

日大での準単色コヒーレント THz アンジュレーター放射に向けた開発状況 DEVELOPMENT OF COHERENT THz QUASI-MONOCHROMATIC UNDULATOR RADIATIONS AT NIHON UNIVERSITY

住友洋介 ^{*A)}, 境武志 ^{B)}, 清紀弘 ^{A)}, 早川建 ^{A)}, 早川恭史 ^{A)}, 黒澤歩夢 ^{A)}, 野上杏子 ^{A)}, 岡崎大樹 ^{A)}, 田中俊成 ^{A)}
Yoske Sumitomo ^{*A)}, Takeshi Sakai ^{A)}, Norihiro Sei ^{B)},
Ken Hayakawa ^{A)}, Yasushi Hayakawa ^{A)}, Ayumu Kurosawa ^{A)}, Kyoko Nogami ^{A)}, Hiroki Okazaki ^{A)}, Toshinari Tanaka ^{A)}
^{A)}LEBRA, Nihon University, Chiba, Japan
^{B)}National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST), Ibaraki, Japan

Abstract

We have initiated a research project generating quasi-monochromatic THz undulator radiations at variable wavelengths. We propose a combination of velocity bunchings, a way of bunch compression using multiple of traveling wave acceleration tubes, so that the generated pulse is expected to be coherent (in time) with a higher peak power. The presence of bright monochromatic THz lights makes a large step toward material developments and transformations. Although we already have developed wide-band THz lights ranging from 0.1 to 2.5 THz generated through the edge radiations or transition radiations at Nihon Univ., the development of monochromatic THz sources opens a door into researches understanding specific molecular vibrations, rotations, spin precessions, and electron accelerations. In this report, we briefly overview the project proposal, and illustrate the current status of the experiment including the installation of the THz extraction chamber. The THz extraction chamber is designed such that we extract the spread THz radiations generated at the undulator coincident with the < 25 MeV e-beam.

1. はじめに

テラヘルツ光は電波と赤外の帯域に挟まれた狭間の領域に位置し、双方の特性を併せ持つことから近い将来での産業利用性が見込まれている。特に、近年その応用可能性から非常に多くの注目を集め、指数関数的に成果報告が増加している最中である ([1, 2])。日本大学では、テラヘルツ放射光源の開発を進めており、現在のところエッジ放射や遷移放射を利用した 0.1-2.5 THz 程度の広いバンド幅を持つ白色テラヘルツ光源があり、ユーザー利用に提供している [3]。本研究では、これに加えてアンジュレーターを用いた準単色のテラヘルツ光源の開発を行い、材料開発や性質変化も含めた物性現象の理解に大きく貢献することを目的とする。

テラヘルツ光はミリ、サブミリ程度の波長をもっていることから、この程度のスケールの物理現象と密接に関わりを持つ。具体例としては、分子の振動や回転、格子振動、スピンの歳差運動、電子加速などがあげられ、これらの現象による物質特性の理解や、材料開発を行うに際してテラヘルツ光は非常に有用である ([4] 参照)。X線における開発の歴史が示すように、テラヘルツ光においても単色性の高い光源開発により、特定の分子振動などの励起現象の誘発が可能となり、物質の表面や内部の詳細構造の特定や性質の理解に大きな進展をもたらすことが期待できる。

さて、そういったテラヘルツ光の生成に関してであるが、加速器はテラヘルツ光生成とは相性がよい。これは加速器の技術として培われたバンチ圧縮技術によるものである。相対論的に加速された電子が

磁場により偏向運動をする際に接線方向に光を放出するのであるが、放射波長よりも十分に短い時間スケールに電子が圧縮され多く存在すると、各電子から放出される波の位相が揃い、放出強度が電子数の二乗に比例するコヒーレント放射を引き起こすようになる。1 THz の放射波長に対しては 1 ps よりも十分に短くなればよく、これは、小・中型加速器においても速度集群法や磁気圧縮法により十分に実現が可能となっている。本プロジェクトでは、複数の進行波加速管を利用した「組合せ速度集群法」を提案し [5]、その実験的実証を行うことも目的となっている。通常速度集群においてはパラメーターの自由度が少なく、圧縮度と加速エネルギーに相関が生じるのに対し、「組合せ速度集群法」においては圧縮を強調するだけではなく、エネルギー選択性の自由度が存在することも利点である。アンジュレーターの周期磁場による光の重ね合わせにより単色性の強い光生成を行う際には、その基本的な放射波長は電子ビームのエネルギーにより決定される。狙ったテラヘルツ波長においてコヒーレント放射による高強度の光生成を行うには「組合せ速度集群法」は都合が良いのである。なお、通常速度集群を利用したテラヘルツ生成の実験例もあることに言及しておく [6]。

2. 組合せ速度集群法

まずは、組合せ速度集群法について紹介する。速度集群法はその名の通り、電子群の中で速度差を設け、後尾の電子を先頭に追いつかせることで時間的な圧縮を行う方法である。この方法が有効と成るためには設けたエネルギー差が速度差として十分に現れる必要があり、数 MeV 程度のエネルギー領域において顕著な効果を示す。エネルギーが高くなるとエネルギー差が速度差として現れにくくなり、電荷量

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

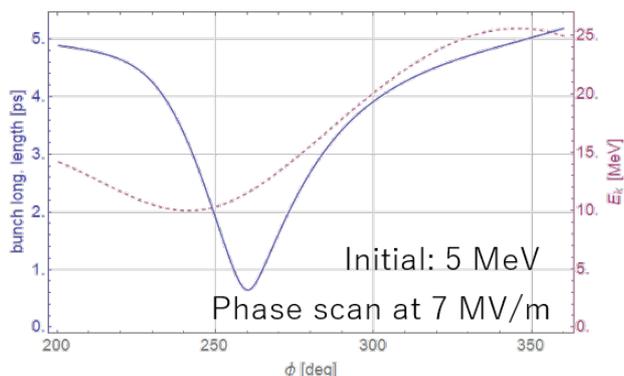


Figure 1: An example of velocity bunching using a 4 m travelling tube. We assume 5 MeV as the initial energy, and 7 MV/m as the highest gradient.

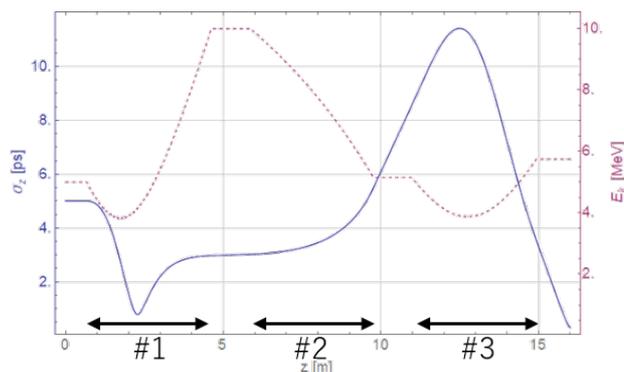


Figure 2: An example of combination of velocity bunching proposed in [5]. We illustrate only one combination of phases at the traveling wave acceleration tubes, but there are choices with different electron energies while keeping the bunch width compressed.

にもよるが、逆に低すぎると空間電荷効果による反発の影響が支配的となりやすい。日本大学の加速器において進行波加速管に入射する前のエネルギーは数 MeV 程度であり、速度集群が効果的となる領域であると言える。組合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これらの速度差の条件の最適化を行うことを目的としている [5]。

よりわかりやすくするため、通常速度集群の一例を Fig. 1 に示す。ここで、実線（青）は RF 位相スキャンに対する電子群の時間幅（RMS）を表しており、点線（紫）は対応する平均エネルギーとなっている。電子群の時間幅とエネルギーには密接な相関があり、圧縮度を優先するとエネルギー選択自由度には乏しいことが見てわかる。この図では加速勾配は固定としてあるが、加速勾配についてのスキャンを含めても相関は存在している。なお、本計算では空間電荷効果を適切に取り入れられる ASTRA [7] を用いている。より詳細な設定は [5] を参考にしてほしい。

次に、組合せ速度集群の一例を Fig. 2 に示す。こちらの図では横軸は上流から下流への長さを表しており、実線（青）は電子群の時間幅の遷移、点線（紫）は平均エネルギーの変化を表している。また、それぞれの図中における数字は何本目の加速管かを示している。この図からは、加速のみならず減速位相も組合せて活用することで圧縮の効果がより顕著になっていることが明らかである。Fig. 2 ではわかりやすくするため、ある位相の組合せのみを表示してあるが、実際の計算では、日本大学における 3 本の進行波加速管全てでの位相スキャンを行っており、同様の電子群の時間幅を持ちながら異なる平均エネルギーとなる状況が存在していることもわかっている。これは、3 本の加速管での位相調整の組合せの自由度が高いことから、圧縮しつつエネルギーの選択自由度をある程度確保できることに繋がっているのである。なお、日本大学のアンジュレーター装置においては、3 MeV 程度以上であればテラヘルツ光生成が見込めるので、数 MeV において効果が顕著と成る速度集群法とは相性が良い。

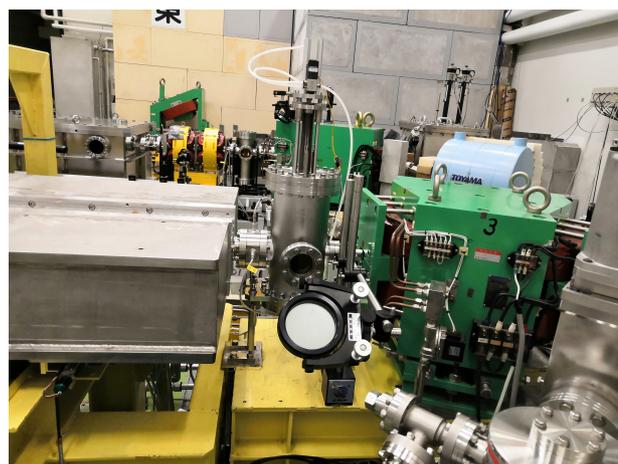


Figure 3: The THz extraction chamber installed after the undulator. Here the e-beam coincides with the extraction of THz radiations.

3. 実験に向けた準備や運転調整

日本大学では組合せ速度集群の実験での実践、並びにこれを利用したアンジュレーターにおける準単色コヒーレントテラヘルツ光生成に向けた準備が進められている。日本大学に設置されているアンジュレーターは中赤外光生成のための共振器型自由電子レーザー装置の一部を構成するものである。本実験においてはこのアンジュレーターを用いるのであるが、磁場周期は 48 mm となっており、テラヘルツ光生成には 3-25 MeV の電子ビームを用いることになる。この 25 MeV 以下の電子ビームから生成される放射光源はその広がり大きく、損失を最小限に抑えるために光取り出しはアンジュレーター直後で行うこととした。このため、テラヘルツ光取り出し用チャンバーを製作し、アンジュレーター直後にアライメントを行った上で設置した (Fig. 3 参照)。広がり大きいテラヘルツ光の取り出しには、幅広い帯域

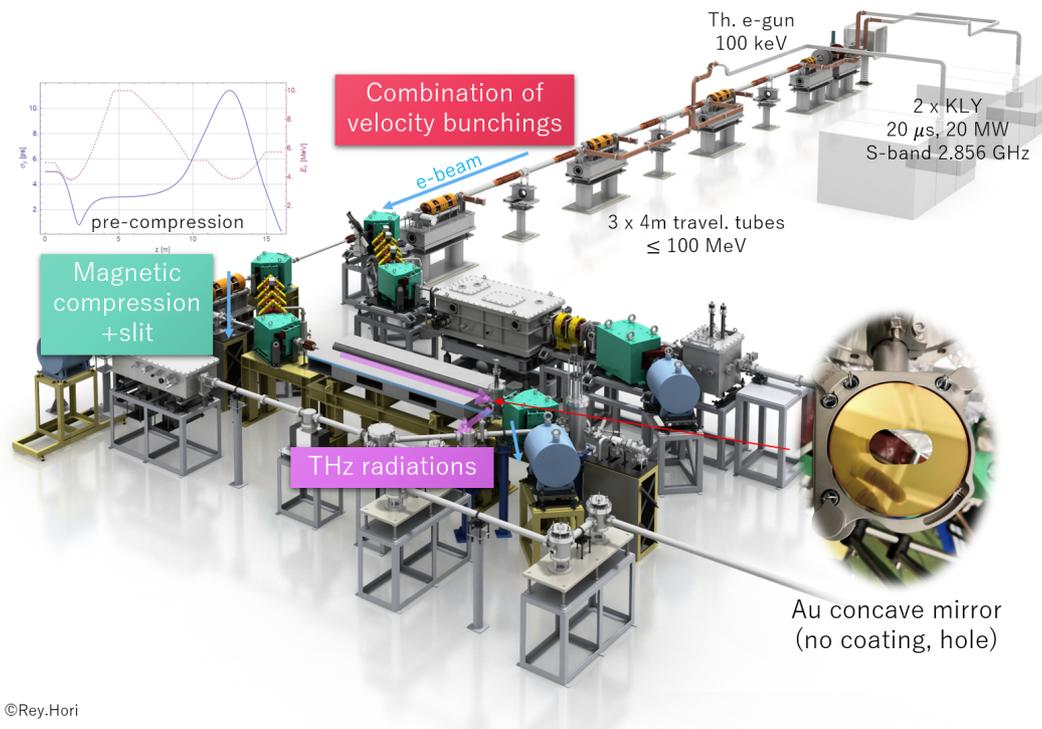


Figure 4: An experimental overview for our project. A concave mirror with a hole is installed at the extraction chamber.

に対応するため、 $\phi 76.2$ mm で $R=2000$ mm の非コート金蒸着の凹面鏡をチャンバー内に設置し、横方向への取り出しを行う。測定に関しては、ビームラインから外れた床周辺に光を輸送し、背景放射線を遮蔽の上で焦電パワーセンサーにて測定を行う。アンジュレーター直後における電子ビームとの共存のため、取り出し用凹面鏡には 45 度設置時に上流から見て円形となるような穴加工をしており、また、電子ビームのハローが衝突した際の熱負荷分散のため凹面鏡基板は無酸素銅とした。実験の様子をわかりやすくするため、この穴開き凹面鏡を含む電子銃からの全体像を Fig. 4 にて示しておく。アンジュレーターは加速直線部に対して 90 度曲がったところに設置されており、電子群の圧縮には組合せ速度集群法に加えて磁気圧縮法やスリットによる効果も期待できる。なお、組合せ速度集群法においては、電子群内でエネルギー差が十分に設けられている状況となるので、磁気圧縮法とは相性が良い。

各種機器の設置後に電子ビームの運転の調整を開始している。アンジュレーターのビームラインは、共振器型自由電子レーザーによる中赤外光生成に使用されており、50 MeV 程度以下におけるビーム調整のパラメーターがない状況であった。そこで、直近に使用していた 67.6 MeV におけるパラメーターを用いて、ここから徐々にクライストロンからの出力や位相調整によりエネルギーを減じていき、それに合わせて各種電磁石の調整を行っている。なお、67.6 MeV の電子ビームでは波長 3.7 μm でのアンジュレーター放射が生成される。調整はビームロスなしに行うことは容易ではなく、これに伴うガンマ線や中性子線

などの放射線によりアンジュレーター磁石が損傷を受けることが想定されるため、電子ビームのマクロパルスは数 μs と短いものとし、繰り返しは 2 Hz 程度、また電流値も BPM 等で測定可能な下限値程度として調整を行っている。現在は、エネルギーを下げていき、37.1 MeV まで到達したところで調整が止まっている状況である。その後、アンジュレーターの磁石交換やエアコンの故障、また、入校制限により運転が不可能となり調整の継続ができていない。

4. まとめと今後の予定

日本大学では加速器を用いたテラヘルツ光開発を推し進めている。本プロジェクトでは、複数の進行波加速管を利用した電子群の圧縮法である「組合せ速度集群」を提案し、実験における実証、ならびにその圧縮を利用し、アンジュレーターによるコヒーレント準単色テラヘルツ光源の開発を進めている。これまでにテラヘルツ光取り出し用の機器が設置を行い、現在は電子ビームの調整を行っている最中である。

本プロジェクトの計画として、今後アンジュレーターダクトを変更予定である。現在は中赤外光を想定して $\phi 22$ mm のダクトを利用しているが、25 MeV 以下の電子ビームからのテラヘルツ放射は広がり大きくダクトにおける大きな損失が予想されている。そこで、22 \times 66 mm の矩形ダクトを製作し、光輸送を多少改善することを予定している。

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] N. Sei *et al.*, “Research of Coherent Edge Radiation Generated by Electron Beams Oscillating Free-Electron Lasers,” in *Proc. IPAC2019*, Melbourne, Australia, May 2019, paper TUPRB039.
- [4] 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).
- [5] Y. Sumitomo *et al.*, “Simulation for THz Coherent Undulator Radiation from Combination of Velocity Bunchings,” *J. Phys. Conf. Ser.* **1067** (2018) no.3, 032017.
- [6] S. Kashiwagi *et al.*, “Status of Test-Accelerator as Coherent THz Source (t-ACTS) at ELPH, Tohoku University,” in *Proc. IPAC2019*, Melbourne, Australia, May 2019, paper TUPGW033.
- [7] K. Floettmann, “Astra user manual,” see <http://www.desy.de/~mpyf10/>, *Astra-dokumentation*.