

平成 30 年 6 月 2 日現在

機関番号：32665

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2017

課題番号：16K17539

研究課題名(和文) テラヘルツ波のパルス蓄積による高強度化に関する研究

研究課題名(英文) Study on high intensity of terahertz-wave by pulse stacking

研究代表者

境 武志 (SAKAI, Takeshi)

日本大学・理工学部・助手

研究者番号：20409147

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,200,000円

研究成果の概要(和文)：電子線形加速器を用いたX線ビームラインにおいて、1ps程度まで短パルス化した100MeV電子ビームによるテラヘルツ波帯コヒーレント遷移放射、偏向電磁石からのコヒーレントエッジ放射を用いた。大気中水蒸気の影響が大きく、乾燥窒素置換測定系を用いても帯域全体にわたり吸収の影響が残っており、出力パワーはマクロパルスあたり、CTRは1mJ、CERは0.2mJ程度得られた。しかしビーム条件を変えることで減衰の影響を無視した状態では数mJの出力が得られる可能性があることが確認できた。ドライエアーによる超乾燥空気置換、または真空チェンバーを用いた光学系全体の真空中構築など改善する必要があることがわかった。

研究成果の概要(英文)：Development of terahertz (THz) wave source has been underway at Nihon University. The THz wave transport lines has been constructed on the same axis as the X-ray and FEL beam line. The average intensity of the THz coherent transition radiation (CTR) wave obtained at the output port in the accelerator room has been 1 mJ/macro-pulse (pulse width 4.5 us). The superposition transport system of the THz waves to the X-ray beam-line was installed in a multi-purpose vacuum chamber. Additionally, the energy of the coherent edge radiation (CER) as high as 0.2 mJ/macro-pulse were achieved with the experimental room. Although an optical system using a vacuum chamber is necessary, if the influence due to the absorption of water vapor is ignored, it is expected that the intensity of the THz wave would up to several-mJ as the electron beam power output increases. These THz waves has been used for user experiments for the imaging in addition to measurement of the spectrum.

研究分野：加速器科学

キーワード：高強度テラヘルツ波光源 コヒーレント遷移放射 コヒーレントエッジ放射 コヒーレントシンクロトロン放射 電子線形加速器 コヒーレントX線 自由電子レーザー

1. 研究開始当初の背景

(1) テラヘルツ波 (THz 波) は光と高周波源の領域のそれぞれの境界付近に位置し、その領域ではそれぞれの光源技術からの延長技術では難しい領域とされており、テラヘルツギャップと呼ばれ、大強度光源が無い帯域であった。しかしこの THz 帯域では物理現象の起源となる多くの素励起があり、長年研究が展開されてきた。THz 光はその物質により透過や吸収の特性がそれぞれ違い、物質がどの帯域帯を透過、吸収したかによって物質固有の様々な指紋スペクトルからその物質が特定できる。この最近の応用例としては、

- ・ 生産品質管理用非破壊イメージング検査、文化財非破壊調査
- ・ 創薬のための結晶多型制御やプロセス管理、遺伝子、たんぱく質立体構造や機能解析
- ・ ポジトロニウム超微細構造の直接観察
- ・ 超伝導体のポンプロープ分光測定

などへの応用など、非常に幅広い分野にまたがり飛躍的に進んでいる。

(2) その中でも、加速器をベースとしたピコ秒オーダーまで短くバンチされた短パルスビームを用いて発生させる THz 光源の強度は、通常の THz 光源と比べて強度が非常に高く、新しい THz 波の応用技術開拓をテーブルトップサイズから大型の加速器共同利用施設に至るまで様々な提案がなされており、高強度な THz 光源の開発、開拓が期待される状況となっていた。

2. 研究の目的

(1) 日本大学電子線利用研究施設の加速器をはじめ、同様の自由電子レーザー研究施設では主に電子線形加速器が用いられており、FEL 発振に用いるための電子ビームは高安定で、ビームの長さはピコ秒以下のマイクロパルスで構成されている。このように短バンチ化できる線型加速器では、より高強度な THz 光源を開発でき、小規模な線型加速器でも高強度テラヘルツ光源の開発が波及しているが、ERL 光源のような大型施設に比べると THz 光源の取出しパワーで課題が残っていた。

(2) そこで、既存の光源のテラヘルツギャップを埋める大強度な THz 波光源を実現できればこれまで THz 帯で行われてきた基礎的な分光研究とは異なり、全く違った研究への波及効果が期待でき、大型施設以外での小型加速器を用いた実現は重要であり、加速器から発生させた THz 波の強度を増強することを目的とした。

3. 研究の方法

(1) 加速器とビームラインは、日本大学電子線利用研究施設に既存の 125 MeV 電子線形加速器における、パラメトリック X 線放射 (PXR) ビームラインを利用した。THz 波帯域の光源には、PXR ビームラインに設置されて

いる金属ターゲットに対して、FEL や PXR 発生にも用いているビーム調整がなされている短バンチ化された電子ビームを当てて、THz 波帯域のコヒーレント遷移放射 (CTR)、ビームラインに設置されている偏向電磁石の入口で発生させた THz 波帯域のコヒーレントエッジ放射 (CER) 及び、偏向電磁石で曲げた電子ビームからのコヒーレントシンクロトロン放射 (CSR) を発生させて行った。

(2) 金属ターゲットにはアルミ蒸着したターゲットを用いた。アルミはチタンなどに比べてプラズマ振動数が 1.5~2 倍ほど高いため、取り出し強度の増加を見込め、ターゲットの熱的な問題に対応するため、ビームを既に対して実績のあった PXR 発生にも用いている Si ウエハを用いた。発生させた各光源は、常時立入可能な実験室へ 2016 年度に新設された THz 輸送光学システムを用い輸送し、光学測定系へ導いて測定した。日本大学電子線利用研究施設の PXR ビームラインと PXR 及び各 THz 光源の輸送系概要図を図 1 に示す。

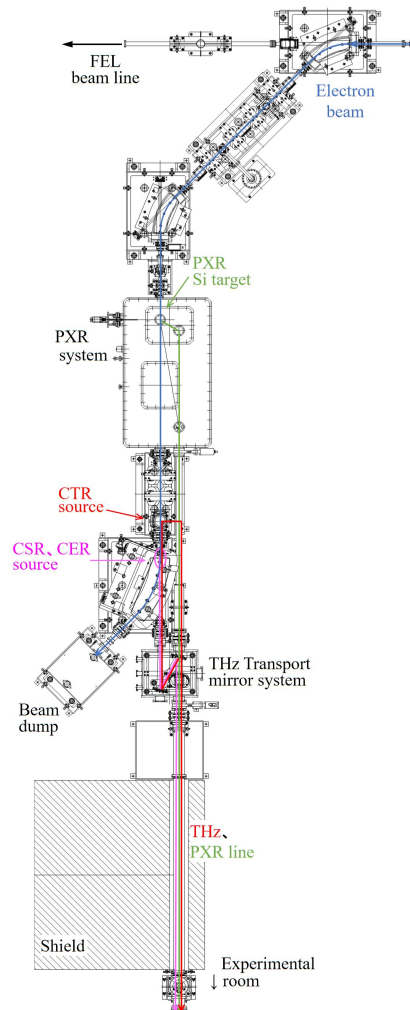


図 1 日本大学電子線利用研究施設におけるパラメトリック X 線放射ビームライン、各 THz 波帯域のコヒーレント遷移放射、コヒーレントエッジ放射、コヒーレントシンクロトロン放射源位置と実験室への輸送光学系概要図

4. 研究成果

(1) 施設側で新規に設置した各 THz 波光源の輸送システムを用いて、常時立入可能な実験室へ取り出し、測定を行った。電子ビームは、1 ps 程度まで短パルス化されたエネルギー100 MeV、ビーム電流約 100 mA、マクロパルス幅 5 μ s、繰り返し 5 pps の状態で用いた。THz 波光源としては、CTR 及び CER を用い、実験室にて X 線の実験ステージ横に光学系を組み行った。

(2) 測定において CTR の波長帯としては、0.1~2 THz 弱、マクロパルス (5 μ s) 当たりの強度は 1 mJ を確認できた。CER を用いた測定でも同様に行い、波長 0.1~2.5 THz、マクロパルス (5 μ s) 当たりの強度は 0.2 mJ が観測できた。図 2 に Michelson 干渉計を用いて測定された CER のスペクトル波形を示す。測定から測定光学系における大気中水蒸気の影響によって特徴的な吸収の凹みが部分的に目立ち、さらに全体的な強度低下、ノイズレベルのベース上昇に伴う波長域への影響が出ていることが分かった。

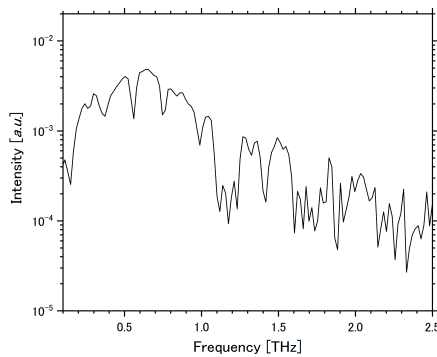


図 2 実験室まで輸送して測定したテラヘルツ帯の CER スペクトル波形の様子。測定系周辺の大気中水蒸気の吸収による影響が目立ち、減衰も多いことが分かった。

(3) そこで、図 3 に示すような測定系専用のアクリルで覆ったボックスを用い、取り出しポートから測定系までを施設既存の窒素ガスで空気置換し対応を行った。

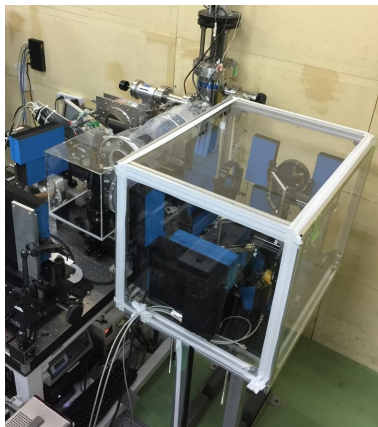


図 3 THz 波輸送取り出しポートから測定光学系全体をボックスで囲い、内部をガス置換し測定している様子。

乾燥窒素でテストを行い、光学系ボックス内の湿度は約 8%まで低下させることができた。乾燥窒素雰囲気中での同様のテラヘルツ帯の CER スペクトル波形の測定例を図 4 に示す。水蒸気による影響はまだ残っており、部分的に吸収の影響は出ているが、特に低周波側では吸収の影響が減っており、測定時の参照光に用いていたフィルターの厚さ由来の干渉効果が見える状態までは改善がされた。

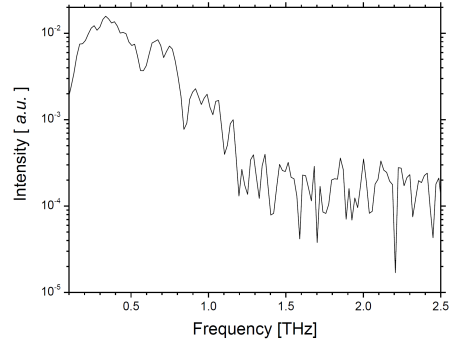


図 4 窒素置換後のテラヘルツ帯の CER スペクトル波形の様子。大気中水蒸気の吸収による影響が若干減り、特に低周波側の改善がされている。

(4) しかしまだ測定表示帯域全体において、吸収の影響が残っている事がわかる。全体的な強度を上げるために、吸収の影響を無くす必要があり、ドライエアー装置による超乾燥空気システムの導入、もしくは真空チャンバーを導入し、光学系全体を真空中で構築するなど改善する必要があることが分かった。また、施設側の都合上、他の実験やユーザー実験の影響もあるため、ビーム条件を大きく上げることが実施できなかったが、最大ビーム条件としては、パルス幅に関しては約 4 倍の 20 μ s、パルス繰り返しは 2.5 倍の 12.5 pps まで可能であるため、乾燥空気や真空チャンバーを用いた場合における、減衰の影響を無視した状態では数 mJ までの出力が得られる可能性がある。ただし、取り出した THz 波を用いて現状でユーザー利用実験を試験的に開始することができており、生体試料、錠剤タイプの薬剤などのイメージングや吸収スペクトル測定など応用実験へも進展して実施している。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計 4 件)

Norihiro Sei, Hiroshi Ogawa, Takeshi Sakai, Ken Hayakawa, Toshinari Tanaka, Yasushi Hayakawa and Kyoko Nogami, " Millijoule terahertz coherent transition radiation at LEBRA ", Jpn. J. Appl. Phys, 56, (2017)32401, 査読有, DOI:10.7567/JJAP.56.032401
T. Sakai, T. Tanaka, Y. Hayakawa, K. Hayakawa, K. Nogami, N. Sei, H. Ogawa, " Development of the High Power

Terahertz Light Sources at LEBRA Linac in Nihon University ”, International Particle Accelerator Conference (8th), (2017) 1437-1439, 査読無, DOI:10.18429/JACoW-IPAC2017-TUPAB049
N. Sei, H. Ogawa, T. Tanaka, Y. Hayakawa, T. Sakai, K. Hayakawa, K. Nogami, H. Ohgaki, H. Zen, “ Measurement of Electron-Bunch Length Using Coherent Radiation in Infrared Free-Electron Laser Facilities ”, International Particle Accelerator Conference (8th), (2017) 288-291, 査読無, DOI:10.18429/JACoW-IPAC2017-MOPAB073
Y. Hayakawa, K. Hayakawa, M. Inagaki, T. Kaneda, K. Nakao, K. Nogami, T. Sakae, T. Sakai, I. Sato, Y. Takahashi, T. Tanaka: “ Project on the superposition of beamlines for parametric X-ray radiation and coherent transition radiation in the THz region at LEBRA ”, J. Phys: Conf. Series 732 (2016) 012013 (doi: 10.1088/1742-6596/732/1/012013), 査読有

[学会発表](計15件)

Takeshi Sakai, Norihiro Sei, Toshinari Tanaka, Yasushi Hayakawa, Yoske Sumitomo, Ken Hayakawa, Yumiko Takahashi, Kyoko Nogami, Hiroshi Ogawa, “ Research and Development of High Power Coherent Terahertz Wave Sources at LEBRA Linac in Nihon University ”, 29th Linear Accelerator Conference, LINAC 18(国際学会)(2018)
Norihiro Sei, Hiroshi Ogawa, Toshinari Tanaka, Yasushi Hayakawa, Takeshi Sakai, Yoske Sumitomo, Yumiko Takahashi, Ken Hayakawa, Kyoko Nogami, Hideaki Ohgaki, Heishun Zen, “ Coherent edge radiation sources in Linac-based infrared free-electron laser facilities ”, 29th Linear Accelerator Conference, LINAC 18(国際学会)(2018)
T. Sakai, N. Sei, T. Tanaka, Y. Hayakawa, Y. Sumitomo, K. Nogami, K. Hayakawa and H. Ogawa, “ Development and Application of Terahertz Sources at LEBRA Linac in Nihon University ”, 日本物理学会第73回年次大会(2018)
N. Sei, H. Ogawa, T. Tanaka, Y. Hayakawa, T. Sakai, Y. Sumitomo, Y. Takahashi, K. Hayakawa, K. Nogami, H. Zen, H. Ohgaki, “ Study of coherent edge radiation for the measurement of the bunch length in an electron bunch ”, 日本物理学会第73回年次大

会(2018)
境 武志, 田中俊成、早川恭史、住友洋介、早川建、高橋由美子、野上杏子、清紀弘、小川博嗣, “ 日本大学電子線利用研究施設における高強度テラヘルツ光源開発 ”, 第31回放射光学会、放射光科学合同シンポジウム(2018)
清 紀弘、小川博嗣、全炳俊、大垣英明、田中俊成、早川恭史、境 武志、住友洋介、高橋由美子、早川建、野上杏子, “ 赤外自由電子レーザー施設におけるコヒーレント放射を用いた電子マイクロパルスのバンチ長の観測 ”, 第31回放射光学会、放射光科学合同シンポジウム(2018)
N. Sei, H. Ogawa, T. Tanaka, Y. Hayakawa, T. Sakai, K. Hayakawa, K. Nogami, H. Ohgaki, H. Zen, “ Measurement of Electron-bunch Length Using Coherent Radiation in Infrared Free-electron Laser Facilities ”, 8th International Particle Accelerator Conference (IPAC2017)(国際学会)(2017)
T. Sakai, T. Tanaka, Y. Hayakawa, K. Hayakawa, K. Nogami, N. Sei, H. Ogawa, “ Development of the High Power Terahertz Light Sources at LEBRA Linac in Nihon University ”, 8th International Particle Accelerator Conference (IPAC2017)(国際学会)(2017)
Takeshi Sakai, Toshinari Tanaka, Yasushi Hayakawa, Yoske Sumitomo, Ken Hayakawa, Kyoko Nogami, Norihiro Sei, Hiroshi Ogawa, “ Research and development of the high power THz light sources at LEBRA in Nihon University ”, 第14回日本加速器学会年会(2017)
Kyoko Nogami, Ken Hayakawa, Toshinari Tanaka, Yasushi Hayakawa, Takeshi Sakai, Yoske Sumitomo, Isamu Sato, Norihiro Sei, Hiroshi Ogawa, Atsushi Enomoto, Satoshi Ohsawa, Shigeki Fukuda, Tetsuo Shidara, Kazuro Furukawa, Shinichiro Michizono, Kimichika Tsuchiya, Mitsuhiro Yoshida, Takakazu Shintomi, Shigeru Yamamoto, “ Status of electron linac and light source at LEBRA in Nihon University ”, 第14回日本加速器学会年会(2017)
T. Sakai, N. Sei, T. Tanaka, Y. Hayakawa, Y. Sumitomo, K. Nogami, K. Hayakawa and H. Ogawa, “ Research and Development of Terahertz Sources at LEBRA in Nihon University ”, 日本物理学会第72回年次大会(2017)
境 武志、田中俊成、早川恭史、早川建、野上杏子、清紀弘、小川博嗣, “ 日

本大学 LEBRA 電子線形加速器を用いたテラヘルツ波光源の研究開発”，第 30 回放射光学会年会・放射光科学合同シンポジウム(2017)

清 紀弘、小川 博嗣、田中俊成、早川恭史、境 武志、早川 建、野上杏子，“赤外自由電子レーザー施設におけるコヒーレント放射を用いた電子バンチ長評価の研究”，第 30 回放射光学会年会・放射光科学合同シンポジウム(2017)

早川恭史，境 武志，“日本大学電子線利用研究施設(LEBRA)の現状”，第 30 回放射光学会年会・放射光科学合同シンポジウム(2017)

早川恭史、早川 建、中尾圭佐、野上杏子、境 武志、清 紀弘、田中俊成，“日大 LEBRA-PXR ビームラインにおける THz 波-X 線ビーム重畳システムの開発”，第 13 回日本加速器学会年会(2016)

6 . 研究組織

(1)研究代表者

境 武志 (SAKAI, Takeshi)

日本大学・理工学部・助教

研究者番号：20409147