

## レーザー変調を用いた超短パルス電子ビーム発生シミュレーション

### SIMULATION STUDY ON LASER MODULATION FOR ULTRASHORT ELECTRON BUNCHES

菅晃一<sup>#</sup>, 上野浩一, 楊金峰, 神戸正雄, 吉田陽一

Koichi Kan<sup>#</sup>, Koichi Ueno, Jinfeng Yang, Masao Gohdo, Yoichi Yoshida

ISIR, Osaka University

#### Abstract

Laser modulator which increase energy spread of electron bunches are composed of a laser and undulator. A laser modulator is expected to modulate electron bunch energy resulting in density modulation of electron bunch with a period of the wavelength of the laser. In this paper, simulation results of bunching factor after the laser modulation are presented.

#### 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照射することにより、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シミュレーションについて、述べる。フォトカソード RF 電子銃加速器からのフェムト秒電子ビーム(エネルギー 32.5 MeV、電荷量 2 pC、パルス幅 9 fs rms)に対して、レーザー変調(レーザー波長 800 nm、ピークパワー 4 GW、エネルギー/パルス幅の想定 0.4 mJ / 100 fs)を適用し、アト秒電子ビームパルス列の発生を検討した。

#### 2. レーザー変調シミュレーション

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、 $\lambda_U$  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  $\lambda_L$  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。

<sup>#</sup> koichi81@sanken.osaka-u.ac.jp

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

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

ここで、 $\gamma$ 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  $\lambda_U$  を 6.6 mm とし、 $K$  値/磁場振幅が、0.15/0.25 T であれば良いことが分かった。

Figure 1 に、計算体系を示す。シミュレーションコード elegant[7]を用いてレーザー変調を計算した。Table 1 に計算のパラメータを示す。アンジュレータの磁場強度  $B_0$ 、レーザー変調後に電子ビームを輸送する自由空間距離  $z_0$  を可変として計算を行った。電子のマクロ粒子数 10,000 個を輸送し、輸送後の 6 次元分布から規格化して積分値が 1 となる時間プロファイル  $f(t)$  を算出した。バンチング因子  $F(\omega)$  は、時間プロファイルのフーリエ変換により、下記のように表される。

$$F(\omega) = \left| \int_{-\infty}^{\infty} f(t) e^{-i\omega t} dt \right| \quad (4)$$

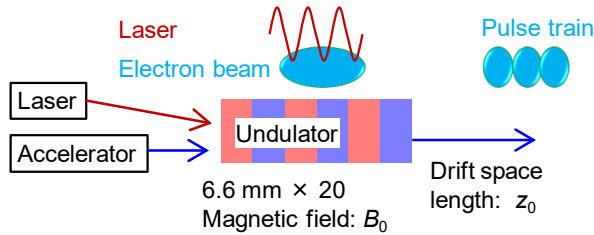


Figure 1: Simulation of laser modulation.

Table 1: Simulation Parameters

Electron beam	32.5 MeV, 9 fs rms, 2 pC, dE/E 0.1%, $\varepsilon_n$ 0.1 mm-mrad
Undulator period/period number	6.6 mm / 20
Laser wavelength/peak power	800 nm / 4 GW (0.4 mJ, 100 fs)

### 3. バンチング因子の計算結果

磁場強度  $B_0$ 、自由空間距離  $z_0$  を変化させながら行った計算結果を Fig. 2 に示す。

Figure 2(a)は、 $B_0 = 0.25$  T,  $z_0 = 150$  mm の条件でのレーザー変調後の軸方向位相空間分布 (プロット、上) とその時間プロファイル (実線、下) である。位相空間分布の傾きの調整により、時間プロファイルにおけるレーザー変調による変調深さは変化する。Figure 2(b)は、この時間プロファイルを Eq. (4) によりバンチング因子を算出した結果である。低周波側に基本波として 0.37 PHz のピークが確認でき、808 nm に相当するため、レーザー変調の効果であることが分かった。2 倍波に相当する 0.74 PHz のピークも確認できた。時間プロファイルにおける周期的なデルタ関数は、周波数スペクトルではその周期を基本波とする倍波の成分が現れる。従って、短パルス化も同時に起こっていると考えられる。Figure 2(c)は、基本波 ( $\sim 0.37$  PHz, レーザー波長) のバンチング因子に着目して、磁場強度、自由空間距離の両方の最適化を行った結果である。自由空間距離は  $R_{56}$  を変化させることとなり、レーザー変調後の軸方向位相空間分布の回転量を調整することができる。そのため、自由空間距離によりバンチング因子が変化することが分かった。さらに、アンジュレータの共鳴条件に関する Eq. (2) から予想されるように、 $B_0 = 0.25$  T でバンチング因子は最大化、つまり、レーザー変調の効率を最大化 (0.44) できることが分かった。本計算による最適化の結果、バンチング因子の最大は、磁場強度 0.25 T、自由空間距離 150 mm で 0.44 となった。

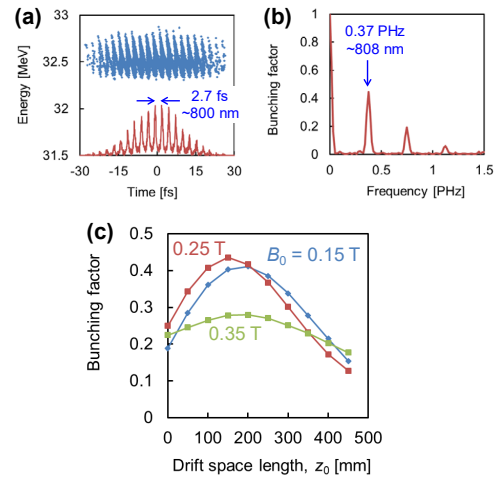


Figure 2: (a) Longitudinal phase-space distribution and time profile after laser modulation with conditions of  $B_0 = 0.25$  T,  $z_0 = 150$  mm. (b) Bunching factor. (c) Bunching factor at  $\sim 0.37$  PHz as a function of  $z_0$ . Three different cases of  $B_0$  are shown.

#### 4. まとめ

レーザー変調を用いた超短パルス電子ビーム発生の計算を行った。電子ビームエネルギー32.5 MeV において、磁場周期長を 6.6 mm とし、バンチング因子の最大は、磁場強度 0.25 T、自由空間距離 150 mm で 0.44 となった。今後、アンジュレータ製作や 3 次の作用 (2400 nm が基本波) についても検討し、電子ビーム実験を行う。

#### 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.*, Phys. Rev. ST Accel. Beams 17, 072803 (2014).
- [2] Z. Huang *et al.*, Phys. Rev. ST Accel. Beams 13, 020703 (2010).
- [3] A. S. Weling *et al.*, Appl. Phys. Lett. 64, 137 (1994).
- [4] S. Bielawski *et al.*, Nat. Phys. 4, 390 (2008).
- [5] Z. Zhang *et al.*, Phys. Rev. Accel. Beams 20, 050701 (2017).
- [6] K. Kan *et al.*, Nonlinear Dynamics and Collective Effects in Particle Beam Physics, 285 (2019).
- [7] M. Borland, elegant: A Flexible SDDS-Compliant Code for Accelerator Simulation, Advanced Photon Source LS-287, September 2000.