

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 14 日現在

機関番号：82118

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2013～2015

課題番号：25600146

研究課題名(和文)自由電子レーザーの高度化に向けたテラワットレーザー光共振器の開発

研究課題名(英文)Development of a TW-class laser build-up cavity for an advanced free electron laser

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) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：近年、自由電子レーザーの性能を向上するために、レーザー光を組み合わせて変調を導入する、シーディングの技術の研究が盛んである。このシステムを高繰り返し連続運転して平均強度を増強するには、加速器の連続運転とともに、高強度レーザーの連続運転が必要になる。とくにレーザーについては、光共振器の技術を利用してこれを実現出来る。短いパルス時間幅のパルス列を高い増大率で蓄積するには、CEPの制御など、いくつかの工夫が必要である。本研究では、EOMを内蔵した高速制御可能なファイバーモードロックレーザー発振器にAOMを用いた変調機構によるCEP制御を導入したものを開発した。

研究成果の概要(英文)：Recently, performance of free-electron-lasers are greatly improved by combining a laser system to introduce a modulation in an electron beam, called seeding. In order to upgrade the system to a high averaged power system operating in a high repetition rate CW mode, development of the laser system to be usable in such a time structure also. An optical cavity system is a candidate. To realize a high enhancement gain and a short pulse duration, some special techniques are necessary. We developed a fiber mode-locked laser with a fast controllable system using an EOM, and a CEP tuning system using an AOM for the purpose. We have demonstrated to control resonance of a build-up cavity with the laser oscillator.

研究分野：加速器科学

キーワード：レーザー 加速器 共振器 自由電子レーザー

1. 研究開始当初の背景

新しい研究分野や新たな測定手法を切り開くうえで、光源技術の発展が果たしてきた役割は大きい。可視光領域においては、レーザーの技術が発達しており、ほぼ理想的な光源となっている。空間的にも時間的にもコヒーレントで、フーリエ限界の短パルスビームが得られる。一方、X線領域では、シンクロトロン放射光が汎用の光源として用いられるようになっており、物性研究において不可欠なものになっている。しかし、シンクロトロン放射光はインコヒーレントで、レーザーのような理想的な光では無い。X線領域でコヒーレント、短パルスの光を実現することが長年の課題であった。近年、高輝度電子源と線型加速器の性能が飛躍的に向上したことにより、X線領域で自由電子レーザー(FEL)が実現されるようになった。SLACのLCLSにおいて世界初の発振がなされ、続いて国内でもSACLAが稼働している。

これらの硬X線自由電子レーザー施設は、いずれもSASE型と呼ばれるもので、空間的にコヒーレントであるが、時間的なコヒーレンスは無い。SASE型の自由電子レーザーでは、もともとの電子ビームの電子密度分布の不均一性に由来するノイズが成長して発振の種になるため、一つのバンチ内でも前後方向には相関が無い光パルスが発生する為である。自由電子レーザーで時間コヒーレンスを実現する手法として、シーディングと呼ばれる方式がある。外部から導入したレーザー光と電子ビームを、アンジュレータ等を介して相互作用させ、電子ビームに外部レーザーの波長での密度変調を生成し、これを発振の種にしようというものである。外部レーザーによって自由電子レーザーの発振が制御されることから、時間コヒーレントな発振が実現できる。特に、外部レーザーとして使用可能な可視から紫外域の光を用いて、より短波長の自由電子レーザーをシードする、高調波シードの研究が近年盛んに行われており、EUVから軟X線領域も実現されるようになってきている。

ELETTLAのFERMIはシードFELのユーザー施設として稼働している。

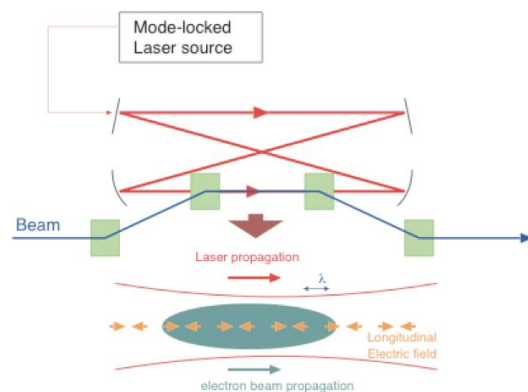
自由電子レーザーのもう一つの課題として、高繰り返し化が挙げられている。これまで実現している短波長FEL施設はいずれも常伝導線形加速器を用いたものである。常伝導線型加速器の繰り返しは100Hz程度に制限されるが、熱損失の無い超伝導加速器を用いることで加速空洞の連続運転が可能になり、~MHzのバンチ繰り返しが可能になる。超伝導線型加速器による次世代の高繰り返しFELとして、SLACのLCLS2計画の建設が開始されている。近い将来に、高繰り返し連続運転のFEL施設が複数稼働する状況になると考えられる。

その次の段階を考えると、繰り返しを更に上げて~100MHzの高フラックスFEL、そしてそのシードFEL化が求められるであろう。FELは元来効率が非常に悪いものであるから、高

フラックスFELで、ビーム加速に必要なRFパワーを評価すると、通常の加速器構成では非現実的と思われる。そこで、エネルギー回収型線型加速器(ERL)のスキームが考えると、ビームパワーを再利用することができ、高フラックスFELが成立する。ERLは、国内外で最近開発が進んでおり、将来的にこの方式で高フラックスFELが建設されると期待される。これを見越したとき、次はそこでのシードFEL化が課題となる。そのとき問題になるのはシードシステムの高繰り返し化である。ビームと同じ繰り返しで、高ピーク強度の外周レーザー光が必要になるが、~1mJ/pulseを100MHzと考えると、単純には100kWものパワーが必要になり、通常のレーザーシステムでは実現不可能である。

2. 研究の目的

本研究では、将来の高フラックスFELを高度化し、シード化を実現するために必要となる、レーザーシステムの開発検討を行う。光学共振器は、高反射率ミラーで構成した光の閉じた空間に、多数のレーザーパルスを時間的に重ね合わせることで、実効的に高い平均パワーを実現する手法である。元々のレーザー光源の出力を、共振器の中で10000倍にパワー増大できるとすると、10Wの入射パワーから100kWの共振器内部パワーが得られる見込みになる。共振器の基本周波数をFELのビーム繰り返し、典型的に100MHz、と一致させ、位同期して動作させるとし、ビームを重ね合わせて配置する。とくに、~100fs程度の電子バンチと同等の時間幅のレーザーを蓄積出来れば、ピーク強度で1TWのレーザーを電子ビームと相互作用させることが出来る。レイアウトは次の図のようになる。



このような光学共振器を動作させるには、以下のような開発課題がある。(1)10000倍のパワー増大を実現するには、低損失ミラーで構成された共振器を共鳴条件に保つことが必要である。共鳴幅は増大率に伴って狭くなり、高精度のフィードバック制御が必要になる。このためには制御の帯域を拡大することが基本的に重要である。高速の共鳴制御が可能な制御機構を開発する必要がある。(2)100fsの短パルスレーザーは、広いスペクトル幅を持っている。これを共振器に蓄積する場合、単に

共振器鏡の反射率だけの問題ではなく、キャリアエンベロープ位相(CEP)と呼ばれる、パルス間の位相関係の制御も必要になる。CEPを制御して、共振器への効率的な蓄積を実現する手法を開発する必要がある。

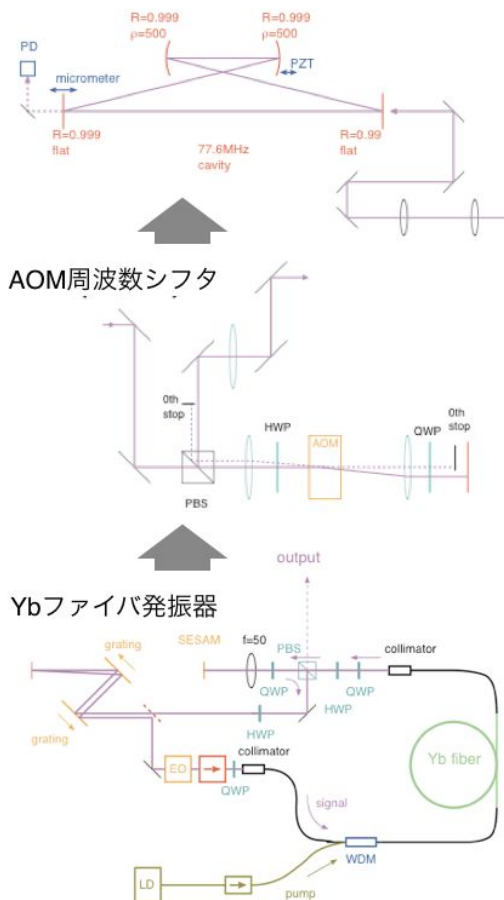
3. 研究の方法

本研究では、まずYbファイバレーザ発振器を製作し、これを用いて光共振器の共鳴制御の試験を行う。低平均パワーであるが、共振器共鳴制御の高速化のための制御機構の開発、および、共振器の蓄積効率の最適化のためのCEP制御機構の開発、の2点について試験することが出来る。

- (1)共鳴制御の制御方法を試験するため、製作したYbファイバレーザ発振器には複数の制御機構を導入した。 piezoミラー、AOM周波数シフター、EO変調器、励起光LD強度変調、である。これらの応答関数を測定する。
- (2)CEPの制御を試験するため、発振器出力下流にAOM周波数シフターを設置した。AOMの駆動周波数を変えて共振器の共鳴を観測し、CEPが制御を確認する。
- (3)FELに設置した場合のレイアウトを考え、本レーザシステムを用いたシード化の可能性について計算する。

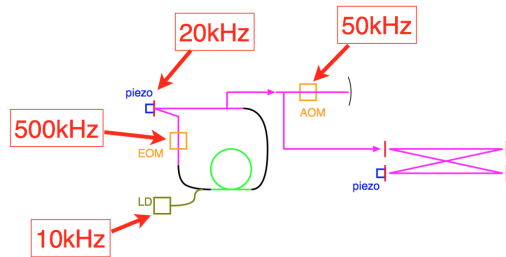
4. 研究成果

本実験で製作したセットアップを次図に示す。非線形偏波回転を利用した Yb ファイバモードロック発振器である。発振周波数は試験用共振器



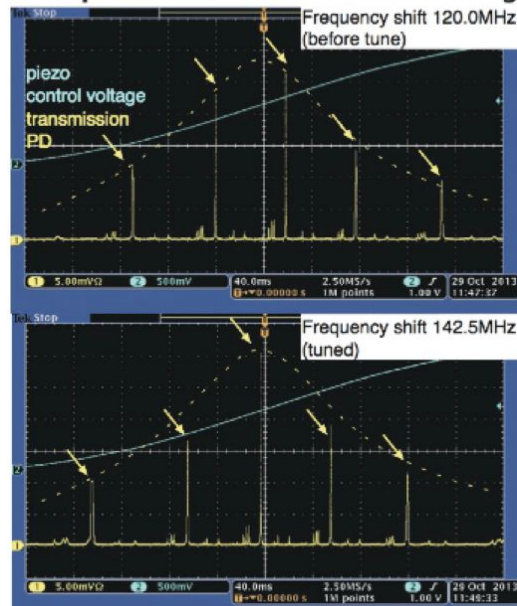
38MHzで、120fs(RMS)のパルス幅で発振する。発振器の出力はダブルパス方式のAOM周波数シフターを経由し、試験用の光学共振器に入射する。光学共振器の基本周波数は77MHzに調整し、発振器からのパルスの整数倍の関係になるようにしてある。

このシステムには、共振器の共鳴条件をシフトさせる機構が複数備えられており、応答を比較する事ができる。それぞれの帯域の上限を評価した所、次図にまとめる結果となった。高増大率の狭共鳴幅の共振器を安定に制御するには、高速のフィードバックが必要であるため、応答周波数の高い機構が必須である。発振器内部に備えた EOM を用いて 500kHz の帯域が得られる事が分かり、共振器の制御は技術的に解があることが確認できた。



CEP の制御はいくつかの手法を検討した結果、100MHz 程度のファイバ発振器の場合は、発振器下流に AOM 周波数シフターを導入する手法が適していると考えた。AOM による光路のずれの影響を受けないようにダブルパスの構成とし、30MHz の範囲で周波数をシフトできるようにした。モードロックレーザの場合、この周波数のシフトは CEP の調整と等価である。

Experimental result of CEO tuning

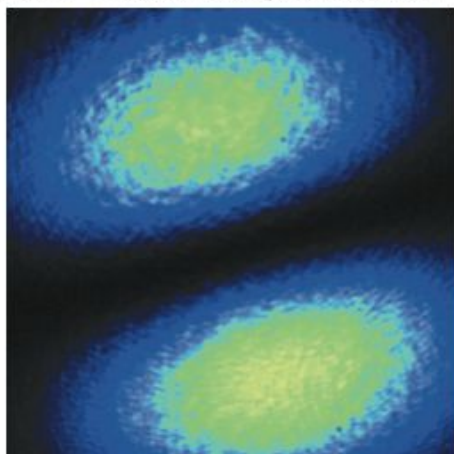


共振器の共鳴条件をスイープして共鳴ピークの分布を観測すると、短パルスレーザを高増大率共振器に使用する場合に特有の非対称な共鳴ピーク列が確認された。このまま

では、CEP が最適化されていないため、共鳴の効率が落ちている。そこで、AOM の駆動周波数を変化させると、ピーク列の構造がシフトし、対称な構造に調整することが出来た。これは、予定したとおり、CEP を調整できたことに相当する。

レーザーと電子ビームを相互作用させる際、通常は共鳴条件に調整したアンジュレータで電子を蛇行運動させ、レーザーの横電場で加減速を行う。今の場合、光共振器とアンジュレータを組み合わせた装置を考える必要があり、複雑になる。レーザーの縦電場を利用する方式だと、アンジュレータを介さずに直接に電子ビームを加減速できるため、装置が簡単にできると考えた。通常のレーザー光は縦電場が存在しないが、高次横モード光の場合はビームの中央部に縦電場が出来る。特に共振器にレーザー光を蓄積する場合は、選択的に高次横モードを共鳴させる事が出来るため、この方式に利点があると考えられる。また、実用上十分な強度の縦電場が実現できることを計算で確認した。とくに、FEL において電子ビームの不安定性を抑えて、FEL 発振を安定させる目的でレーザーヒータと呼ばれるシステムを導入することがあるが、本方式で 100kW 程度の平均パワーが実現できれば、十分に適用が可能であると見積もられた。高パワーで動作している既存の共振器システムを使用し、高次横モードを蓄積する試験を行った。通常、基本モードを 10kW 蓄積しているシステムで、高次モードで 5kW の蓄積を確認することが出来た。これは、特別な共振器の設計をしなくても十分な強度で高次モードを共振器に蓄積することができることを示す結果である。

TM10 モードにロックした時のプロファイル



成果をまとめると、(1)高増大率の共振器の制御に必要な高速のフィードバックシステムの性能確認を行った。(2)短パルスレーザーを共振器に蓄積する際に必要な CEP 制御機構を実証した。(3)レーザーと電子ビームの相互作用のレイアウトを検討し、とくに高次モード縦電場を利用する方式の可能性を確

認した。

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 3 件)

¹ 本田 洋介 赤木 智哉 小菅 淳, "高繰り返し CW-FEL 用のレーザーヒータ", 日本加速器学会, 2015年8月4~7日, プラザ万象(福岡県敦賀市)

² Y.Honda, "High Repetition Rate Energy Modulator System utilizing a Laser Enhancement Cavity", Free Electron Laser Conference (FEL2014), 2014.8.24~29 バーゼル(スイス)

³ 本田 洋介, "高繰り返しシード型自由電子レーザーのためのレーザーエネルギー変調器", 日本加速器学会, 2014年8月8~12日, 青森市文化会館(青森県青森市)

〔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:
出願年月日:
国内外の別:

取得状況(計 0 件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
取得年月日:
国内外の別:

〔その他〕

ホームページ等

<http://pfconrg07.kek.jp:8082/trac/cerl/wiki/Users/honda>

6. 研究組織

(1)研究代表者

本田 洋介 (Yosuke Honda)

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

(2)研究分担者

なし

()

研究者番号：

(3)連携研究者
なし

()

研究者番号：