

THz 加速器のためのプラズマ電磁波源の開発

DEVELOPMENT OF A PLASMA ELECTROMAGNETIC WAVE SOURCE FOR TERAHERTZ ACCELERATORS

大塚崇光[#], 高久隼太郎, 坂本千明, 種倉遥斗, 塩澤友紀, 白坂幹人, 湯上登
Takamitsu P. Otsuka[#], Juntaro Takaku, Chiaki Sakamoto, Haruto Tanekura,
Tomoki Shiozawa, Mikito Shirasaka, Noboru Yugami
Utsunomiya University

Abstract

Recent advances in laser wakefield acceleration have enabled the generation and application of high-energy electron beams. In parallel, terahertz-based acceleration techniques have gained attention due to their potential to overcome electrical breakdown limits by operating at higher frequencies than conventional RF accelerators. This study aims to demonstrate electron acceleration using terahertz waves by combining a laser wakefield-accelerated electron beam with a plasma-based electromagnetic wave source. Experiments show that applying an external electric field to the plasma enhances the emitted wave intensity. The polarization and angular distribution of the radiation vary depending on the direction of the applied field, indicating the need for further investigation for integration into accelerator structures.

1. はじめに

高強度フェムト秒レーザーによって生成されるプラズマ中では、レーザーの進行方向およびその垂直方向に電場が励起される。この電場を利用して荷電粒子を加速する手法は、レーザー航跡場加速 (Laser Wakefield Acceleration: LWFA) と呼ばれる。本手法の物理的機構は、1979 年に T. Tajima および J. M. Dawson によって提案された[1]。LWFA では、100 GV/m を超える加速電場の励起が可能であり、従来の加速器技術と比較して高い加速勾配を実現できることから、加速器の小型化が期待されている。

これまでに多くの実験的研究が展開され、レーザー航跡場加速の性能向上に関する重要な成果が報告されている。2019 年にはキャピラリー放電プラズマを用いた実験により 8 GeV 級の電子ビーム生成が達成された[2]。2020 年には 400 MeV 級電子ビームの 24 時間連続運転が実現され[3]、2021 年にはレーザー航跡場加速によって得られた電子ビームを駆動源とする自由電子レーザー (Free-electron laser: FEL) の発振が報告された[4]。さらに 2025 年にはレーザー加速によって生成された電子ビームを加速空洞に導入し、位相回転を行うことでエネルギースペクトルの改善を図る実験が実施された[5]。

一方、テラヘルツ波を用いた加速手法に関する研究も進展している。既存の加速器で用いられる RF 周波数に比べて高い周波数帯域であるテラヘルツ波を利用することで、絶縁破壊に対する制約が緩和される可能性がある。2015 年には 60 keV の電子ビームと光整流によって生成されたテラヘルツ波を用いた原理実証実験が実施されたが、得られたエネルギー変化はわずかであり、依然として多くの技術的課題が残されている[6]。

本研究では、レーザー航跡場加速によって生成された電子ビームとプラズマ電磁波源を組み合わせることで、テラヘルツ波による電子加速の実証を目指している。こ

の手法により、テラヘルツ帯域での加速技術の可能性を探るとともに、次世代小型加速器の構築に向けた基盤技術の確立を図ることができる。

2. 静電場印加型プラズマ電磁波源

高強度超短パルスレーザーをガスに集光してプラズマを励起すると、ラジアル偏波の電磁波が発生する。さらに、外部からプラズマに電場を印加することで、電磁波の強度が印加電場の二乗に比例して増加することが知られている[7, 8]。これまでにこの現象を完全に説明できる放射モデルは提案されておらず、テラヘルツ加速用の高出力電磁波源を実現するためには、発生原理の解明が重要な課題となっている。

2.1 縦電場印加型プラズマ電磁波源

Figure 1(a) は縦電場印加型プラズマ電磁波源の実験配置図である。Ti:Sapphire レーザー (最大エネルギー 100 mJ、パルス幅 120 fs、波長 800 nm) を集光距離 $f = 200$ mm のレンズを用いて実験チャンパー内に集光照射しプラズマを励起した。集光点に設置した穴あきの電極対 (ギャップ間隔 5 mm) にレーザー進行方向に最大電場 16 kV/cm をプラズマに与えた。実験チャンパーの圧力は大気圧とした。発生した電磁波を 220 - 325 GHz に感度を有するショットキーバリアダイオードを用いて検波した。検波した電場の向きは Fig. 1 の y 軸方向の電場である。

Figure 1(b) は、 xz 面で観測された電磁波の放射角度分布を示している。電磁波は ± 15 度方向に強く放射され、放射電磁波強度は z 方向に電場を印加した場合と比較して、 $-z$ 方向に電場を印加した場合に約 1.5 倍強くなる。放射分布は先行研究で提案されたモデルとよく一致しているが[9]、電場の向きによる強度の依存性については、このモデルでは説明できない。引き続きデータの収集と数値シミュレーションを通じて、放射機構の理解を深め、より包括的なモデルの構築を目指す。

[#] takamitsu@a.utsunomiya-u.ac.jp

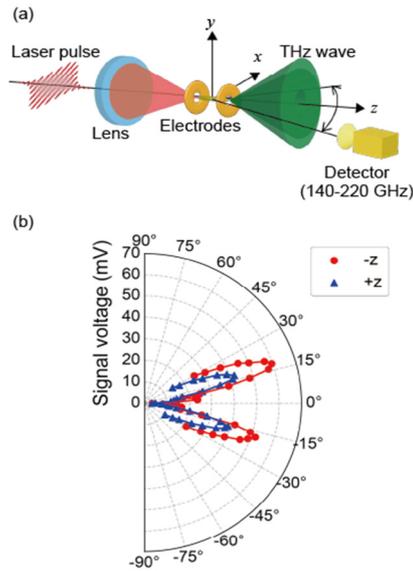


Figure 1: (a) Schematic of the experimental setup. (b) Angular distribution of the emitted electromagnetic waves observed in the xz plane.

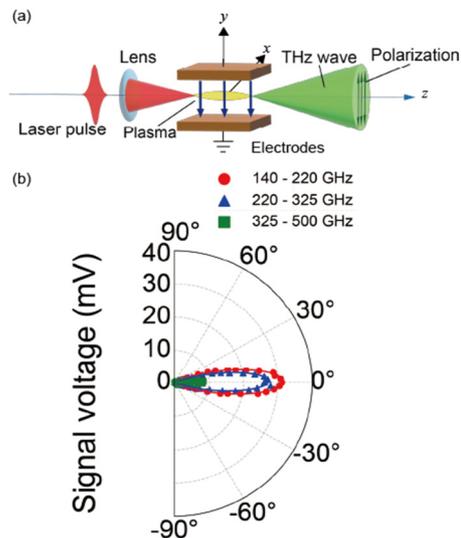


Figure 2: (a) Schematic of the experimental setup. (b) Angular distribution of the emitted electromagnetic waves observed in the xz plane.

2.2 横電場印加型プラズマ電磁波源

Figure 2(a) は横電場印加型プラズマ電磁波源の実験配置図である。Ti:Sapphire レーザー (最大エネルギー 70 mJ、パルス幅 120 fs、波長 800 nm) を集光距離 $f = 400$ mm のレンズを用いて実験チャンバー内に集光照射しプラズマを励起した。集光点に電極対 (長さ 50 m、ギャップ間隔 5 mm) にレーザー進行方向に最大電場 4 kV/cm をプラズマに与えた。実験チャンバー

の圧力は大気圧である。発生した電磁波を 140-220、220-325、325-500 GHz に感度を有するショットキーバリアダイオードを用いて検波した。検波した電場の向きは Fig. 2 の y 軸方向の電場である。

Figure 2(b) は、 xz 面で観測された電磁波の放射角度分布を示している。電磁波は z (レーザー伝搬) 軸方向に強く放射され、 y 方向に偏波されている。周波数による放射角度分布、偏波方向の依存性はない。これまでに得られた実験データをもとに光速で伝搬する電離面と電場の相互作用による電磁波放射のモデルを構築中である。

3. まとめと今後の展望

テラヘルツ波による電子加速の実証を目指し、プラズマによる電磁波発生実験を行った。現時点では、電磁波発生物理モデルは十分に構築されておらず、発生機構の理解には課題が残されている。今後は、引き続きデータの収集を進めるとともに、数値シミュレーションを併用してモデルの構築を目指す。なお、外部電場をレーザー伝搬軸に対して垂直かつ水平方向に印加した場合、電磁波の放射角度分布、偏波方向に違いが見られており、加速管への導入など応用に向けた検討が必要である。

謝辞

本研究は科学研究費助成事業 22K03565、22H01197、23K11701、23K20038 の支援を受けて実施しました。

参考文献

- [1] T. Tajima *et al.*, “Laser Electron Accelerator”, *Phys. Rev. Lett.* **61**, 98 (1988).
- [2] A. J. Gonsalves *et al.*, “Petawatt Laser Guiding and Electron Beam Acceleration to 8 GeV in a Laser-Heated Capillary Discharge Waveguide”, *Phys. Rev. Lett.* **122**, 084801 (2019).
- [3] A. R. Maier *et al.*, “Decoding Sources of Energy Variability in a Laser-Plasma Accelerator”, *Phys. Rev. X* **10**, 031039 (2020).
- [4] W. Wang *et al.*, “Free-electron lasing at 27 nanometres based on a laser wakefield accelerator”, *Nature* **595**, 516 (2021).
- [5] P. Winkler *et al.*, “Active energy compression of a laser-plasma electron beam”, *Nature* **640**, 907 (2025).
- [6] E. A. Nanni *et al.*, “Terahertz-driven linear electron acceleration”, *Nat. Commun.* **6**, 8486 (2015).
- [7] T. Fukuda *et al.*, “Characteristics of terahertz waves from laser-created plasma with an external electric field”, *Jpn. J. Appl. Phys.* **58**, 070909 (2019).
- [8] T. Fukuda *et al.*, “Experiments of forward THz emission from femtosecond laser created plasma with applied transverse electric field in air”, *Jpn. J. Appl. Phys.* **59**, 020902 (2020).
- [9] Yi Liu *et al.*, “Amplification of transition-Cherenkov terahertz radiation of femtosecond filament in air”, *Appl. Phys. Lett.* **93**, 051108 (2008).