

東北大学 t-ACTS における加速構造中の Velocity Bunching を用いた 超短バンチ生成

EXTREME SHORT ELECTRON BUNCH GENERATION BASED ON VELOCITY BUNCHING IN ACCELERATING STRUCTURE AT T-ACTS, TOHOKU UNIVERSITY

柏木茂^{#,A)}, 日出富士雄^{A)}, 武藤俊哉^{A)}, 柴崎義信^{A)}, 南部健一^{A)}, 高橋健^{A)}, 長澤育郎^{A)}, 東谷千比呂^{A)},
永沢聡^{A)}, Anusorn Lueangaramwong^{A)}, Nuan-Ya Huang^{B)}, 浜広幸^{A)}
Shigeru Kashiwagi^{#,A)}, Fujio Hinode^{A)}, Toshiya Muto^{A)}, Yoshinobu Shibasaki^{A)}, Kenichi Nanbu^{A)}, Ken Takahashi^{A)},
Ikuro Nagasawa^{A)}, Chihiro Tokoku^{A)}, Satoru Nagasawa^{A)}, Anusorn Lueangaramwong^{A)}, Nuan-Ya Huang^{B)},
Hiroyuki Hama^{A)}

^{A)} Electron Light Science Centre, Tohoku University

^{B)} National Synchrotron Radiation Research Center, Hsinchu, Taiwan

Abstract

We are conducting a beam experiment of sub-picosecond electron bunch generation at t-ACTS (test accelerator as a coherent terahertz source), Tohoku University. In the t-ACTS, the intense coherent terahertz radiation will be generated from an undulator and an isochronous accumulator ring via producing sub-picosecond bunches. The accelerator is composed of a thermionic cathode rf gun, an alpha magnet and a 3 m-long accelerating structure. Velocity bunching scheme in accelerating structure is applied to generate the short electron bunch. The thermionic rf gun consists of two independent cavities has been developed, which is capable of manipulating the beam longitudinal phase space. To produced femtosecond electron bunch, the longitudinal phase space distribution of the beam entering the accelerating structure is optimized by changing the rf gun parameters. The bunch length is measured by observing an optical tradition radiation using a streak camera. In the study of femtosecond electron bunch generation, a relation between the rf gun parameters and the bunch length after compression was investigated. The preliminary results of experiments are described in this report.

1. はじめに

東北大学電子光学研究センターでは極短電子バンチを使った加速器ベースの高輝度テラヘルツ光源の開発研究を行なっている[1]。これまでに、試験加速器 (t-ACTS: test Accelerator as the Coherent THz Source) のビーム加速部までの建設を完了し、平成 25 年 12 月に最大ビームエネルギー 50MeV の電子加速器として放射線施設検査に合格した (Figure 1)。現在、加速構造中の Velocity Bunching を用いた極短電子バンチ生成実験が進行中である。入射器は電子ビームの縦方向位相空間分布の操作を可能にする独立二空洞型の熱陰極高周波電子銃(ITC RF-gun)とアルファ電磁石で構成され、これにより加速管での velocity bunching に最適なビームの生成が可能である。ITC RF-gun で生成されたビームの縦方向位相空間分布を直接的に観測することは困難であるため、アルファ電磁石内に設置した可動スリットを使いエネルギースペクトルを測定し、シミュレーションとの比較より縦方向位相空間分布を推定する。加速後のバンチ長計測はストリークカメラを使い遷移放射(OTR)を測定することによって行なわれる。実験では加速管に入射するビームの縦方向位相空間分布や加速器位相を変化させ、加速後のバンチ長を計測した。

[#] kashiwagi@lns.tohoku.ac.jp

2. 超短電子バンチ生成

2.1 Velocity bunching

t-ACTS では超短電子バンチを生成する方法として、システム構成がシンプルかつコンパクトであることから加速構造中の velocity bunching を採用した[2,3]。Velocity bunching は、光速よりも僅かに小さい速度の電子バンチを加速構造の RF ゼロクロス付近に入射することによりバンチ圧縮を行なう。加速構造に入射した直後の電子バンチの速度は、RF の位相速度よりも遅いため、加速構造中で位相スリップをしながら、縦方向位相空間で回転しバンチ圧縮されると同時に加速されていく。

Figure 2 に加速構造中での縦方向位相空間にお

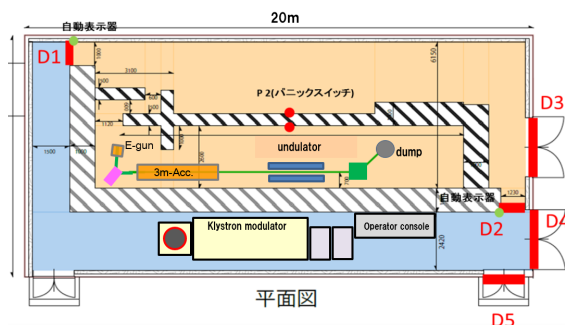


Figure 1: Accelerator-based light source house (t-ACTS).

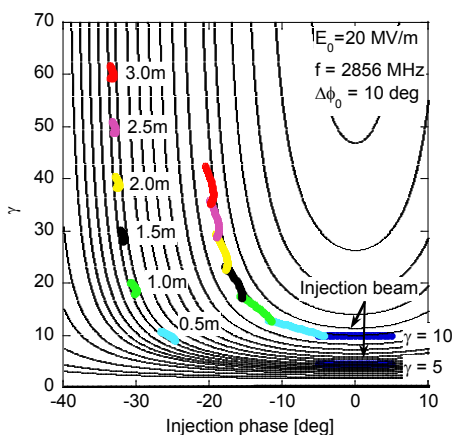


Figure 2: Equi-potential lines for the peak accelerating field $E_0 = 20\text{MV/m}$. Evolution of electron distributions injected at 0 degree are plotted with colored lines.

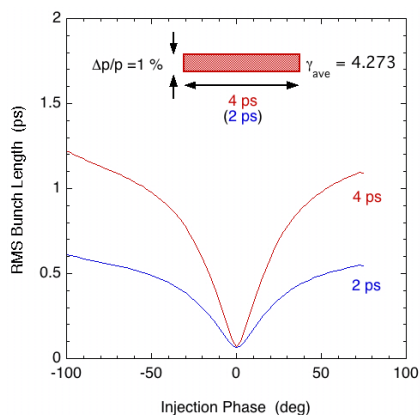


Figure 3: RMS bunch length via velocity bunching versus the beam injection phase to accelerating structure. ($E_0 = 20\text{MV/m}$) Initial electron bunch has uniform charge distribution with $\gamma_{\text{ave}} = 4.273$, $\Delta p/p = 1\%$, $\Delta t = 4\text{ps}$ (2ps).

る電子の軌跡を示す（加速勾配：20 MV/m）。このとき、加速構造に入射する電子の初期分布は、時間幅（位相幅）10 deg、エネルギーを $\gamma = 5$ と 10 とした。加速構造に入射した電子は等ポテンシャルラインに沿って、位相スリップをしながら加速されていく。RF のゼロクロス付近の等ポテンシャルラインの平らな部分にエネルギーの揃った電子バンチを入射することで、加速後に時間幅の極めて短いバンチを生成することができる。等ポテンシャルラインの形からもわかるように、入射ビームのエネルギーが低い方が、RF ゼロクロス付近の等ポテンシャルラインがより平坦で線形な部分を使うことができる。

加速構造へのビームの入射位相と圧縮後のバンチ長との関係を Figure 3 に示す。このとき、ビームの運動量幅 ($\Delta p/p$) は 1%、 $\gamma_{\text{ave}} = 4.273$ とし、時間幅は 4ps と 2ps の一様な電荷分布を仮定した。Figure 3 より、入射位相が RF のゼロクロス付近でバンチ長が最短となることが分かる。加速後のバンチ長は、RF のどの位相にどのような縦方向位相空間分布で入射するかによって決まる。

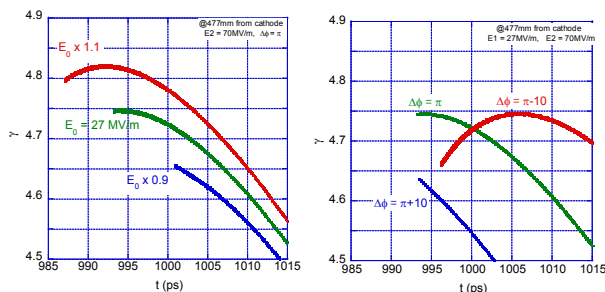


Figure 4: Simulation results for the electron distribution in the longitudinal phase space at the position of 477mm from the cathode for different combinations of the field strength (left) and the phase (right).

2.2 独立二空洞型熱陰極高周波電子銃


加速構造中での velocity bunching に適した電子バンチを生成するために、我々は独立二空洞型熱陰極高周波電子銃(ITC RF-gun)を開発した[4]。この ITC RF-gun は 2 つの高周波空洞で構成されており、 空洞間の結合度を極めて小さくすることで、それぞれの空洞に供給する RF の位相と振幅を調整させることにより、それぞれの空洞内の電場強度と空洞間の位相差を独立に制御することが可能である。

Figure 4 に GPT を使い計算した ITC RF-gun の第一空洞の電場強度と空洞間の位相差を変化させた場合のカソードから 477mm の位置での電子ビームの縦方向位相空間分布を示す。空洞内の電場強度や位相を変化させることにより、ビームの縦方向位相空間分布が制御できることが分かる。この特長から、ITC RF-gun では加速構造中の velocity bunching に適した等ポテンシャルラインに沿うような縦方向位相空間分布を持つビームを作り出すことができる。また、ITC RF-gun で生成されるビームは、各 RF サイクルにおいて Figure 4 に示したバンチ先頭部分に電荷が集中している。実際に velocity bunching を行なう際は、バンチ先頭にエネルギーの揃った部分をつくりその部分だけをスリットで使い切り出し加速管へ入射する。

3. Velocity bunching 実験

実験では、ビームの加速管への入射位相を変え、加速後のバンチ長の変化を測定した。本実験では、ビームの入射位相が RF ゼロクロスに近づくにつれ velocity bunching によりバンチ長が短くなること、また入射位相がゼロクロス付近のときバンチ長が最短となることを検証することを目的とした。

3.1 実験セットアップ

t-ACTS の電子源部分は、ITC RF-gun とアルファ電磁石により構成されている。アルファ電磁石内に挿入されている真空槽には可動式のスリットが設置されており、その金属スリットを使い、velocity bunching に必要な部分のビームのみを切り出す。ITC RF-gun で生成されたビームの縦方向位相空間分布を直接測定することは困難であるため、アルファ

電磁石内の可動スリットを使いエネルギースペクトルを測定しシミュレーション結果と比較することによりビームの縦方向位相空間分を推定し、加速管へ入射するビームの切出し部分を決定する。ビームの加速管への入射位相の調整は RF 立体回路に設置した大電力移送器により行なう。

バンチ長計測は、加速管下流のビームラインに Al 蒸着ミラーを挿入し遷移放射 (OTR) を発生させ、その時間幅をストリークカメラ (FESCA-200) で測定することにより行なった。OTR はサファイア窓から大気に取り出され、凹面鏡 ($f = 400$) で平行光にした後、平面鏡で構成される反射光学系により加速器室の外側まで約 10m 輸送された。ストリークカメラの入射スリット部分に OTR を集光するために、今回は調整が容易であることから凸レンズ ($f = 150$) を使用した。

3.2 入射ビームと入射位相 (加速位相)

加速管への入射ビームの調整は、ITC RF-gun への RF パワーを設定した後、ビームパルス先頭にエネルギーの揃ったフラットな部分ができるように空洞間の位相差を調整することにより行なった。パルス先頭部分のエネルギーが揃っている場合には、エネルギー幅が狭くピーク電流の大きいスペクトルとなる。

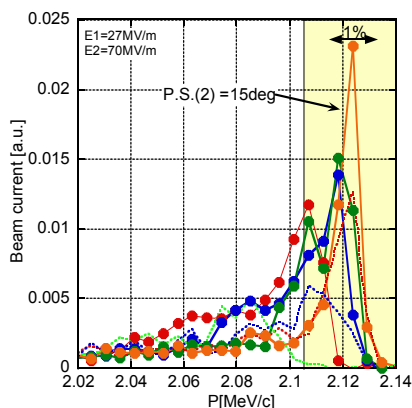


Figure 5: Measured momentum spectra for different phases of ITC RF-gun. These spectra were measured in the alpha-magnet using the movable beam slit.

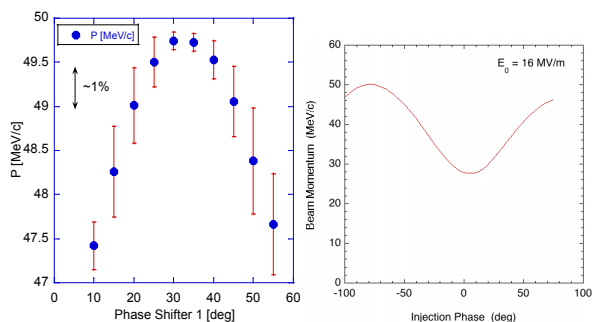


Figure 6: (Left) RF phase dependence of the beam momentum measured at the linac downstream. (Right) Injection phase versus the momentum of accelerated beam (calculation).

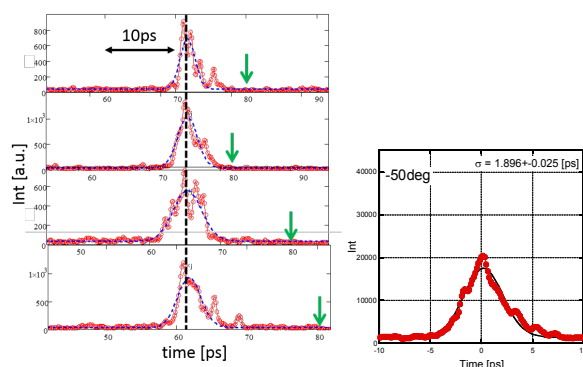


Figure 7: Measured time profile using streak camera. (Left) Samples of single shot measurement. (Right) Time profile superimposed of 30 shots.

Figure 5 に位相差を 5 度ステップで変化させた時に測定されたスペクトルを示す。スペクトル幅が狭くなる位相 (P.S.(2)=15deg) に設定し、エネルギーの揃ったパルス先頭部分のみを金属スリットで切り出し加速管へ入射した。今回のビーム実験で加速管に入射したビームの電流値は約 18mA、マイクロバンチあたりの電荷量は約 6pC であった。

一方、ビームの加速管への入射位相は、加速管に入力する RF 位相とリナック下流でのビーム運動量の関係を測定し、その最大値をとる位相を計算と比較することで判断した。Figure 6 に測定と計算結果を示す。これより、Phase Shifter 1 の 35 度設定が入射位相 -80 度に対応することが分かる。また、運動量の最大値から電場勾配は約 16 MV/m と推定された。

3.3 バンチ長計測

バンチ長計測は、ストリークカメラ (FESCA-200) の 100ps レンジ (掃引時間: 153.77ps, 1024ch, 1ch あたり約 0.15ps) を使い、入射スリット幅を 60 μ m にして行なった。今回の測定では、各入射位相で 30 パルスの時間プロファイルを測定し、その各プロファイルにガウス分布を当てはめることによりパルスの中心軸を求め、その軸に対して 30 パルスを重ね合わせて得られた分布よりバンチ長を求めた (Fig. 7)。

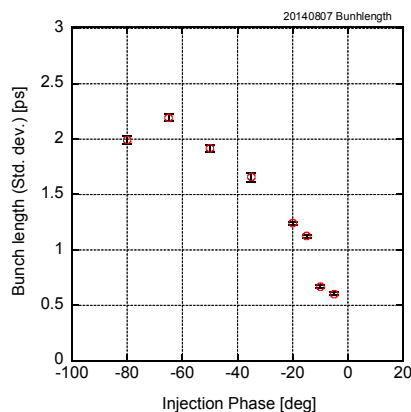


Figure 8: Measured bunch length plotted as a function of injection phase.

3.4 測定結果と考察

Figure 8 に入射位相と測定されたバンチ長の関係を示す。入射位相が RF ゼロクロスに近づくにつれて、バンチが短くなっていくのが測定された。また今回のビーム実験では、バンチ長が最短になることが予想された RF ゼロクロスを跨ぐ範囲で入射位相を変え測定を試みたが、RF ゼロクロス付近と減速位相の範囲でバンチ長を測定することができなかった。ゼロクロス付近では、加速管でのビーム集束（発散）が大きく変化し、それを加速管上流の四極電磁石だけでは調整（補正）することができず加速管でのビームロスにより透過率が減少し、測定に必要な OTR の光量を得ることができなかったためである。

エネルギーが最大となる位相でビームを加速管に入射した場合、バンチは殆ど圧縮されることなく、入射時の時間幅のまま加速される (Fig.3, Fig.6)。このことから、今回の実験で加速管に入射したときのビームの時間幅は、エネルギーが最大であった-80度のときに測定された約 2ps (σ)であったといえる。

次に、縦方向位相空間で一様な電荷分布を持つ電子ビームを仮定し、入射位相と velocity bunching 後のバンチ長の関係を計算により求め、実験結果と比較をした。計算では、電子バンチを時間幅 6ps (rms バンチ長 \sim 2ps、実験のときの入射ビームと同じ)、

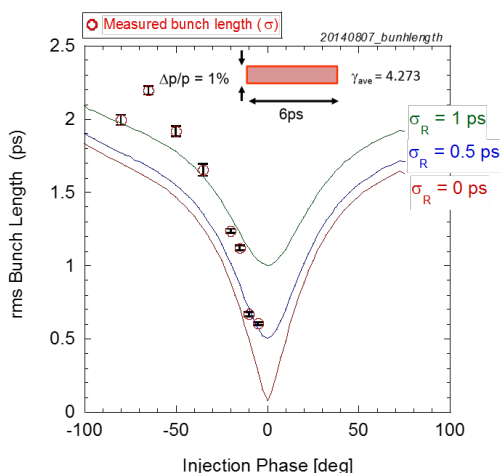


Figure 9: Measured bunch length versus beam injection phase. The solid lines show the calculation results of rms bunch length with time resolution of 0.0ps, 0.5ps, 1.0 ps.

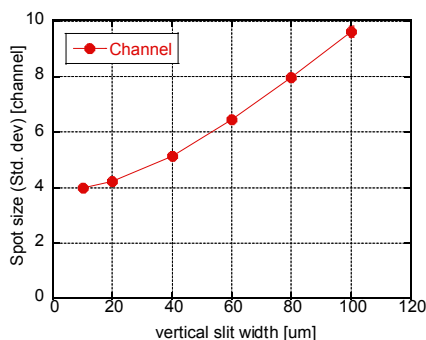


Figure 10: Measured slit size with a focus mode of streak camera plotted as a function of vertical slit width.

運動量拡がり ($\Delta p/p$) を 1%、 $\gamma_{ave} = 4.273$ とした。Figure 9 に実験結果と計算結果を合わせて示す。計算結果の 3 本の線は、時間分解能 (σ_R) が 0ps, 0.5ps, 1.0ps のときに測定されるバンチ長を表している。実験結果は、いずれの計算結果とも完全には一致しなかったが、時間分解能 1 ps とした場合の計算結果と実験結果が -90 度から -20 度の範囲ではおおよそ一致する。測定分解能を 1ps とした場合、入射位相が -20 度付近で測定されたバンチ長 (1.1~1.3 ps) からその分を差し引くとバンチ長はサブピコ秒まで圧縮されていたことになる。また、ストリークカメラの時間分解能は入射スリット幅に依存することが知られているが [5]、その確認のためフォーカスモード (時間掃引しない) でスリット像を測定することによりスリット幅に起因する時間分解能を測定した (Figure 10)。測定から、ビーム実験時のスリット幅 60 μ m は約 0.96ps の時間分解能に相当するという結果が得られた。この 0.96ps という時間分解能は、実験と計算結果との比較の際に想定された時間分解能とほぼ一致する。しかし、今回のバンチ長測定の時間分解能が約 1ps だったとすると、-10 度付近で約 0.6ps のバンチ長が測定されていることと矛盾する。Figure 10 のグラフを注意深く見ると、スリット幅 10~100 μ m の範囲で、スリット幅とスリット像の大きさ (spot size) の関係が線形でないことが分かる。スリット幅の依存性も含め、ストリークカメラの時間分解能については今後詳細に調べる。

4. まとめと今後の課題

東北大学 t-ACTS において、ITC RF-gun で生成したビームを使い、加速構造中での velocity bunching をビーム入射位相とバンチ長の関係を測定することで確認した。実験では、入射位相を制御することで、サブピコ秒時間幅の電子バンチを生成することができた。また、入射位相が RF のゼロクロス付近では加速管内でのビーム集束の変化から電子ビームの加速管透過率が減少し、バンチ長計測を行なうことができなかった。この問題を解決するため、加速管周り (特に入力カップラ付近) へのビーム集束系の追加が必要だと思われる。今後、ストリークカメラを用いたバンチ長計測の時間分解能の評価を行ない、また RF deflector などストリークカメラ以外のバンチ長計測手法についても検討していく予定である。

謝辞

本研究の一部は JSPS 科研費 基盤研究(S) 25790078、基盤研究(B) 25286084 の助成を受けたものです。

参考文献

- [1] H. Hama et al., New J. Phys. 8 (2006) 292.
- [2] L. Serafini, and M. Ferrario, AIP Conf. Proc. 581, pp 87-106.
- [3] F. Miyahara et al., Proc. of IPAC'10, (2010) 4509.
- [4] F. Hinode et al., Proc. of IPAC'10, (2010) 1731.
- [5] H. Tomizawa, 第 5 回日本加速器学会, pp129-132