

ストリークカメラを用いた OTR 測定による極短電子ビームバンチ長測定 (II)

ULTRA-SHORT BUNCH LENGTH MEASUREMENT VIA OBSERVATION OF OTR USING A STREAK CAMERA (II)

齊藤寛峻[#], 柏木茂, 日出富士雄, 武藤俊哉, 阿部太郎, 齊藤悠樹, 柴崎義信, 南部健一, 長澤育郎, 高橋健,
濱広幸

Hirotooshi Saito [#], Shigeru Kashiwagi, Fujio Hinode, Toshiya Muto, Taro Abe, Yuki Saito, Yoshinobu Shibasaki,
Kenichi Nanbu, Ikuro Nagasawa, Ken Takahashi, Hiroyuki Hama
Research Center of Electron Photon Science, Tohoku University

Abstract

A test accelerator as a coherent terahertz source (t-ACTS) has been under development at Tohoku University, in which an intense coherent terahertz (THz) radiation is generated from an extremely short electron bunch. An injector of t-ACTS is consisted of a thermionic RF gun, an alpha-magnet as an energy filter, and a 3m-long travelling wave accelerating structure. A velocity bunching scheme is employed for the production of short electron bunches. According to a numerical simulation, ~100 fs bunch can be produced by using the t-ACTS accelerator configuration. An experiment of short bunch production has been carried out and the bunch length was measured with a streak camera by measuring optical transition radiation from the electron bunch. We have succeeded in producing a sub-picosecond electron bunch, however a time resolution of the measurement was approximately 400 fs. To improve the time resolution, we performed a modification of the optical transport line of OTR for the measurement of streak camera with the fast range and the optical system was evaluated by ray tracing. The time resolution of the measurement system and measurement results are described in this paper.

1. はじめに

東北大学電子光理学研究センターでは加速器ベースの高輝度コヒーレントテラヘルツ光源の研究開発を行っている。試験加速器(t-ACTS)では、光源に必要な 100 fs 以下の極短パルス電子ビームを進行波型加速管中で速度集群法(velocity bunching 法)により生成する。

t-ACTS では、バンチ長測定には測定システムが比較的シンプルかつシングルショットで 1 つのマイクロバンチのパルス長を測定できるストリークカメラを用いる方法を採用している。この測定では電子ビームにより生成した可視光領域の遷移放射(Optical Transition Radiation: OTR)のパルス長をストリークカメラで測定することにより電子ビームのバンチ長測定を行っている。

ストリークカメラでは掃引速度や入射スリット幅などに依存する時間分解能があるが、掃引速度を高速にすることによってこの時間分解能を小さくすることができる。しかし、掃引速度を上げると掃引により伸長されたストリーク像が光量不足のために不明瞭になってしまうという問題があった。そのため、これまでは現在使用しているストリークカメラ(浜松ホトニクス, FESCA-200)の最速レンジである 20 ps レンジ(掃引速度 18.99 ps/frame)での測定は行えておらず、50 ps レンジ(掃引速度 53.99 ps/frame)での測定までとなっていた。掃引レンジが 50 ps の場合は、ストリークカメラの時間分解能は約 370 fs(スリット幅 60 μm)であり、ビームシミュレーションから予想されるバンチ長(約 100 fs)を大きく超えるものである。

今回 OTR 発光点からストリークカメラまでの光輸送系における光量の減少を抑えるよう光学系の改良を行い、

より時間分解能の高い 20 ps レンジでの測定を試みた。本学会では今回用いたバンチ長測定システムと測定システムで生じる被測定光の時間拡がりの評価結果、バンチ長測定結果について報告する。

2. バンチ長測定システム

バンチ長測定実験ではビームライン上で発生した OTR を真空窓を通して大気中に取り出し、反射光学系を使いストリークカメラまで約 10 m 輸送する。OTR は発散角を持つ放射であるため[1]、発散光を平行光に変換してから平面鏡によりストリークカメラの直前まで輸送し、ストリークカメラのスリット部分に集束させる光学系を用いる。

これまでは OTR を平行光に変換するのにアルミコート球面鏡を、スリット部に集束させるのにアルミコートの 90°非軸放物面鏡を使用し、他に輸送のため 6 枚の平面鏡を使用していた。また、波長分散による OTR の時間拡がりを抑制するためカットオン波長 409 nm のロングパスフィルターを使用し、時間拡がりへの影響の大きい短波長成分をカットしていた。今回、OTR を平行光に変換するためのミラーと集束させるためのミラーをともに 90°非軸放物面鏡に変更し、輸送のための平面鏡の枚数を 5 枚に減らした。また、アルミコートに比べ 400 nm 以下の短波長の反射率が低い金コートの放物面鏡を採用することによりロングパスフィルターを使用しない光学系とした。また、400 nm~800 nm の波長域では金コートミラーの方がアルミコートミラーよりも高い反射率を持つ。光学系変更前後のストリークカメラへ輸送される OTR の波長スペクトルとレイトレースの計算結果から、今回の光学系の変更によりストリークカメラへ導かれる光量は約 2 倍に増加し

[#]hsaito@lms.tohoku.ac.jp

た。

3. バンチ長測定システムの時間分解能評価

現在使用しているバンチ長測定システムでは、ストリークカメラの時間分解能と OTR 輸送光学系において発生する被測定光の時間拡がりを合わせたものが測定システム全体の時間分解能となる。本測定システムの測定結果からバンチ長を導出する際には、このシステム全体の時間分解能を考慮する必要がある。本研究ではストリークカメラ、光学系それぞれの時間分解能の評価を行った。

3.1 ストリークカメラの時間分解能

ストリークカメラでは光電面から発生した光電子を時間的に変化する電場で掃引し、時間方向の分布を空間分布に変換することによって被測定光のパルス長を測定する。そのため、光電面に入射する光の掃引方向の空間サイズを決めるスリット幅に依存した時間拡がりが存在する。本研究ではフォーカスモード(掃引電場を印加しない測定モード)で入射スリット像の大きさを測定することによりストリークカメラの時間分解能評価した。スリット幅を 60 μm に設定した場合、測定されたスリット像の大きさと掃引速度から、50 ps レンジは約 370 fs、20 ps レンジは約 130 fs の時間分解能を持つことが分かった。

3.2 光学系の時間分解能(発生する時間拡がり)

光学系で生じる時間拡がりとしては、光源の空間拡がりや真空窓での屈折に起因する光路長偏差による時間拡がりや波長分散による時間拡がりが考えられる。今回、光学系の 3 次元レイトレースを行うことにより、光学系で生じる時間拡がりの評価を行った。

3.2.1 3 次元レイトレースによる時間拡がりの評価方法

Figure 1 にレイトレースを行った光学系の概略図を示す。レイトレースでは Al 板の直前で電子を生成し Al 板に入射させ、発生した OTR を 90°非軸放物面鏡 1 で平行光に変換し、90°非軸放物面鏡 2 で観測面に集束させる光学系を設定した。2 台の放物面鏡は同じ形状のものをを用いており、焦点距離 $f = 177.8 \text{ mm}$ 、光軸から見た形状は直径 76.2 mm の円である。Al 板は 1 辺 10 mm の正方形とした。実験では放物面鏡 1 から放物面鏡 2 まで OTR を輸送するために 5 枚の平面鏡を使用しているが、レイトレースでは平面鏡の影響は無視できるとして、光学系には含めていない。

設定した光学系において、電子ビーム軸を z 軸とし、ビーム軸とビーム軸に対して角度 45°傾けた Al 板の交点 (Al 板の中心) を原点とした。Al 板の加速器上流側の先端を含む面 $z = 5/\sqrt{2} \text{ mm}$ を起点とし、この面からレイトレースを開始した。z 軸上を進む電子ビームが Al 板に入射したときに発生する OTR の発散角ゼロの軸を x 軸とした。この x 軸上を進む光の経路を基準経路と呼ぶことにする。基準経路を進む光が放物面鏡 1 で 90°方向に反射して zx 平面上を -z 方向に進み、放物面鏡 2 により 90°方向に反射して zx 平面上を -x 方向に進むよう 2 台の放物面鏡の角度を設定した。各鏡の位置は、基準経路が各鏡の中心を通るように設定し、原点から放物面鏡 1 の中心までの距離を焦点距離 $f = 177.8 \text{ mm}$ 、2 台の放物面鏡の中心間の距離を 10 m とした。放物面鏡 2 の焦

点を原点とし、放物面鏡 2 の中心が z 軸上(負側)になり、Y 軸が y 軸と平行になるように直交座標軸 X, Y, Z を新たに定義し、面 $Z = 0$ をストリークカメラの入射スリット面に対応する観測面に設定した。また、厚さ 0.3 mm の真空窓を Al 板と放物面鏡 1 の間の yz 平面上に設定し、原点から窓までの距離を 43.3 mm とした。実験で使用した真空窓の OTR 発生点から見た立体角は放物面鏡 1 の立体角より大きいため、レイトレースでは窓のサイズを考慮しなかった。上記の鏡、窓の設置位置や設定角度はバンチ長測定実験のセットアップに対応させている。

レイトレースでは、面 $z = 5/\sqrt{2} \text{ mm}$ において中心座標 $(x, y) = (0, 0)$ 、標準偏差 200 μm のガウス分布に従う乱数で (x, y) 座標を指定することにより実験とはほぼ同等なビームサイズ 200 μm (RMS) の電子ビームを生成した。生成した電子の進行方向を z 軸に平行な方向とし、電子と Al 板との交点において角度分布

$$\frac{d^2W}{d\omega d\Omega} = \frac{e^2}{4\pi^3 \epsilon_0 c} \frac{\beta^2 \sin^2 \theta}{(1 - \beta^2 \cos^2 \theta)^2} \quad (1)$$

に従う乱数により x 軸からの発散角 θ を、yz 面内の角度を $0 \sim 2\pi$ の一様乱数で与えることにより OTR 光子の発生方向を決定した。(1)式は OTR の発散角分布を表す公式である[2]。発散角分布は電子ビームのエネルギーによって変化するが、レイトレースでは実験に対応するようビームエネルギーを $\gamma = 60$ に設定した。

さらに、以下の手順で光子に波長を与え、波長分散を考慮した。OTR の単位波長あたりの光子数は Figure 2 の赤線のような波長の逆数に比例するスペクトルを持つ。これに実験で使用している真空窓の透過率と鏡の反射率をかけ合わせることでストリークカメラに到達する OTR 光子数のスペクトルが得られる (Figure 2 の青線)。さらにストリークカメラの光電面の量子効率をかけ合わせることでストリークカメラの光電面から放出される光電子数のスペクトルが得られる (Figure 2 の緑線)。レイトレースではこの光電子数のスペクトルに従う乱数で光子に波長を与えた。

以上の方法により生成した光子が真空窓を通過して 2 つの放物面鏡で反射し、観測面に到達するまでの経路を計算し、その経路から観測面への到達時間(経路長を光の伝搬速度で割った値)を計算した。その際、実験に対応するようレイトレース開始面から真空窓までを真空、真空窓の内部を化学気相成長ダイヤモンド (Chemical Vapor Deposition Diamond: CVD Diamond)、真空窓から観測面までを空気として各物質中での波長分散を考慮した。また、光の経路が設定した放物面鏡のサイズから外れた場合はそれ以降の軌道と到達時間の計算は行わないようにした。光子数 5 万個でレイトレースを行い、到達時間の標準偏差を光学系で発生する時間拡がりとした。

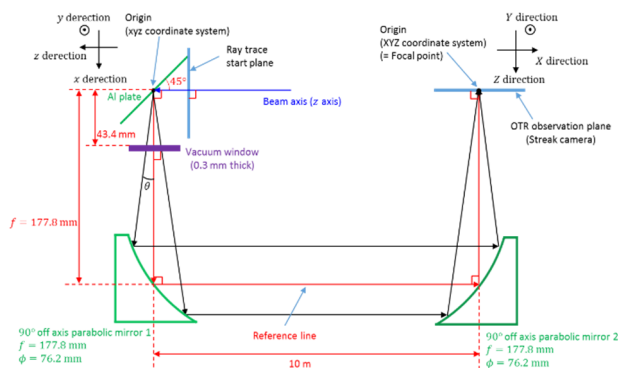


Figure 1: Schematic transport line for a numerical ray trace.

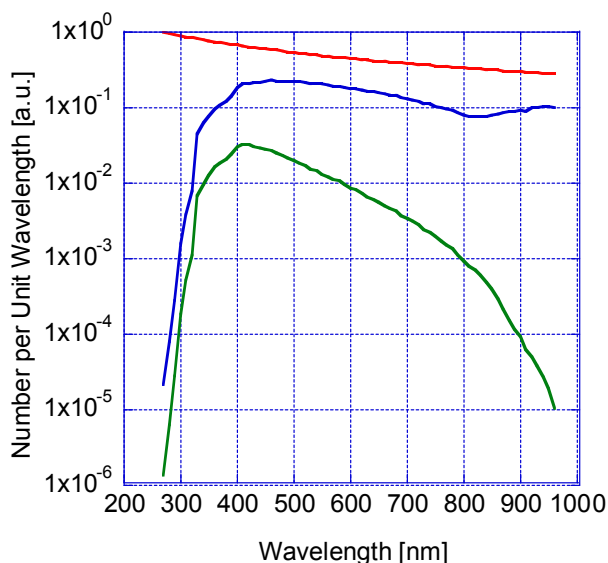


Figure 2: OTR spectra. The red line denotes a spectrum of a photon number of OTR per unit wavelength. The blue line is the spectrum of the photon number of OTR transported passing through a window and mirrors. The green line is the spectrum of the photoelectron number emitted from a photocathode of a streak camera.

3.2.2 光路長偏差による時間拡がり

まず有限の光源サイズに起因する光路長偏差による時間拡がりを評価するために OTR に波長分散を与えず、光子の波長は全てストリークカメラで観測される波長スペクトル (Figure 2 の緑線) の平均波長値 (483 nm) とした。計算の結果得られた観測面 $Z = 0$ におけるプロファイルと到達時間分布を Figure 3 に示す。到達時間は基準経路の到達時間をゼロに規格化した到達時間である。有限のビームサイズ (200 μm (RMS)) を設定したこと、真空窓での屈折を考慮したことからプロファイルは 1 点に集束せず、標準偏差で X, Y 方向に約 200 μm の拡がりを持つ結果となった。また、到達時間分布の標準偏差、すなわち光路長偏差による時間拡がりは約 40 fs であることが分かった。

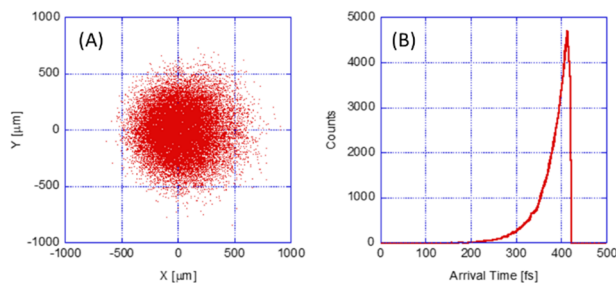


Figure 3: Calculation results by the ray trace in which chromatic dispersion is not taken into account. (A) An OTR profile at the observation plane. (B) An arrival time distribution at the observation plane (the minimum arrival time is normalized to zero).

3.2.3 波長分散による時間拡がり

次に、波長分散による時間拡がりも考慮するため、生成した光子にストリークカメラが観測する波長スペクトルに従う乱数で波長を与えてレイトレースを行った。計算の結果得られた観測面 $Z = 0$ における到達時間分布を Figure 4 に示す。波長分散を考慮しても OTR プロファイルはほとんど変化せず、 X, Y 方向に約 200 μm の拡がりを持つ分布となったが、時間拡がりは約 130 fs に増加した。この結果から、本測定システムの光学系で生じる時間拡がりの主要な原因は波長分散であると言える。

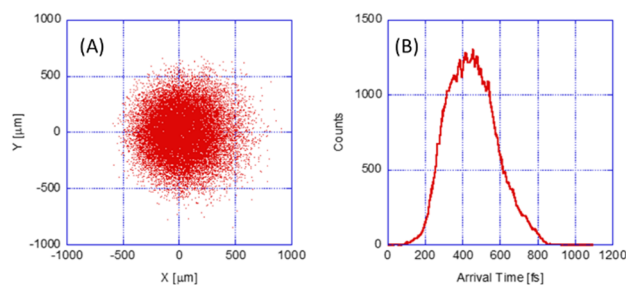


Figure 4: Calculation results by the ray trace in which chromatic dispersion is taken into account. (A) An OTR profile at the observation plane. (B) An arrival time distribution at the observation plane (the minimum arrival time is normalized to zero).

3.3 バンチ長測定システム全体で生じる時間拡がり

ストリークカメラの時間分解能を σ_{streak} 、光学系で生じる時間拡がりを $\sigma_{\text{transport}}$ とすると、バンチ長測定システム全体で生じる時間拡がり σ_{total} は

$$\sigma_{\text{total}} = \sqrt{\sigma_{\text{streak}}^2 + \sigma_{\text{transport}}^2} \quad (2)$$

と計算される。これまでの評価結果から $\sigma_{\text{streak}} = 130$ fs (20 ps レンジ)、 $\sigma_{\text{streak}} = 370$ fs (50 ps レンジ)、 $\sigma_{\text{transport}} = 130$ fs であるため、 $\sigma_{\text{total}} = 180$ fs (20 ps レンジ)、 $\sigma_{\text{total}} = 390$ fs (50 ps レンジ) と計算される。

4. バンチ長測定実験

4.1 バンチ長測定方法

t-ACTS の加速器システムは独立 2 空洞型熱陰極高周波電子銃 (ITC-RF Gun) [3]、アルファマグネット、3 m の S バンド加速管で構成されている。ITC-RF Gun は我々が独自に開発した 2 空洞型の熱陰極高周波電子銃であり、高周波空洞に供給する RF の位相と振幅を 2 空洞独立に調整することにより、ビームの縦方向位相空間分布を制御することができる。

ビーム生成実験では ITC-RF Gun から velocity bunching に適した縦方向位相空間分布を持つ電子ビームを生成し、下流のアルファマグネットの真空槽の中にある可動スリットを使いビームエネルギーの高い部分だけを切りだす。そして、加速管の RF ゼロクロス付近の位相にビームを入射して加速を行うことにより極短パルス電子ビームを生成した[4]。

バンチ長測定は生成した電子ビームを加速管下流のビームライン上に設置した Al 板 (直径 25mm, BK7 にアルミニウムを蒸着したもの) で電子ビームにより発生した OTR をストリークカメラ (浜松ホトニクス, FESCA-200) で測定することにより行った。Al 板はビーム軸と角度 45° で交わるよう設置し、ビーム軸に垂直かつ水平方向にのびる軸を中心に発生した OTR は厚さ 0.3 mm の真空窓 (CVD ダイヤモンド, Diamond Materials 社製) を通して大気中に取り出した。発散角を持つ OTR は 90° 非軸放物面鏡 (直径 76.2 mm, 軸外焦点距離 177.8 mm, 保護膜付き金コート, Edmund Optics 社製) を用いて平行光に変換した。平行光に変換した OTR は 5 枚の平面鏡 (直径 150 mm, シグマ光機社製, Al + MgF₂ コーティング) を用いてストリークカメラの直前まで輸送し、平行光に変換する際に使用したものと同等の 90° 非軸放物面鏡を用いてストリークカメラの入射スリット部分に集束させた。OTR 発生点からストリークカメラまでの輸送距離は約 10 m であった。

4.2 バンチ長測定結果

ストリークカメラの垂直スリット幅を 60 μm に設定し、20 ps レンジおよび 50 ps レンジでバンチ長測定を行った。Figure 5 に各測定レンジにおける典型的な 1 ショットの信号を示す。トリガー信号のジッターの影響で各ショットの信号の位置は時間軸方向にばらつく。各ショットの信号をガウスフィットして中心軸を求め、軸を合わせて 30 ショットの信号を積算し、得られた分布 (Figure 6) をガウスフィットしたときの標準偏差を OTR のパルス長 (RMS) とした。今回測定されたパルス長は 20 ps レンジで 210 fs、50 ps レンジで 450 fs であった。

前述したように、本測定システムでは被測定光に時間拡がり $\sigma_{\text{transport}}$ が生じる。そのため測定されるパルス長 σ_{measure} は真のバンチ長 σ_{bunch} よりも長くなる。これらの関係は次の式で表される。

$$\sigma_{\text{measure}} = \sqrt{\sigma_{\text{bunch}}^2 + \sigma_{\text{total}}^2} \quad (3)$$

(3)式を用いて測定されたパルス長から時間拡がりを差し引き真のバンチ長を求めると、 $\sigma_{\text{bunch}} = 110 \text{ fs}$ (20 ps レ

ンジ)、 $\sigma_{\text{bunch}} = 220 \text{ fs}$ (50 ps レンジ) と計算される。

今回評価したストリークカメラの時間分解能はフォーカスモードにおけるスリット像幅から算出したものであった。しかし掃引電場を印加した測定では掃引電場の影響でこの像幅が大きくなることが報告されており[5]、実際のストリークカメラの時間分解能は今回の評価値より大きいと考えられる。20 ps レンジと 50 ps レンジの測定結果が一致せず、50 ps レンジにおけるバンチ長の方が長くなったのはそのためであると推測される。したがって今回の測定結果から、バンチ長 100 fs 程度の極短パルス電子ビームが生成されていると考えられる。

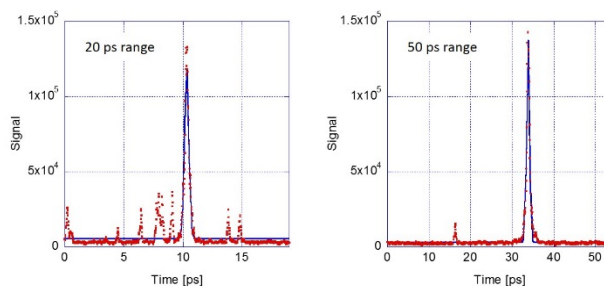


Figure 5: Typical one shot time profiles measured by the streak camera. Red dots show measured signals and blue lines are Gaussian fitting curves.

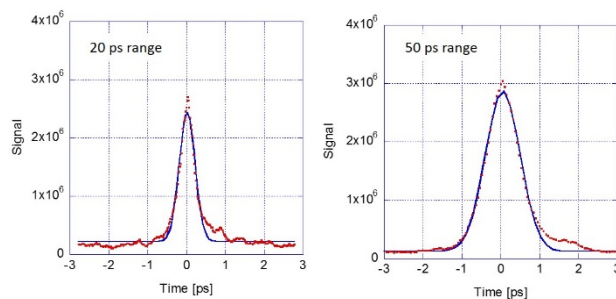


Figure 6: Time profiles obtained by adding up time profiles of 30 shots. Red dots show measured signals and blue lines are Gaussian fitting curves.

5. まとめ

東北大学電子光学研究センターでは高輝度コヒーレントテラヘルツ光源の開発を目指し、t-ACTS で velocity bunching 法を用いた極短パルス電子ビームの生成、ストリークカメラを用いた OTR 測定によるバンチ長測定を行っている。今回、OTR の輸送効率を上げるよう光学系の変更を行い、ストリークカメラの最速レンジである 20 ps レンジでバンチ長測定を行った。光学系のレイトレースおよびストリークカメラのフォーカスモードでのスリット像測定から評価した測定システムで生じる時間拡がりを考慮すると、今回の測定結果からバンチ長 100 fs 程度の極短パルス電子ビームが生成されていると考えられる。今後は加速管 RF のゼロクロス付近で入射位相を細かく変化させ、velocity bunching 法により生成される極短パルス電子ビームのバンチ長の変化を測定する予定である。

謝辞

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

参考文献

- [1] V. L. Ginzburg and I. M. Frank, JETP, 16, 15 (1946)
- [2] B. Gitter, CAA-TECH-NOTE-internal-#24 (1992)
- [3] F. Hinode *et al.*, Proc. Of IPAC'10, (2010) 1731.
- [4] 柏木茂 他, 第 11 回日本加速器学会年会, (2014), SUOM02.
- [5] H. Tomizawa *et al.*, Proc. Of the 5th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, (2008), pp 129-132.