

レーザー変調の電子ビーム実験

EXPERIMENT OF LASER MODULATION FOR ELECTRON BEAM

菅晃一[#], 神戸正雄, 楊金峰, 吉田陽一

Koichi Kan [#], Masao Gohdo, Jinfeng Yang, Yoichi Yoshida

SANKEN(ISIR), Osaka University

Abstract

Ultrashort electron beams are useful for time-resolved measurements such as pulse radiolysis. Laser modulator is expected for improving the time resolution and irradiation method in the measurements and reaction analysis. Laser modulation increases energy spread of electron bunches using a laser and undulator. Experiments of laser modulation using electron beam will be reported.

1. はじめに

フェムト秒・ピコ秒パルス幅を有する電子ビームは、自由電子レーザー、パルスラジオリシス等の加速器物理、物理化学の研究に応用されている。そのため、短パルス電子ビーム発生は、高品質な光源開発や時間分解計測における時間分解能向上のために不可欠となっている。これまでに阪大産研では、フェムト秒電子ビームとフェムト秒レーザーを用いて、フェムト秒時間分解能を有するパルスラジオリシス(過渡吸収分光法)を開発・利用してきた。今後、パルスラジオリシスの時間分解能を向上するためには、さらに短い電子ビームが必要となる。これまでに電子ビーム発生では、フォトカソード高周波(RF, radio frequency)電子銃にピコ秒またはフェムト秒紫外光を照射し、光電子を電子ビームとして利用してきた。さらに、発生した電子ビームを加速管によりエネルギー変調し、アクロマティックアークの磁気パルス圧縮器により約30 MeVのフェムト秒電子ビームを発生してきた。光電子発生にフェムト秒レーザーを用いて、さらに空間電荷効果を低減した場合は、フェムト秒電子銃と磁気パルス圧縮の最適化により、マイケルソン干渉計を用いて20フェムト秒の電子ビーム計測を行うことが可能になっている[1]。

新たな電子ビーム圧縮技術の開発において、さらに短パルスの電子ビームパルス列もしくは単パルスを得るためのレーザー変調は有用な手段であることが期待される。レーザー変調とは、アンジュレータ周期磁場中にレーザーと電子ビームを入射することにより、電子ビームの(パルス中のスライス)エネルギー分散を増大させる手法である。一般的には、単一パルスのレーザー光がレーザー変調に用いられ、X線自由電子レーザーの施設では自由電子レーザーのX線強度の増強および安定化のために用いられている[2]。また、レーザー光が存在しない時刻はレーザー変調が行われなため、時間的に強度変調したレーザー光を用いた場合は変調によるエネルギー分散の増大が進行方向のスライスごとに異なる電子ビーム発生も可能となる。そのため、レーザー変調に使用するレーザーの時間プロファイルの操作も、レーザー変調に関連した研究の種類を広げてきた。例えば、

マイケルソン干渉計等により、2つに分岐されたレーザー光を合流させてレーザーの持つチャープを利用してレーザーの時間的な強度変調、つまり、チャープドパルスビーティング[3]等を利用する報告がある。サブピコ〜ピコ秒オーダーのうなりによる光の強度変調を用いて、円形加速器におけるテラヘルツ放射[4]、フォトカソードベースの加速器による高出力テラヘルツ光源の提案[5, 6]が行われている。いずれにしても、効率的なレーザー変調を行うためには、入射電子ビームエネルギー・エネルギー分散、使用レーザーの波長・ピークパワー、アンジュレータの発振波長・磁場強度(K値)、下流のビーム光学系(主に R_{56})の設計が不可欠である。そのような設計や最適化により、例えば、電子ビームの変調波長におけるバンチング因子を高める等の、効率的なレーザー変調が可能となる。

そこで、本報告では、レーザー変調を用いた超短パルス電子ビーム発生のための電子ビーム実験を行った。

2. レーザー変調の条件と測定

レーザー変調の効果の最適化を行う場合は、光源として使用した場合のアンジュレータの発振波長と使用するレーザーの波長を一致させる必要がある。

直線偏光アンジュレータの場合、水平方向と電子ビームの蛇行方向に x 軸、垂直方向と磁場の方向に y 軸、ビーム進行方向に z 軸を定義し、アンジュレータの磁場の垂直成分 B_U を、

$$B_U = B_0 \sin \frac{2\pi}{\lambda_U} z \quad (1)$$

とする。ここで、 B_0 は磁場の振幅、 λ_U は磁場の周期長である。同時に、電子ビームが磁場を通過した際に増幅される電磁波の基本波の発振波長 λ_L は、磁場の強度を表す K 値を用いて、共鳴条件下で、下記のように表される。

$$\lambda_L = \frac{\lambda_U}{2\gamma^2} \left(1 + \frac{K^2}{2} \right) \quad (2)$$

$$K = \frac{eB_0\lambda_U}{2\pi mc} \quad (3)$$

[#] koichi81@sanken.osaka-u.ac.jp

ここで、 γ は電子のローレンツ因子、 m は電子の静止質量、 c は真空中の光速である。

電子ビームエネルギー32.5 MeV ($\gamma \sim 64.6$)において、既存のレーザー波長 800 nm を考慮し、アンジュレータの基本波の共鳴波長で 800 nm を満たすような周期長を検討した。その結果、磁場周期長 λ_0 を 6.6 mm とし、K 値/磁場振幅が、0.15/0.25 T であれば Eq. (2) を満たすことができる。

図 1 に、レーザー変調の実験の模式図を示す。レーザー変調されるための電子ビーム発生では、フォトカソード RF 電子銃加速器[1]からのフェムト秒電子ビームの発生を行った。カソード駆動用の Ti:Sapphire フェムト秒レーザーの 3 倍高調波からの紫外光パルスはフォトカソード RF 電子銃に入射し、光電子による電子ビームを用いた。また、本加速器は、フォトカソード RF 電子銃、加速管、磁気パルス圧縮器により構成される。これらを用いて、パルス圧縮されたフェムト秒電子ビーム (エネルギー: 32.5 MeV 前後、電荷量:) を発生した。電子銃へのレーザー入射位相と加速管における加速位相は、それぞれ、 30° と 100° を用いた。発生したフェムト秒電子ビームをチタン箔のビーム窓から低真空中に取り出し、レーザー変調実験を行った。

レーザー変調用レーザーはフェムト秒レーザーの一部 (レーザー変調用としてエネルギー: $<400 \mu\text{J/pulse}$ 、波長: 800 nm、パルス幅: 130 fs、繰り返し: 960 Hz) の光パルスを適宜時間遅延して使用した。電子ビームおよびレーザーの径方向の重なり確認のために、アンジュレータ前後に 2 セットの脱着可能なスクリーン (点線) と CCD カメラを用いた。また、軸方向の重なり測定 (Timing meas.) では脱着可能な電気光学結晶 (ZnTe、厚み 1 mm) と偏光子とフォトダイオード (PD) を用いた。レーザーと電子ビームを同軸で輸送するために、金属蒸着ペリクルを用いた。

レーザーと同軸でアンジュレータへ入射した電子ビームのレーザー変調 (エネルギー変調) の測定を行うために、偏向磁石によるエネルギー幅の測定を行った。電子ビームは偏向される前にアパーチャ (直径: 1 mm) を通過させて、整形を行った。偏向磁石は 2 つネオジウム磁石を用いた。

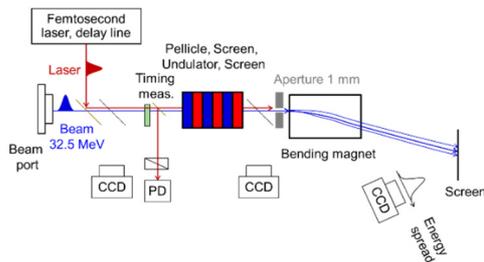


Figure 1: Experiment of laser modulation. Removable screens (dashed lines) and CCD cameras were used for transverse measurement. Timing measurement system using ZnTe crystal and a polarizer is also removable. Electron beam passing through the undulator was adjusted by an aperture with a diameter of 1 mm. Energy spread was measured using a bending magnet, screen, and CCD camera.

3. 測定結果

3.1 軸方向の重なり測定

レーザー変調を行うためには、電子ビームとレーザーのアンジュレータ入射時刻を一致させる必要がある。図 2 に測定系と結果の例を示す。電子ビームが電気光学結晶 (ZnTe) に与える電場由来のポッケルス効果に基づいて、偏光測定を行った。偏光子をフォトダイオード前に設置して、ポッケルス効果によるフェムト秒レーザーの偏光変化を測定した (図 2(a))。また、フェムト秒レーザーに対する光学遅延を変化させることにより、電子ビームとレーザーのタイミングが一致した時に、偏光子を通過する光量、つまり、フォトダイオードの出力が増加した。これらの結果により、電子ビームとレーザーの入射時刻が一致する光学遅延の調査を行った。

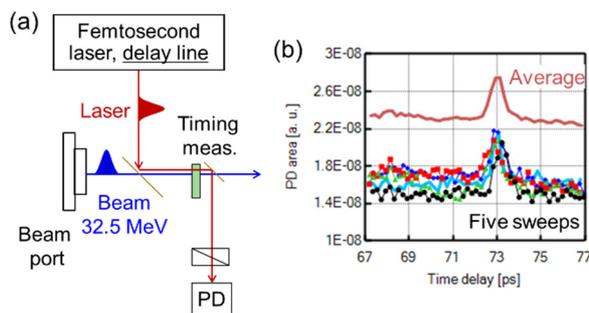


Figure 2: (a) Timing measurement using ZnTe. (b) Photodiode (PD) output as a function of the time delay for the femtosecond laser. Five sequential sweeps and the averaged result were shown as the bottom and top sweeps.

3.2 エネルギー幅の測定

図 3 に、測定結果を示す。レーザー変調された電子ビームは、レーザーの存在する時間においてスライスのエネルギー幅が広がる。エネルギー幅測定を行うために、偏向磁石とスクリーンを用いて、測定される電子ビームプロファイルの幅がエネルギー幅に相当するとして、測定を行った。

ビーム進行方向において、偏向磁石磁場の長さおよび磁石出口からスクリーンまでの距離は、それぞれ、67 mm および 260 mm であった。また、磁場強度 0.74 T を考慮し、35 MeV の電子ビームに対して、 R_{16} は 0.125 m と得られ、エネルギー幅見積りの係数として用いた。測定手順として、①光学遅延を調整し、②フェムト秒レーザー無しで測定し、③フェムト秒レーザー有りで測定し、④項目②-③を 100 回繰り返し、⑤電子ビームのエネルギー調整し、再度の測定を繰り返した (図 3(a-d))。ビームプロファイルとして図 3(e) の様な数 mm の視野において、画像を解析した。レーザーの時間遅延を軸方向の重なり測定に対して、 -2.3 ps 、 0 ps 、 $+2.3 \text{ ps}$ のそれぞれの電子ビームエネルギーにおいて 3 通りの時間遅延条件でエネルギー幅のレーザー有無による比率測定の平均値と標準偏差を解析した。現段階では、シングルショットによるレーザー変調測定の比較は困難であるが、電子ビームエネルギーが 31.9 MeV の場合、レーザー有無による幅の比は 1.02 と得られた。

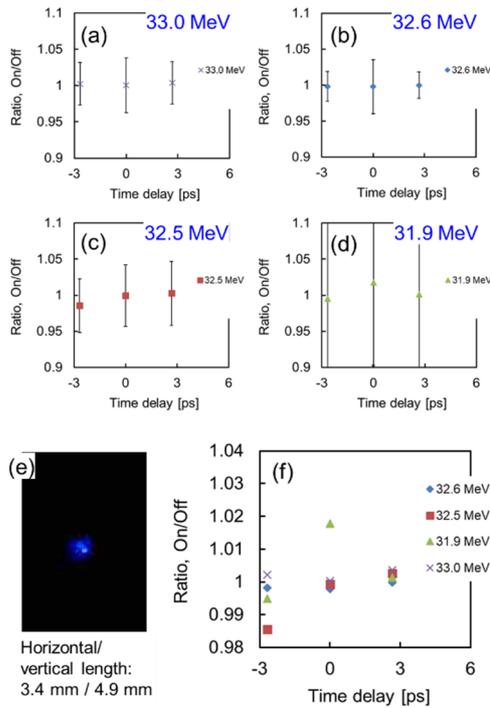


Figure 3: (a-d) Energy spread energy ratio with or without laser for four energy conditions. Error bars are standard deviations of datasets of 100 pairs of images. (e) An example image of beam profile for the energy spread measurement. (f) Energy spread ratios as functions of time delay of the laser.

4. エネルギー変調の理論的な見積もり

レーザー変調におけるエネルギー幅の変化については、理論的な研究もおこなわれている[2]。効率が良いレーザー変調、つまり、電子ビームエネルギー幅の増加させるためには、レーザーや電子ビームの径、K 値などに依存し、下記のようにあらわされる[2]。

$$\sigma_{\Delta E} \approx \sqrt{\frac{\sigma_r^2}{2(\sigma_x^2 + \sigma_r^2)}} \sqrt{\frac{P_L K[J] N_u \lambda_u m c^2}{P_0 \gamma_0 \sigma_r}} \quad (4)$$

ここで、 $\sigma_{\Delta E}$ はエネルギー幅の増加、 σ_x は電子ビーム径、 σ_L はレーザー径、 P_L はレーザーピークパワー、 $[J]$ はベッセル関数による係数、 N_u はアンジュレータの周期数、 λ_u はアンジュレータの周期長である。

理論的な見積もりでは、表 1 のパラメータを用いて、レーザー変調によるエネルギー幅の増大は $\sigma_{\Delta E}/(\gamma_0 m c^2)$ として、0.16%と得られた。初期エネルギー幅を 0.1%とすると、レーザーの有無による幅の比率は $(0.16 + 0.1)/0.1 = 2.5$ と考えられる。また、実験におけるレーザー変調によるエネルギー幅の変化が小さいため、今後は最適化(アンジュレータ磁場、電子ビームエネルギー、パルス幅等)が必要であると考えられる。

Table 1: Parameters for Theoretical Estimation

Electron beam size / energy	1 mm / 32.5 MeV
Undulator period / number / magnetic field / K value	6.6 mm / 20 / 0.25 T / 0.15
Laser size / wavelength / peak power	1 mm / 800 nm / 4 GW (0.4 mJ, 100 fs)

5. まとめ

レーザー変調の電子ビーム実験を行っている。レーザーと電子ビームをアンジュレータへ同軸入射し、レーザー有無でエネルギー幅(rms)の比率を測定した。実験では、1.02と得られた。理論的計算では、2.5と見積もられた。今後、偏向磁石部の改良とエネルギー幅測定の高感度化、アンジュレータの磁場制御、電子ビームの短パルス化と同期測定、レーザー変調(不均一な振幅磁場の影響等)の計算、線量計へのビーム照射を行う。

謝辞

本研究は、科研費(15H05565, 17H01374, 19K05331, 20H00364)による支援を受けました。

参考文献

- [1] I. Nozawa *et al.*, “Measurement of <20 fs bunch length using coherent transition radiation”, Phys. Rev. ST Accel. Beams 17, 072803 (2014).
- [2] Z. Huang *et al.*, “Measurements of the linac coherent light source laser heater and its impact on the x-ray free-electron laser performance”, Phys. Rev. ST Accel. Beams 13, 020703 (2010).
- [3] A. S. Weling *et al.*, “Generation of tunable narrow-band THz radiation from large aperture photoconducting antennas”, Appl. Phys. Lett. 64, 137 (1994).
- [4] S. Bielawski *et al.*, “Tunable narrowband terahertz emission from mastered laser–electron beam interaction”, Nat. Phys. 4, 390 (2008).
- [5] Z. Zhang *et al.*, “Generation of high-power, tunable terahertz radiation from laser interaction with a relativistic electron beam”, Phys. Rev. Accel. Beams 20, 050701 (2017).
- [6] K. Kan *et al.*, “Intense THz source based on laser modulator and bunch compressor with electron beam ranging from 35 to 50 MeV”, Proc. of Nonlinear Dynamics and Collective Effects in Particle Beam Physics, 2019, pp.285.