

PRESENT STATUS OF S-BAND FEMTOSECOND ELECTRON LINAC IN OSAKA UNIVERSITY

J. Yang¹, T. Kondoh, K. Kan, K. Norizawa, T. Yamamoto, T. Kozawa, Y. Yoshida, G. Isoyama, S. Tagawa, T. Majima, K. Tanimura

The Institute of Scientific and Industrial Research, Osaka University,
8-1 Mihogaoka, Ibaraki, Osaka, 567-0047, JAPAN

Abstract

The facilities of S-band linear accelerators (linacs) based on a thermal electron gun and two photocathode rf guns have been constructed in Osaka University. The thermal-gun-based linac is used to generate a slow positron beam for the researches of nano-materials and polymers. The photocathode electron linear accelerator with the maximum energy of 40 MeV generates a femtosecond electron beam and has been used successfully to study the radiation-induced ultrafast physical and chemical reactions in the femtosecond time region by means of pulse radiolysis technique. Moreover, a new femtosecond electron source based on the photocathode rf gun is constructed for the femtosecond time-resolved MeV-electron diffraction. In this source, a 100-fs electron beam with the energy of a few MeV and the bunch charge of 0.1-1pC is generated by using a femtosecond laser light.

阪大産研Sバンドフェムト秒電子ライナックの現状報告

1. はじめに

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材料科学にとって極めて重要である。ここ数年、フェムト秒短パルスレーザーの登場により、ピコ秒、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。最近になって、加速器から生成したフェムト秒短パルス電子ビームは、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ビームとして、フェムト秒時間領域の物質内超高速現象の解明・構造変化の追跡に注目されている。

大阪大学産業科学研究所・量子ビーム科学研究施設では、大強度電子ビーム発生用の40MeV Lバンド電子ライナック、陽電子発生用120MeV Sバンド熱電子銃ライナックのほかに、40MeVレーザーフォトカソードRF電子銃Sバンドライナックが設置され、フェムト秒短パルス電子ビームの発生や共同利用を行っている。また、2008年に新たな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、次世代のフェムト秒時間分解・MeV電子線回折装置の研究開発を進めている。

阪大産研 Sバンドフォトカソード電子ライナックでは、以下のような装置の研究開発とビーム利用が行われている。

低エミッタンス電子ビームの発生とビーム物理の研究。

フェムト秒・アト秒短パルス電子線の発生

フェムト秒パルスラジオリシスの開発と量子

ビーム誘起反応現象の解析。

濃淡電子ビームの開発と新規医療応用。

フォトカソードRF電子銃を用いたフェムト秒時間分解・MeV電子線回折装置の開発。

2. SバンドフォトカソードRF電子銃ライナックの現状

阪大産研SバンドフォトカソードRF電子銃ライナック (Fig.1に示す) は、1.6セルBNLタイプのフォトカソード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た。光カソード材質は無酸素銅を利用し、低エミッタンス電子ビーム発生のためカソード励起源にはピコ秒Nd:YLFレーザーを利用している。RF電子銃から発生した約3mm-mradの低エミッタンス・ピコ秒パルス電子ビームは、ライナックより最大40MeVまで加速される。また、磁気パルス圧縮における高次効果によるパルス幅の増大を補正するために、加速RFの位相を最適化し、電子線パルスにおける非線形エネルギー変調を行う。最後に、その電子線パルスを、磁気パルス圧縮器を用いてフェムト秒まで圧縮する[1]。そのために、磁気パルス圧縮器での2 pairの四極電磁石の磁場強度の調整を高精度で行い、電子が圧縮器を通過するパスをサブピコ秒まで制御する。

性能向上を目指して、照射室の温度変化、湿度変化、空気の流れを抑えるために、昨年度にレーザーとビーム利用のスペースにクリーンブースを設置した。クリーンブースの設置により、電子ビーム発生用レーザーの安定性が向上し、従来のビームド

¹ E-mail: yang@sanken.osaka-u.ac.jp

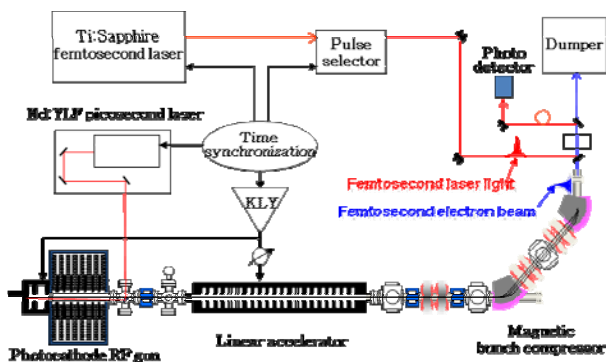


Fig.1 阪大産研SバンドフォトカソードRF電子銃ライナックシステム

リフトの問題が解決でき、長期安定なビームの発生とビームの高度利用ができるようになった。レーザー強度とビーム電荷量の安定度はそれぞれ1.6%と1.7%と得られ、サンプルでのビームのpointingとビームサイズの変動はそれぞれ75 μmと50 μm以内に抑えられた。レーザーと79.33MHzのRF（加速用2856MHzのRFを1/36分周したもの）の同期ジッターは、100fs以下となった（Fig.2に示す）。

また、ライナックの運転とビームの調整を簡単化するために、PLCを導入し、コンピューターによりフォトカソードRF電子銃S-バンドライナックの制御システムを製作した。これにより、ビームを高精度で調整でき、ビームの高品質化につなげた。その結果、利用実験の再現性の向上につなげた。

さらに、極低エミッタンス（0.1mm-mrad）電子ビームの発生と磁気パルス圧縮の高度化によるアト秒電子線パルス発生の研究をスタートした。それは、フォトカソードRF電子銃にフェムト秒レーザー励起によりフェムト秒低エミッタンス電子ビームを発生し、磁気パルス圧縮でアト秒電子線パルス生成の方法である。理論研究では、780アト秒の電子線パルスの発生が実現可能であることがわかった。

3. フェムト秒短パルス電子ビームの利用とフェムト秒パルスラジオリシス

電子線励起時間分解吸収分光法（パルスラジオリシス）は、量子ビーム誘起初期反応や超高速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解明に大きく貢献してきた。パルスラジオリシス法では、加速器から発生した短パルスの電子線を試料に照射させ、電子線誘起反応・現象を、電子線パルスを同期した分析光を用いて測定する。パルスラジオリシスにおいて、時間分解能を決める因子は

- (1) 電子ビームのパルス幅
- (2) 分析光のパルス幅
- (3) 電子線と分析光の同期ジッター

(4) サンプル中での光速と電子の速度差の違いから生じる時間分解能の劣化の4つである。

フェムト秒の時間分解能達成には、フェムト秒電子パルスやフェムト秒分析光パルスを利用するほかに、電子線パルスと分析光パルスの同期ジッターによる時間分解能の劣化、サンプル中での光の速度と電子の速度の差の違いから生じる時間分解能の劣化をフェムト秒までに抑える必要がある[2-3]。

光が屈折率 n のサンプルに入ると、光の速度が n 分の1に遅くなる。この時、数～数十MeVの電子ビームはほぼ光の速度でサンプルを通過するため、サンプル中での光の速度と電子の速度の差の違いから生じる時間分解能の劣化は、電子ビームがサンプルを通り抜けるのにかかる時間と、レーザーがサンプルを通り抜けるのにかかる時間の差で表される。例えば、サンプル長1mmの水（ $n = 1.33$ ）の場合、時間分解能の劣化は1.1psとなる。フェムト秒の時間分解能を得るためには、サンプル長さが1 mm以下にする必要がある。従来の光吸収の測定では、1nCの電子ビームで1mmのサンプル長はほぼ測定できる限界レベルであり、サンプル長を短くして、その代わりにパルス当たりの電荷量を上げる必要がある。しかし、電荷量を上げることにより、電子線パルスの場合、空間電荷効果が大きくなり、フェムト秒短パルス電子ビームが生成できなくなる。そこで我々は、システムの安定化とダブルパルス測定法の利用によ

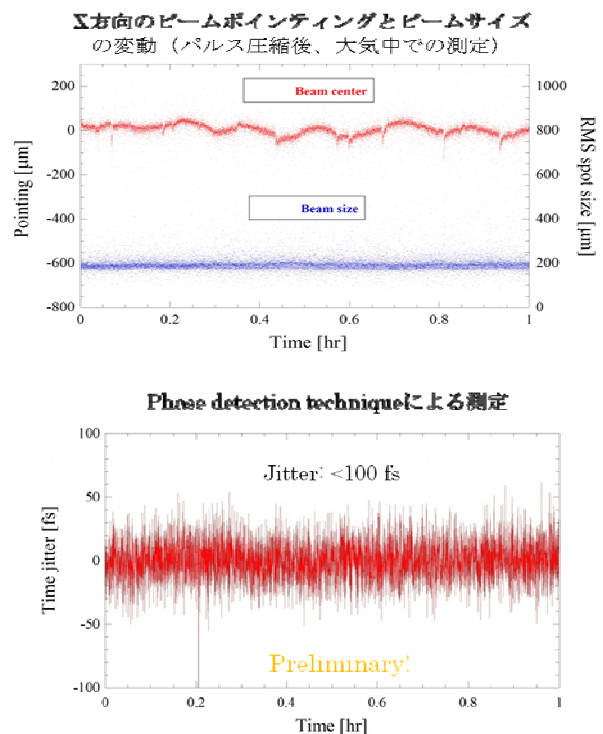


Fig.2 サンプルでのビームのpointingとビームサイズの変動およびレーザーとRFの同期ジッター

り、光吸収強度変動によるS/Nの劣化を抑え、電荷量0.4nCの電子線パルスを利用して0.18mmまでの薄いサンプルでの光吸収測定法を実現した。

Fig.3に、200フェムト秒の電子線パルスを利用し、パルスラジオリシスで、世界初めて水和電子生成過程を観測した実験データを示す。その時の光吸収の測定波長は800nmであり、分析光パルス幅は78fs、電子線パルスの電荷量は0.4nC、サンプルは水、サンプルの厚さは0.187mmであった。電子線照射による水和電子の生成は水和前の電子状態を経由し、生成時間は540fsであることがわかった。本パルスラジオリシスでは、電子ビーム幅、レーザーパルス幅、時間同時ジッターによる時間分解能は240fsであり、サンプルによる時間分解能劣化は190fsであった。

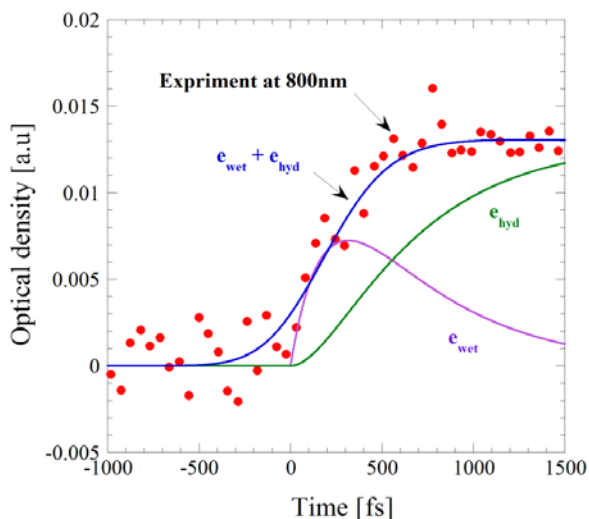


Fig.3 フェムト秒時間領域での水和電子の過渡吸収の測定データ（水、測定波長800nm）

4 . 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

フェムト秒時間分解電子線回折による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。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[4]。

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0.1mm-mrad、エネルギー分散が 10^{-4} 、パルス当りの電荷量は0.1~1pCである。実現すれば、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、MeVエネルギーの電子ビームを得ることが可能となり、次世代の電子源として、フェムト秒時間分解MeV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。Fig.4に、阪大産研フォトカソードRF電子銃を利用した時間分解電子線回折システムを示す。本時間分解電子線回折は、フェムト秒フォトカソードRF電子銃、試料室、電子線回折光学系と測定部から構成されている。平成19年度にフェムト秒フォトカソードRF電子銃を製作し、平成20年度に電子線回折システムを完成した。今年度に、電子銃の加速空洞のRFコンディショニングを行い、暗電流の測定を実施した。これから、レーザーを導入し、フェムト秒電子ビームの発生と計測を行う予定である。年内には電子線回折の実験まで計画している。

4 . まとめと展望

本報告では、加速器からフェムト秒電子線パルスの発生、そのパルスを利用して量子ビーム誘起高速反応・現象の測定方法と測定結果を紹介した。フェムト秒短パルス電子ビームは、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ビームとして、物質内超高速反応・現象の解明、ナノテクノロジー、がん治療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きた。これからのフェムト秒短パルスビームの利用は、生体・物理・化学分野に大きなインパクトを与えると共に、さまざまな新しい発見と応用に道を拓く。



Fig.4 フォトカソードRF電子銃を利用した時間分解電子線回折システムとフェムト秒RF電子銃

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] Yang, J., Kondoh, T., Kozawa, T., Yoshida, Y., Tagawa, S., Radiat. Phys. Chem. 75, 1034-1040 (2006).
- [3] Yang, J., Kondoh, T., Yoshida, A., Yoshida, Y., Rev. Sci. Instrum. 77, 043302 (2006).
- [4] Yang J., Kan K., Naruse N., Yoshida Y., Tanimura K., Urakawa J., Radiat. Phys. Chem., in press.