

Development of Femtosecond Double-decker Electron Accelerator

Yoichi Kuroda¹, Jinfeng Yang, Takafumi Kondo, Yoichi Yoshida
The Institute of Scientific and Industrial Research Osaka University
8-1 Mihogaoka Ibarakicity Osaka 567-0047

Abstract

Femtosecond electron beams are practical sources in the pump-probe experiment (e.g. pulse radiolysis) for studies of ultrafast physical/chemical reactions in materials, in which a femtosecond electron bunch is used as a pump source and a mode-locked ultrashort laser light is used as a probe source. The synchronized time jitter between the electron beam and the laser light limits the time resolution in the experiment. In order to reduce the time jitter, a new concept of synchronized double-decker electron beams generation in a photocathode rf gun system was proposed. The double electron beams were observed in a photocathode RF gun by injecting two laser beams which produced with a picosecond laser. The double electron beams were accelerated upto 32MeV by a Linear accelerator, and compressed into 380 fs in rms with a phase-space rotation technique in magnetic fields. The beams, which one is used as a pump source and another is used as a probe source, are expected for ultrafast reaction studies on femtosecond scale.

フェムト秒ダブルデッカー電子加速器の開発

1. はじめに

フェムト秒、アト秒領域における時間分解吸収分光測定は、物理的、化学的反応を研究する上で重要である。超短パルスの電子線と分析光を用いたパルスラジオリシスは、電子線によって引き起こされるイオン化、熱化をはじめとする超高速反応の分析に適している。現在、パルスラジオリシスの時間分解能はピコ秒まで達している。大阪大学ではLバンド電子ライナックによるフェムト秒電子パルス、分析光としてフェムト秒レーザーとそれらのジッター補正を用いてサブピコ秒の時間分解能を持つパルスラジオリシスシステムが構築されている。

パルスラジオリシスの分解能を向上させるには、3つの要素が必要とされている。一つは超短パルスの電子線、二つ目はそれに準じた超短パルスの分析光源、三つ目はそれらの高精度時間同期法である。近年、大阪大学では100fs程度の電子線パルスを発生させることに成功しているが、電子線パルスと分析光の時間ジッターによりパルスラジオリシスの時間分解能は制約されている。そこで、それらのジッターを減らすためにダブルデッカー方式という新しい方法が考えられた。

2つに分けられて時間差をつけられたレーザーパルスがRF電子銃のカソードに入射することで時間差を持つ2つの電子線パルスが発生する。RF電子銃で発生した電子パルスはライナックによって32MeV程度に加速される。最後に電子線パルスは磁気パルス圧縮器を通して輸送され、位相空間分布を回転させることによりフェムト秒まで圧縮される。電子線パルスの1つ目はチェレンコフ光に変換されて分析光源となり、2つ目は励起源用電子として用いられる。2つの電子線は同一のレーザーを用いて

発生させているので、時間ジッターはほとんど起こらないと考えられる。

2. ダブルデッカー電子加速器

フェムト秒ダブルデッカー電子ライナックは、電子線パルス発生のためのレーザーフォトカソードRF電子銃とNd:YLFピコ秒レーザー、電子線の加速とエネルギー変調のためのライナック、電子パルス圧縮用の磁気パルス圧縮装置によって構成されている。RF電子銃は、BNL—GunIVタイプであり、加速空洞はハーフセルとフルセルからなる1.6セルのSバンド(2856MHz)である。フルセルとハーフセルの最大電場が一樣になるよう各空洞の大きさは調整され、フォトカソードはハーフセル側に取り付けられている。加速空洞の材質は無酸素銅であり、カソードにも同様に無酸素銅が使われている。フルセルには導波管が取り付けられ、クライストロンから高周波を供給している。カソードから発生した電子は、空洞内に作られた100MV/m以上の高電場により4MeV程度に加速され、空間電荷効果の影響が抑えられて、低エミッタンスの電子ビームが得られる。光電効果のための励起光源としてはNd:YLFピコ秒レーザーを用いた。オシレーターの共振器長はRF電子銃とライナックの加速周期の36分の1である79.3MHzにモードロックされ、オシレーターの出力とRFの時間ジッターは0.5ps以下と測定された。オシレーターのあとにポッケルセルを用いてオシレーターのシングルレーザーパルスを取り出し、増幅器でエネルギー2mJまで増幅し、非線形結晶によって4倍高調波(UV262nm)に変換される。発生したUVレーザーパルスはビームスプリッターによって2つに分けられてカソードに入射し、2つの電子パルスを発生させ

¹ E-mail: kuroda81@sanken.osaka-u.ac.jp

る。2つのレーザーパルスは350ps（2856MHzの周期）の整数倍の時間差を持ってカソードに入射するように後のレーザーパルスを光学遅延装置に通した。実験では2856MHzの4周期分の1.4nsの時間差に調整した。レーザーパルスはRF電子銃の下流に設置されたプリズムによって、電子ビームとは約2°の角度でカソードに入射する。

カソード面でのレーザービーム径は直径約1mm、ビーム間隔1mmで、パルス幅はストリークカメラによると5ps(FWHM)であった。

電子ビームを加速するためのライナックには、長さ2mのS-バンド進行波線形加速管を採用している。本ライナックは、54個の空洞により構成されていて、第一空洞にRF入力導波管を取り付け、第54空洞にダミロードを取り付けている。ライナックとRF電子銃には、同一35MWのクライストロンから発生したRFが供給される。RF電子銃とライナックの運転温度はそれぞれ32℃、30℃±0.1℃である。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4μsで運転繰り返しは10Hzである。ライナックでは、電子ビームを加速するとともに、パルス圧縮のため、RF位相調整により電子パルスがエネルギーを変調される。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を安定化する必要がある。本クライストロンに高精度のパルス電源を取り付け、RFパワーの変動を0.1%以内に抑えた。

磁気パルスの圧縮は、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によって行なった。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器を通過するとき、電子のエネルギーによってその軌道が違ってくる。すなわちエネルギーの高い電子(先頭)が外側を通り、エネルギーの低い(後方)電子が内側を通過するので、4台の四極電磁石の磁場強度を調整することによって、エネルギーの高い電子とエネルギーの低い電子の通る軌道長が調整できる。その軌道長の

差を調整することによって磁気パルス圧縮装置の出口に電子が同じタイミングで到達し、パルス圧縮ができる。

3. 結果と考察

図1に、発生した電子線パルスのそれぞれの場所におけるプロファイルを示す。測定場所は、RF電子銃の出口、ライナックの出口、パルス圧縮装置の出口である。なお、パルス圧縮装置の出口での測定は空気中で行われた。RF電子銃で発生したダブルデッカー電子ビームが加速管を通過した後も上下のポジションを維持したまま加速されたことが分かる。しかしながら、パルス圧縮を行った後は上下のビームの間隔が広がってしまい、最適な状態であるとは言えない結果となった。

図2はライナック出口における電荷量モニターの出力結果である。2つのパルスのピークの時間差は約1.4nsでそれぞれの電荷量は先行のパルスが0.55nC/Pulse、後行のパルスが0.62nC/Pulseであった。

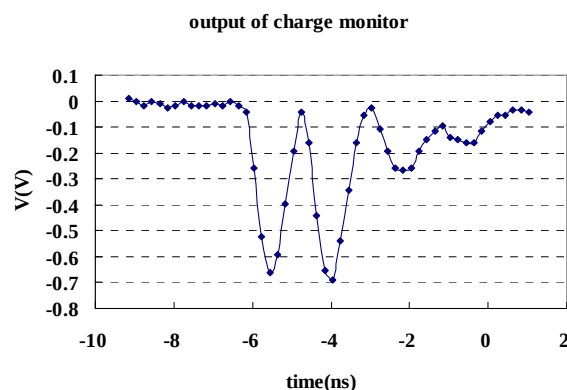


図 2 ライナック出口での電荷量モニターの出力結果

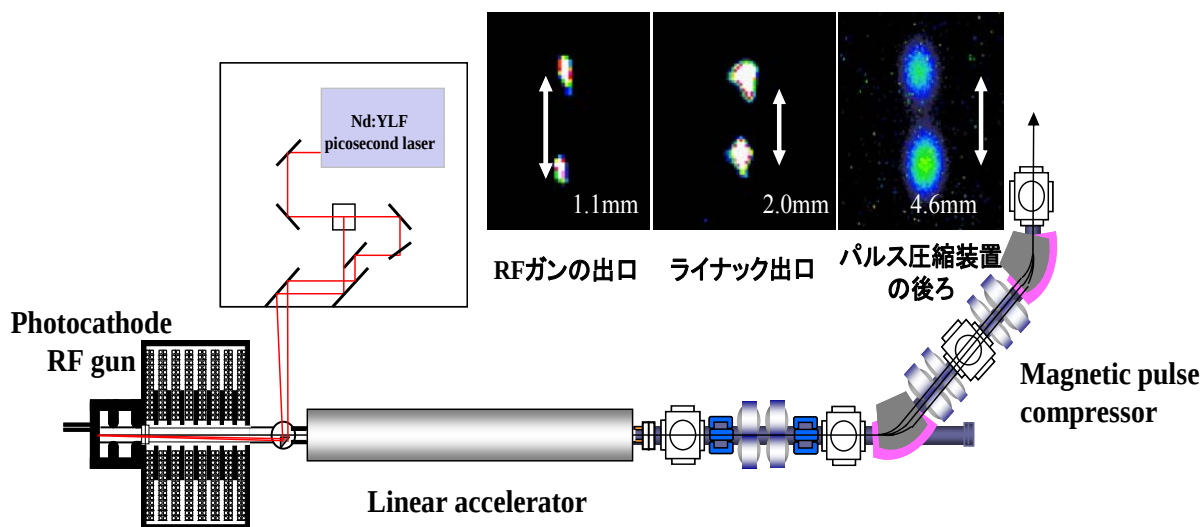


図 1 ダブルデッカー電子ビーム発生装置とビームプロファイル

これは、それぞれの励起源のレーザーのエネルギーの差によって起こったと考えられる。

また、45°偏向磁石を用いてライナック下流での2つのパルスのエネルギーとエネルギー分散についても測定した。偏向磁石から測定用スクリーンまでの距離は0.74mである。Dispersion functionによる測定したエネルギー分散の増大を偏向電磁石の下流に設置された四極電磁石を用いて低減した。ライナックの位相に対するエネルギーとエネルギー分散を図3に示す。最も小さいエネルギー分散の値をとったのはライナックの位相が277°のときに上のビームでは0.08%、下のビームでは1.2%であり、最大エネルギーは31.8MeVであった。

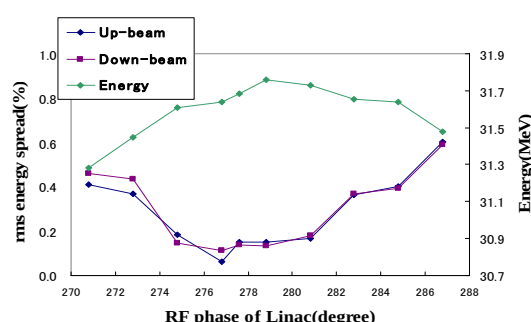


図 1 ビームのエネルギー分散とライナックのRF位相の関係

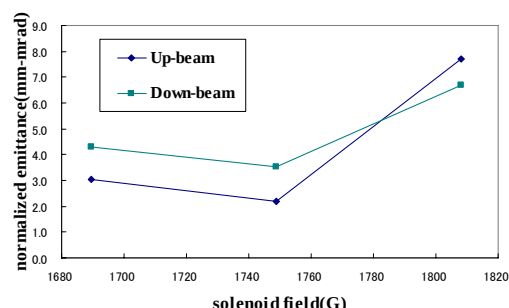


図 2 ビームの規格化エミッタンスとソレノイドの磁場強度の関係

ビームのエミッタンスはライナック下流に設置された四極電磁石を用いて測定された。測定されたエミッタンスとソレノイドの磁場強度との依存性を図4に示す。ソレノイドの磁場が1.75kGのときに最小となり、空間電荷効果によるエミッタンス増大の補正が最適であったとき、上のビームは2.2mm-mrad、下のビームは3.5mm-mradとなった。この上下のビームのエミッタンスの違いはそれぞれの電荷量の違いから起こったと考えられ、下のビームは空間電荷効

果によってエミッタンスが増大したと考えられる。また、両方のビームは四極電磁石の中心よりも0.9mmほど外にずれているために実際のエミッタンスはこの測定値よりも小さい値であると推測される。

次に、フェムト秒ストリークカメラを用いて磁気パルス圧縮後の電子パルスの長さを測定した。測定された電子パルスのパンチ長とライナック位相の依存性を図5に示す。ライナックの位相が293°のときパンチ長は最小値380fs(rms)となった。

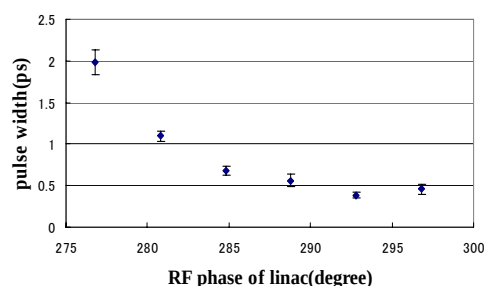


図 5 電子線パルスのパンチ長とライナックのRF位相の関係

4. 結論

フォトカソードRF電子銃とダブルレーザーパルス入射光学系を用い、ダブルデッカー電子ビームの発生に成功した。1.4nsの時間差をつけたダブルデッカー電子ビームがライナックを通過し、磁気パルス圧縮器でフェムト秒まで圧縮した。エネルギー分散についてはライナックの位相が277°のとき、上のビームは0.08%、下のビームは1.2%であった。それぞれの規格化エミッタンスは上のビームで2.2mm-mrad、下のビームで3.5mm-mradであった。また、磁気パルス圧縮器を用いてパルス圧縮実験を行い、フェムト秒ストリークカメラ測定によりパルス幅は380fs(RMS)と得られた。

参考文献

- [1] Y. Yoshida, et al., Radit. Phys. Chem., **60** (2001), 313-318.
- [2] K. Kozawa, et al., Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. Sect. A **440** (2000), 251-254.
- [3] J. Yang, et al., Proc. of this conference.
- [4] J. Yang, et al., J. Appl. Phys., **92** (2002), 1608-1612.
- [5] J. Yang, et al., Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. Sect. A **491** (2002), 15-22.