

組み合わせ速度集群法によるテラヘルツ帯アンジュレーター放射実験 REPORT ON THZ UNDULATOR RADIATION EXPERIMENT WITH COMBINATION OF VELOCITY BUNCHINGS

住友洋介, 境武志, 早川建, 早川恭史

Yoske Sumitomo*, Takeshi Sakai, Ken Hayakawa, Yasushi Hayakawa
College of Science and Technology, Nihon University, Chiba, Japan

Abstract

THz sciences have been developing rapidly to satisfy high demands from commercial and industrial usages with helps of the recent significant developments of radio technologies at higher frequencies and optics for longer wavelengths. For the developments of THz light sources, the accelerators have an advantage to generate light pulses with high peak powers and short durations by their manipulability that make electrons compressed less than pico-seconds. Here, we use the proposed "combination of velocity bunchings" method for the compression of electrons in order to generate the quasi-monochromatic THz light sources as the undulator radiations. In this paper, we report on the result of experiment held at Nihon Univ., where we observe signals of the THz lights generated from interactions between the existing IR-undulator and the low energy electron beam at around 13 MeV that have not been achieved as successful transportations until then.

1. はじめに

近年、電波の領域においては通信を含めた産業応用性から、従来のGHzよりも高い周波数となるミリ波を含む高周波帯域の需要が急速に高まってきている。また、光学の世界においても近赤外領域の技術開発のみならず、中赤外領域を含めた長波長側の技術開発が目覚ましく、光源や各種光学素子の開発が盛んである。電波と赤外の間には存在する領域はその周波数からテラヘルツ領域と呼ばれており、双方で培われた技術が出会う場所でもあることから、電波と赤外の利点を両方活かして、近い将来において我々の生活を豊かにすることのできる技術が埋もれているギャップ領域であると期待されている。特に、その高い注目度は、近年のテラヘルツに関連する論文数が指数関数的に増加している状況からも明らかである [1,2]。また、先端研究の世界だけで留まらず、実際に市場で手に入るような民生品の種類が年々増えるなど急速な変化が顕在化している状況であり、テラヘルツ科学の近い将来の社会における発展性の期待の高さを示しているにほかならない。

物質においては、テラヘルツ帯域の周波数は分子の振動や回転、格子振動、スピンの歳差運動、電子加速などに関連して研究が行われており、対応する物性現象の理解を行う上で有用な光源である [3]。特に、単色性の高いテラヘルツ光源を用いることで、特定の現象を狙って励起させることが可能となり、物質中における平均的な応答よりもより詳細にその構造の特性を理解する上で役に立つ。

電子加速器は電子の加速のみならず、電子状態の動的な変更制御を行いやすいところが利点であり、この特性を活かした光生成を行うことで他の光源にはない加速器に固有の特徴を備えた光源開発が可能となる。一般的に電子集団から光を生成する際には、それぞれの電子から生成された光の波は揃っておら

ず、部分的な振幅のキャンセルが起きるので結果的な光強度は電子ビームの電流値に比例する程度となる。しかし、電子集団が放射波長に対して十分に時間的圧縮されている状況では、発生する光位相が揃い、振幅の共鳴増幅が起こることによって結果的な光強度は電子ビームの電流値の二乗に比例するようになる。加速器においても一つの電子加速集団あたりに 10^8-10^{10} 個の電子が含まれていることを踏まえると、この効果は顕著に現れ、ピーク強度の強い光生成が可能となる。また、磁場と相互作用することにより生成される光スペクトルは一般的には広い帯域を持つのであるが、周期磁気回路（アンジュレーター）を用いて電子集団を蛇行運動をさせることで、生成される光スペクトルを周期的に重ね合わせて単色性の強い光生成が可能となる。本研究においてはこれらの特性に加えて、加速器光源の大きな特徴となる光波長の連続可変性を兼ね備えた上で、加速器で実現可能となるサブピコ秒に至る電子集団圧縮技術を活用したコヒーレント放射、更にはアンジュレーターによる単色性の高い光開発をテラヘルツ帯域で行うことを目的としている。

加速器における電子集団圧縮法としてはシケインを用いた磁気圧縮がよく用いられるところであるが、集団内の速度差を設けることで圧縮を行う速度集群法もある。本研究においてはこれを更に発展させた「組み合わせ速度集群法」を提案し [4]、その実証実験も兼ねてテラヘルツ帯におけるコヒーレント放射実験を行っている。加速を行いながら速度差を設けることで圧縮を行う従来の速度集群法では、最大圧縮となる点では必然的に加速エネルギーが決まってしまう、加速器由来光源としての大きな特徴である光波長の連続可変性が犠牲になりやすい。それに対して、組み合わせ速度集群法においては、複数の進行波加速管を用いることで加速のみならず減速位相も活用した上で速度差を設けることが可能となり、十分な圧縮度を損なうことなくエネルギーの選択自由度も持たせることができる。特に、先述のア

* sumitomo.yoske@nihon-u.ac.jp

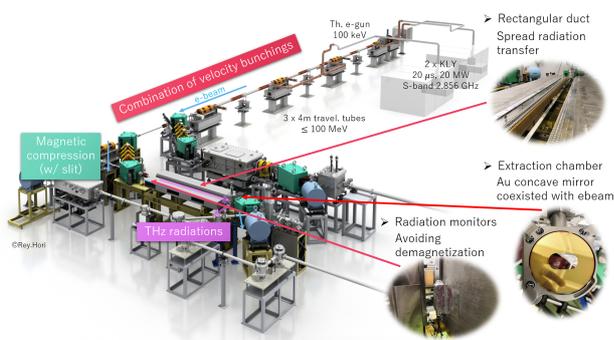


Figure 1: A schematic of the installations for this project (used in [5]).

アンジュレーター装置を用いた準単色の光生成と組み合わせることで、エネルギーの選択自由度に由来する波長の連続可変性を備えることを可能とし、様々な固有波長に対応できる有用性の高いテラヘルツ光源開発に繋がるのである。

2. 実験準備

予算の都合上、普段は中赤外光生成に用いている既存のアンジュレーター装置を利用するため、目的となるテラヘルツ帯域での放射を生成するには25 MeV 以下の低いエネルギーの電子ビームが必要となる。また、この低いエネルギーのビームから発生する光放射は広い発散角を持つことになるため、輸送損失を低減した上で発生したテラヘルツ光を取り出すためには、広がりや抑えられているアンジュレーター装置直後に取り出さないとけない。そこで、アンジュレーター装置直後に真空チャンバーを設置し、その中に電子ビームと共存可能となるような穴開き凹面鏡を配置して、生成されるテラヘルツ放射を取り出せるようにした。なお、テラヘルツ帯域でも十分な反射率を持ち、電子ビーム直撃の際の熱負荷による損傷を低減できるような凹面鏡は銅基盤に金蒸着にて作成し、普段の中赤外自由電子レーザー実験と干渉させないため必要に応じて退避できるようにしてある。また、取り出し窓はテラヘルツ帯域でも十分な透過性を持つ素材の中でも市場で安価に入手可能なサファイア窓を採用した。アンジュレーターで用いている真空ダクトにおける輸送損失も想定されたため、それまで用いられていた円形のものから長方形のものへと変更し、一方だけではあるがアンジュレーター装置の十分短い磁石間ギャップと輸送損失低減を最大限両立できるものとした。他に、組み合わせ速度集群法のための位相制御調整には大幅な電子ビームの変動が予想される、ビーム損失による多量の放射線の発生が予想される。アンジュレーター装置を構成するネオジム磁石は放射性により減磁する効果も確認されているため、磁力の低下を防ぐ目的でアンジュレーター前後に CsI シンチレーターと光電子増倍管からなる簡易の放射線モニターを製作の上設置し、慎重な運転調整を行う上での指標とできるようにした。なお、日本大学にお

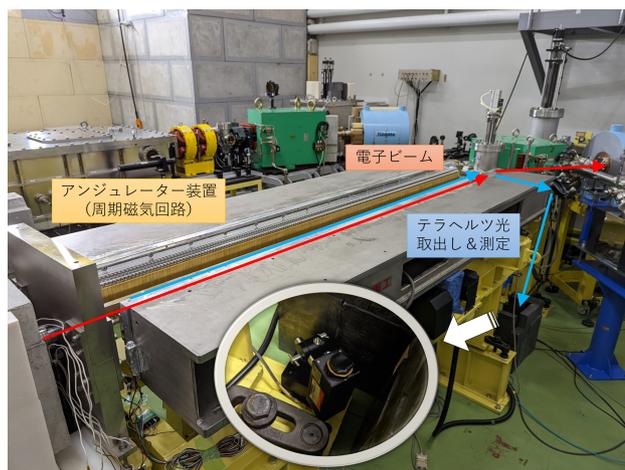


Figure 2: The location of detector and the transport of generated THz radiations.

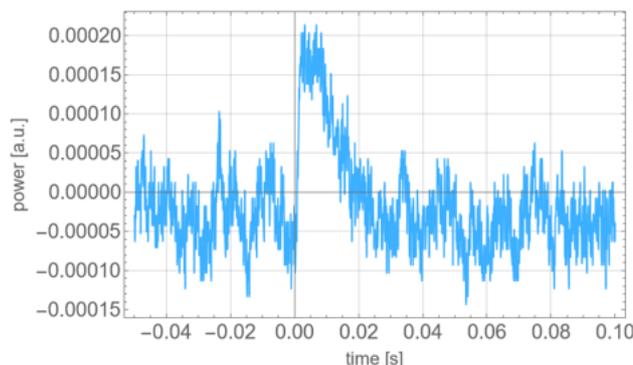


Figure 3: A measurement of the THz radiation signals.

る加速器と、設置した装置の概略としては [5] にまとめられており、ここでも図 1 に示しておく。

3. 運転調整と測定

アンジュレーターが存在するビームラインでは25 MeV 以下の低いエネルギーでビーム通過を行ったことはなく、ビームパラメーターが存在しない状態であった。そこで、中赤外自由電子レーザーで用いられていた既存の 67.6 MeV の運転パラメーターを用いて開始し、加速用高周波の位相制御調整に合わせて収束や軌道を調整する各種電磁石で徐々に変更を行い、設置した簡易放射線モニターにより損失のない状況でビームエネルギーを下げていくような運転調整とした。運転については、低いエネルギーでも電子圧縮が起こりやすい一つの電子パルスあたりの電荷量が少なく、かつすべての加速位相を利用して高い繰返しとなるフルバンチモード運転が目的に適している。しかし、調整パラメーターの確立していない初期におけるビームハンドリング調整中の余計な放射線ダメージを低減する必要もあるため、最大のマクロパルス長である 20 マイクロ秒での運転は避け、4 マイクロ秒程度に制限した上での運転とした。元々のビームラインの設計においては、

空間電荷効果が全般的に無視できないようなほどの低いエネルギーでビーム通過を行うことは想定されず、偏向磁石部やアンジュレーター部を含めダクト径の細い部分が存在している状況ではあったが、結果として 13.5 MeV もの低いエネルギーでの電子ビームを十分な電流量を確保したうえで正常に通過させることに成功した。

アンジュレーターにおけるテラヘルツ放射に見合う電子ビーム状態が整ったので、次に、アンジュレーターの磁石間隔を狭めて周期磁場との相互作用実験を行った。図 2 に示すように、発生した発散角の大きなテラヘルツ光はアンジュレーター下部に設置された穴開き凹面鏡により横方向に取り出され、その後平面鏡で下部に輸送されたのちに凹面鏡の焦点付近で測定される。測定に使用したのは、CDP 社製のパイロ検出器 PD-1 であり、0.02-3 THz の周波数帯域に検出感度を持つ。また、実験の際には短波長域遮断フィルムとして、中赤外帯域以上での透過率が低く、テラヘルツ帯域で十分な透過性を持つオリジン社取扱の BPP フィルムを用いた上で測定を行った。

得られた測定結果を図 3 に示す。パイロ型の検出器は一般的に熱的緩和時間としてより長い時間スケールの信号となるが、測定値も長い時間構造を持っている。この信号測定はビーム非照射時の背景ノイズを差し引いた上での信号値であり、設置した短波長域遮断フィルムやパイロ検出器の測定感度を踏まえると、テラヘルツ帯域が信号の主成分となっていると言える。なお、遮断フィルムを除いた上でも発生している信号強度に大きな違いがないことも確認されており、生成光の大部分が電子ビームのエネルギーとアンジュレーターの磁場周期から予想されるテラヘルツ帯域として出力されていると言えるだろう。

4. まとめと議論

この実験においては、新たな電子圧縮方法として提案している「組み合わせ速度集束法」の実証試験を兼ねて、アンジュレーターによるテラヘルツ放射実験を行い、その有意な強度を確認することができている。ただ、まだ調整の初期段階であることは否めなく、電子ビームのマクロパルス幅の伸長による強度増強や位相組み合わせによりコヒーレント放射の最適化を行う余地が大きく残されている。特に位相組み合わせには、各進行波管の RF 出力情報が役に立つことがわかっており、この情報と [4] で得られたシミュレーションによる知見をもとにした加速減速位相の調整の上で、信号強度が電流値の二乗に比例するようなコヒーレント性の確認を行っていくことが今後の課題となる。ただ、今回マクロパルス幅を 4 マイクロ秒と大幅に制限した中でも十分に観測可能となる信号強度が見られており、この信号をもとにビーム状態の理解や調整が可能となったことを踏まえると、社会状況で大きな制限を受けた中でも有意義な進展であったと言えるだろう。

謝辞

本研究は JSPS 科研費 JP19K12631 の助成を受けている。

参考文献

- [1] T. Hochrein, "Markets, Availability, Notice, and Technical Performance of Terahertz Systems: Historic Development, Present, and Trends," *J. Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, 36, 235 (2015).
- [2] R. A. Lewis, "A review of terahertz sources," *J. Phys. D*, 47, 374001 (2014).
- [3] T. Kampfrath, K. Tanaka, K. A. Nelson, "Resonant and non-resonant control over matter and light by intense terahertz transients," *Nat. Photonics*, 7, 680 (2013).
- [4] Y. Sumitomo, *et al.*, "Simulation for THz Coherent Undulator Radiation from Combination of Velocity Bunchings," *J. Phys. Conf. Ser.* 1067 (2018) no.3, 032017.
- [5] Y. Sumitomo, *et al.*, "Toward THz Coherent Undulator Radiation Experiment with a Combination of Velocity Bunchings," *Proceedings of 12th IPAC, TUPAB116*, 1663 (2021).