

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 9 日現在

機関番号：82118

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23600003

研究課題名(和文) エネルギー回収型リニアック放射光源用電子銃励起レーザーシステムの研究

研究課題名(英文) Research and development of a drive laser system for a photocathode gun of an energy-recovery-linac light source

研究代表者

中村 典雄 (Nakamura, Norio)

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・教授

研究者番号：10198228

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,100,000円、(間接経費) 1,230,000円

研究成果の概要(和文)：次世代光源として有望なエネルギー回収型リニアック(ERL)において良質な大電流電子ビームを生成するために、電子銃用励起レーザーシステムを高出力で高い安定度が期待できるファイバーレーザーを用いて開発した。結果として、1.3GHzの高いくり返し周波数でビーム電流10mA発生可能な目標パワーを越えるレーザー光を実現した。また、開発したレーザーシステムを用いて試験機であるコンパクトERLを運転し、システムがERL電子銃レーザーとして安定に働くことを実証した。今後、ERLのみならず自由電子レーザーの電子銃や加速器における各種レーザーシステムへの応用が大いに期待される。

研究成果の概要(英文)：In order to generate a high-quality and high-current electron beam in an energy recovery linacs (ERL), a promising candidate of the next-generation light source, a laser system driving an electron gun of the ERL was developed based on a fiber laser, which was expected to be highly stable for high output power. A higher output power than the target value for the beam current of 10mA was achieved at the high-repetition rate of 1.3 GHz by a developed laser system. The system has been used for a test ERL facility at KEK, the Compact ERL and it demonstrated to stably work as the ERL drive laser. It is greatly expected to be applicable to electron guns of FELs as well as ERLs and various laser systems in accelerators.

研究分野：時限

科研費の分科・細目：量子ビーム科学

キーワード：電子銃励起レーザー ファイバーレーザー 光陰極電子銃 エネルギー回収型リニアック 加速器 放射光源 高繰り返しレーザー 高出力高安定レーザー

### 1. 研究開始当初の背景

近年、自由電子レーザー(FEL: Free Electron Laser)やエネルギー回収型リニアック(ERL: Energy Recovery Linac)による次世代放射光源の研究開発が国内外で進みつつあり、特に ERL による放射光源はこれまでの蓄積リングによる第3世代放射光源の非破壊性などの特徴を継承しつつ、その輝度、空間コヒーレンス、短パルス性が2桁以上も向上し、さらに ERL 放射光源で生成される良質で高い繰返しを持つビームによって、共振器型のX線自由電子レーザー(X-FELO)が実現できるものと期待されている。

ERL 放射光源を実現するためには、まだ多くの研究開発が必要とされ、このため海外においては、米国のコーネル大学、英国のダラスベリ研究所、米国アルゴンヌ国立研究所、米国ジェファーソン研究所(J-Lab)で ERL の開発研究が進められている。日本では、高エネルギー加速器研究機構(KEK)を中心に ERL 研究開発共同チームが発足し、平成18年度から要素技術開発と ERL 試験機(コンパクト ERL)建設のための研究開発を進めている。

ERL 放射光源の実現のために必要な開発要素に光陰極電子銃システムがあり、低エミッタンスや短バンチの観点から熱陰極電子銃に比べて優れていると期待されている。一方で、光陰極電子銃システムは安定性が悪いことが欠点で、励起レーザーの安定性に起因していることが多い。そのために、ERL 放射光源の光陰極電子銃システムには、高出力で高い安定性をもつ励起レーザーの開発が必要である。

### 2. 研究の目的

本研究は、ERL 放射光源の光陰極電子銃を励起するレーザーシステムの研究開発である。次世代放射光源として安定で高品質な電子ビームを供給するために、高出力で高安定に動作することが期待されるファイバーレーザーをシステムの基本とし、構成要素としては、ERL の加速周波数に等しい1.3GHz の繰返し周波数と数ピコ秒のパルス幅を持つ発振器、必要な出力パワーを得るための増幅器、電子銃の光陰極に最適な波長に変換するための波長変換システムで構成する。

本研究で得られる成果は、ERL 放射光源のみならず将来の加速器の電子源の高性能化と高安定化に大きく寄与する。加えて、レーザーを用いた様々な加速器サブシステムへの応用も可能で、加速器科学技術の幅広い発展につながるものと期待できる。

### 3. 研究の方法

ERL 放射光源用電子銃励起レーザーシステムは、高繰返しのパルス光を生成するレーザー発振器、高出力レーザー増幅器、

波長変換システムから構成される。本研究計画では、30W の増幅器の出力を波長変換システムに入力して、ビーム電流10mA の発生に対応できるシステムを開発するものとする。

発振器開発では、波長1030nm、繰返し1.3GHz のパルス列を生成する Yb ファイバーレーザー発振器の開発を基本とする。基本繰返しが1.3GHz の分数周波数になるようなファイバー共振器中に電気光学(EO)変調器を挿入して、1.3GHz の基準周波数で外部から振幅変調を加えることにより、安定した能動的高調波モード同期を試みる。なお、1.3GHz のファイバーレーザー発振器の開発が早期に完了しない場合でも、既存のファイバーレーザー(繰返し80-100MHz)や市販レーザーをシード光として利用して増幅器及び波長変換システムの開発を進める。

増幅器の開発では、1.3GHz のシード光を30W レベルまで増幅するために、ファイバーレーザー増幅器を開発する。ファイバー中の非線形効果を抑制するために、利得媒質としてコア径40ミクロンの大口径 Yb 添加フォトニック結晶ファイバー(PCF)を用い、励起光として出力80W クラスのファイバーカップル型半導体レーザーを用いる。必要に応じて多段増幅を行う。

波長変換システムの開発では、ファイバーレーザー増幅器の出力を LBO 結晶に照射して第2高調波発生を行う。さらに、この第2高調波出力を励起光として波長800nm で波長可変なパラメトリック増幅器を開発する。パラメトリック増幅の信号光にはファイバーレーザー増幅器の出力光の一部を高非線形フォトニック結晶ファイバーに入射することで生成されるスーパーコンティニウム(SC: Super continuum)光を使う。この SC 光から最終的に使用する波長を増幅光から選択して電子銃光陰極に照射する。

最終的に開発された各サブシステム(発振器、増幅器、波長変換システム)を組み上げて、電子銃励起レーザーシステム全体の性能評価を行う。

### 4. 研究成果

(1) 発振器開発では、波長1030nm の Yb ファイバー共振器での電気光学(EO)変調による能動的高調波モード同期(図1)を試みてきたが、421MHz の発振は得られたものの、1.3GHz までの安定な発振を得ることはできなかった。そこで、代わりに波長の近い Nd:YVO<sub>4</sub> を用いた1064nm のレーザー発振器を試作して試験した(図2)。波長808nm のファイバー結合半導体レーザー(LD)からの光を Nd:YVO<sub>4</sub> 結晶に入射し、そこからの放出光を二色性ミラーと半導体過飽和吸収鏡による共振器で増幅させて1.2GHz 繰返して発振に成功した。最

最終的には、新たに Nd:YVO<sub>4</sub> を用いた 1.3GHz 発振器を製作して使用した。なお、Yb ファイバー増幅器での増幅率向上の観点から、波長 1030nm の Yb 結晶による 1.3GHz 発振器の検討も開始している。

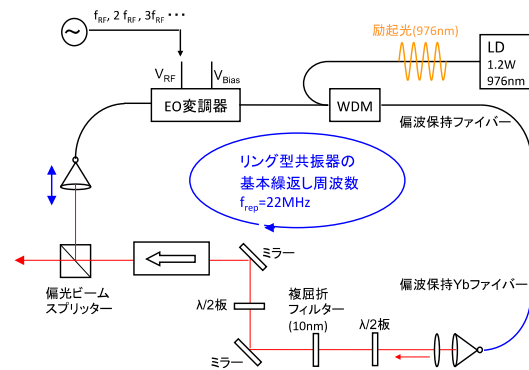


図 1 電気光学(EO)変調を用いたファイバーレーザー発振器

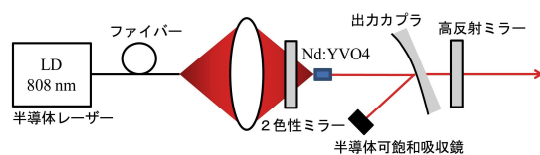


図 2 試作した Nd:YVO<sub>4</sub> 発振器

(2) 増幅器では、最初に利得媒質として長さ 1.2m でコア径 40 ミクロンの大口径 Yb 添加フォトニック結晶ファイバー(PCF)を、励起光として最大出力 80W のファイバーカップル型半導体レーザー(LD)を使用したファイバーレーザー増幅器を開発した。波長 1030nm、出力約 10mW の 85 MHz シード光に対して 10W まで増幅できたが、目標である 30W までの増幅は得られなかった。そこで、利得媒質として長さ 5m、コア径 5 ミクロンの Yb ファイバーの前置増幅器(出力約 60mW)を導入するとともに LD と PCF の温度制御を改善して、31 W の増幅光を得ることに成功した。図 3 にその時のセットアップ、図 4 に励起光である半導体レーザーパワーに対する増幅器出力を示す。

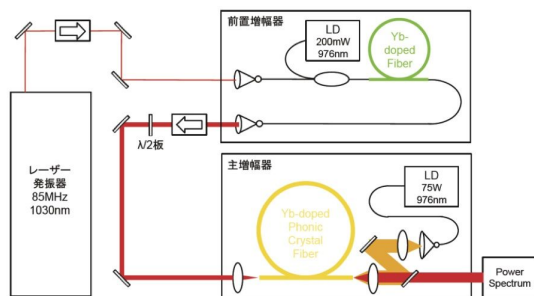


図 3 ファイバーレーザー増幅器

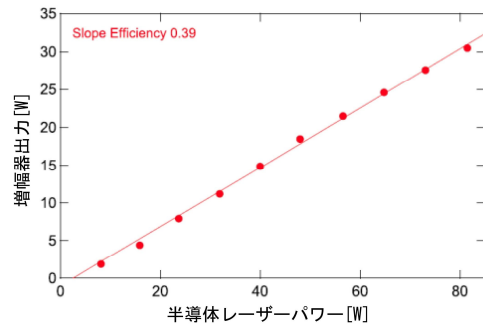


図 4 増幅器出力と半導体レーザー(LD)パワーの関係

その後、Nd:YVO<sub>4</sub> 結晶を用いた発振器と長さ 1.5m のファイバーレーザー増幅器を構築して、波長 1064nm、繰り返し周波数 1.3GHz で出力パワー 37.9W を得ることに成功した。さらに、Nd:YVO<sub>4</sub> 発振器からの出力を直接の入力光として、最大出力 25W と 100W のファイバーカップル型半導体レーザーを使用した 2 つのファイバーレーザー増幅器をつないだ 2 段増幅器(図 5)によって出力のさらなる増強を図った。その結果、波長 1064nm、繰り返し周波数 1.3GHz で出力パワー 70W を得ることに成功した。

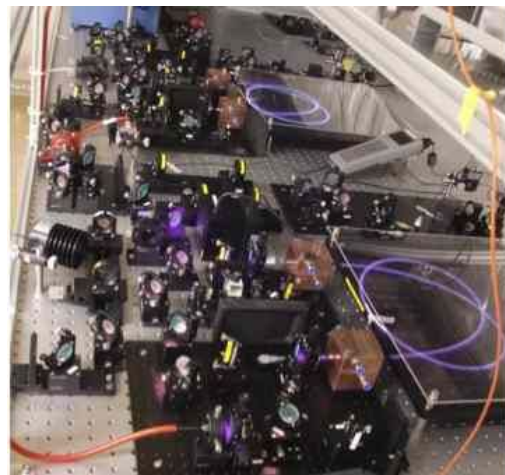


図 5 2 段ファイバーレーザー増幅器

(3) 波長変換では、増幅器出力の第 2 高調波発生(波長 515nm または 532nm)と 800nm への波長変換について開発を行った。第 2 高調波発生では最初に増幅器出力の波長 1030nm、その後 1064nm に対して LBO 結晶を用いて変換効率の試験を行った(図 6)。その結果、想定される GaAs 光陰極の量子効率 1% に対して、第 2 高調波の電子銃光陰極への直接照射で 10mA のビームが生成可能であることが確認できた。

800nm への波長変換は、図 7 に示すようにファイバーレーザー増幅器の出力光の一部(2W)を 0.85 m の高非線形フォトニック結晶ファイバー(PCF)に入射することで、

中心波長 800 nm、バンド幅 85 nm、平均出力パワー 0.19 W のスーパーコンティニウム(SC)光を得ることができた(図8)。この波長は、光陰極のエネルギーギャップの波長に近く、この光を信号光に、増幅器出力の第2高調波を励起光として、パラメトリック増幅を行えば、さらに大きな出力が得られるものと期待される。しかし、800nmの光から発生する電子ビームのエミッタンスが第2高調波の光のそれと比べて大きな差が見られないことや800nmの光では電子バンチにハローの原因となるテールができやすいことなどが別の実験からわかったため、本研究計画ではカソードに照射する光を800nmの光ではなく第2高調波(波長532nm)そのものとした。

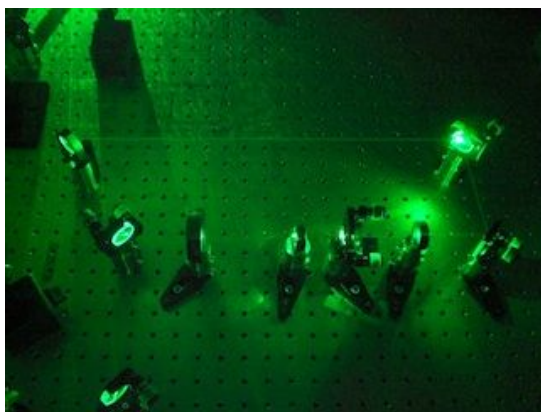


図6 第2次高調波発生実験

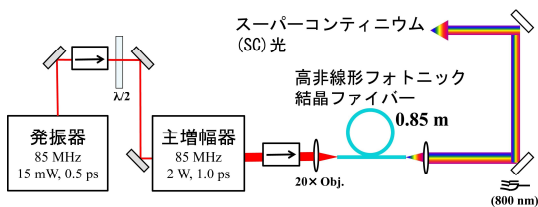


図7 SC光発生実験

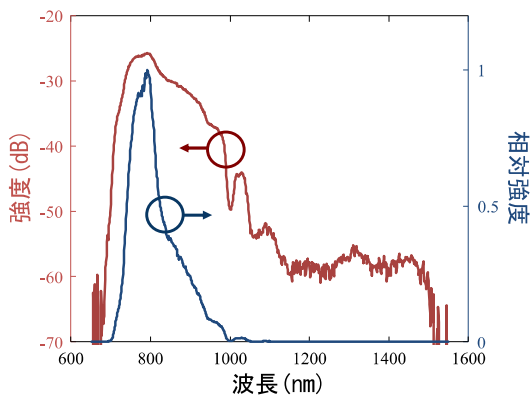


図8 SC光のスペクトル

(4) 開発したレーザーシステム(図9)は、レーザー輸送ラインやパルスを切り出すゲート機構などが加えられた上で、コンパクト

ト ERL の光陰極電子銃用励起レーザーとしてコミッショニング開始から現在まで使用されつづけている。1.3GHz の連続波(CW)運転運転では既に 6.5  $\mu$ A までの電子ビーム生成を実現した。パルス運転でも CW では 10mA の平均電流に相当するバンチ電荷 7.7pC/bunch で電子ビーム発生を実現した。電子銃からの電子ビームのエミッタンスも小電流で期待される値(規格化エミッタンス 0.1mm mrad 以下)を示し、開発したレーザーシステムが問題なく稼働していることを確認できた。図10にレーザーシステムの仮想光陰極面でのレーザープロファイルを示す。今後は、コンパクト ERL 施設の申請出力の増加に伴ってレーザーシステムの出力を上げて CW 運転で 10mA を、パルス運転では CW で 100mA に相当する 77pC/bunch を実現していくことになる。また、システムの安定度についても詳細の測定を進めて、より定量的にシステム全体の性能を評価し、必要があれば改良を加えていく。

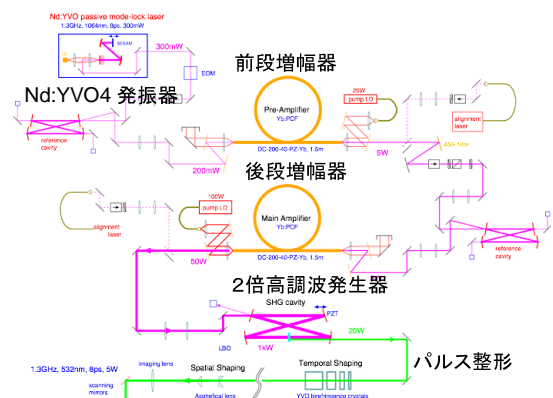


図9 電子銃励起レーザーシステム

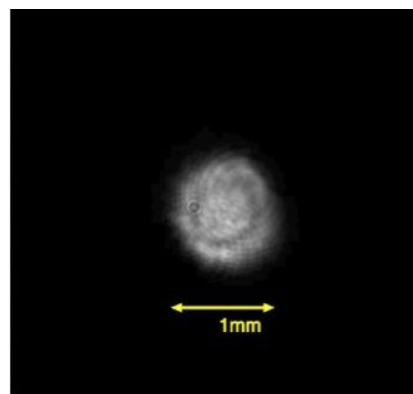


図10 レーザー光プロファイル(仮想陰極面)

本研究では、国内で初めてファイバーレーザーを基本とした光陰極電子銃用励起レーザーを開発して、実際にコンパクト ERL 運転に使用することに成功した。このようなシステムは国外でもコーネル大学の ERL 試験入射器にあるだけであるが、コン

パクト ERL では最近入射器のみならず周回部での運転にも成功しており、エネルギー回収を含めた ERL 加速器全体の運転で常時安定に稼働しているのは世界的にも初めての例になった。現在までの良好な稼働状態を考えると、今後はこのようなファイバーレーザーを基本とするシステムが電子銃励起レーザーのみならず他の加速器関連のレーザー装置にも応用されていくものと期待される。

研究者番号：40569654  
(平成23年度)

#### 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)

[学会発表](計 5件)

本田洋介、宮島司、コンパクト ERL コミッショニンググループ、「ERL 試験加速器入射部における光陰極電子銃用レーザーシステムの開発」、第10回日本加速器学会、2013年8月3日、名古屋大学

本田洋介、「cERL 電子銃用レーザーシステムの開発」、第9回日本加速器学会、2012年8月9日、大阪大学

本田洋介、"Development of a photo-injector laser system for KEK ERL test accelerator", IPAC2012, 2012年5月22日、ニューオーリンズ(米国)

伊藤功、笠原亮、中村真毅、吉富大、鳥塚健二、中村典雄、"Recent Progress of an Yb-doped fiber laser system for an ERL-based light source", ERL2011 workshop, 2011年10月17日、高エネルギー加速器研究機構

笠原亮、伊藤功、吉富大、中村真毅、中村典雄、本田洋介、鳥塚健二、「ERL 光陰極電子銃励起用 Yb ファイバーレーザーシステムの進捗状況」、第8回日本加速器学会、2011年8月2日、つくば国際会議場

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

中村 典雄 (NAKAMURA NORIO)

大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構

研究者番号：10198228

##### (2) 研究分担者

吉富 大 (YOSHITOMI DAI)

独立行政法人産業技術総合研究所

研究者番号：40509783

本田 洋介 (YOSHITOMI DAI)

大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構

研究者番号：10392680

##### (3) 連携研究者

伊藤 功 (ITOH ISAO)

東京大学物性研究所