間領域の測定系の開発を行った。また、フェムト秒ストリークカメラを用いた、電子線パルスと分析光パルスの間の時間ジッター補正システムを導入した。

3 PLC による制御

図 1 に PLC を用いたライナック制御のブロック図を示す。クライストロン、RF、ビーム輸送及びパルス圧縮用のマグネット、施設のインターロック、機器の冷却系等全ての制御を PLC により行い、PLC の情報は全て一台の PC 上に表示される。

ステアリング、ソレノイド、四重極磁石、偏向磁石の制御は、PLC でのデジタル情報を D/A コンバータでアナログ信号に変換してそれぞれの電源に信号を供給し、電源出力電流を制御することで行っている。クライストロン制御 PLC との通信と、冷却水制御装置間の信号の送受信は高速 FL-net で行っている。

PLC の制御にはラダープログラムを用いた。ラダープログラムはその他の開発言語にくらべて、簡単な構造なのでプログラム上の不具合の原因になることが少なく、本フェムト秒パルスラジオリシスに要求される精度とビームの再現性において好ましいと考えられる。

4 同期システム

フェムト秒時間分解能の実現のために電子パルスと分析光パルスの間のジッターを低減する必要がある。図2にフェムト秒パルスラジオリシスの同期システムを示す。本システムでは、RF 発信機から 2856MHz の RF 信号を発生し、2 つに信号を分ける。その一つはフェーズシフターを通してクライストロンのドライブ信号とする。もう一つは 79.3MHz に分周して、RF 電子銃用のピコ秒レーザーと、パルスラジオリシスの分析光フェムト秒レーザーのモードロック RF 信号としている。クライストロンのモジュレーターと RF 電子銃用ピコ秒レーザーの再生増幅器のポッケルセルにも同期回路からの 79.3MHzRF と同期した 10Hz のトリガー信号を供給している。フェムト秒レーザーのタイミング調整では、79.3MHzRF のライン上の位相器を用いて行われているため、フェムト秒レーザー再生増幅器のポッケルセルのトリガーは、RF 位相調整後の 79.3MHzRF と同期した 1 kHz のトリガーとした。

同期システムの性能の検証のために、2856MHz と分周器から出力された 79.3MHz との時間ジッターを測定した。測定には、Tektronix 製の高時間分解能サンプリングオシロ (50GHz,50GS) を用いた。図3に同期システムの時間ジッターを示す。図3(a)は 2856MHzRF 信号を 2 つに分けてサンプリングオシロに入力してオシロ自体の時間ジッターを測定したものである。図3(b)は、分周した 79.3MHzRF をトリガーとし、2856MHzRF を 1 分間測定したデータであり、図3(c)は、図3(b)と同じ条件で 1 時間測定したデータ

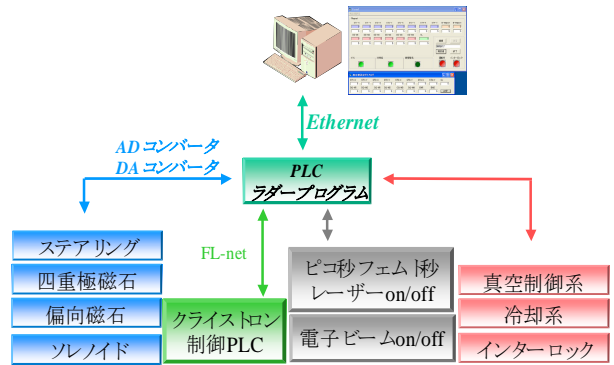


図1 PLC 制御システム

である。短時間での 79.3MHzRF と 2856MHzRF の間の時間ジッターの測定データ(1.8ps)は、オシロ自体のジッター (1.4ps) と比べて変化はあまり見られない。長時間においては、熱の影響で分周器の温度が上昇し、ドリフト現象が見られるが、今後分周器の温度を制御することにより改善できると考えている。

ストリークカメラのトリガーは、ピコ秒、フェムト秒レーザーのパルスを切り出すポッケルセルのトリガーや、クライストロンの RF Driver、Power Source のトリガーと比較すると高精度の必要がある。

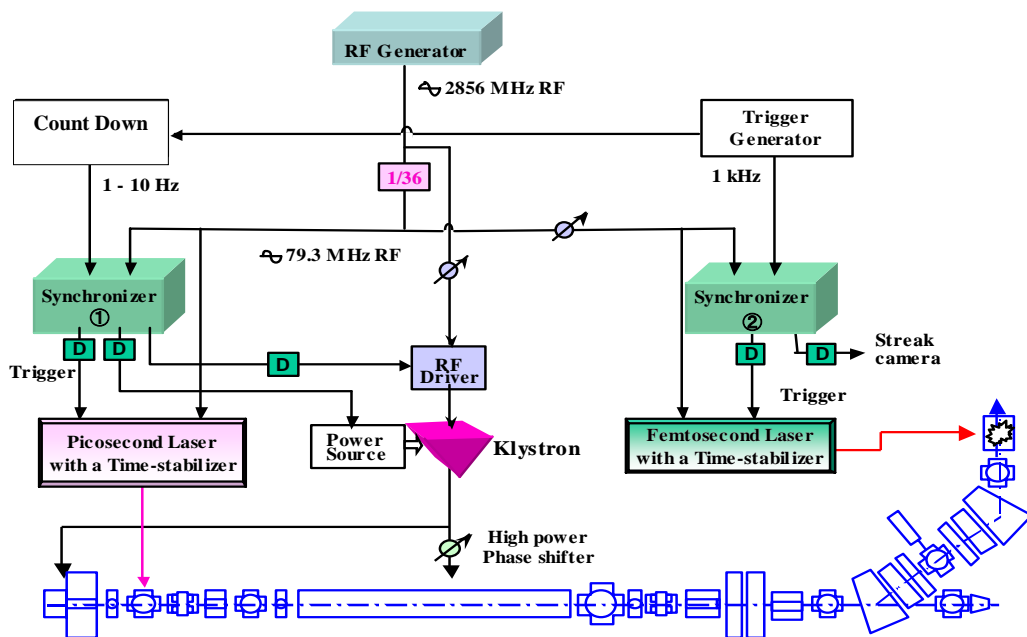


図2 フェムト秒パルスラジオリシスの同期システム

5 今後の予定

フェムト秒パルスラジオリシスの制御系と同期システムを構築した。今後、動作試験やパルス精度の検証を行う必要があり、光学系を含んだ測定系の構築も行う。最終的には、サンプルを用いて実験を行い、フェムト秒時間領域の初期反応の観測を行う。

参考文献

- [1] T. Kozawa, Y. Mizutani, K. Yokoyama, S. Okuda, Y. Yoshida and S. Tagawa, Nucl. Instrum. Meth. A429 (1999) 471.
- [2] Y. Yoshida, Y. Mizutani, T. Kozawa, A. Saeki, S. Seki, S. Tagawa and K. Ushida, Radit. Phys. Chem. 60 (2001) 313.
- [3] T. Kozawa, Y. Mizutani, M. Miki, T. Yamamoto, S. Suemine, Y. Yoshida and S. Tagawa, Nucl. Instrum. Meth. A440 (2000) 251.
- [4] T. Kozawa, A. Saeki, Y. Yoshida and S. Tagawa, Jpn. J. Appl. Phys. 41 (2002) 4208.

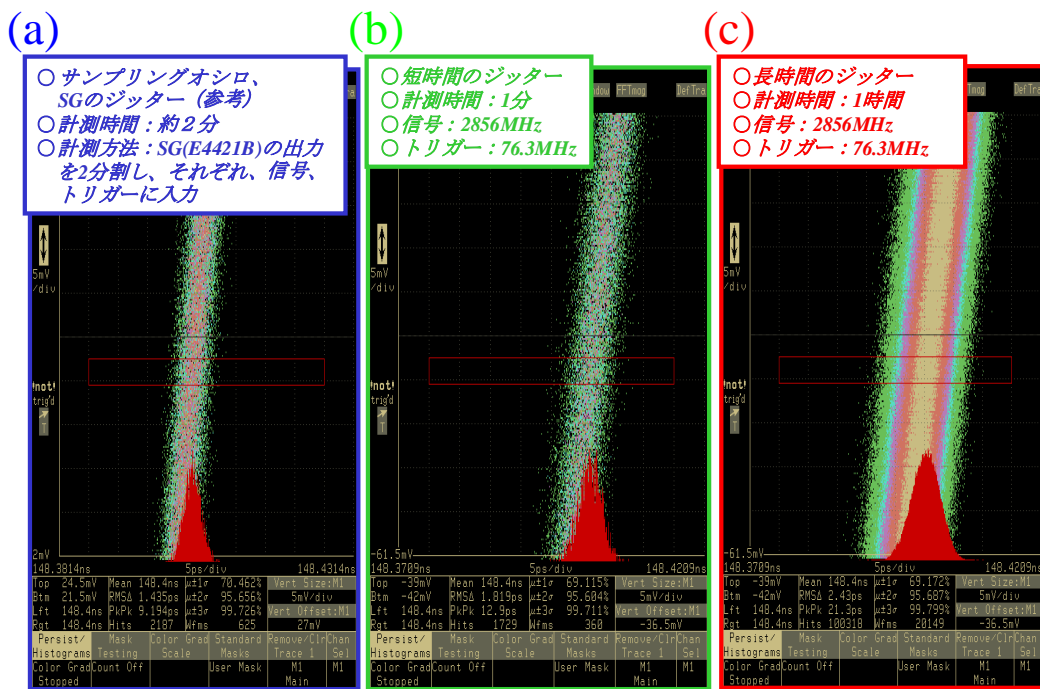


図3 同期システムの時間ジッター