

## コヒーレント遷移放射を用いたフェムト秒電子ビーム計測

### BUNCH LENGTH MEASUREMENT OF FEMTOSECOND ELECTRON BUNCHES BASED ON COHERENT TRANSITION RADIATION

野澤一太<sup>#</sup>, 菅晃一, 楊金峰, 小方厚, 近藤孝文, 神戸正雄, 吉田陽一

Itta Nozawa <sup>#</sup>, Koichi Kan, Jinfeng Yang, Atsushi Ogata, Takafumi Kondoh, Masao Gohdo, Yoichi Yoshida

The Institute of Scientific and Industrial Research (ISIR), Osaka University

#### Abstract

An electron bunch emits coherent radiation when the bunch length is shorter than the wavelength of the emitted electromagnetic waves. The spectrum of the coherent radiation contains information of the bunch length of the electron bunch. In this study, femtosecond electron bunches were generated using an S-band laser photocathode RF gun linac and a magnetic bunch compressor. The bunch length was estimated by observing coherent transition radiation on basis of a Michelson interferometer.

#### 1. はじめに

ピコ秒・フェムト秒のパルス幅を持つ超短パルス電子ビームは、自由電子レーザー<sup>[1]</sup>、大強度テラヘルツ光源<sup>[2]</sup>、パルスラジオリシス法<sup>[3]</sup>、時間分解電子線回折<sup>[4]</sup>など、加速器物理・物理化学の分野において多くの応用がなされている。このような極めて短い時間幅を有する電子ビームの発生は、高品質な光源の開発やパルスラジオリシス法における時間分解能の向上に必要不可欠であり、更なる電子ビームの短パルス化が求められている。

一方で、超短パルス電子ビームの発生と並行して、パルス幅計測手法も発展しており、電気光学結晶<sup>[5]</sup>、偏向空洞<sup>[6]</sup>、コヒーレント放射<sup>[6-9]</sup>などを用いたフェムト秒電子ビーム測定手法が研究されている。本研究では、コヒーレント放射を用いたパルス幅測定について検討を行った。コヒーレント放射は電子ビームのパルス幅よりも長波長の電磁波が高強度で放射される現象であり、その周波数スペクトルからパルス幅の情報を得ることができる。

本研究では、阪大産研 S バンドレーザーフォトカソード RF 電子銃ライナックを用いて、フェムト秒電子ビームを発生した。電子ビームパルス幅の評価に関しては、電子ビームが真空とアルミミラーの境界面で放射するコヒーレント遷移放射 (CTR, coherent transition radiation) を、マイケルソン干渉計を用いて計測・解析することで実施した。また、CTR の周波数スペクトルをより広帯域で計測するために、二つの異なる赤外検出器を用いた二帯域同時計測に関して検討を行った。

#### 2. 実験体系

##### 2.1 レーザーフォトカソード RF 電子銃ライナック

Figure 1 に、阪大産研の S バンドレーザーフォトカソード RF 電子銃ライナック及び磁気パルス圧縮器の模式図を示す<sup>[9-11]</sup>。本ライナックは、1.6 セル S

バンドレーザーフォトカソード RF 電子銃、S バンド進行波型線形加速空洞、磁気パルス圧縮器から構成される。RF 電子銃の銅カソードの励起には、Ti:Sapphire フェムト秒レーザーの三倍高調波を使用し、低エミッタンスかつ初期パルス幅の短い電子ビームを生成した。また、エミッタンスの増加を低減するために、レーザー入射角は $\sim 2^\circ$ と直入射の条件でカソードを励起した。電荷量の測定には、電流モニター (current transformer) を利用した。空間電荷効果によるパルス幅の増大を抑制するために、電荷量はピコクーロンオーダーとした。電子ビームは電子銃出口では $\sim 4$  MeV、加速管出口では $\sim 32$  MeV まで加速されると同時に、加速管では磁気パルス圧縮に適切なエネルギー変調がなされた。磁気パルス圧縮器は、2 台の偏向電磁石 (B1-2)、4 台の四極電磁石 (Q1-4)、2 台の六極電磁石 (S1-2) から構成されており、磁気パルス圧縮器内での軸方向位相空間分布の回転により、パルス圧縮がなされた。2 台の六極電磁石は、フリッジングフィールドによるパルス幅の増大を補正するために利用した。最終的に、圧縮された電子ビームは、後述するパルス幅測定系に導かれ、パルス幅測定を実施した。

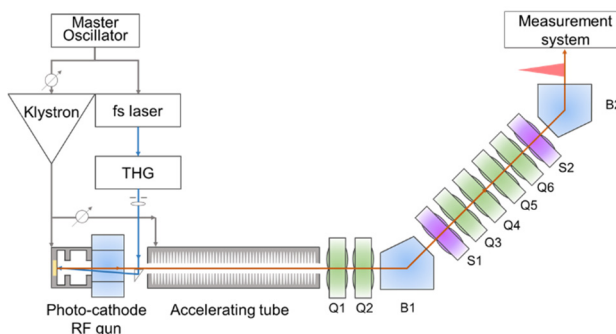


Figure 1: Schematic diagram of a laser photocathode RF gun linac and a magnetic bunch compressor. B: bending magnet, Q: quadrupled magnet, S: sextupled magnet.

<sup>#</sup>nozawa81@sanken.osaka-u.ac.jp

## 2.2 パルス幅測定系

Figure 2(a)にパルス幅測定系の模式図を、Figure 2(b)にマイケルソン干渉計の写真を示す<sup>9)</sup>。測定系は検出器を除いて真空中に設置した。ビームポートから出た電子ビームは、アルミミラー (M1) と真空の境界面でCTRにより赤外光を放射する。放射された赤外光は、非軸放物面鏡 (OAP1)、アルミミラー (M2, M3) によって伝播され、マイケルソン干渉計へと導かれる。マイケルソン干渉計では、ビームスプリッター (BS1) により、放射された赤外光は2経路に分けられ、一方は固定鏡 (M4) により反射され、もう一方は可動鏡 (M5) による光学遅延後に反射される。最終的に、MCT (mercury cadmium telluride detector, P5274-01 or P2748, 浜松ホトニクス) あるいは液体ヘリウム冷却シリコンボロメータ (general-purpose 4.2-K system, Infrared Laboratories) で2光束が合流し、インターフェログラムが計測される。CTRのインターフェログラムと周波数スペクトルは、フーリエ変換の関係で結びれているため、インターフェログラムに対して後述する解析モデルをフィッティングすることにより、パルス幅を推定することができる。なお、本研究では、赤外光源 (IRS-003C, IR system) を用いて、測定系全体の感度補正・最適化を実施した。

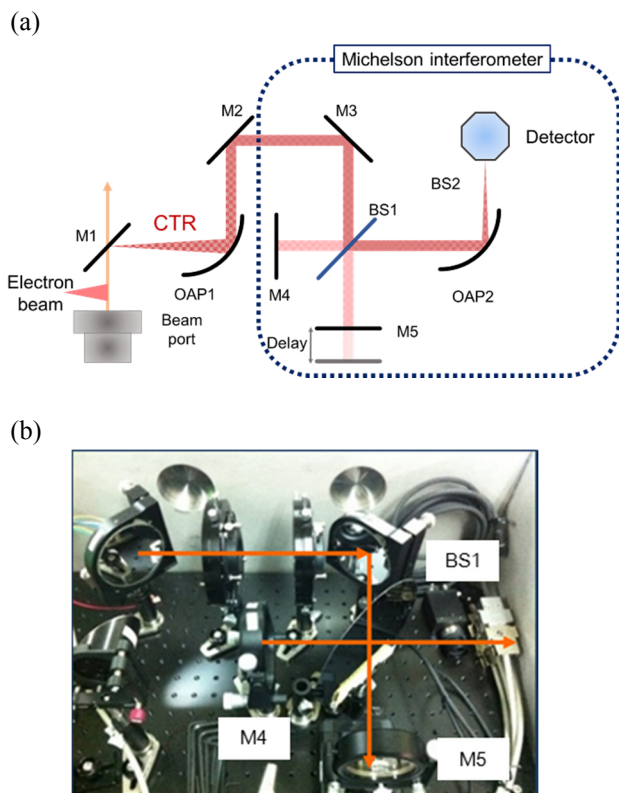


Figure 2: (a) Measurement system using the Michelson interferometer. M: mirror, OAP: off axis parabolic mirror, BS: beam splitter, MCT: photoconductive mercury cadmium telluride detector. (b) Picture of the Michelson interferometer. The orange solid line denotes the optical path of the infrared light.

## 2.3 解析モデル

コヒーレント放射の周波数スペクトル  $I_{\text{coh}}$  は、バンチ内の電子数を  $N$ 、バンチ形状因子を  $F_b$ 、一電子の放射スペクトルを  $I_e$  とし、Eq.(1)のように表される。

$$I_{\text{coh}}(\omega) \approx N^2 I_e(\omega) F_b(\omega) \quad (1)$$

ただし、 $\omega$ は角周波数である。軸方向の電荷分布としてパルス幅  $\sigma$  のガウス分布を仮定すると、バンチ形状因子は Eq.(2)のように表される。

$$F_b(\omega) = \exp(-\sigma^2 \omega^2) \quad (2)$$

簡単のため、真空と金属薄膜の境界面で起きる遷移放射を考える場合、一電子の放射スペクトルは Ginzburg-Frank の式に従い、周波数依存性がないことが知られている。ゆえに、CTRの周波数スペクトル  $I_{\text{CTR}}$  は、以下のようにバンチ形状因子のみに依存することになる。

$$I_{\text{CTR}}(\omega) \propto \exp(-\sigma^2 \omega^2) \quad (3)$$

しかしながら、Eq.(3)はあらゆる周波数領域で感度がフラットな理想的な条件での式であるため、実験的に得られる周波数スペクトルについては測定系の感度を考慮して立式する必要がある。そこで、本研究では、測定系の感度  $S(\omega)$  を Eq.(4)のように定義した。

$$S(\omega) = \frac{I_{\text{IRS}}(\omega)}{B(\omega)} \quad (4)$$

ただし、 $I_{\text{IRS}}$  は実験的に得た赤外光源の周波数スペクトル、 $B$  はプランクの黒体放射をそれぞれ表す。すなわち、実験的な CTR の周波数スペクトル  $I_{\text{CTR,eff}}$  はバンチ形状因子と測定系の感度の積として記述することができるため、

$$I_{\text{CTR,eff}}(\omega) = S(\omega) F_b(\omega) = S(\omega) \exp(-\sigma^2 \omega^2) \quad (5)$$

となる。ゆえに、インターフェログラムの解析モデルは、Eq.(5)の逆フーリエ変換により与えられるため、

$$i_{\text{CTR,eff}}(\tau) \propto \int S(\omega) \exp(-\sigma^2 \omega^2) \exp(i\omega\tau) d\omega \quad (6)$$

となる。以下では、Eq.(6)を感度モデルと呼ぶ。

## 3. 結果と議論

### 3.1 赤外光源を用いた光学系の最適化

以下では、赤外光源を用いた光学系の最適化と感度評価について述べる。赤外光源から放射された赤外光は光チョッパーによって 1 kHz に変調された後、ロックイン検出された。ビームスプリッターと検出器は、臭化カリウム (KBr) ビームスプリッターと MCT 検出器あるいは高抵抗率シリコン (HRSi) とボロメータの場合について検討した。赤外光源のインターフェログラムをフーリエ変換することで得られた周波数スペクトルから、それぞれの検出器における最大信号強度の 10% をカットオフ周波数として検出周波数帯域を評価したところ、KBr ビームスプリッター・MCT 検出器の系では、~20 THz から ~120 THz までの広帯域な赤外光の検出が可能であること

がわかった。一方で、HRSi ビームスプリッター・ボロメータの系では~5 THz から~19 THz までの赤外光を検出可能であった。より短パルスの電子ビームを測定するためには、より高周波の電磁波を観測する必要があるため、後述するフェムト秒電子ビーム計測には、KBr ビームスプリッター・MCT 検出器の系を採用した。また、光学系は各検出器での信号強度を最大化するように最適化した。

### 3.2 フェムト秒電子ビーム計測

Figure 3 に、KBr ビームスプリッター・MCT 検出器の系で測定した CTR のインターフェログラムを示す。曲線は Eq.(6) に基づいて計算した感度モデルであり、測定値に対して最小二乗法でフィッティングされている。電子銃における加速位相は  $15^\circ$  であり、バンチの電荷量は  $1\text{ pC}$  とした。また、加速管加速位相はこれまでの実験において最適な圧縮条件となった  $105^\circ$  とした<sup>9)</sup>。各測定点は 19 回の平均をとっている。感度モデルをフィッティングすることにより、パルス幅が  $\sigma=5\text{ fs}$  と求められた。また、計測したインターフェログラムのセンターバーストの左右に存在する減衰振動は、低周波数の電磁波が MCT のバンドギャップにより抜け落ちるために生じると考えられる。さて、前節で述べたように KBr ビームスプリッター・MCT 検出器の系ではボロメータに比べて高周波数の赤外光を検出可能であるため、フェムト秒オーダーの電子ビームを計測するために適切であると考えられる。しかしながら、検出帯域の観点から、数十フェムト秒オーダーの電子ビームの計測においては、低周波数帯域に感度がないため、測定することができない。ゆえに、様々なパルス幅の電子ビームを測定するためには、測定周波数帯域を広帯域化することが必要であると考えられる。

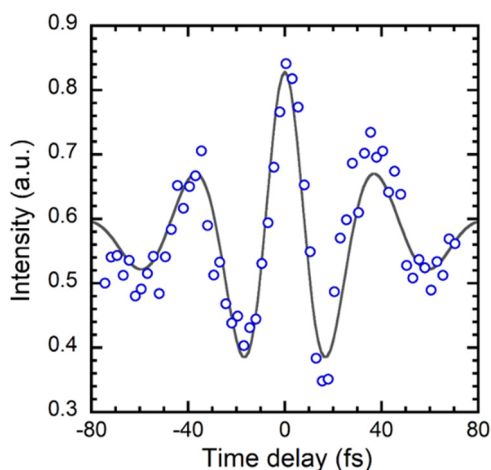


Figure 3: Interferogram of CTR measured using the MCT detector and fitting curve based on Eq.(6).

### 3.3 二帯域計測に向けた検討

先に述べたように、サブピコ秒からフェムト秒までの様々なパルス幅の電子ビームを計測するためには、パルス幅に応じた周波数帯域を確保する必要がある。そこで、本研究ではボロメータと MCT 検出

器を用いた同時計測を行うことによって、測定周波数帯域を広帯域化することを検討した。KBr ビームスプリッターを用いた場合、ボロメータでは低周波数側のカットオフが存在し、検出周波数帯域が狭くなってしまったため、ビームスプリッターとして HRSi を採用した。現状、電子ビームを用いた試験は実施することができていないため、以下では、前段階として赤外光源を用いた評価の結果を記載する。

Figure 4 はボロメータと MCT 検出器で計測した赤外光源のインターフェログラムである。黒色の曲線はボロメータで取得したインターフェログラムを、青色の曲線は MCT 検出器で取得したインターフェログラムをそれぞれ表す。MCT 検出器の方が、高周波数の電磁波まで計測可能であるため、センターバースト付近の領域で形状が急峻に変化することがわかる。Figure 5 にインターフェログラムをフーリエ変換することにより得た、赤外光源の周波数スペクトルを示す。黒色の曲線はボロメータで取得した周波数スペクトルを、青色の曲線は MCT 検出器で取得した周波数スペクトルをそれぞれ表す。それぞれの検出器における最大信号強度の 10% をカットオフ周波数として検出周波数帯域を評価したところ、5 THz から 70 THz までの広い周波数帯域を確保することがわかった。今後は、上述した光学系を用いた電子ビーム診断に発展させていきたい。

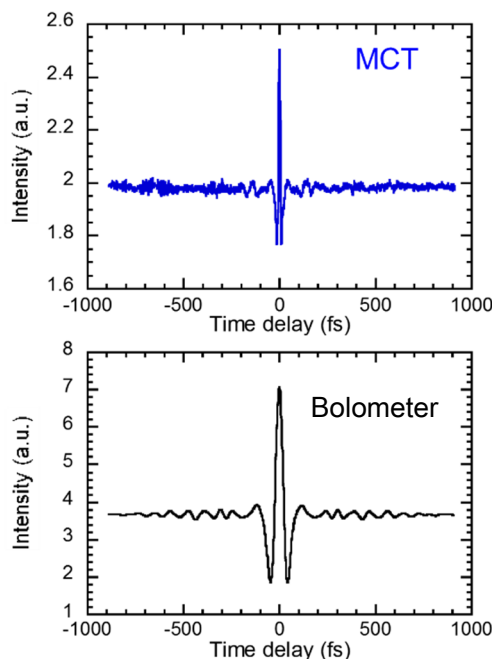


Figure 4: Interferogram of infrared light source detected using the MCT detector and the bolometer.

[11]K. Kan et al., Nucl. Instrum. Meth. A 597, 126 (2008).

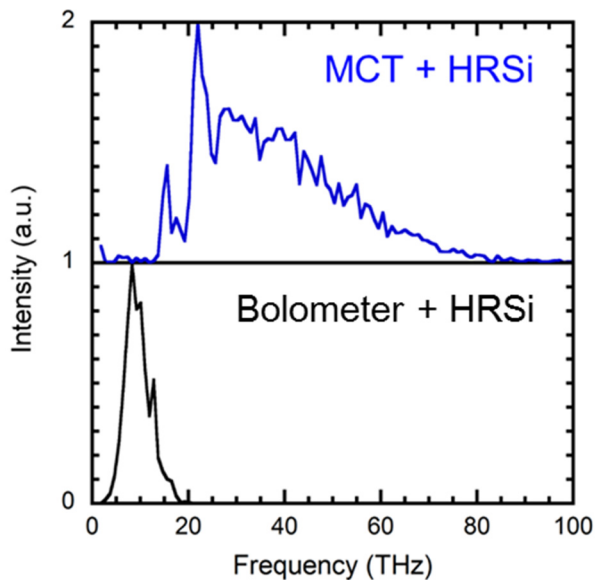


Figure 5: Frequency Spectra of the infrared light source obtained using the MCT detector and the bolometer.

#### 4. 結論

本研究では、フォトカソード RF 電子銃ライナック・磁気パルス圧縮器を用いて、フェムト秒電子ビームを発生し、CTR をマイケルソン干渉計で計測することで電子ビームパルス幅測定を実施した。MCT 検出器・KBr ビームスプリッターの系で測定したインターフェログラムの解析から、パルス幅 5 fs の電子ビームの計測に成功した。様々なパルス幅の電子ビームの計測に向け、二つの異なる周波数帯域の検出器を用いた同時計測の光学系を構築し、赤外光源を用いたテストを実施した。今後は二帯域での電子ビームパルス幅計測を行い、様々な条件下での電子ビーム測定を行う予定である。

#### 謝辞

大阪大学産業科学附属量子ビーム科学研究施設の教員および職員の方々に実験装置の立ち上げや運転においてご支援頂いた。また、本研究の一部は科研費 (26249146・15J02667) により支援頂いた。関係各位に深く感謝したい。

#### 参考文献

- [1] T. Shintake et al, Phys. Rev. ST Accel. Beams, 12, 070701 (2014).
- [2] M. J. Nasse et al., Rev. Sci. Instrum. 84, 022705 (2013).
- [3] J. Yang et al., Nucl. Instrum. Methods A 556, 52 (2011).
- [4] P. Musumec et al., Ultramicroscopy 108, 1450 (2008).
- [5] I. Wilke et. al., Phys. Rev. Lett. 88, 124801 (2002).
- [6] Z. Wu et al., Rev. Sci. Instrum. 84, 022701 (2013).
- [7] P. Kung et al., Phys. Rev. Lett. 73, 967 (1994).
- [8] T. Watanabe et. al., Nucl. Instrum. Methods A 437, 1 (1999).
- [9] I. Nozawa et al, Phys. Rev. ST Accel. Beams, 17, 072803 (2014).
- [10]J. Yang et al., Nucl. Instrum. Meth. A 556, 52 (2006).