

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 10 日現在

機関番号：15401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25390126

研究課題名(和文) 光加速器のための位相空間制御によるマイクロバンチ構造の生成

研究課題名(英文) Micro-bunch Formation with the phase-space rotation for the dielectric accelerator

研究代表者

栗木 雅夫 (KURIKI, MASAO)

広島大学・先端物質科学研究科・教授

研究者番号：80321537

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円

研究成果の概要(和文)：時間方向に密度変調された電子ビームは自由電子レーザーやコヒーレント輻射、光加速器のためのドライブビームなど、コヒーレントが介在する電子ビーム応用において大きな役割を果たす。本研究では、電子ビームにおける空間方向変調と位相空間回転を組み合わせることにより、大きな操作性をもって、幅広いパラメーターを有する密度変調マイクロバンチビーム構造をつくることを目的として研究を行った。その結果、本方式により密度変調ビームが生成可能であり、密度変調FELなどに应用可能であることが示唆された。

研究成果の概要(英文)：The temporally modulated electron bunch is useful for applications employing coherent phenomena of electron beam such as FEL (Free Electron Laser), coherent radiation, drive beam for the dielectric accelerator, etc. In this project, the temporally modulated bunch (micro-bunch structure) generation with the spatial modulation and the phase-space rotation was studied. According to the result, it is confirmed that the micro-bunch structure can be generated by this method with a large operability. It can be applicable for the pre-bunched FEL and potentially for the drive beam of the di-electric optical accelerator.

研究分野：加速器科学

キーワード：自由電子レーザー 位相空間回転 コヒーレント輻射 光加速器

1. 研究開始当初の背景

電子ビームとアンジュレーターなどの電磁場との相互作用による輻射現象は、現象そのものの研究のみならず、放射光、自由電子レーザー、準単色X線生成などの利用研究がひろがっている。電子ビームは多数の電子の集まりであり、発生する電磁場の波長に比べて大きな空間的あるいは時間的広がりをもっており、発生する電磁場は個々の電子が発生する輻射のインコヒーレントな重ね合わせであり、そのパワーは粒子数の二乗根に比例する。一方、なんらかの方法により電子の空間的・時間的広がりを電磁場の波長よりも短くできた場合、電磁場はコヒーレントな重ね合わせとなり、そのパワーは粒子数に比例することとなり、インコヒーレントな場合に比べて輻射パワーを大幅に増大できる。自由電子レーザーは自己変調作用によりコヒーレンスを生成するプロセスであるが、それには比較的大規模な施設が必要である。一方、超短パルス電子ビームを光カソードなどの技術により直接生成する方法が試みられているが、電子の持つ自己散逸力(空間電荷力)により必ずと限界がある。位相空間回転によるビーム制御は、分布を最適化することで、ビーム全体の品質向上をすることなく、自由電子レーザーの発振効率を向上させることを意図して検討されてきた。

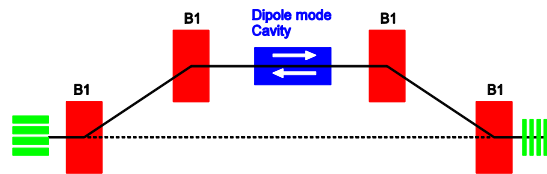
2. 研究の目的

従来型の高周波と金属空洞を用いた加速器は、パワー効率や放電限界などから、これ以上の加速勾配の飛躍的向上が難しい状況にある。加速効率は電磁場の波長の二乗根の逆数に比例するから、より波長の短い電磁場が加速効率の向上には有利である。レーザープラズマ加速やプラズマウエーク加速など、プラズマ中に誘起される短波長の電磁場による効率的加速の研究が進められているが、新規加速方式の中で誘電体構造内に比較的長波長の光を閉じ込めて行う誘電体加速は、従来の高周波加速とプラズマ加速との中間的性格を有する。プラズマ加速の問題点はその安定性や再現性にあるが誘電体加速において加速構造そのものは固体であり安定した境界条件を提供する。一方で、加速場をつくるのに必要な大きなパワーの光をどのように導入するかは大きな課題である。短パルス電子ビームを誘電体加速構造に入射した場合、そのパルス長が誘電体における加速モードの波長に比べて充分短ければ、ビームのエネルギーは効率的に誘電体内の光加速モードへと変換され、誘電体内には光加速による高い加速勾配が発生する。本研究は、THz領域における光加速を仮定し、THz領域のマイクロバンチ構造(密度変調)をもったビームの生成を目的とした。マイクロバンチ構造の生成方法として、空間変調と位相空間回転の組み合わせを試みた。この方法においては、機械的なスリットなどにより、横方向空間に

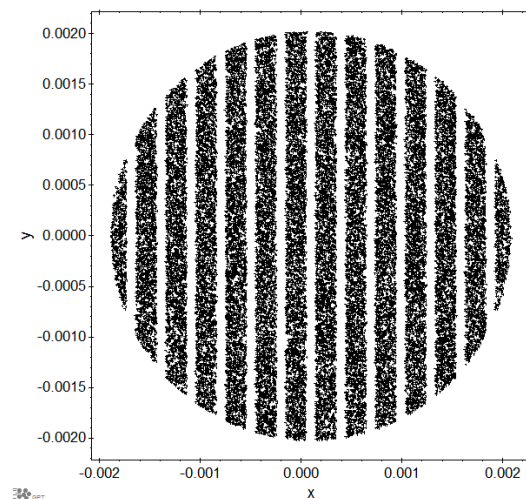
おいてビームを櫛状に切り取ることで密度変調を導入する。このビームに対して、位相空間回転を適用し、横方向の空間変調を、進行方向の密度変調へと変換する。これにより、ビームの密度の時間方向の変調、すなわちマイクロバンチ構造が作られる。マイクロバンチ構造を持ったビームは、その構造に比べて長い波長をもった電磁波が介在するすべての相互作用において、コヒーレントとなる。

3. 研究の方法

機械的スリットと位相空間回転をくみあわせることで、直接つくることがきわめて困難なマイクロバンチ構造を有するビームの生成について、主にシミュレーションによる検討をおこなった。Pulsar Physics社のビームトラッキングコードのGPT(General Particle Tracer)を使用した。また、FELについてのシミュレーションにはGENESIS(PSI)を使用した。下に位相空間回転のためのビームラインの構成をしめす。ビームラインはシケインと二重極モードのRF空洞からなっており、このビームラインを通過することで、ビームのx空間座標(横方向)とz空間座標(進行方向)が完全に交換される。

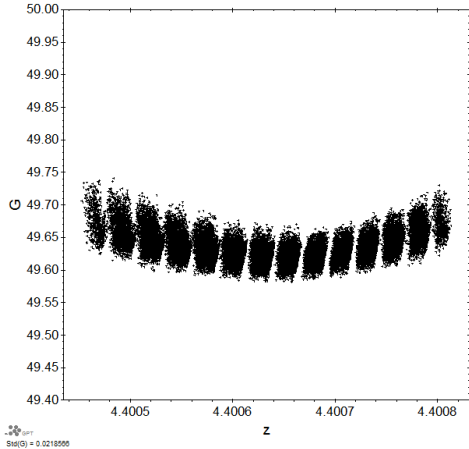


入射ビームをスリットによる切り出し、次のような空間変調を導入する。この横方向に

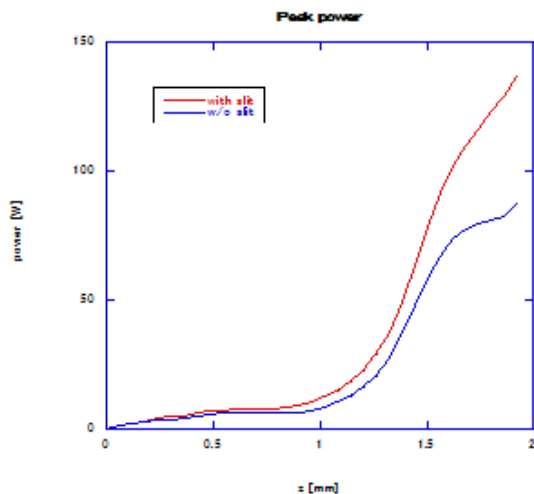


変調されたビームをこのビームラインに通過させるとその変調はz方向、すなわち進行方向に移動する。下に横軸に進行方向、縦軸にエネルギーを取りビームライン出口での粒子分布をしめす。進行方向の密度変調、すなわちマイクロバンチ構造が生成されてい

ることがわかる。



この生成されたマイクロバンチ構造を有するビームをアンジュレータに入射した。そのときのパワーを下に示す。比較のためにスリットありの場合とスリット無しの場合を示している。この結果より、スリットあり、すなわちマイクロバンチ構造を導入したほうが放射パワーが増大していることが確認できる。



4. 研究成果

GPTを用いたシミュレーションによる検討から、機械的スリットと位相空間回転をくみあわせることで、マイクロバンチ構造を有するビームの生成が可能であることが確認された。また、生成されたマイクロバンチ構造を有するビームをアンジュレータに入射したところ、通常のインコヒーレントな放射光発生に比べて、有意な放射パワーの増大がみられた。これはマイクロバンチ構造により放射のコヒーレント成分が増加したことを表している。このようにマイクロバンチ構造の生成とコヒーレント放射の増大を確認することができた。光加速器のドライバーも基本的にはコヒーレントな相互作用の一種であるから、マイクロバンチ構造による加速場の誘起が本方式で可能であることは明白である。一方でその実用を考えた場合、本献

課題でしめされたコヒーレント成分の増大は充分とは言えず、その向上が残された課題と言える。

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 0件)

(学会発表)(計 8件)

1. 栗木雅夫、根岸健太郎、清宮裕史、加藤龍好、大見和史、浦川順治、柏木茂、「位相空間回転によるマイクロバンチ構造の生成とその応用」、日本物理学会年会、仙台市(2016・3・20)
2. M. Kuriki, Y. Seimiya, R. Kato, S. Chen, K. Ohmi, J. Urakawa, S. Kashiwagi, "FEL Enhancement by Microbunch Structure Made With Phase-Space Rotation", *Proc. Of IPAC2015*, Richmond, VA, USA(2015・5・5).
3. M. Kuriki, "FEL Enhancement by Micro-bunch structure Made with Phase-space rotation", Asian Forum for Accelerator and Detector(AFAD2015), Hsinchu, Taiwan(2015・1・26)
4. M. Kuriki, et al., "High Gain FEL with a Micro-bunch Structured Beam by the phase-space rotation", LINAC conference, Geneva, Swiss(2014・9・2)
5. M. Kuriki, "Extra-ordinal Beam Formation by Phase-space rotation", 高輝度・高周波電子銃研究会、大阪(2014・1・9)
6. M. Kuriki, S. Otsuki, "Micro-bunch Structure Formation by Phase-Space rotation", KEK-PF workshop, (2013・9・18)
7. 大槻祥平、栗木雅夫、「位相空間制御によるTHz帯マイクロバンチ生成の研究」、日本加速器学会年会、名古屋(2013・8・4)
8. 栗木雅夫、早野仁司、柏木茂、「KEK-STFにおける高アスペクト比電子ビームの生成」、日本加速器学会年会、名古屋(2013・8・3)

6. 研究組織

(1)研究代表者

栗木 雅夫 (KURIKI MASAO)
広島大学・大学院先端物質科学研究科・教授
研究者番号：80321537

(2)研究分担者

早野 仁司 (HAYANO HITOSHI)
高エネルギー加速器研究機構・加速器研究施設・教授

研究者番号：00173055

柏木 茂 (KASHIWAGI SHIGERU)

東北大学・電子光理学研究センター・准教授

研究者番号：60329133