

科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成25年 5月26日現在

機関番号：32689

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2011～2012

課題番号：23740203

研究課題名（和文） 極短バンチ生成RF電子銃開発と大強度テラヘルツ光発生の実証試験

研究課題名（英文） Study on an rf electron gun for ultra-short bunch and demonstration of a coherent THz generation

研究代表者

坂上 和之（SAKAUE KAZUYUKI）

早稲田大学・理工学術院・助教

研究者番号：80546333

研究成果の概要（和文）：極短バンチ生成用高周波電子銃(ECC-RF-Gun)の最適化設計を行い、実際に製作を行い、最終的にビーム生成試験及びビームからの放射の計測までを行った。設計・製作ともに非常に成功裏に遂行することができ、計算では89fsもの極短バンチを生成できるシステムを構築することができた。ビーム試験においては電子ビームの生成を確認するとともに極短バンチでしか得られないコヒーレント放射を確認することができた。また、放射の周波数から概算することで500fs以下の電子バンチ長が得られていることを確認した。

研究成果の概要（英文）：Design of ECC-RF-Gun for ultra-short bunch generation, manufacturing of ECC-RF-Gun, beam experiments by ECC-RF-Gun and measurement of coherent radiation were performed in this project. We confirmed ECC-RF-Gun can produce 89fs electron bunch by simulation code PARMELA/GPT. The experimental results showed that the 0.2THz was coherently produced, which means that the less than 500fs bunch was successfully generated.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	3,600,000	1,080,000	4,680,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：極短バンチビーム・高周波電子銃・テラヘルツ光

1. 研究開始当初の背景

テラヘルツ光は非破壊検査・分光分析・臨床診断等の様々な応用の可能性の広がりつつある波長域の光であるが、未踏波長域と呼ばれ、光源・検出器ともに他の波長帯と比べて開発が遅れているのが現状である。大規模(20m×20m以上)の加速器システムを用いた自由電子レーザーでは非常に高強度なテラヘルツ光を生成することが可能であるが、実用化を見込むためには同等程度の出力を持ち、小型な光源が求められていた。そこで本研究では小型な電子加速器システムを用いて自由電子レーザーと同等程度のテラヘルツ光源を構築することを考案し、試験する。

通常電子銃と呼ばれる電子を発生させ、加速する機器においては電子の初期エネルギーがほぼゼロから加速していくために数ps程度の時間幅が限界であった。研究代表者が新たに考案した電子銃は高周波空洞形状を工夫することによって電子をほぼ光速まで加速した後に圧縮をすることが1つの空洞によって可能であるために100fs程度の極短バンチ電子ビームの生成が可能となる。このような極短バンチビームを用いてテラヘルツ光を生成することによって、前述非常に高強度なテラヘルツ光源を比較的小型(2m×2m程度)にて構築することが可能となる。

2. 研究の目的

本研究課題では(1)極短バンチ生成用電子銃の最適化設計を行い、(2)電子銃空洞を製作、そして(3)テラヘルツ光を生成・評価することによってその性能を確かめることを目的としている。これにより2m×2m程度の小型高強度テラヘルツ光源が可能となるとともに、非常に品質の良い極短バンチ電子ビームの生成が可能となり、他の応用も広がる電子源の実現が見込める。特に極短バンチの電子ビーム計測は非常に困難であるため、テラヘルツ光をコヒーレントに生成できることを確認することによって間接的ではあるが極短バンチが実現できていることを観測する。

3. 研究の方法

(1)極短バンチ生成用電子銃の最適化設計研究はまず極短バンチ生成用電子銃の最適化設計から行う。基本コンセプトとしては従来の高周波電子銃空洞に新たに1セルを追加することによって電子バンチに線形なエネルギー変調を施し、速度差及び電磁石を用いた軌道差によってバンチを圧縮する。電子銃空洞には生成されるバンチの変調の他にも空洞のQ値やフィールドのバランスなど様々なパラメータを考慮しなければならない。したがって様々な空洞形状をSuperFishと呼ばれる電磁場解析コードによって生成し、これを組み込む形でGPT(General Particle Tracer)/PARMELA(Phase And Radial Motion in Electron Linear Accelerators)と呼ばれる粒子シミュレーションコードを行い、結果をフィードバックすることで最適形状を模索する。考慮したパラメータとしては最終到達バンチ長はもちろんのこと、その位置(ビームライン上のカソードからの距離)、空洞のQ値(入力できる高周波に制限があるため)などである。

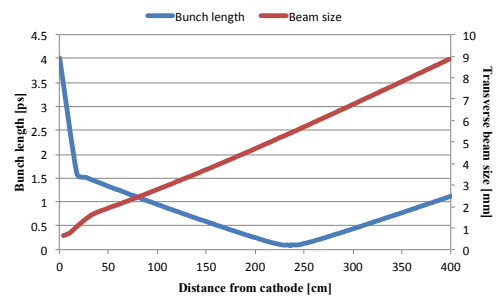
(2)極短バンチ生成用電子銃の製作と評価
極短バンチ生成用電子銃(ECC-RF-Gun)の製作は協力研究者のKEK 高富氏の下行った。空洞壁面における電解放出を低減し、Q値を向上させるためにダイヤモンドバイトを用いた超精密旋盤を用いて行った。加工したセルはろう付けによって接着し、構成を行った。完成後ネットワークアナライザによって空洞の特性を評価することで(1)にて設計した通りの空洞ができているかを確認した。

(3)大強度テラヘルツ光生成の実証と評価
製作・評価完了した高周波電子銃を早稲田大

学に設置している加速器システムに組み込み、ビーム生成試験を行った。電子ビームからの放射として、軌道放射・遷移放射を取り出し、テラヘルツ領域に感度を持つ狭帯域の検波器を用いてどの程度高周波までの放射を得られているかを確認することによってバンチ長を概算する。

4. 研究成果

(1)極短バンチ生成用電子銃の最適化設計前節に示した通り SuperFish と GPT/PARMELA コードを何度もフィードバックして設計の最適化を行った。研究開始当初は200fs程度までしか得られなかった到達バンチ長は100fsを切る89fsまで計算上得られることを確認するとともに、Q値を向上させるために様々な工夫を行い、設計上13000を確保した。主な工夫としては空洞の形状をこれまでの円筒形状から曲率を持った形状にすることによって表面積を小さくしたこと、最終のECCe11のビームポートを小さくしたことが挙げられる。以下の図1にビームシミュレ-



シヨンの結果を示す。横軸は電子を生成するカソードからの距離であり、距離を追うごとにバンチ長が短く圧縮されることがわかる。図1：PARMELAによるビームシミュレーション結果

また、赤線はビームサイズを示しており、バンチを圧縮することによる空間電荷効果をビームの横方向を大きくすることによって緩和している。最終的な到達バンチ長は89fsと極短バンチを実現するとともにカソードからの距離2.3mにおいて実現していることがわかる。

(2)極短バンチ生成用電子銃の製作と評価
(1)において最適化した形状を基に実際に製作する空洞の図面を作製し、KEKと共同で製作を行った。前述の通り、内面はダイヤモンドバイトによる超精密加工を行っており、鏡面になっている。完成した空洞の写真を以下に示す。

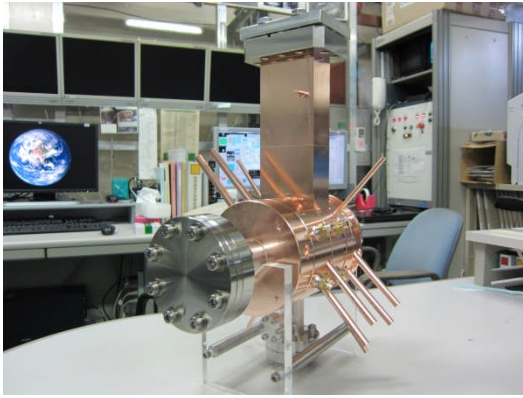


図2：完成した ECC-RF-Gun 空胴の写真
完成した空胴の評価を行い、空胴の Q 値は 10860、フィールドバランスはほぼ設計通りに完成した。

(3)大強度テラヘルツ光生成の実証と評価
完成した電子銃空胴を早稲田大学加速器システムに導入し、ビーム試験を行った。投入した高周波の電力は 10MW で、最適設計値までは達成できないものの、200fs 程度の電子バンチは得られるという実験環境でビーム試験を行った。電子ビームからの放射を計測することによって間接的ではあるがバンチ長を概算した。放射はターゲットに照射することによる遷移放射光、電磁石によって曲げることによる軌道放射光の両方を用いたが、ここでは後者の軌道放射光 (SR) についてのみ報告する。どちらの放射でもほぼ同じ結果が得られている。電子ビームから得られる放射の周波数成分を狭帯域の検波器によって計測することによってバンチ長を概算した。まずは放射強度と電子バンチ内の電子数の関係を示す。

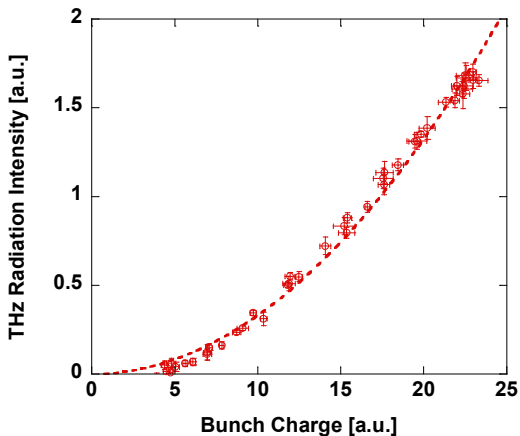


図3：電子数(電荷量)と放射強度の関係
電子数に対して放射が2乗で強度を増していることがわかる。通常の放射においては電子数に比例するが、2乗で増していることで、放射の波長よりもバンチ長が短く、コヒーレントに放射が生成していることがわかる。また、検波器の感度から考えてもコヒーレント放射が生成できていない場合には検出限界

以下であるため検出されることがつまりコヒーレントであることを示している。次にさまざまな周波数帯の検波器を用いて検出試験を行った結果に関して示す。

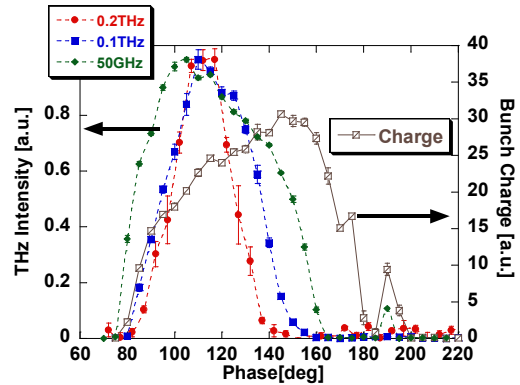


図4：電子ビームの加速位相と放射強度・バンチ電荷量の関係

図4を見てわかるとおり、0.2THz までの放射が検出されていることがわかる。また、放射の周波数に応じて放射の検出が可能な領域が変化しており、この結果はほぼシミュレーションに一致する。0.2THz で十分な放射が検出されたことを勘案すると 500fs 以下までは十分に圧縮された電子バンチが得られていると概算できる。また、さらにコヒーレント放射が得られていることから十分応用に堪える光源を構築できたことを示している。しかしながらより高い周波数の放射は現時点で検出できていない。これは検出器のアーチャーが高周波になるごとに小さくなるためであると考えている。0.1THz の検波器に対して 0.3THz では径で 1/3、面積としては約 1/10 となってしまうことに起因すると考えている。今後はより高精度にバンチ長を計測できる手法の導入を検討していくとともにテラヘルツ光の応用に関して検討していく。

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9件)

① 坂上和之、Alexander Aryshev、荒木栄、浦川順治、武田彩希、照沼信浩、福田将史、三好敏喜、鷲尾方一、KEK-LUCX におけるレーザーコンプトン散乱小型 X 線源の開発、日本加速器学会誌、査読あり、第 10 巻 1 号 2013 年

② Masao Kuriki, Hokuto Iijima, Seiichi Hosoda, Ken Watanabe, Hitoshi Hayano, Junji Urakawa, Goro Isoyama, Ryuko Kato, Keigo Kawase, Ayaka Kuramoto, Shigeru Kashiwagi, Kazuyuki Sakaue, Ims Pulse Beam Generation and Acceleration by Photo-cathode RF gun and Super-conducting Accelerator, Jpn. J. Appl. Phys., 査読あり

り, 52(2013)056401-1-7.

DOI: 10.7567/JJAP.52.056401

③ Yuji Hosaka, Ryosuke Betto, Kazuyuki Sakaue, Ryunosuke Kuroda, Shigeru Kashiwagi, Kiminori Ushida, Masakazu Washio, Construction of nanosecond and picosecond pulse radiolysis system with supercontinuum probe, Radi. Phys. Chem., 査読あり, 84, (2013)pp. 10-13.

DOI: 10.1016/j.radphyschem.2012.06.055

④ 福田将史, Alexander Aryshev, 荒木栄, 本田洋介, 坂上和之, 照沼信浩, 浦川順治, 鷺尾方一, KEK におけるレーザーコンプトン散乱を用いた小型 X 線源の開発の現状とアップグレード計画, 日本加速器学会誌, 査読あり, 第 9 巻 3 号 2012 年

⑤ Kazuyuki Sakaue, Akira Endo, Masakazu Washio, Design of high brightness laser-Compton source for EUV and soft X-ray wavelengths, SPIE Journal of Micro/Nanolithography, MEMS, and MOEMS (JM3), 査読あり, 11(2), (2012) 021124-1-7.

DOI: 10.1117/1.JMM.11.2.021124

⑥ 渡邊謙, 早野仁司, 浦川順治, 松本利広, 福田将史, 栗木雅夫, 飯島北斗, 坂上和之, 倉本綾佳, Mathieu Omet, L-band 常伝導 RF 電子銃による 1ms パルス長電子ビームの生成, 日本加速器学会誌, 査読あり, 第 9 巻 2 号 2012 年

⑦ K. Sakaue, T. Aoki, M. Washio, S. Araki, M. Fukuda, N. Terunuma, J. Urakawa, First refraction contrast imaging via Laser-Compton Scattering X-ray at KEK, AIP Conf. Proc., 査読あり, 1466, (2012) pp. 272-277.

DOI: 10.1063/1.4742304

⑧ Kazuyuki Sakaue, Hitoshi Hayano, Shigeru Kashiwagi, Ryunosuke Kuroda, Akihiko Masuda, Tatsuya Suzuki, Toshikazu Takatomi, Nobuhiro Terunuma, Junji Urakawa, Masakazu Washio, Cs-Te photocathode RF electron gun for applied research at Waseda University, Nucl. Instrum. Meth., 査読あり, B269 (2011) 2928-2931.

DOI: 10.1016/j.nimb.2011.04.041

⑨ Abhay Deshpande, Sakae Araki, Masafumi Fukuda, Kazuyuki Sakaue, Nobuhiro Terunuma, Junji Urakawa, Masakazu Washio, Experimental results of an rf gun and the generation of a multibunch beam, Phys. Rev. STAB., 査読あり, 14(2011)063501.

DOI: 10.1103/PhysRevSTAB.14.063501

[学会発表] (計 7 件)

① 坂上和之, 極短バンチ生成を目指した高周波電子銃開発, 第 10 回高輝度高周波電子銃研究会, 2013 年 1 月 10 日, 姫路

② Kazuyuki Sakaue 他, Direct diagnostics concept for high power CO2 laser at the LPP focus spot, 2012 International Workshop on EUV and Soft X-ray Sources, 2012 年 10 月 9 日, Dublin(Ireland)

③ 坂上和之他, 極短バンチ生成用光陰極高周波電子銃開発, 第 9 回日本加速器学会年会, 2012 年 8 月 9 日, 大阪

④ 坂上和之他, STF 量子ビーム電子銃用ロングパルストレインレーザーシステム開発, 第 9 回高輝度高周波電子銃研究会, 2012 年 3 月 9 日, つくば

⑤ Kazuyuki Sakaue 他, Recent progress of a photocathode RF electron gun at Waseda University, 11th Trombay Symposium on Radiation & Photochemistry (TSRP), 2012 年 1 月 4 日, Mumbai(India)

⑥ Kazuyuki Sakaue 他, Design of a chirping cell attached rf gun cavity for ultrashort electron generation, International Particle Accelerator Conference 2011, 2011 年 9 月 6 日, San Sebastian(Spain)

⑦ 坂上和之他, 極短バンチ電子ビーム生成用エネルギーチャープセル付高周波電子銃開発, 第 8 回加速器学会年会 2011 年 8 月 2 日, つくば

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 1 件)

名称: 光陰極高周波電子銃, および光陰極高周波電子銃を備えた電子線装置

発明者: 坂上和之, 鷺尾方一

権利者: 学校法人 早稲田大学

種類: 特許

番号: 特開 2012-004069

出願年月日: 2010 年 6 月 21 日

国内外の別: 国内

○取得状況 (計 0 件)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

坂上 和之 (SAKAUE KAZUYUKI)

早稲田大学・理工学術院・助教

研究者番号: 80546333