

令和元年6月10日現在

機関番号：82118

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2016～2018

課題番号：16H05991

研究課題名(和文)共振器型回折放射による誘導放出テラヘルツ光源の開発

研究課題名(英文)Development of terahertz source via stimulated resonant diffraction radiation

研究代表者

本田 洋介 (Honda, Yosuke)

大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・加速器研究施設・助教

研究者番号：40509783

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 17,700,000円

研究成果の概要(和文)：短バンチ電子ビームが導体板の近傍を通過する際に、コヒーレント回折放射(CDR)と呼ばれるテラヘルツ帯域の電磁波が発生する。穴あきミラーで構成した光共振器に、その基本周波数に一致する繰り返しのマルチバンチビームを通過させる時、ミラーの穴で発生した各バンチからのCDRがコヒーレントに足し合わされ、強いテラヘルツ放射のエネルギーが取り出される(誘導放射)。誘導放射の現象を実験的に確認し、大強度テラヘルツ光源への応用を検討した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

近年の先端的な加速器で得られる、低エミッタンス、短バンチ、高繰り返し、の電子ビームを用いると、穴あき共振器に損失無くビームを通過させるレイアウトが実現できるようになった。テラヘルツ帯域で回折放射による誘導放射の現象を世界で初めて実験的に示した。コンパクトERL試験加速器のような超伝導線形加速器において、誘導回折放射による大強度広帯域テラヘルツ光源が実現可能であることを示した。

研究成果の概要(英文)：When a short bunch electron beam passes near the boundary of conductive plate, a electromagnetic radiation in terahertz frequency range, called as coherent diffraction radiation (CDR), is produced.

When a multi-bunch electron beam passes through an optical cavity which consists of mirrors with a hole, it can produce a high power terahertz radiation by coherent stacking of CDR between bunches (Stimulated radiation). We experimentally confirmed the stimulated radiation process and discussed its application for a high power terahertz source.

研究分野：加速器科学

キーワード：テラヘルツ 電子ビーム コヒーレント放射

1. 研究開始当初の背景

電波から可視光、ガンマ線に至るまで、広範な周波数の電磁波が利用されている。その中でテラヘルツ帯と呼ばれる、周波数で0.3-3THzの領域は、これまであまり利用研究が進んでこなかった。電波技術と光技術の狭間にあつて、光源および検出器が未発達であった事がその主な理由である。一方で、テラヘルツ光のエネルギーは、分子の振動や回転運動のエネルギーに一致し、物質と強く相互作用する。このエネルギー領域には分子構造による興味深い現象が沢山あり、光源でそれらを励起して詳細な解析が出来ることと期待されている。

加速器によるテラヘルツ光源は、従来の発生装置をはるかに凌ぐ大強度を実現できる。当然、大平均強度電子加速器が必要であるが、近年、エネルギー回収型線型加速器(ERL)の開発が進展し、MW級のビーム出力の利用が現実のものとなってきている。国内でもKEKにcERLと呼ばれるERL試験加速器が建設され、テラヘルツ光源としての応用は研究テーマの一つである。

大強度のテラヘルツ光の発生のためには、効率的にビームのエネルギーを放射に変換することが基本的に重要である。誘導放射と呼ばれるメカニズムを実現できると、放射効率が飛躍的に上がると考えられ、大強度光源を考えるうえで魅力的である。我々は、コヒーレント回折放射による誘導放射テラヘルツ光源を検討した。これは原理的にはビームを損失せずに、広帯域の放射を発生することができる。これまで、コヒーレント遷移放射(CSR)およびコヒーレントシンクロトロン放射(CSR)において、主にミリ波の領域で、低い増幅率で誘導放射の原理試験が行われている。テラヘルツ領域で、高い増幅率において、回折放射(CDR)での実証試験が待たれる状況であった。

2. 研究の目的

回折放射という放射メカニズムと、光共振器を用いた誘導放射を組み合わせた、新しい方式の大強度広帯域テラヘルツ光源を開発する。誘導放射の原理により、電子ビームエネルギーからテラヘルツ放射に効率良くエネルギーが変換されることを実証するのが目的である。

この方式は、ERL加速器に代表されるような、近年の先端的電子ビームで初めて可能になる、高繰り返し、低エミッタンス、短バンチビームの特性を生かしたものである。

回折放射(Diffraction Radiation)は、相対論的な荷電粒子が導体の近傍を通過する際に発生する電磁波である。穴あきの導体板に電子ビームを通過させると、ビーム進行方向にドーナツ状の角分布でラジアル偏光の電磁波が放射される。時間幅が100フェムト秒以下の短バンチ電子ビームの場合、テラヘルツ帯においては、バンチ内の個々の電子による放射が位相を揃えて(コヒーレントに)起こり、バンチ電荷の2乗に比例した強度の放射が得られる。

本研究は、誘導放射と呼ばれる現象を用いて、コヒーレント回折放射(CDR)をさらに発展させるものである。中央には穴が開いた光共振器を用い、電子ビームは共振器を通過する。この時、共振器鏡を起点としてCDRが発生し、共振器内部を往復し続けることになる。電子ビームバンチが次々にやってくる場合、共振器内の放射の往復時間がバンチ間隔と一致すると、後続のバンチは、既に共振器内を往復している放射と同位相でCDRを放射することになる。異なるバンチ間で放射がコヒーレントに(振幅の重ね合わせで)積上り、その結果、バンチ数の2乗に比例した強度の成長が起こる。これは、既存の放射がビームにたいして減速電場として働き、ビームが失ったエネルギーが効率良く放射として取り出されると理解することもできる。既存の放射に誘導されてより強い放射が取り出されることから、誘導放射と呼ばれる。共振器内部のパワーの一部を外部に取り出すことで、テラヘルツ光源として利用できる。

誘導放射CDRの実証試験を行い、計算と比較して、定式化の検証を行う。また、実際の加速器で実用上に問題が無いかを検証する。

3. 研究の方法

KEKのコンパクトERL試験加速器は、高繰り返し(1.3GHz)で、低エミッタンス(1 μ m)、短バンチ(100fs)の電子ビームが実現できる施設で、本計画の誘導回折放射の研究に最適である。試験用の共振器装置を開発し、cERLの周回部に設置してビーム試験を行い、誘導回折放射の現象を確認する。

2枚の穴あき凹面鏡を向かい合わせにした構成の光学共振器を製作する。片方のミラーは位置を調整できるようにし、共振器長を変えることができるようにする。これにビームを通過させて、共振器長をスキャンし、ビーム繰り返しと共振器長の条件が合ったところで、共振器内部に励起されたテラヘルツ光が増幅されることを実証する。

ビームを共振器の小さな穴に損失無く通過させるためには、低エミッタンスビームとビームの収束、精密なビーム軌道の調整が必要である。入射器のビーム調整を行い、規格化エミッタンスを最小化する。また、装置設置部の収束電磁石と軌道補正電磁石の調整も行う。

ビーム損失を確認するために、共振器の近くにビームロスモニタを設置し、これを最小化する

ように調整を行う、また、ビーム損失量の評価を行う。

短バンチビームを実現するには、ERL加速器のバンチ圧縮運転が必要である。バンチ圧縮を最適化するには、加速空洞をオフレスト位相で運転し、バンチにエネルギー勾配をつけるとともに、アーク部電磁石による分散の精密な調整が必要である。また、調整のためには、バンチ長のモニタシステムも必要である。バンチ長に応答する遷移放射強度モニタを開発し、これを参照しながらビーム調整を行う。また、遷移放射の自己相関干渉計による分光システムを開発し、バンチ長の確認を行う。

4. 研究成果

短バンチビームの調整を行うために、テラヘルツ帯域のコヒーレント遷移放射によるビームモニタシステムを開発した。これを用いてバンチ圧縮運転のビーム調整を行った。さらに、自己相関干渉計によりバンチ長を測定した。バンチ圧縮調整手順が確立し、バンチ長250fs以下を確認し論文(3)にまとめた。

コンパクトERL周回部に真空チェンバを設置し、ビーム軌道上に光学共振器を設置した。共振器は設置前に機械的にアライメント調整を行っており、共振器長だけを遠隔から精密にスキャンできるようにした。

共振器内部にスクリーンモニタを設置し、ビーム収束の調整を行なった。RMSビームサイズ250 μ m程度に絞られたビームを確立し、直径3mmの光学共振器の穴を損失2500ppmで通過させることに成功した。

共振器から漏れ出したテラヘルツ光を大気中に取り出し、液体ヘリウム冷却ボロメータを用いたテラヘルツ測定系で測定するシステムを構築した。共振器長をスキャンしながらテラヘルツ光強度を観測し、誘導放射の信号を示す、鋭いピークを確認した。これは、広帯域の共振器モードが同時発振している証拠である。テラヘルツ帯域の回折放射で誘導放射を示した世界初の成果であり、論文(2)にまとめた。

ビームエネルギーがテラヘルツ放射に変換される結果として、ビームエネルギーが下がる。これを光学共振器下流の分散部のスクリーンモニタで測定した。共振器長をスキャンし、テラヘルツ光が発生すると同時にビームエネルギーが下がることが確認できた。エネルギー変化量を計算と比較し、設計どおりの効率で放射が発生していることを確認した。この結果と設計計算の詳細をまとめた論文(1)をまとめた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 (計 4 件)

- ① [Y.Honda](#) et al. 2019, Phys. Rev. Acc. Beam. 22, 040703
- ② [Y.Honda](#) et al. 2018, Phys. Rev. Lett. 121, 184801
- ③ [Y.Honda](#) et al. 2017, Nucl. Instrum. Meth. A 875, 156
- ④ [M.Akemoto](#) et al. 2017, Nucl. Instrum. Meth. A 877, 197-219

〔学会発表〕 (計 10 件)

- ① [本田洋介](#) 他, “共振器型回折放射による広帯域テラヘルツ放射発生” 日本物理学会 (2019)
- ② [本田洋介](#) 他, “コンパクトERLにおけるCDRテラヘルツビームライン” 日本放射光学会 (2019)
- ③ [Y.Honda](#) et al. , “Observation of Resonant Stimulated Radiation from a Multi-bunch Electron Beam Passing Through an Optical Cavity, Linac conference 2018, TU1P03 (2018)
- ④ [本田洋介](#) 他, “共振器型回折放射による広帯域テラヘルツ自由電子レーザーの発振”, 加速器学会 WEOLP04, (2018)
- ⑤ [本田洋介](#) 他, “共振器モデルによるコヒーレント放射の解釈”, 加速器学会, (2018)
- ⑥ [本田洋介](#) 他, “cERLにおけるCDRテラヘルツビームラインの計画”, 加速器学会, (2018)
- ⑦ [Y.Honda](#) et al. “Broadband THz FEL oscillator via Resonant Coherent Diffraction Radiation at ERL Test Accelerator in KEK” FEL conference 2017 (2017)
- ⑧ [本田洋介](#) 他, “共振器型CDRによる広帯域THz光源”, 加速器学会, (2017)
- ⑨ [Y.Honda](#) et al. “Resonant Coherent Diffraction Radiation System at ERL Test Accelerator in KEK” ERL2017 (2017)
- ⑩ [Y.Honda](#) et al. International Particle Accelerator Conference 2017, MOPVA018

(2017)

〔図書〕（計 0 件）

〔産業財産権〕

○出願状況（計 0 件）

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年：
国内外の別：

○取得状況（計 0 件）

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年：
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名：
ローマ字氏名：
所属研究機関名：
部局名：
職名：
研究者番号（8桁）：

(2) 研究協力者

研究協力者氏名：アリシェフ アレクサンダー
ローマ字氏名：Alexander Aryshev

研究協力者氏名：加藤 龍好
ローマ字氏名：Ryukou Kato

研究協力者氏名：宮島 司
ローマ字氏名：Tsukasa Miyajima

研究協力者氏名：帯名 崇
ローマ字氏名：Takashi Obina

研究協力者氏名：島田 美帆
ローマ字氏名：Miho Shimada

研究協力者氏名：高井 良太
ローマ字氏名：Ryota Takai

研究協力者氏名：山本 尚人
ローマ字氏名：Naoto Yamamoto