

光電導アンテナを用いた電子ビーム電場時間波形の観測

OBSERVATION OF TEMPORAL ELECTRIC FIELDS EMITTED BY ELECTRON BEAMS USING A PHOTOCONDUCTIVE ANTENNA

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

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, temporal electric fields from electron bunches using a photoconductive antenna (PCA) with radial microstructures were measured. Radially polarized terahertz (THz) pulses from femtosecond electron bunches were generated by coherent transition radiation (CTR). Photo-induced current depending on THz electric field was measured.

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は、自由電子レーザー^[1,2]、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]が開発されている。一方では、フェムト秒電子銃と磁気パルス圧縮の最適化により、20 フェムト秒の電子ビーム発生を行ってきた^[6]。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。同時に、短パルス電子ビームの発生に加え、ビーム診断手法の開発も不可欠となる。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]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^[12]。これまでに、EO サンプリングでは、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^[13]。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^[14,15]。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^[16]。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^[17,18]。最近では、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ている^[19]。また、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^[20,21]。しかし、PCA が電子ビーム診断に利用された実績はない。

そこで、本研究では、これまでに開発した微細構造電極を有する PCA を応用して、電子ビーム電場波形の観測を行った。実験では、フェムト秒電子ビームにより発生させた CTR の電場波形を計測した。

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^[22,23]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^[24]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 180 $\mu\text{J}/\text{pulse}$ 、波長 262 nm、

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

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、ピコ秒レーザーのエネルギーにより電荷量の調整を行った。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：32 MeV）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、 30° と 100° を用いた。発生したフェムト秒電子ビームをチタン箔のビーム窓から空気中に取り出し、測定を行った。

2.1 電子ビーム電場時間波形の計測

PCA のテラヘルツ波検出における偏光特性は、パルスレーザーによる PCA 上の光誘起電流の方向に依存する。CTR はラジアル（径方向）偏光特性を持つことが知られている^[25]。このため、これまでに開発したラジアル偏光テラヘルツ波発生が可能な PCA の利用が有効であり、本研究では微細構造電極を有する大口径 PCA^[21]を用いた。図 1 に、PCA を用いたラジアル偏光テラヘルツ波検出の原理を示す。図 1(a) は、簡略化した中心部のみの微細構造電極・フォトマスクの形状を示す。設計は過去の報告^[21]と同一であり、電極・フォトマスクを半導体上に製作した。電極上に光パルス照射し、フォトマスクでおおわれていない電極間のみ光誘起電流を流し、電極間 (+V, -V) から光誘起電流を出力する。この時の光誘起電流量は、紙面の裏側から入射するテラヘルツ電場強度に依存する。図 1(b) に、本 PCA の中心部の写真を示す。径方向に周期構造が観測される。図 1(c) に、図 1(a) の座標系を用いた断面図を示す。テラヘルツ電場は $z > 0$ から入射した。一方、光パルスは、 $z < 0$ の電極側から入射した。半導体上に、電極（赤、青）、絶縁層（黄）、フォトマスク（灰）を製作した。フォトマスクは一つ置きの電極間を覆うため、光パルス照射時に一つ置きの電極間に光キャリアを生成することができる。光キャリアは入射したテラヘルツ電場により $r > 0$ の方向に加速され、電極間で一方方向の光誘起電流を出力することができる。また、同じ色の電極は導通している。このため、電極間から出力される電流を観測することにより、ラジアル偏光電場強度を得ることができる。フォトマスクは、このテラヘルツ電場計測において、検出感度に対する重要な役割を果たしている。フォトマスクがない場合、光パルスは全ての電極間に光キャリアを生成する。この場合、全ての電極間における光誘起電流の流入・流出が相殺され、電極間から光誘起電流を得ることができなくなる。これまでに、フォトマスクの効果は、本研究とは異なる構造の PCA を用いたテラヘルツ波発生における研究では、フォトマスクがない場合に“遠視野における干渉が破壊される”^[18]とされ、テラヘルツ波出力の減少が報告されている。本研究で用いた PCA は、反絶縁 GaAs 上に電極（Au:Ge/Ni）、絶縁層（ポリイミド）、フォトマスク（Al）の 3 層構造で製作した。電極幅および電極間の長さ（ラインアンドスペース）は $10 \mu\text{m}$ であった。フォトマスクにより一つ置きの電極間を覆った。PCA 全体の直径は約 9 mm であり、電極間

の数は 220 である。PCA 自体の大口径化による検出の高感度化を図った。電極には 3 mm 角の電極に銀ペーストを用いて銅線を接続した。図 2 に電子ビーム電場波形の測定系を示す。空气中で CTR の発生・測定を行い、電子ビームが平面鏡を通過する際に放射される CTR を PCA に導いた。非軸放物面鏡の焦点距離および平面鏡までの距離は 191 mm であった。従って、コリメートされたラジアル偏光テラヘルツ波である CTR を PCA の鏡面研磨側から入射した。また、適宜光学遅延したフェムト秒レーザー（エネルギー $< 40 \mu\text{J/pulse}$ 、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（ 50Ω 終端、ゲイン 500）とオシロスコープにより計測した。

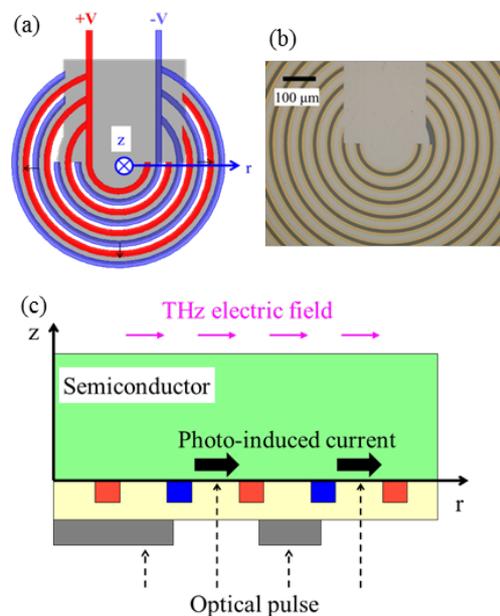


Figure 1: (a) Schematic diagram of electrodes (red and blue) and photomasks (gray) of the PCA. (b) Picture of the PCA near the center. (c) Schematic diagram of cross section of the PCA. Electrodes (red and blue), insulating layer (yellow), and photomasks (gray) were fabricated on semiconductor (green).

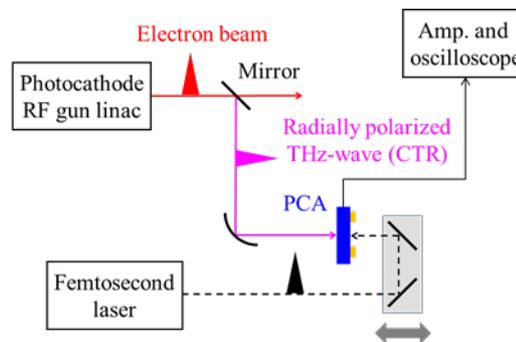


Figure 2: (a) Schematic diagram of measurement system for electric field of electron beams.

3. 実験結果と考察

光誘起電流は、テラヘルツ電場強度に依存する。図 2 に電子ビーム電場時間波形の計測結果を示す。図 2(a)に、シングルスキャンによる光誘起電流のフェムト秒レーザー遅延時間依存性を示す。電子ビームの電荷量とフェムト秒レーザーのエネルギーは、それぞれ、170 pC と 21 μ J/pulse であった。図 2(a)では、3 回のシングルスキャンを重ねて示している。現段階では不安定性があるが、PCA におけるテラヘルツ電場と光キャリア生成のためのレーザー入射タイミングが一致した時に、再現よく光誘起電流が増加する様子が観測された。図 2(b)に、12 回のシングルスキャンを平均化したデータを示す。ガウスフィッティングによりパルス幅を求めた結果、 $\sigma = 550$ fs と得られた。時間波形におけるパルスの直前と直後に、微かな沈み込みが観測された。この沈み込みの原因は、光学素子の有効径や PCA における検出面積による回折限界と考えられる。同様の沈み込みは、干渉計を用いた電子ビーム測定においても観測されている^[6]。図 2(c)に、信号強度の電荷量依存性を示す。信号強度は、5 回以上のシングルスキャンに対してガウス分布でフィッティングを行って得られた尖頭値を用いた。エラーバーは標準偏差を示す。本研究では、80 から 270 pC まで電荷量を変化させて測定を行った。その結果、信号強度は、電荷量に比例することが分かった。これまでの研究では、光伝導アンテナは入力テラヘルツ電場に比例する光誘起電流を出力することが知られている^[26]。一方、電子ビームのコヒーレント放射による電場強度は、解析的な計算から、電荷量に比例することが報告されている^[27]。従って、この線形性により、本研究の測定手法は、電子ビームの電場を計測していることが明らかとなった。今後、より短パルスのレーザー^[28]を用いた PCA による測定系の広帯域化だけでなく、PCA から発生したテラヘルツ波を用いた電子ビーム操作の研究が期待される。

4. まとめ

微細構造電極を有する光伝導アンテナ (PCA) を応用して、電子ビーム電場波形の観測を行った。フェムト秒電子ビームが発生するコヒーレント遷移放射 (CTR) の電場波形の観測に成功した。PCA の大口径化・微細構造電極製作により、ラジアル偏光電場計測における高感度化・偏光特性の設計を可能にした。PCA から出力される光誘起電流信号強度の電荷量依存性は線形であり、電子ビームの電場を計測できていることが明らかとなった。今後、測定系の広帯域化等の応用展開を行う。

本研究は、科研費 (21226022、23109507、25870404、26249146)、受託研究 (産総研)、基礎科学研究助成 (住友財団) により支援を受けました。

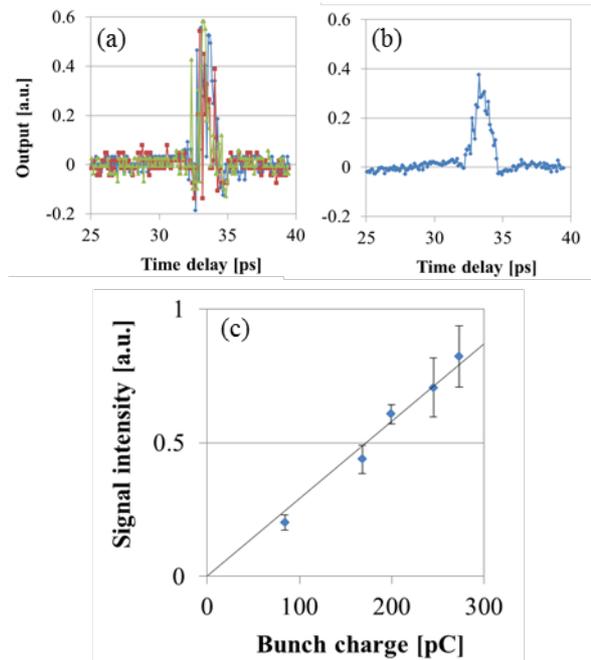


Figure 3: Electric field profile of electron beam of (a) three sequential sweeps and (b) averaged data using twelve sweeps. (c) Signal intensity as a function of bunch charge.

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] M. Nagai et al., Opt. Express 20, 6509 (2012).
- [13] G. Berden et al., Phys. Rev. Lett. 99, 164801 (2007).
- [14] D. H. Auston, Appl. Phys. Lett. 26, 101 (1975).
- [15] M. Tani et al., Jpn. J. Appl. Phys. 36, L1175 (1997).
- [16] H. Park et al., Appl. Phys. Lett. 101, 121108 (2012).
- [17] H. Yoneda et al., Appl. Opt. 40, 6733 (2001).
- [18] A. Dreyhaupt et al., Appl. Phys. Lett. 86, 121114 (2005).
- [19] K. Takano et al., Appl. Phys. Lett. 99, 161114 (2011).
- [20] S. Winnerl et al., Opt. Express 17, 1571 (2009).
- [21] K. Kan et al., Appl. Phys. Lett. 102, 221118 (2013).
- [22] J. Yang et al., Nucl. Instrum. Methods A 556, 52 (2006).
- [23] K. Kan et al., Nucl. Instrum. Methods A 597, 126 (2008).
- [24] E. Pedersoli et al., Appl. Phys. Lett. 87, 081112 (2005).
- [25] D. Daranciang et al., Appl. Phys. Lett. 99, 141117 (2011).
- [26] M. Tani et al., Semicond. Sci. Technol. 20, S151 (2005).
- [27] M. Schwarz et al., Phys. Rev. ST Accel. Beams 17, 050701 (2014).
- [28] S. Kono et al., Appl. Phys. Lett. 79, 898 (2001).