

平成 30 年 6 月 12 日現在

機関番号：14301

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2014～2017

課題番号：26706026

研究課題名(和文)超短バンチ電子ビームを用いた新奇THz自由電子レーザー発生手法の研究

研究課題名(英文)Study on New THz Free Electron Laser Generation Scheme Using Ultra-short Electron Beam

研究代表者

全 炳俊 (Zen, Heishun)

京都大学・エネルギー理工学研究所・助教

研究者番号：80548371

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 18,400,000円

研究成果の概要(和文)：光陰極高周波電子銃より発生させた電子ビームを4つの偏向電磁石により構成されるバンチ長圧縮器を用いて短バンチ化させ、その電子ビームを一对の磁石列で構成されるアンジュレータに入射し、THzコヒーレントアンジュレータ放射(THz-CUR)を発生させた。発生させたTHz-CURの特性評価を行い、周波数可変範囲0.17-0.65 THz、最大マイクロパルスエネルギー約1 μ J(@0.17 THz)の準単色大強度THz光が発生可能である事が示された。また、電子ビームの電荷量を増大させた際に、マイクロパルスエネルギーが飽和する現象も確認され、この装置の性能限界に関する情報も得られた。

研究成果の概要(英文)：THz Coherent Undulator Radiations (THz-CUR), which is a quasi-monochromatic intense THz radiation, were generated by injecting a short bunch electron beam generated from photocathode RF gun with a bunch compression chicane. Experiments to investigate the basic parameters of the THz-CUR were carried out. As the results, the frequency tunable range and the maximum micro-pulse energy of the THz-CUR was determined as 0.17-0.65 THz and 1 micro-J (at 0.17 THz), respectively. Moreover, the intensity saturation was observed when the amount of charge in an electron bunch was increased higher than 80 pC. The intensity saturation gave us information of the performance limitation of this THz-CUR source.

研究分野：加速器・放射光・自由電子レーザー

キーワード：テラヘルツ放射 加速器光源 コヒーレント放射

1. 研究開始当初の背景

THz 光は透視検査や物性物理の分野でその需要が高まっている。しかし、短パルスレーザを用いた THz 光源では十分な強度が得られていない。一方、大強度な THz 光源は巨大な加速器からの自由電子レーザ(FEL)光に限られている。我々の研究グループではこれまでに熱陰極高周波電子銃(RF Gun)を用いて、比較的小型(5m×10m)な加速器で中赤外 FEL の発生に成功し、広く共同利用研究に公開している。加えて、熱陰極 RF Gun に比べ、大電荷の電子ビーム生成が可能な光陰極 RF Gun を用いた FEL 開発にも着手し、光陰極 RF Gun の開発を KEK と行い、準備を進めると同時に、テーブルトップ型の THz-FEL 装置の提案と試験機の数値計算による評価を行った。これまでの研究で、光陰極 RF Gun から生成された短バンチ電子ビーム(<1ps)を用いて THz 領域の FEL を発生させる場合、アンジュレタ走行中に電子と光が時間的にずれていくスリッページという現象が非常に大きく、FEL 増幅率を制限する事が分かっている。

2. 研究の目的

当初は二台のアンジュレタを直列に設置し、上記スリッページ効果を補償する為に電子遅延路および光遅延路を二台のアンジュレタ間に設置して一台目で THz コヒーレント放射光を発生させ、二台目でそれを電子バンチと位相を合わせて相互作用させ、増幅させる発生手法の原理検証を目的としていたが、計算による検討の結果、長波長の放射であり、二台のアンジュレタ間の繋ぎの部分で大きな回折損失が発生する事や一台のアンジュレタからでも十分に強い放射を得られる可能性が示唆された事から、途中から一台のアンジュレタに放射波長以下の長さの短バンチ電子ビームを入射し、発生させたコヒーレントアンジュレタ放射の性能を評価する事に研究目的を変更した。

3. 研究の方法

光陰極高周波電子銃と集束用ソレノイド電磁石、4つの偏向電磁石により構成されるバンチ圧縮用シケイン、集束用四重極電磁石(×5)、周期長70mm・10周期アンジュレタ、電子ビームエネルギー分析用偏向電磁石で構成される図1の様な加速器・ビームラインを構築した。本装置にて発生させた THz コヒーレントアンジュレタ放射を THz 取出し薄膜チタンミラーで反射させ、合成石英を通して大気中に取り出した後、自作の干渉計型 THz 分光器・高感度焦電検出器(PYD-1: FLUXY)およびドイツの PTB でエネルギー校正された焦電検出器(THz10: Sensor und Lasertechnik)を用いて測定する事で、発生可能な準単色 THz 光の周波数および帯域幅、絶対強度の測定を行った。

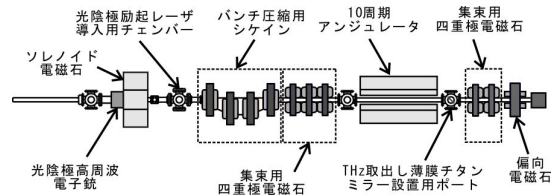


図1：構築した実験用加速器・ビームライン

4. 研究成果

図1に示す構築した実験用加速器・ビームラインにおいて、光陰極高周波電子銃より発生させた電子ビームをバンチ長圧縮用シケインにより短バンチ化させ、その電子ビームを一對の磁石列で構成されるアンジュレタに入射し、THz コヒーレントアンジュレタ放射(THz-CUR)を発生させた。この時、電子ビームのエネルギーは約 4.6 MeV であり、このタイプの光陰極高周波電子銃に約 10 MW のマイクロ波を投入した場合に得られる標準的な電子ビームエネルギーであった。

発生させた THz-CUR の特性評価を行い、図2に示す様に、1バンチ当たりの電荷量 60 pC の条件下でアンジュレタ磁石列の間隔(ギャップ)を 30 mm から 60 mm まで変化させる事で発生した THz-CUR の中心周波数を 0.17-0.65 THz の間で変化させる事が可能である事が分かった。周波数帯域幅は約 10% であり、アンジュレタ周期数から予測される帯域幅と矛盾しない。

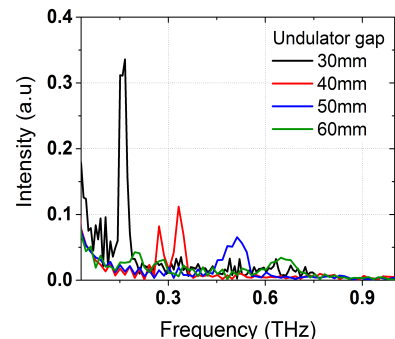


図2：アンジュレタギャップ変化時の THz-CUR スペクトル変化

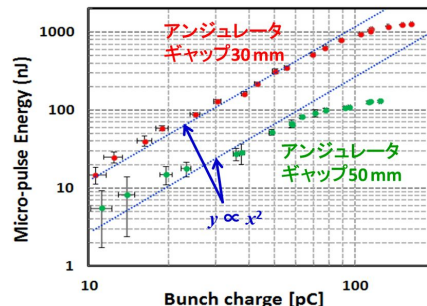


図3：アンジュレタギャップ 30 mm と 50 mm 時の THz-CUR ミクロパルスエネルギーの電荷量依存性

また、アンジュレタギャップ 30 mm(中心周波数 0.17 THz)の条件において、電荷量を変化させた際にミクロパルス当たりの光エ

エネルギーが 80 pC までは電荷量の二乗に依存する事を確認した(図3参照)。原理上、短バンチ電子ビームから発生するコヒーレント放射の強度は電荷量の二乗に比例する事が知られており、80 pC 以下の条件ではこの法則に則って THz-CUR の強度が電荷量の二乗に依存して増加した。しかし、更に電荷量を増やしていくと、図3に青破線で示した電荷量に二乗で依存する直線から外れていき、原理通りに THz-CUR 強度が増加しない『飽和』現象が観測された。電荷量 160 pC の条件下で観測された最大マイクロパルスエネルギーは約 1 μ J であり、そのピークパワーは約 20 kW と推定される。一方、アンジュレータギャップ 50 mm(中心周波数 0.51 THz)の条件においては、約 60 pC 程度から二乗則に対して強度の電荷量依存性が弱くなる『飽和』現象が観測された。

上記の測定で観測された飽和現象はこの装置の性能を制限する現象であり、数値計算や各アンジュレータギャップ条件での THz-CUR スペクトルの電荷量依存性等を調査した。結果として、電子ビームのバンチ長が電荷量に依存して長くなると共に、エネルギー拡がりも大きくなっており、その結果、個々の電子が出す放射の重ね合わせ条件が悪化し、ある電荷量を超えると電荷量を増加させても二乗則に従って THz-CUR 強度が増加しない『飽和』現象が発生しているという事が判明した。アンジュレータのギャップが広い場合は放射の周波数が高く、波長が短いため、バンチ長の伸長やエネルギー幅の増大により敏感であり、この為、アンジュレータギャップ 50 mm の条件の方が 30 mm の条件よりも早く飽和が生じたと考えられる。電子ビームエネルギーが 4.6 MeV と低い為、空間電荷効果による電子バンチ長の伸長やエネルギー幅の増大が顕著である事が原因でこのような現象が起こっていると考えられる。より大強度の THz-CUR 放射を発生させるには、陰極に照射するレーザ光の時間・空間分布を制御し、空間電荷効果の影響を低減する必要があると考えられる。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 8 件)

Sikharin Suphakul, Heishun Zen, Toshiteru Kii and Hideaki Ohgaki, Measurement of Coherent Undulator Radiation of Compact Terahertz Radiation Source at Kyoto University, International Journal of Magnetics and Electromagnetism, 査読有, 3, IJME-3-008 (2017).
<http://vibgyorpublishers.org/content/international-journal-of-magnetics-and-electromagnetism/ijme-3-008.php>

Heishun Zen, Sikharin Suphakul,

Toshiteru Kii, Kai Masuda and Hideaki Ohgaki, Present Status and Perspectives of Long Wavelength Free Electron Lasers at Kyoto University, Physics Procedia, 査読有, Volume 84, Pages 47-53 (2016).
<https://doi.org/10.1016/j.phpro.2016.11.009>

Sikharin Suphakul, Kantaphon Damminsek, Heishun Zen, Toshiteru Kii and Hideaki Ohgaki, Beam Dynamics Investigation for the Compact Seeded THz-FEL Amplifier, 査読有, Energy Procedia, Volume 89, Pages 373-381 (2016).
<https://doi.org/10.1016/j.egypro.2016.05.049>

Siriwan Krainara, Heishun Zen, Toshiteru Kii, Hideaki Ohgaki, Sikharin Suphakul, Development of Compact THz Coherent Undulator Radiation Source at Kyoto University, 査読無, Proceedings of FEL2017, Pages 158-161 (2018)
<https://doi.org/10.18429/JACoW-FEL2017-MOP049>

Sikharin Suphakul, Heishun Zen, Kenichi Morita, Konstantin Torgasin, Kai Masuda, Toshiteru. Kii and Hideaki Ohgaki, Generation of Short Bunch Electron Beam from Compact Accelerator for Terahertz Radiation, 査読無, Proceedings of IPAC2016, Pages 1757-1759 (2016)
<https://doi.org/10.18429/JACoW-IPAC2016-TUPOW008>

Sikharin Suphakul, Kantaphon Damminsek, Heishun Zen, Toshiteru Kii and Hideaki Ohgaki, Development of Compact Seeded Terahertz Free-Electron Laser Amplifier System at Kyoto University, 査読無, Proceedings of IRMMW-THz 2015 (2015)
<https://doi.org/10.1109/IRMMW-THz.2015.7327804>

Kantaphon Damminsek, Sakhorn Rimjaem, Chlada Thongbai, Sikharin Suphakul, Hideaki Ohgaki and Heishun Zen, Electron Beam Properties from a Compact Seeded Terahertz FEL Amplifier at Kyoto University, 査読無, Proceedings of FEL2015, Pages 85-88 (2015).
<https://doi.org/10.18429/JACoW-FEL2015-MOP025>

Sikharin Suphakul, Yusuke Tsugamura, Heishun Zen, Toshiteru Kii, Hideaki Ohgaki and Qika Jia, Development of Compact THz-FEL System at Kyoto University, 査読無, Proceedings of FEL2014, Pages 501-504 (2015).
<http://epaper.kek.jp/FEL2014/papers/tup057.pdf>

[学会発表](計 21 件)

S. Krainara, S. Chatani, H. Zen, T. Kii,

H. Ohgaki, Study of the Saturation of Radiation Energy Caused by the Space Charge Effect in a Compact THz Coherent Radiation Source, 9th International Particle Accelerator Conference, IPAC2018, 2018年5月3日, JW Marriott Parq Vancouver, Canada.

S. Krainara, H. Ohgaki, T. Kii, H. Zen, S. Chatani, Study on space charge effect in a compact THz coherent undulator radiation (THz-CUR) source at Kyoto University, 日本原子力学会「2018年春の年会」, 2018年3月26日, 大阪大学吹田キャンパス

H. Zen, Status of Accelerator based Infrared Light Sources at Kyoto University, 2nd International workshop on CSR and free electron lasers from ultra short bunch electron beam, 2017年9月19日, 東北大学電子光物理学研究センター

S. Krainara, H. Ohgaki, H. Zen, T. Kii, S. Suphakul, Observation of THz radiation from THz Coherent Undulator Radiation Source, 日本原子力学会「2017年秋の大会」, 2017年9月14日, 北海道大学

S. Krainara, T. Kii, H. Ohgaki, H. Zen, S. Suphakul, Development of Compact THz Coherent Undulator Radiation Source at Kyoto University, 38th International Free Electron Laser Conference (FEL2017), 2017年8月21日, Santa Fe Community Convention Center, Santa Fe, NM, USA.

S. Krainara, S. Suphakul, H. Zen, T. Kii, H. Ohgaki, THz coherent undulator radiation generated from compact accelerator based on photocathode RF gun, 第14回日本加速器学会年会, 2017年8月1-2日, 北海道大学

全炳俊, Suphakul Sikharin, 紀井俊輝, 増田開, 大垣英明, 光陰極高周波電子銃を用いた THz コヒーレントアンジュレータ放射の発生, 2017年1月7-9日, 第30回日本放射光学会年会・放射光科学合同シンポジウム, 神戸芸術センター

Heishun Zen, Sikharin Suphakul, Toshiteru Kii, Kai Masuda, Hideaki Ohgaki, Development of Quasi-monochromatic THz Coherent Undulator Radiation Source at Institute of Advanced Energy, Kyoto University, IW-FIRT2017/DHP-TST2017, 2017年3月8日, 福井大学

全炳俊, Suphakul Sikharin, 紀井俊輝, 増田開, 大垣英明, 京都大学における加速器駆動波長可変 THz 光源の開発, (社)レーザー学会第503回研究会「レーザーのカオス・ノイズダイナミクスとその応用」(招待講演), 2017年2月28日, 東北工業大学一番町ロビー 2階 ホール

Siriwan Krainara, Sikharin Suphakul, Heishun Zen, Toshiteru Kii, Hideaki Ohgaki,

Study of Undulator Characteristics for Generating THz Radiation at Kyoto University, FELとHigh-Power Radiation研究会, 2017年2月22-23日, 東北大学電子光物理学研究センター

全炳俊, Sikharin Suphakul, 紀井俊輝, 増田開, 大垣英明, 光陰極高周波電子銃駆動 THz コヒーレントアンジュレータ放射光源の開発, FELとHigh-Power Radiation研究会, 2017年2月22-23日, 東北大学電子光物理学研究センター

H. Zen, S. Suphakul, T. Kii, K. Masuda, H. Ohgaki, Present Status and Future Plan of Infrared FEL Facility at Kyoto Univ., IRMMW-THz 2016, 2016年9月25-30日, Bella Center, Copenhagen, Denmark

S. Suphakul, K. Torgasin, K. Morita, H. Zen, T. Kii, K. Masuda, H. Ohgaki, Electron Beam for Compact THz FEL Amplifier at Kyoto University, 第13回日本加速器学会年会, 2016年8月8-10日, 千葉県千葉市幕張メッセ国際会議場

H. Zen, S. Suphakul, T. Kii, K. Masuda, H. Ohgaki, Present Status and Perspectives of Long Wavelength Free Electron Lasers at Kyoto University, Synchrotron and Free Electron Laser Radiation: Generation and Application (SFR-2016)(招待講演), 2016年7月4-7日, BINP, Novosibirsk, Russia

S. Suphakul, T. Kii, K. Masuda, K. Morita, H. Ohgaki, K. Torgasin, H. Zen, Generation of Short Bunch Electron Beam from Compact Accelerator for Terahertz Radiation, the 7th International Particle Accelerator Conference (IPAC2016), 2016年5月8-13日, BEXCO, Busan, Korea

Suphakul Sikharin, Kantaphong Damminsek, Heishun Zen, Toshiteru Kii and Hideaki Ohgaki, Electron Beam Generation by a Photocathode RF-gun at Kyoto University, 第12回日本加速器学会年会, 2015年8月5-7日, プラザ萬象・アイアイプラザ(福井県敦賀市)

Suphakul Sikharin, Kantaphong Damminsek, Heishun Zen, Toshiteru Kii and Hideaki Ohgaki, Development of compact seeded terahertz free-electron laser amplifier system at Kyoto University, 40th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz waves (IRMMW-THz), 2015年8月23-28日, Chinese University of Hong Kong, Hong Kong, China

K. Damminsek, S. Rimjaem, S. Suphakul, C. Thongbai, H. Ohgaki, H. Zen, Electron Beam Properties from a Compact Seeded Terahertz FEL Amplifier at Kyoto University, 37th International Free Electron Laser Conference (FEL2015), 2015年8月23-28日, Daejeon Convention Center, Daejeon, Korea

Suphakul Sikharin, Yusuke Tsugamura, Heishun Zen, Toshiteru Kii, Qika Jia, Hideaki Ohgaki, Design of Compact THz-FEL system at Kyoto University, 第 11 回日本加速器学会年会, 2014 年 8 月 9 日, 青森県青森市リンクステーション青森

Sikharin Suphakul, Hideaki Ohgaki, Toshiteru Kii, Kai Masuda, Heishun Zen, Yusuke Tsugamura, Expected THz-CSR Radiation Performance from a Short Undulator, 日本原子力学会「2015 年春の年会」, 2015 年 3 月 21 日, 茨城県日立市茨城大学日立キャンパス

② Sikharin Suphakul, Hideaki Ohgaki, Toshiteru Kii, Kai Masuda, Heishun Zen, Hani Negm, Kyohei Yoshida, Torgasin Konstantin, Motoharu Inukai, Design of Magnetic Chicane for Compact THz-FEL system, 日本原子力学会「2014 年秋の大会」, 2014 年 9 月 9 日, 京都府京都市京都大学吉田キャンパス

6. 研究組織

(1) 研究代表者

全 炳俊 (ZEN, Heishun)

京都大学・エネルギー理工学研究所・助教

研究者番号: 80548371