

干渉計と光伝導アンテナを用いたフェムト秒電子ビーム計測

MEASUREMENT OF FEMTOSECOND ELECTRON BEAM USING INTERFEROMETER AND PHOTOCONDUCTIVE ANTENNA

菅晃一[#], 楊金峰, 近藤 孝文, 神戸正雄, 野澤一太, 吉田陽一

Koichi Kan, Jinfeng Yang, Takafumi Kondoh, Masao Gohdo, Itta Nozawa, and Yoichi Yoshida

The Institute of Scientific and Industrial Research (ISIR), Osaka University,
8-1Mihogaoka, Ibaraki, Osaka 567-0047, Japan

Abstract

Generation of femtosecond electron bunches has been investigated for a light source based on electron bunches and improvement of time resolution in time-resolved measurements. In this study, characterization of THz pulse emitted from femtosecond electron bunch was conducted. THz pulses of coherent transition radiation (CTR) were generated by the electron bunches. Combining a Michelson interferometer and a photoconductive antenna (PCA) enabled frequency and time-domain measurement of THz pulses from electron bunches, respectively. In the experiment, CTR was separated by a beam splitter and transported to the interferometer and PCA.

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[3,4,5]等の加速器物理、物理化学の研究に応用されている。そのため、超短パルス電子ビーム発生は、高品質な光源開発や時間分解計測における時間分解能向上のために不可欠となっている。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、フェムト秒時間分解能を有するパルスラジオリシス(過渡吸収分光法)[4]を開発・利用してきた。今後、パルスラジオリシスの時間分解能を向上するためには、さらに短い電子ビームが必要となる。これまでに電子ビーム発生では、フォトカソード RF 電子銃にピコ秒またはフェムト秒紫外光を入射し、光電子を電子ビームとして利用してきた。さらに、発生した電子ビームを加速管によりエネルギー変調し、アクロマティックアークの磁気パルス圧縮器により約 30 MeV のフェムト秒電子ビームを発生してきた。光電子発生にフェムト秒レーザーを用いて、さらに空間電荷効果を低減した場合は、フェムト秒電子銃と磁気パルス圧縮の最適化により、マイケルソン干渉計を用いて 20 フェムト秒の電子ビーム計測を行うことが可能になっている[6]。しかし、マイケルソン干渉計による測定は周波数領域の情報に制限されている。

フェムト秒・ピコ秒電子ビームパルスは、1 ps の逆数が 1 THz に相当するため、テラヘルツ領域の電磁波研究にも利用されている。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バンチ形状因子[7]から、より広帯域の電磁波を高強度で生成することがコヒーレント放射として知られている。電子ビームを用いたテラヘルツ波の発生は、コヒーレント遷移放射(CTR, coherent transition radiation)[6,7,8]、コヒーレントチェレンコフ放射[9,10]、スミス・パーセル放射[11,12]等により行われている。同様に、レーザーの分野においても、テラヘルツ波発生・検出手法に

ついて研究が行われている。レーザーと電気光学(EO, electro-optic)結晶を用いたテラヘルツ発生・検出手法は、結晶の複屈折性を利用する[13]。これまでに、EO サンプルリングでは、電子ビームのテラヘルツ電場により誘起される複屈折性を利用して、電子ビーム診断では 60 フェムト秒の電子ビーム電場が観測されている[14]。同様に、レーザーと光伝導アンテナ(PCA, photoconductive antenna)を用いたテラヘルツ波発生・検出手法の研究も行われている[15,16]。PCA は、半導体表面に電極を有し、テラヘルツ波発生・検出の両方が可能な素子である。テラヘルツ波発生時は、電極間に電場を印加し、レーザー照射時に流れる電場方向の光誘起電流がテラヘルツ電磁波として放射される。逆に、検出時は電極間に電流計を接続し、レーザー照射時の光誘起電流が入射テラヘルツ波による電極間電場依存性を利用して、電流量によりテラヘルツ電場強度を計測することができる。また、発生・検出における偏光特性は、光誘起電流方向に依存することが知られている[17]。これまでに、微細構造電極を用いた大口径化により、発生テラヘルツ波の高出力化が報告されている[18,19]。また、光伝導アンテナの電極形状の工夫により、発生テラヘルツ波の偏光・周波数特性の設計も行われ [20]、ラジアル(径方向)やアジマス(周方向)に偏光したテラヘルツ波発生の研究にも使われている[21,22]。さらに、最近では、このような偏光特性が設計された PCA を電子ビームの CTR の時間領域測定に利用できるようになってきた。

そこで、本研究では、これまでに行ってきたフェムト秒電子ビームのマイケルソン干渉計と PCA を用いた同時計測を検討した。つまり、干渉計と PCA による、それぞれ、周波数領域と時間領域測定の可能性について研究を行った。

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

2. 実験装置

2.1 フェムト秒電子ビーム発生

フェムト秒電子ビームからの CTR を測定するために、フォトカソード RF 電子銃ライナック[23,24]を用いてフェムト秒電子ビームの発生を行った。カソード駆動用の Nd:YLF ピコ秒レーザーからの紫外光パルスをフォトカソード RF 電子銃に入射し、光電子による電子ビームを用いた。カソード表面における光電場の効果[25]により電子ビームの電荷量の増強を目的に、光パルスをビーム軌道となす角:68° の条件でカソードに入射した。ピコ秒レーザーからの光出力は、エネルギー160 $\mu\text{J}/\text{pulse}$ 、波長 262 nm、パルス幅 5 ps、繰り返し 10 Hz であった。電子ビーム測定では、ピコ秒レーザーと電子銃の間に反射型の可変 ND(neutral density) フィルターを設置し、カソードに照射するレーザーのパルスあたりのエネルギー、つまり発生電荷量を調整した。また、加速器は、フォトカソード RF 電子銃、加速管、磁気パルス圧縮器により構成される。これを用いて、パルス圧縮されたフェムト秒電子ビーム(エネルギー:35 MeV、電荷量:<1 nC/pulse)を発生した。電子銃へのレーザー入射位相と加速管における加速位相は、それぞれ、 $\sim 40^\circ$ 、 100° を用いた。発生したフェムト秒電子ビームを、高真空室のビームラインを隔てるチタン箔のビーム窓から、低真空室の測定用真空チャンバーに取り出し、測定を行った。

2.2 干渉計と PCA による CTR の測定

Figure 1 に、干渉計と PCA を用いた電子ビーム測定系を示す。Figure 1(a)に示すように、低真空中(<100 Pa)でアルミ平面鏡(M1)の境界面でCTRのテラヘルツパルスを発生した。発生した CTR を、非軸放物面鏡(OAP1、焦点距離:191 mm)によりコリメートして下流の測定系へ導いた。また、CTR の偏光成分はラジアル方向(テラヘルツパルス進行方向に対して直交方向)の電場を持つと考えられている。そのため、本研究では、ラジアル偏光特性を有し、大口径化により感度を改善した PCA(半絶縁 GaAs 基板製)[22]を用いた。コリメートされたテラヘルツパルスはビームスプリッター(BS1、高抵抗シリコン、0.38 mm 厚)により PCA と干渉計へ分岐された。PCA では、テラヘルツパルスを PCA の鏡面研磨側から入射した。また、適宜光学遅延(Delay1)を調整したフェムト秒レーザー(エネルギー<300 $\mu\text{J}/\text{pulse}$ 、波長 800 nm、パルス幅 130 fs、繰り返し 1 kHz)を PCA の電極側に照射した。電極から出力される光誘起電流を、アンプ(50 Ω 終端、NF 5307、倍率 100)とオシロスコープ(LeCroy 204Xi)により計測した。PCA からの信号は、フォトダイオードの信号に似ていたが、光学遅延によりレーザーの PCA 入射タイミングがテラヘルツパルスの入射タイミングと一致したときのみ、電圧波形が変化した。また、その電圧波形の変化は、約 20 ns の間の波形変化であった。アンプに接続する終端抵抗 50~5 k Ω まで離散的に変化させた場合、低抵抗(50 Ω)の方が、得られた信号の強度、つまり、電子ビームからの電場検出成分が大きかったため、終端抵抗は 50 Ω とした。一方、マイケルソン干渉計においても分岐されたテラヘルツパルスの計測を行った。干渉計内で、入射テラヘルツパルスはビームスプリッタ

(BS2、高抵抗シリコン)により分岐され、片方は移動鏡(M2、Delay2)、もう片方は固定鏡(M3)により反射され、最終的に非軸放物面鏡(OAP2、焦点距離:191 mm)により赤外検出器で合流した。赤外検出器には、液体ヘリウム冷却 Si ボロメータ(Infrared Laboratories Inc.)を用いた。ボロメータからの信号はアンプを用いずに測定した。また、ボロメータ検出素子の前にガーネット粉付水晶窓フィルター(<3 THz)を設置した。干渉計による測定では、ボロメータ出力の移動鏡(Delay2)の移動距離依存性である、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フーリエ変換により周波数スペクトルを解析した。Figure 1(b)に、測定系の写真を示す。CTR 発生部、テラヘルツパルスの光軸、レーザー光軸、PCA 部分、干渉計部分が観測できる。Figure 1(c)に、PCA の電極構造を示す。周(アジマス)方向に準対称的な電極を有し、電極間に直交する径(ラジアル)方向にテラヘルツパルスの電場は光誘起電流を変調することができるため、これまでに電子ビーム測定に利用できることが明らかとなった。

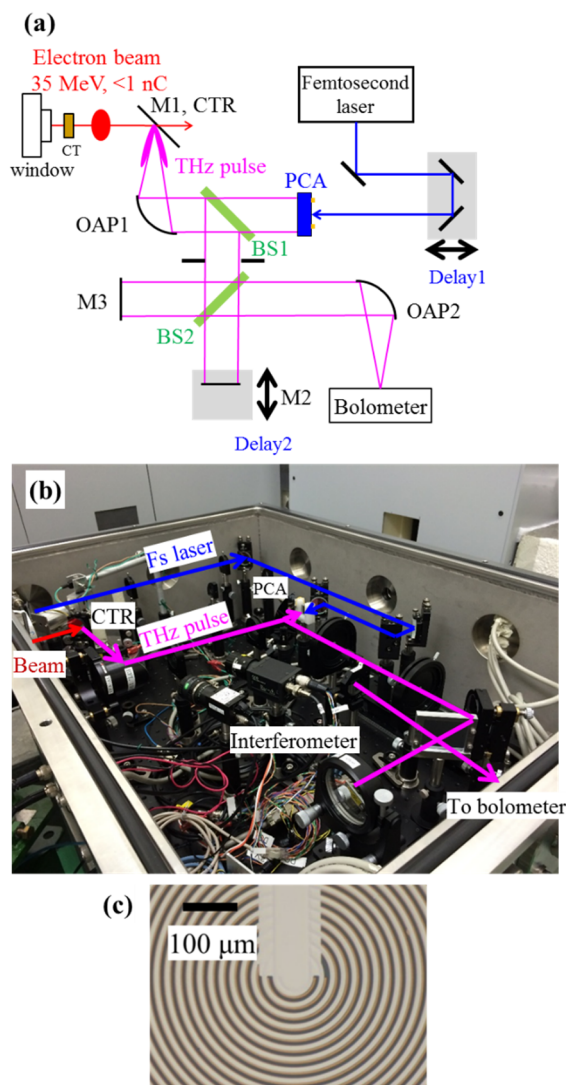


Figure 1: (a) Measurement system of electron beam using a Michelson interferometer and PCA. (b) A picture of the measurement system. (c) Electrodes on the PCA.

3. 実験結果と考察

Figure 2 に干渉計と PCA を用いた電子ビーム測定の結果を示す。Figure 2(a)に、両手法の時間領域測定結果を示す。電子ビームのエネルギーと電荷量は、それぞれ、35 MeV、740 pC/pulse であった。PCA 駆動用フェムト秒レーザーのパルスあたりのエネルギーは、300 μ J/pulse であった。マイケルソン干渉計の測定結果は、ボロメータ出力の移動鏡位置 (Delay2) 依存性であり、どの波長の光も強めあう干渉により検出器の出力が増加するセンターバースト近辺の結果を示す。PCA の測定結果は、PCA の電圧 (電流) 出力の光学遅延 (Delay1) 依存性を示す。本来、マイケルソン干渉計は、周波数領域 (スペクトル) を測定する手法であるが、光学遅延時間を横軸にとったため、便宜上、両結果を時間領域の結果と呼ぶことにする。マイケルソン干渉計の時間領域結果は、回折限界等による低周波成分の欠落による信号強度の沈み込みが観測された。そのため、filtered model[6,26]によりフィッティングを行った。一方、PCA の時間領域結果は、干渉計と同じ光学遅延距離の条件で測定した場合は、パルス波形の幅が干渉計よりも広く見ることが分かった。また PCA の結果に対しては、ガウス分布によってフィッティングを行った。フィッティングの結果、干渉計と PCA によって測定された電子ビームのパルス幅は、それぞれ、94、430 fs (rms)と得られた。現在、アンテナ口径と干渉計上流の絞りによって、干渉計と PCA で観測されるテラヘルツパルスの口径を 9 mm の同一に固定しているが、両手法により求められたパルス幅に差異が生じた。差異の原因としては、PCA のフェムト秒レーザーに対する応答時間、電子ビームとフェムト秒レーザーの同期タイミングジッター等が挙げられるが、原因は特定できていない。Figure 2(b)にそれぞれの時間領域結果のフーリエ変換により得られる周波数スペクトルを示す。CTR は (回折限界を除いて) 低周波から高周波にかけて、強度が減少するスペクトル形状が実験・計算的にも得られている。そのため、本研究での干渉計および PCA で測定された帯域は、それぞれ、 <2 、 <1 THz と見積もられた。しかし、両スペクトルは表示上のオフセット調整をしていないが、本研究での PCA の測定は、干渉計よりもダイナミックレンジが低い (例えば、4 THz 近辺のノイズレベルが高い) ことが分かった。これまでに行った、ビームスプリッタ (BS1) を取り除いたテラヘルツパルスの分岐がない場合の測定は、PCA に供給されるテラヘルツパルス強度は約 2 倍となり、ダイナミックレンジの改善が予想されるが、得られる情報量の観点から本研究で提案している測定手法の利点は損なわれてしまう。しかし、本研究により、まだ途上ではあるが、干渉計と PCA を用いた、サブピコ秒の電子ビーム CTR の周波数・時間領域の同時測定の可能性が示唆された。

今後、フェムト秒レーザーの短パルス化、PCA 基板のみならず製作された PCA 電極間の (暗) 抵抗値、PCA の信号の増幅手順の最適化等により、PCA 測定系の高感度化・広帯域化を行う。同時に、CTR 等のパルス電子ビームの放射する電場の周波数・時間領域の情報に関する包括的な理解を深める予定である。

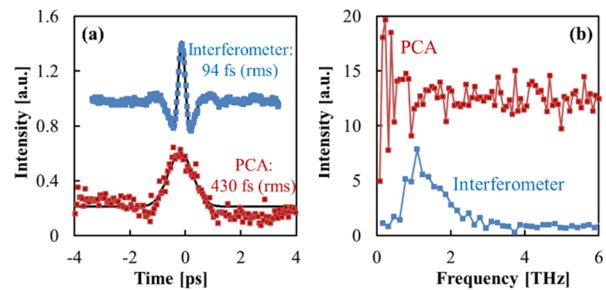


Figure 2: (a) Time-domain data using the interferometer and PCA. Averaged data of 10 sweeps for each data were shown. Factors and offsets were adjusted for comparison. Fitting lines of filtered model for the interferogram and Gaussian distribution for the PCA were plotted respectively. (b) Frequency spectra of the data from the interferometer and PCA. Only factors were adjusted for comparison.

4. まとめ

本研究では、これまでに行ってきたフェムト秒電子ビームのマイケルソン干渉計と PCA を用いた、それぞれ、周波数領域と時間領域測定の同時計測が可能であることが明らかになった。現段階では、両手法の測定結果に差異が観測されているが、干渉計と PCA によって測定された電子ビームのパルス幅は、それぞれ、94、430 fs (rms)と得られた。干渉計および PCA で測定された帯域は、それぞれ、 <2 、 <1 THz と見積もられた。今後、特に PCA 測定系の高感度化・広帯域化を行うとともに、CTR 等のパルス電子ビームの放射する電場の周波数・時間領域の情報に関する包括的な理解を深める。

本研究は、本研究は、JSPS 科研費 (JP25870404, JP26249146, JP15H05565)、基礎科学研究助成 (住友財団) による支援を受けました。

参考文献

- [1] A. F. G. van der Meer, Nucl. Instrum. Meth. A 528, 8 (2004).
- [2] H. Wabnitz *et al.*, Phys. Rev. Lett. 94, 023001 (2005).
- [3] T. Kondoh *et al.*, Radiat. Phys. Chem. 84, 30 (2013).
- [4] J. Yang *et al.*, Nucl. Instrum. Meth. A 629, 6 (2011).
- [5] K. Kan *et al.*, Rev. Sci. Instrum. 83, 073302 (2012).
- [6] I. Nozawa *et al.*, Phys. Rev. ST Accel. Beams 17, 072803 (2014).
- [7] T. Takahashi *et al.*, Phys. Rev. E 50, 4041 (1994).
- [8] P. Kung *et al.*, Phys. Rev. Lett. 73, 967 (1994).
- [9] A. M. Cook *et al.*, Phys. Rev. Lett. 103, 095003 (2009).
- [10] K. Kan *et al.*, Appl. Phys. Lett. 99, 231503 (2011).
- [11] J. Urata *et al.*, Phys. Rev. Lett. 80, 516 (1998).
- [12] K. Kan *et al.*, Electron. Comm. Jpn. 99, 22 (2016).
- [13] M. Nagai *et al.*, Opt. Express 20, 6509 (2012).
- [14] G. Berden *et al.*, Phys. Rev. Lett. 99, 164801 (2007).
- [15] D. H. Auston, Appl. Phys. Lett. 26, 101 (1975).
- [16] M. Tani *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys. 36, L1175 (1997).
- [17] H. Park *et al.*, Appl. Phys. Lett. 101, 121108 (2012).
- [18] H. Yoneda *et al.*, Appl. Opt. 40, 6733 (2001).
- [19] A. Dreyhaupt *et al.*, Appl. Phys. Lett. 86, 121114 (2005).
- [20] K. Takano *et al.*, Appl. Phys. Lett. 99, 161114 (2011).
- [21] S. Winnerl *et al.*, Opt. Express 17, 1571 (2009).
- [22] K. Kan *et al.*, Appl. Phys. Lett. 102, 221118 (2013).
- [23] J. Yang *et al.*, Nucl. Instrum. Methods A 556, 52 (2006).
- [24] K. Kan *et al.*, Nucl. Instrum. Methods A 597, 126 (2008).
- [25] E. Pedersoli *et al.*, Appl. Phys. Lett. 87, 081112 (2005).
- [26] A. Murokh *et al.*, Nucl. Instrum. Meth. A 410, 452 (1998).