

Production of Ultra-short Bunches Employing Alpha Magnet and Off-crest Acceleration for Coherent THz Light Sources

Fusashi Miyahara, Fujio Hinode, Kenichi Nanbu, Toshiya Muto, Yuu Tanaka,
Masayuki Kawai, Shigeru Kashiwagi and Hiroyuki Hama
Electron Light Science Center, Tohoku University
1-2-1 Mikamine, Taihaku-ku, Sendai, Miyagi, 982-0826

Abstract

We have studied production of the very short electron beam to generate intense coherent THz radiation. Since the power of coherent synchrotron radiation is proportional to the bunch form factor, the bunch length shorter than 100 fs has to be produced to obtain large form factor sufficient to generated intense coherent THz radiation. The beam from the thermionic RF gun is injected into a bunch compression system consist of an alpha magnet and a linac employing velocity bunching. We report the bunch compression scheme of this system.

コヒーレントテラヘルツ光源のためのアルファ磁石とオフ Crest 加速を用いた超短バンチ生成

1. はじめに

東北大学電子光研究センター（旧核理研）では加速器を用いた高輝度コヒーレントテラヘルツ光源の開発を行っており、現在、試験加速器 t-ACTS (test Accelerator as Coherent THz Source) の入射器部分の設置が進んでいる。THz 光源としてアンジュレータとアイソクロナスリングからのコヒーレント放射光を検討中である[1,2]。高輝度なコヒーレント THz 光生成に十分大きな形状因子を得るためには 100 フェムト秒以下の超短バンチ電子ビームが要求される。アイソクロナスリングでは 50MeV まで加速した電子ビームをシケインによって圧縮する。一方、THz 域のアンジュレータ光が必要とする電子ビームは 17 MeV 程度の低エネルギーである[3]。

Serafini 等は電子ビームをゼロクロス付近のオフ Crest 位相で加速構造に入射し、粒子の速度差を利用してバンチ圧縮を行う velocity bunching を提案した[4]。この方法は加速構造のみで圧縮を行うため、シケイン等を用いないため小型化が可能である。

本稿では熱陰極高周波電子銃（ITC RF-Gun）、アルファ磁石、3m 加速構造から成るコンパクトなバンチ圧縮システムと、数値シミュレーションを用

いた評価を報告する。

2. 実験装置とバンチ圧縮の概要

試験加速器の概観図とバンチ圧縮を模式的に表した様子を図 1 に示す。

ITC RF-Gun は 2 つの空洞を持ち、それぞれの空洞に入力する電力と位相を変えることで、電子銃出口での電子ビームの縦方向位相空間分布を操作することが可能である[5]。図に示した縦方向位相空間は電子銃から引き出されたビームのバンチ先端部分の様子を示しており、バンチ前方のエネルギーが高い。電子ビームは 0 MeV から 1.74 MeV まで連続的な運動エネルギー分布を持つが、バンチ先端の高エネルギー部分に電荷が集中している

アルファ磁石は縦方向位相空間分布の回転とスリットを用いたエネルギー選択に用いる。電子の運動量の違いによる行路差を利用して、アルファ磁石を通過したバンチは前方の粒子のエネルギーが低くなるような磁場勾配に設定している。

3. Velocity Bunching

velocity bunching は数 MeV 程度の光速よりもわずかに小さい速度を持つ電子バンチを加速構造の RF 位相のゼロクロス付近に入射することで行う。加速構造に入射した直後、バンチの前方の電子は減速位相、後方は加速位相に乗ることで圧縮が始まる。電子バンチの速度は RF の位相速度に比べて遅いため、バンチ全体の位相は徐々に Crest 側へスリップして行く。このため、バンチ全体の加速は加速構造の途中から始まる。

進行波加速構造の加速電場を

$$\begin{aligned} E_z &= -E_0 \sin(\omega t - kz + \psi_0) \\ &= -E_0 \sin \xi \end{aligned} \quad (1)$$

とすると Hamiltonian は

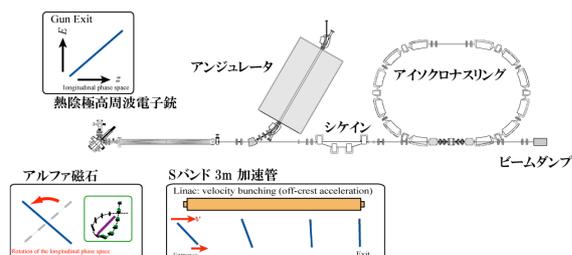


図 1: t-ACTS の概観（上）とバンチ圧縮の模式図（下）。青色の線は各装置におけるビームの縦方向位相空間分布を模式的に表している。

$$H = \gamma - \beta_r \sqrt{\gamma^2 - 1} - \alpha \cos \xi \quad (2)$$

で与えられる。ここで $\alpha = eE_0 / mc^2 k$ 、加速構造の位相速度は $\beta_r c$ である。図 1 に $E_0 = 7.2$ MV/m、 $\alpha = 0.236$ の場合の位相空間での粒子の軌跡を示す。図中の四角で示した領域は $\gamma = 4$ で、 $\xi = 0$ 付近に入射したビームが加速され $\xi = -60$ 、 $\gamma = 34$ で加速構造から出た事に対応しており、バンチ長が短くなる様子を示している。

バンチの圧縮比を表す **compression factor** C (バンチ長は $1/C$ となる) は加速構造入口と出口の等ポテンシャル線から、バンチ中心の位相 $\bar{\xi}$ が 0° となる様に入射した場合は

$$C = \frac{2\delta\psi_0 |\sin \bar{\xi}_{ex}|}{\sqrt{\delta\psi_0^4 + \left(\frac{1}{\alpha\gamma_0} \frac{\delta\gamma_0}{\gamma_0}\right)^2}} \quad (3)$$

で与えられる。ここで $\delta\psi_0$ と $\bar{\gamma}_0$ はそれぞれ入射時のバンチ長と平均のエネルギー、 $\bar{\xi}_{ex}$ は加速構造出口での中心位相を表す。

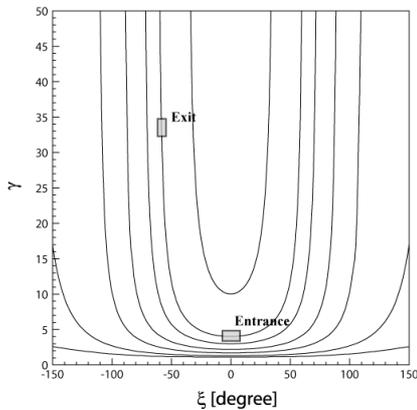


図 2 : 7.1MV/m のときの縦方向位相空間における等ポテンシャル線と、入射と加速後のビームの位相空間分布

4. シミュレーションによる評価

4.1 単純な縦方向位相空間分布を用いた評価

実際の圧縮比は加速構造へ入射する電子バンチの縦方向位相空間分布や初期位相によって **compression factor** は異なる。ITC RF-gun から放出される電子ビームの縦方向位相空間分布は直線状となっており、初期位相を 0° からクレスト側へずれた位置にすることで、ちょうど等ポテンシャル線に沿う様な条件が選べる。この分布を $\xi = 0$ に移動させた場合はエネルギー広がりや殆ど無い事を意味し、

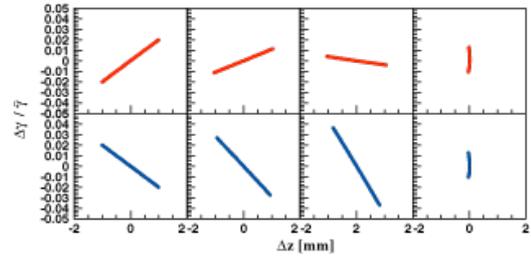


図 3 : 加速構造中での縦方向位相空間分布の変化。横軸はバンチの平均の位置からのずれ、縦軸は平均のエネルギーからのずれを表す。上段、下段はそれぞれバンチの先頭の粒子のエネルギーが高い場合(a)と低い場合(b)に対応し、左から順に加速構造入口、 $z=44$ 、 $z=116$ mm、加速構造出口の分布を示している。

(3)式の分母の第2項目がゼロとなる。したがってエネルギー広がりをもつフォトカソード RF-gun と比べてより効率的なバンチ圧縮が期待できる。そこで汎用粒子トラッキングコード GPT を用いた数値シミュレーションを使ってバンチ長が最短となる条件を調べた[6]。ITC RF-Gun からの電子ビームの位相空間に近い傾きを持つバンチ長 2psec、エネルギー広がり $\delta\gamma_0/\gamma_0 = 0.012$ の電子バンチがどの程度まで圧縮されるか調べた。空間電荷効果及びビームローディングは考慮していない。簡単のため、図 3 の一番左に示す様に、加速構造入口での縦方向位相空間分布でバンチの先頭でエネルギーが低い場合 (青色) と高い場合 (赤色) の 2 通りを調べた。

加速構造入口での初期位相ごとに加速構造出口で

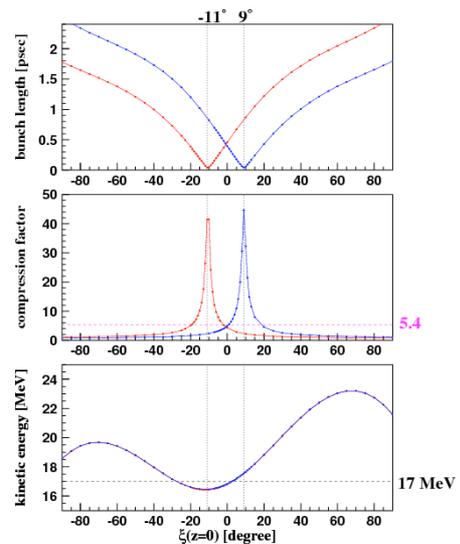


図 4 : バンチ長 (上段)、compression factor (中段)、エネルギー (下段) の初期位相依存性。赤色と青色はそれぞれ加速構造入射時のバンチの先頭のエネルギーが高い場合と低い場合に対応している。

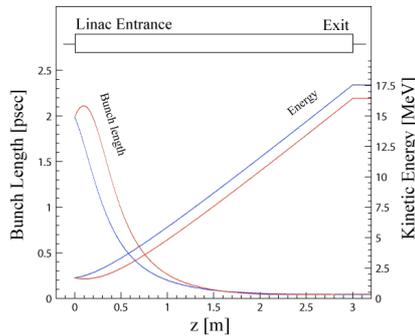


図 5 : バunch長が最短となる初期位相を選んだときの加速構造中でバunch長とエネルギーの変化。赤色と青色はそれぞれ加速構造入射時のバunchの先頭のエネルギーが高い場合と低い場合に対応する。

のバunch長を調べた結果を図 4 に示す。横軸は初期位相でクレストは+90° に対応する。バunch前方のエネルギーが低い場合は+9° でバunch長 44fsec、C=45、前方のエネルギーが高い場合、-11° でバunch長は 47fsec、C=42 となり、縦方向位相空間に依らず十分な圧縮が可能であることが分かった。バunch長が最短となる時、加速構造出口での運動エネルギーは前方が低エネルギーの場合 17.5MeV、前方が高エネルギーの場合は 16.5MeV となった。図 3 はバunch長が最短となる時の加速構造入口付近での縦方向位相空間の変化の様子を表しており、バunchの前方がエネルギー場合も結局、時間と共にバunch前方のエネルギーが高い状態へと変化している。

加速構造中でのバunch長とエネルギーが変化する様子を図 5 示す。圧縮は加速構造入口付近から 1m 程度までにバunch圧縮が行われている。バunch前方のエネルギーが高い場合は加速が遅れて始まっており、これは図 2 を見れば分かるように $\xi=0$ を通過する分の遅れに対応する。

空間電荷効果の影響を少なくするためには、低エネルギーの状態にいる時間が短いバunch前方のエネルギーが低い縦方向位相空間の方が良い。

4.2 電子銃、アルファ磁石、加速構造を使った圧縮

ITC RF-gun、アルファ磁石、3m 加速構造の全体に渡ってシミュレーションを行いバunch長 100fsec 以下の電子ビームが生成可能かどうかを調べた。世より線形な縦方向位相空間の電子ビームを生成するために ITC RF-gun の第 1 セル、第 2 セルの最大の電場強度はそれぞれ、25, 70MV/m、位相差を π

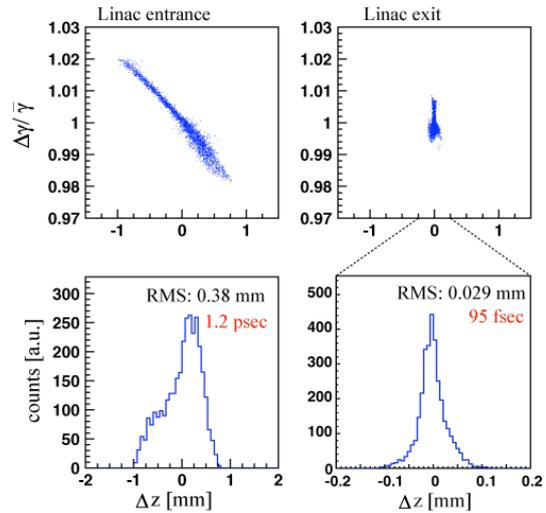


図 6 : 加速構造入口、出口での縦方向位相空間分布。下段は Δz 方向へ分布を射影した図。加速構造入口、出口での平均の γ はそれぞれ 4.31, 34.3 である。

+24° とした。アルファ磁石の磁場勾配を 3T/m とし、バunch先頭の 20pC を選択するために、エネルギー 1.66MeV 以下のビームはスリットを用いて除去した。加速電場は加速後の平均エネルギーが 17MeV となる様に 8MV/m とした。加速構造入口での縦方向位相空間分布を図 6 に示す。入口での平均のエネルギーは 1.69MeV、バunch長は 0.38mm (1.2psec) であった。

バunch長が最も短くなる位相はゼロクロスから 13° でバunch長 0.029mm (95fsec)、エネルギー 17 MeV の超短バunch電子ビームが生成可能な事が分かった。

今後は実際に使用する加速構造の電磁場分布を取り込み、横方向も考慮した最適化と評価を行う。

参考文献

- [1] H. Hama, et al., New. J. Phys. 8(2006), 292.
- [2] H. Hama, et al., Nucl. Instr. And Meth. A (2010), doi:10.1016/j.nima.2010.02.022.
- [3] F. Hinode, et al., Nucl. Instr. And Meth. A (2010), doi:10.1016/j.nima.2010.02.025
- [4] L. Serafini and M. Ferrario, "Velocity Bunching in Photo injectors", Proc. of Workshop on the Physics with the X-ray FEL, Arcidosso, Sept. 2000.
- [5] T. Tanaka, et al., "Study and development of a thermionic ITC-RF gun for production of ultra-short electron bunches", Proc. of the 3rd Annual Meeting of Particle Accelerator Soc. of Japan.
- [6] General Particle Tracer (GPT), URL: <http://www.pulsar.nl/gpt>