

## コヒーレント遷移放射解析によるビーム幅診断

### BEAM DIAGNOSTIC BASED ON ANALYSIS OF 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, 法澤 公寛, 小林 仁, 吉田 陽一  
Itta Nozawa<sup>#</sup>, Koichi Kan, Jinfeng Yang, Atsushi Ogata, Takafumi Kondoh,  
Masao Gohdo, Kimihiro Norizawa, Hitoshi Kobayashi, Yoichi Yoshida  
The Institute of Scientific and Industrial Research, Osaka University

#### Abstract

Coherent transition radiation (CTR) is emitted by pulsed electron bunches on an interface of two different media and has intense components at wavelength shorter than the bunch length. In this study, the beam diagnostic of <10 fs time resolution was demonstrated by measuring CTR using Michelson interferometer. Ultrafast electron beam was generated by photocathode RF gun linac.

#### 1. はじめに

超短パルス電子ビームは、自由電子レーザー、レーザーコンプトンX線、テラヘルツ光源[1]など加速器物理の分野において、多くの応用がなされている。また、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パルスラジオリシスや超高速電子線回折など時間分解計測に利用されており、極短時間に量子ビームによって誘起される超高速現象解明のための重要なツールとなっている。そのため、高品質な光源開発やポンプ・プローブ実験における時間分解能の向上のために、超短パルス電子ビームが求められている。フェムト秒電子ビームのパルス幅測定はストリークカメラを用いて行われるが、ストリークカメラの時間分解能は~100 fsである。一方、<100 fsの電子ビームに対しては、電気光学結晶、偏向空洞、コヒーレント放射などを利用した高時間分解能のパルス幅測定手法が研究されている。阪大産研では、より高時間分解能での量子ビーム誘起超高速現象の観測や集団励起効果[2]の実証などの応用に向け、サブフェムト秒・アト秒電子ビームの発生及びパルスラジオリシスへの応用を探求している。

本研究では、超短パルス電子ビームを発生し、発生した電子ビームからのコヒーレント遷移放射(CTR)を異なる周波数帯域を持つ2つの検出器を備えたマイケルソン干渉計で計測・解析することによって、電子ビームパルス幅測定を行った。

#### 2. 実験系

##### 2.1 フォトカソードRF電子銃ライナック

本実験系は、更に短パルスの電子ビームを発生するために、従来の電子ビーム発生系[3,4]に改良を加えたものである。本レーザーフォトカソードRF電子銃ライナックは1.6セルSバンドレーザーフォトカソードRF電子銃と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。電子ビームは電子銃出口では~4 MeV、加速管出口では~30 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施される。具体的な電子ビーム発生系の改良点は、カソード励起用Nd:YLFピコ秒レーザーをTi:Sapphireフェムト秒レーザーに変更し、カソードから発生する初期の電子ビームパルス幅を低減した点とフリレンジング磁場による二次効果を低減するために、アクロマティックアーク型磁気パルス圧縮器に2台の六極電磁石を導入した点である。

##### 2.2 赤外光源の測定

光学系の調整と干渉計の性能評価の為に、赤外光源による測定を行った。図1に本研究で使用した光学系の模式図を示す。IRSは赤外光源、Mは平面鏡、OAPは非軸放物面鏡、BSはビームスプリッターをそれぞれ表している。プランクの黒体放射に従って放射された赤外光はチョッパーにより1 kHzに変調され、マイケルソン干渉計へと導かれることで、検出器によりインターフェログラムが計測される。

厚さ375 μmのSiビームスプリッターにより、放射された赤外光は2経路に分けられ、一方は固定鏡により反射され、もう一方は可動鏡による光学遅延後に反射される。最終的に、検出器(MCT、ボロメータ)で2光束が合流する。本測定では、可動鏡の位置を移動させることにより、インターフェログラムを取得している。また、取得したインターフェログラムを離散フーリエ変換することにより、周波数スペクトルを得た。

電子ビームのパルス幅が短い場合、高周波の電磁波が放射されるため、パルス幅測定の時間分解能を向上するためには、高周波の測定が必要である。そのため、本研究に用いたマイケルソン干渉計は低周波の赤外光はボロメータで、高周波の赤外光はMCTで測定することができる2つの周波数帯域を有する測定システムとなるよう構築した。光学系の調整及び干渉計の性能評価のための赤外光源の測定

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

では、ボロメータ及び MCT の出力をチョッパーによる赤外光の変調周波数を参照周波数としてロックイン検出した。

### 2.3 電子ビーム測定系

図 1(b)に示すように、赤外光源で最適化された光学系を用いて CTR を測定し、ビーム幅測定を行った。ビーム幅測定の場合、赤外光源とチョッパーの代わりに平面鏡が導入されている。これは、本測定手法では、電子ビームが平面鏡に入射した際にコヒーレント遷移放射により放射される赤外光のインターフェログラムを解析することによって、パルス幅測定を行なっているためである。

前述したように、CTR とは異なる媒質間を電子ビームが通過した際に、電子ビームのパルス幅より長波長の電磁波が高強度で放射される現象であり、電子ビームパルス幅が短いほど、高周波の電磁波が放射される。遷移放射では電子ビームの電場が媒質の分極を引き起こし、電磁波として伝播するため、簡便には、CTR は軸方向の電子バンチ内の電荷分布から導かれるバンチ形状因子に従った放射を意味する。

本パルス幅測定手法においては、電子ビームが CTR によって放射した赤外領域の電磁波に対して、図 1(b)に示した光学系を用いて MCT とボロメータによってインターフェログラムを取得し、得られたインターフェログラムに対して近似式をフィッティングすることにより、電子ビームパルス幅を算出した。近似式はバンチ形状因子[5]とハイパスフィルター関数を用いて導出され、インターフェログラムの近似式  $s(\tau)$  は式(1)で、周波数スペクトルの近似式  $S(\omega)$  は式(2)で表される[6]。

$$s(\tau) \approx \left[ \begin{array}{l} \exp\left\{-\frac{(\tau-\tau_0)^2}{4\sigma^2}\right\} - \frac{2\sigma}{\sqrt{\sigma^2+\xi^2}} \exp\left\{-\frac{(\tau-\tau_0)^2}{4(\sigma^2+\xi^2)}\right\} \\ + \frac{\sigma}{\sqrt{\sigma^2+2\xi^2}} \exp\left\{-\frac{(\tau-\tau_0)^2}{4(\sigma^2+2\xi^2)}\right\} \end{array} \right] \quad (1)$$

$$S(\omega) = \exp\left\{-(\sigma\omega)^2\right\} \left[1 - \exp\left\{-(\xi\omega)^2\right\}\right]^2 \quad (2)$$

ここで、 $\tau-\tau_0$  はセンターバーストからの光学遅延距離を時間に換算したもの、 $\sigma$  は電子ビームの rms パルス幅、 $\xi^{-1}$  は回折限界によるフィルター関数のカットオフ周波数をそれぞれ表す。

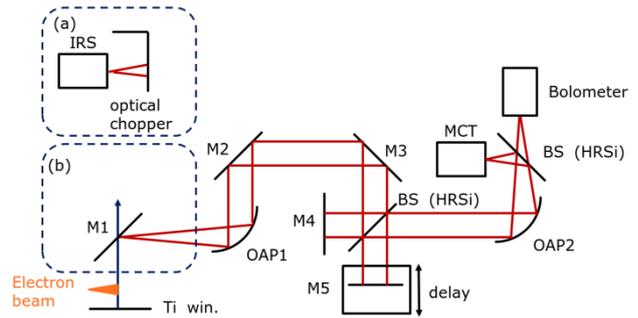


Figure 1: Schematic diagram of the optical system for (a) infrared source and (b) CTR. IRS: infrared source, BS: beam splitter, HRSi: high resistivity silicon, MCT: HgCdTe detector, OAP: off-axis parabolic mirror.

## 3. 実験結果

### 3.1 赤外光源を用いた光学系の最適化

図 2(a)に真空中で MCT とボロメータのそれぞれを用いて計測したインターフェログラムを、図 2(b)にインターフェログラムを離散フーリエ変換することにより得た周波数スペクトルを示す。図 2 中の赤い線は MCT での測定結果を、青い線はボロメータの測定結果をそれぞれ表している。図 2(a)の縦軸は任意単位の強度、横軸は可動鏡の移動距離を光速で除し時間に換算したものである。インターフェログラムはセンターバーストを軸にして対称な形状をしており、センターバーストから離れるに従って干渉量が減少するため、減衰振動のような挙動を取った。ボロメータに比べ MCT はより高周波まで検出感度があるため、観測した高周波成分の寄与によって、センターバーストが急峻になることがわかった。

図 2(b)に示した周波数スペクトルから、ボロメータを用いた測定の場合、周波数スペクトルは 10 THz 程度でピークを取り、~20 THz まで計測できる。これは、本来、赤外光源は 20 THz 以上の周波数の電磁波を放射しているが、ボロメータの感度がポリエチレン窓材のため~20 THz までしか対応できないためである。また、MCT を用いて測定した場合、~100 THz までの赤外光を検出できることがわかった。なお、図 2(a), (b)ともに測定値は MCT とボロメータの比較のため、オフセットとファクターを調整している。

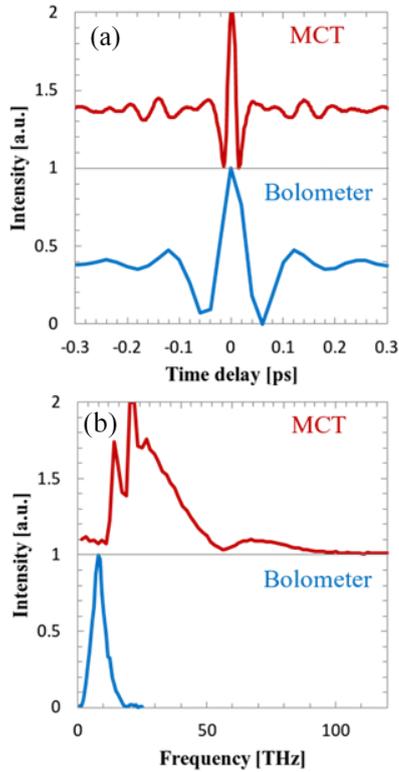


Figure 2: (a) Interferograms and (b) frequency spectra of the infrared source using the MCT detector and bolometer.

### 3.2 電子ビームパルス幅測定

図 3(a)は異なる加速管加速位相でのインターフェログラムを示している。上から、赤い線は加速管加速位相が 105 度、青い線は加速管加速位相が 90 度の際のインターフェログラムであり、プロットは測定値を表している。なお、両測定とも電荷量は 2.1 pC であり、測定はボロメータを用いて行った。実験的に得た離散的なインターフェログラムに式(1)を最小二乗法でフィッティングすると、加速管加速位相が 90 度の場合、パルス幅は 106 fs であったのに対し、105 度の場合、パルス幅は 21 fs であった。

図 3(b)にパルス幅の加速管加速位相依存性を示す。加速管加速位相が 105 度の際に、パルス幅が最短となることがわかった。図 3(b)より、加速管加速位相を最適にするとパルス幅が短くなることが明らかとなった[3]。

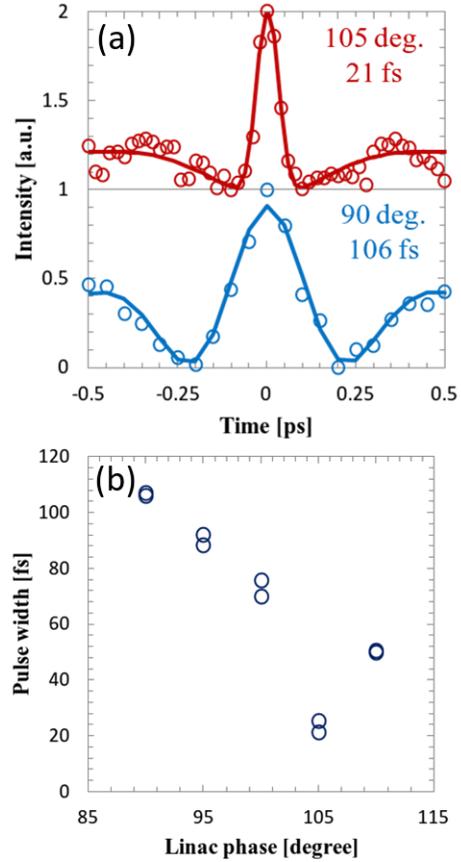


Figure 3: (a) Typical results of interferograms and fitting curves using Eq.(1). (b) Dependence of pulse widths on linac phases.

図 4 は、MCT を用いて測定したインターフェログラムに対する近似式のフィッティングを示しており、近似式は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。フィッティングから得られたパルス幅は、電荷量が 0.7 pC、2.1pC の時、それぞれ 5 fs と 15 fs であった。従って、高帯域の MCT を用いることで、ボロメータよりも高時間分解能の電子ビームパルス幅測定を行うことができることがわかった。

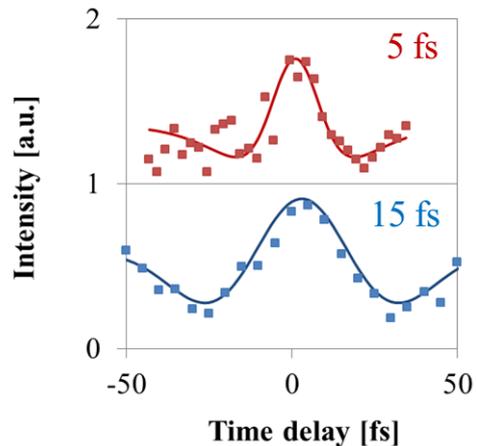


Figure 4: Interferograms detected with MCT detector and fitting curves using Eq.(1).

#### 4. 結論

異なる周波数帯域を持つ 2 つの検出器を備えたマイケルソン干渉計を用いて、フォトカソード RF 電子銃ライナックから発生した電子ビームの CTR を利用した高時間分解能の電子ビームパルス幅測定手法を確立した。また、本手法が <10 fs の電子ビームの計測に有効であることが示唆された。今後は、パルス幅測定手法の定量制の向上を図るとともに、サブフェムト秒電子ビームの発生、アト秒パルスラジオリシスや集団励起効果の実証などへ展開する。

#### 参考文献

- [1] K. Kan et al., Appl. Phys. Lett. 99, 231503 (2011).
- [2] A. Ogata et al., Nucl. Instrum. Methods A 637, S95 (2011).
- [3] J. Yang et al., Nucl. Instrum. Methods A 556, 52 (2006).
- [4] K. Kan et al., Nucl. Instrum. Methods A 659, 44 (2011).
- [5] T. Takahashi et al., Phys. Rev. E 50, 4041 (1994).
- [6] A. Murokh et al., Nucl. Instrum. Methods. A 410 (1998)