

超短パルス電子ビームの発生・計測およびその利用

GENERATION AND MEASUREMENT OF ULTRASHORT ELECTRON BEAM FOR APPLICATIONS

菅晃一[#], 楊金峰, 小方厚, 近藤孝文, 神戸正雄, 野澤一太, 樋川智洋, 法澤公寛, 小林仁, 吉田陽一
K. Kan[#], J. Yang, A. Ogata, T. Kondoh, M. Gohdo, I. Nozawa, T. Toigawa, K. Norizawa, H. Kobayashi, Y. Yoshida
Institute of Scientific and Industrial Research (ISIR), Osaka University, Osaka 567-0047, Japan

Abstract

Femtosecond pulse radiolysis, which is a powerful tool for the observation of electron-beam-induced ultrafast reactions, has been developed in ISIR, Osaka University. In order to improve the time resolution of pulse radiolysis, electron beam diagnostics based on coherent transition radiation from electron beams were studied. Applications of the electron beams to ultrafast pulse radiolysis were discussed from the viewpoints of S/N ratio and time resolution.

1. はじめに

フェムト秒・ピコ秒領域の超短パルス電子ビーム [1,2] は、自由電子レーザー、レーザーコンプトン X 線発生、パルスラジオリシス [3] 等の加速器物理、物化学の研究に応用されている。一方では、1 ps の逆数は 1 THz に相当するため、超短パルス電子ビームは、テラヘルツ領域の電磁波生成にも利用されている [4,5,6]。同時に、より短いパルス幅を持つ電子ビームは、電子ビームの分布をフーリエ変換することにより得られるパンチ形状因子 [4] の観点から、より高帯域の電磁波を高強度で生成できることがコヒーレント放射として知られている。

これまでに阪大産研では、フェムト秒電子ビームとフェムト秒レーザーを用いて、数 100 フェムト秒の時間分解能を有するパルスラジオリシスが開発されている。現在、フェムト秒ストリークカメラを用いた電子ビーム計測では、 ~ 100 fs の電子ビームパルス幅が得られているが [2]、パルスラジオリシスの時間分解能 [3] を向上するためには < 100 fs のパルス幅を有する電子ビーム発生・計測が不可欠である。また、超短パルス電子ビームを発生・計測するだけでなく、パルスラジオリシスへ応用可能な電子ビーム・測定系の検討を行う必要もある。

そこで、本研究では、フェムト秒・サブフェムト秒パルスラジオリシスに利用可能な超短パルス電子ビーム発生・計測方法の研究を行った。これまでに開発したフェムト秒電子銃 [7]、高次収差補正を考慮した磁気パルス圧縮器 [8] を用いて超短パルス電子ビーム発生を行った。また、電子ビームからのコヒーレント遷移放射 [9,10,11] の測定に基づく、電子ビームパルス幅計測を行った。最後に、パルスラジオリシスへの応用を検討した。

2. 実験

2.1 超短パルス電子ビームの発生

本研究では、阪大産研に設置されたフォトカソード RF 電子銃ライナック [2,3,8] を用いて、超短パルス電子ビーム発生を行った。本ライナックは、フォトカソード RF 電子銃、加速管、磁気パルス圧縮器から構成される。超短パルス電子ビームを得るために、フェムト秒 UV を用いて、電子銃におけるフェムト秒電子ビーム発生を行った。フェムト秒 UV パルスを虹彩とレンズにより ~ 0.6 mm FWHM のスポットサイズでカソードへほぼ垂直に入射した。発生電荷量を pC オーダーとし、空間電荷効果によるパルス幅増大を低減した [7]。さらに、高次効果補正を考慮した磁気パルス圧縮器 [8] を用いて、エネルギー変調された電子ビームを適切にパルス圧縮した。電子銃出口、加速管出口における電子ビームのエネルギーは、それぞれ ~ 4 、 ~ 30 MeV であった。圧縮された電子ビームは、パルス幅測定光学系へ導かれた。

2.1 超短パルス電子ビームの計測

本研究では、従来のフェムト秒ストリークカメラを用いた電子ビームパルス幅計測の時間分解能を超える測定系を開発するために、電子ビームからのコヒーレント遷移放射 [9,10,11] の測定に基づく、電子ビームパルス幅計測を行った。図 1 に、超短パルス電子ビーム計測に用いたマイケルソン干渉計を示す。図 1(a) および (b) に、同じ干渉計により評価された異なる光源を示す。図 1(a) に示すように、電子ビーム計測では、電子ビームが平面鏡 (M1) を通過する際に発生するコヒーレント遷移放射をコリメートし、マイケルソン干渉計へ導いた。干渉計において、入射電磁波はビームスプリッタ (BS) により分岐され、片方は移動鏡 (M3)、もう片方は固定鏡 (M4) により反射され、赤外検出器で合流した。赤外検出部では、測定帯域の異なる液体ヘリウム冷却 Si ボロメータ (Infrared Laboratories Inc.) および光電型 MCT (Mercury cadmium telluride) 検出器 (P5274-01, Hamamatsu

[#] koichi81@sanken.osaka-u.ac.jp

Photonics)を用いた。従って、本干渉計では、電磁波計測の広帯域化(Bolometer：低周波、MCT：高周波)を図った。ビームスプリッタ(BS)は、反射・透過率が検出効率に影響するため、遠赤外～中赤外において比較的高い反射・透過率を有する高抵抗 Si 基板(HRSi)を用いた。測定では、移動鏡の距離を変化させインターフェログラムの計測を行った。さらに、インターフェログラムの高速フーリエ変換により周波数スペクトルを解析した。また、電子ビームパルス幅計測における時間分解能はパンチ形状因子の観点から、高周波の電磁波解析が不可欠である。測定系の最適化・評価を行うために、図 1(b)に示すように、光チョッパー(C)により 1 kHz で変調された赤外光源(IRS, IRS-001C, IR System Co.)のロックイン検出を用いて、インターフェログラム・周波数スペクトルを解析した。赤外光源は、定圧電源により赤熱し赤外線を出し、表面温度は~900 (公称値)である。さらに、黒体放射を模擬するために、黒体スプレー(JSC-3, Japan Sensor Corp.)を光源表面に塗布した。

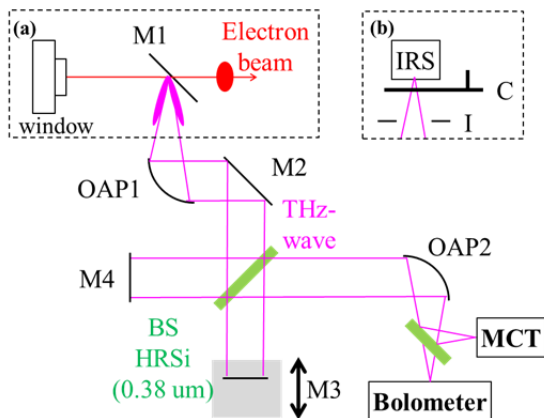


Figure 1: Michelson interferometer for the measurement of (a) electron beam and (b) infrared source. M denotes a plain mirror; OAP, an off-axis parabolic mirror; BS, a beam splitter; MCT, a mercury cadmium telluride detector; IRS, infrared source; C, an optical chopper; I, an iris.

3. 実験結果と考察

3.1 赤外光源を用いた光学系の最適化・評価

図 2 に、真空中における赤外光源のインターフェログラムと周波数スペクトルの測定結果を示す。図 2(a)に示すように、移動鏡(M3)の位置に応じて MCT 検出器もしくはボロメータの出力を記録し、センターバースト近辺のインターフェログラムを得た。MCT 検出器の方が高周波(短波長)の電磁波を計測可能なため、インターフェログラムは急峻に変化した。さらに、インターフェログラムをフーリエ変換することにより、図 2(b)に示すように、それぞれの検出器を用いた場合の周波数スペクトルを得た。インターフェログラムの計測から予想されるように、MCT 検出器の方が高周波の電磁波を計測できてい

ることがわかる。ボロメータを用いた測定では、ポリエチレン窓材の透過率のため、<20 THz までの電磁波計測に使用可能である。一方、MCT 検出器を用いた測定において、低周波では光電型検出器(バンドギャップ)のため>10 THz の電磁波計測となり、高周波では MCT 光電材料の感度特性および Si 基板の透過特性により<100 THz の電磁波計測に対応できることが明らかとなった。また、~17 THz に観測されるディップは Si における格子振動の吸収が原因と考えられる。従って、本干渉計において、ボロメータを用いて<20 THz、MCT 検出器を用いて<100 THz の広帯域の電磁波検出が可能となった。

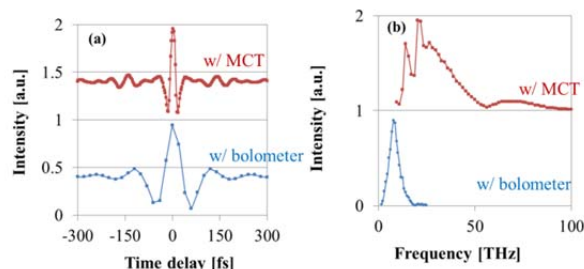


Figure 2: (a) Interferograms and (b) frequency spectra for the infrared source in the vacuum. The top and bottom data show the results using the MCT detector and bolometer, respectively. Factors and offsets were adjusted for comparison.

3.2 ボロメータを用いた電子ビームの測定

図 3 に、加速管加速位相を変化させた場合のインターフェログラムを示す。測定条件は、電子銃加速位相：15°、電荷量：2.1 pC とした。

電子ビームパルス幅を干渉計により計測する場合、パンチ形状因子[4]や回折限界によるフィルターにより観測される周波数スペクトル $S(\omega)$ およびインターフェログラムの形状 $s(\tau)$ を近似的に表すことができ[10,11]、

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

$$s(\tau) \propto \left[\begin{aligned} & \exp(-(\tau - \tau_0)^2 / 4\sigma^2) - \frac{2\sigma}{\sqrt{\sigma^2 + \xi^2}} \exp(-(\tau - \tau_0)^2 / 4(\sigma^2 + \xi^2)) \\ & + \frac{\sigma}{\sqrt{\sigma^2 + 2\xi^2}} \exp(-(\tau - \tau_0)^2 / 4(\sigma^2 + 2\xi^2)) \end{aligned} \right] \quad (2)$$

ここで、 σ ：ガウス分布を仮定した場合の rms 電子ビームパルス幅、 ξ^{-1} ：回折限界によるハイパスフィルターのカットオフ周波数、 τ_0 ：センターバースト時間中心を示す。

加速管加速位相を変化させることにより、電子ビームのエネルギー変調が変化し、電荷量を一定で磁気パルス圧縮の効果を観測した。エネルギー分散が最小となる 85° から 105° の加速位相まで変化した結果、パルス幅が最小となる最適な加速位相は 105° となり、式(2)を用いたフィッティングにより、

rms パルス幅は 21 fs と得られた。

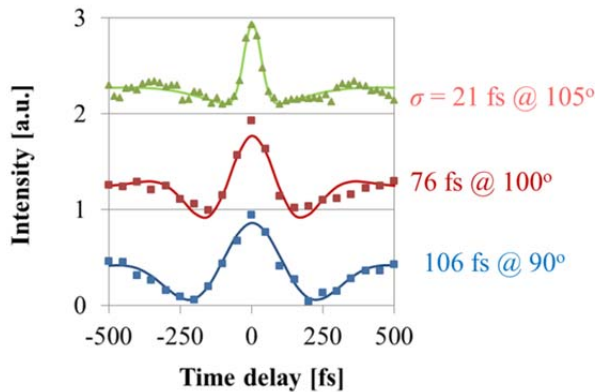


Figure 3: Interferograms for three different accelerating phases in the linac. Lines denote fitting results using Eq. (2).

3.2 MCT 検出器を用いた測定

図 4 に、加速管の加速位相を 105° に最適化後の、MCT 検出器を用いたインターフェログラム計測結果を示す。上下の測定は、それぞれ、電荷量：0.7、2.1 pC の場合のインターフェログラムを示す。空間電荷効果の低減により、低電荷量の場合はパルス幅の増大を低減できることが分かった。また、ポロメータを用いた場合よりも短い電子ビームパルス幅を得た。赤外光源を用いた測定から予想されるように、MCT 検出器を用いた場合は高帯域の測定が可能である。従って、ポロメータを用いた測定よりも時間分解能が向上し、式(2)を用いたフィッティングにより、最短 5 fs の rms 電子ビームパルス幅の達成および解析が可能であることが明らかとなった。

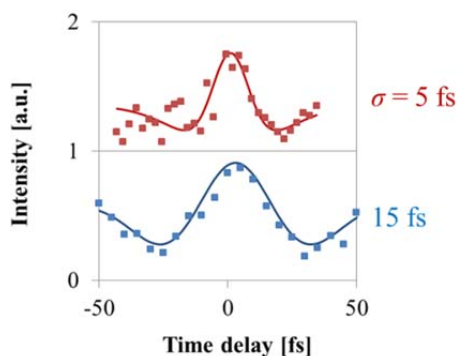


Figure 4: Interferograms for two different bunch charges. The top and bottom data shows the data at bunch charges of 0.7 and 2.1 pC, respectively. Lines denote fitting results using Eq. (2).

3.3 フェムト秒・サブフェムト秒パルスラジオリシスへの応用

今後、<10 fs の電子ビームをポンプ・プローブ計測の一種であるパルスラジオリシスに応用する場合、

時間分解能と信号強度の議論は不可欠である。パルスラジオリシスの信号強度は、電荷量に比例し、サンプルセル長に反比例することが知られている[3]。しかし、信号強度を得ようとしてセル長を長くすると、時間分解能がセル長に比例して劣化するため、低電荷量かつ短いセル長で高時間分解能を達成するのは困難となる。しかし、電子ビームの縦・横分布を最適に調整することができれば、等価速度分光法[12]が可能となり、信号強度を保ったままで時間分解能の劣化を防ぐことが可能である。また、今後は電子ビームの高繰り返し化(>100 Hz)によるロックイン検出についても検討を行う。また、電子ビームと分析光の時間ジッターの低減では、1つの加速器から同期された2つの電子ビームを発生する手法を用いたダブルデッカーパルスラジオリシス[13]が有効である。いくつかの手法を組み合わせ、本電子ビームをフェムト秒・サブフェムト秒パルスラジオリシスへ応用展開する予定である。

4. まとめ

フェムト秒・サブフェムト秒パルスラジオリシスに利用可能な超短パルス電子ビーム発生・計測方法の確立とその利用における検討を行った。フェムト秒電子銃、磁気パルス圧縮を用いた超短パルス電子ビーム発生を行い、ポロメータと MCT 検出器を用いたマイケルソン干渉計の構築により、<10 fs の rms 電子ビームパルス幅計測の可能性を示唆した。

今後、システム全体の最適化によるさらなる短パルス化を行うとともに、パルスラジオリシスにおける等価速度分光法およびロックイン検出等を検討し、サブフェムト秒パルスラジオリシスの実現や集団励起等の新現象発見への応用展開を目指す。

謝辞

本研究の一部は、科研費 (21226022, 23109507, 25870404)により支援された。また、大阪大学産業科学研究所附属量子ビーム科学研究施設の教員、技術職員の方々にも、実験装置の立ち上げや運転において、支援を頂いた。関連する方々に深く感謝したい。

参考文献

- [1] G. Berden et al., Phys. Rev. Lett. 99, 164801 (2007).
- [2] J. Yang et al., Nucl. Instrum. Methods A 556, 52 (2006).
- [3] J. Yang et al., Nucl. Instr. and Meth. A 629, 6 (2011).
- [4] T. Takahashi et al., Phys. Rev. E 50, 4041 (1994).
- [5] A. M. Cook et al., Phys. Rev. Lett. 103, 095003 (2009).
- [6] K. Kan et al., Appl. Phys. Lett. 99, 231503 (2011).
- [7] K. Kan et al., Nucl. Instrum. Meth. A 659, 44 (2011).
- [8] K. Kan et al., Nucl. Instrum. Meth. A 622, 35 (2010).
- [9] T. Watanabe et al., Nucl. Instrum. Meth. A 480, 315 (2002).
- [10] A. Murokh et al., Nucl. Instrum. Meth. A 410, 452 (1988).
- [11] Z. Wu et al., Rev. Sci. Instrum. 84, 022701 (2013).
- [12] J. Yang et al., Radiat. Phys. Chem. 78, 1164 (2009).
- [13] K. Kan et al., Rev. Sci. Instrum. 83, 073302 (2012).