

# RECENT PROGRESS OF AN Yb-DOPED FIBER LASER SYSTEM FOR AN ERL PHOTOCATHODE GUN

Ryo Kasahara<sup>#A)</sup>, Isao Ito<sup>B)</sup>, Dai Yoshitomi<sup>C)</sup>, Shinki Nakamura<sup>A,D)</sup>,  
Norio Nakamura<sup>E)</sup>, Yosuke Honda<sup>E)</sup>, Kenji Torizuka<sup>C)</sup>

A) Major in Media and Telecommunication Engineering, Graduate school of science and Engineering, Ibaraki University, 4-12-1 Nakanarusawa, Hitachi, Ibaraki, 316-8511

B) Institute for Solid State Physics, University of Tokyo, 5-1-5 Kashiwanoha, Kashiwa, Chiba, 277-8581

C) National Institute of Advance Industrial Science and Technology, 1-1-1 Umezono, Tsukuba, Ibaraki, 305-8568

D) Frontier Research Center for Applied Atomic Science, Ibaraki University, 162-1 Shirakata, Tokaimura, Ibaraki, 319-1106

E) High Energy Accelerator Research Organization, 1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801

## Abstract

We report on the development of an Yb fiber laser system for ERL photocathode gun. The Yb fiber laser is expected to have both high stability and high output power required for the drive laser. We have demonstrated wavelength conversion from 1  $\mu\text{m}$  into 800 nm by supercontinuum generation with a conversion efficiency of 9.5%, and improved the output power of Yb fiber laser system up to 31 W by installing preamplifier. In addition, we have developed a Nd:YVO<sub>4</sub>-based mode-locked oscillator operating at a repetition rate of 1.2 GHz, close to the RF frequency of a superconducting accelerating cavity. We report our recent progress in this development.

## 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

### 1. はじめに

放射光は非常に明るく指向性が高いため、物質科学や生命科学、産業利用などの幅広い領域で利用されている。近年、次世代の放射光源加速器として高輝度・短パルスの X 線を発生できる ERL の開発が行われている<sup>[1]</sup>。従来の加速器では、電子ビームが蓄積リング内を多数回周回するため、放射平衡による輝度の限界があった。しかし、ERL では超伝導加速空洞で加速した電子ビームを周回部に入射して放射光を発生させ、蓄積リングを一周した後、再び超伝導加速空洞に帰還した電子ビームを廃棄するので、周回部に入射する直後の電子ビームが大電流で超低エミッタンスであれば、高輝度で高指向性の放射光が得られる。超低エミッタンス・大電流の電子ビームを生成するために、NEA-GaAs 光陰極電子銃の開発が行われている<sup>[1]</sup>。この光陰極電子銃を励起するレーザーシステムには、超伝導空洞の RF 周波数と同じ繰り返しであることと、高輝度にするため高出力・短パルスであることが要求される。表 1 にレーザーシステムの主なパラメータを示す。

表 1: レーザーシステムの性能

平均出力パワー	15W
繰り返し周波数	1.3GHz
パルス幅	10-30ps
波長	800nm(波長可変)

図 1 に光陰極電子銃のためのレーザーシステムの概略図を示す。レーザーシステムでは、高い安定性と高い出力が期待できる Yb ファイバーによるレーザー発振器と、増幅するレーザー増幅器を別々に構成する。さらに Yb ファイバーレーザーの波長 1030 nm から光陰極(NEA-GaAs)のバンドギャップに相当する波長 800 nm に変換するため、光パラメトリック増幅(Optical Parametric Amplification, OPA)を行う。まず、増幅光を二つに分岐し、一方を非線形光学結晶で波長 515 nm の第二高調波へ変換し、もう一方を高非線形フォトニック結晶ファイバー(Photonic Crystal Fiber, PCF)で波長 800±50 nm のスーパーコンティニューム光(Supercontinuum, SC)を生成する。そして第二高調波を励起光、SC 光を信号光として OPA を行う。

本稿では、次世代放射光源 ERL 用光陰極電子銃を励起するレーザーシステムの開発の現状を報告する。

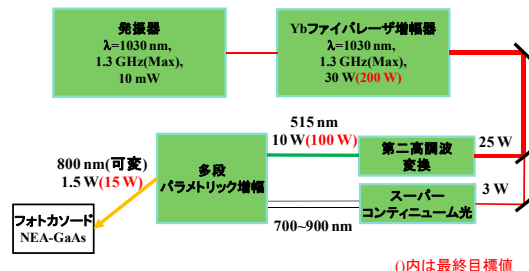


図 1: レーザーシステムの概略図

## 2. SC 光の発生実験

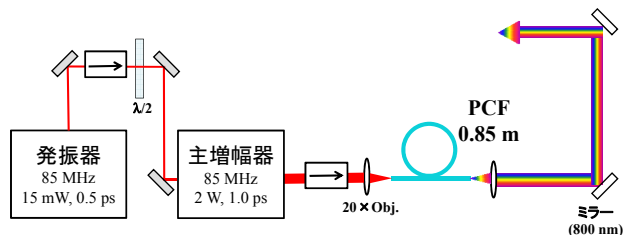


図 2: SC 光発生の実験装置

OPA の信号光として使用する SC 光を高非線形 PCF によって発生させた。実験装置を図 2 に示す。85 MHz の Yb ファイバーレーザー発振器から出力されたパルス光を Yb ファイバーレーザー増幅器で 2 W まで増幅して高非線形 PCF に入射する。使用した高非線形 PCF は波長 1  $\mu\text{m}$  付近において低分散であり、1030 nm のパルス光がピーク強度を保ったまま高非線形 PCF を伝搬するので、効率の良い SC 光の生成が期待できる。高非線形 PCF を通して得られた SC 光のうち 800 nm の帯域の光を取り出すため、800 nm のミラーを 2 回反射させる。

SC 光のスペクトルを図 3 に示す。中心波長は 800 nm、バンド幅は 85 nm であった。平均出力パワーは 0.19 W、変換効率は 9.5%(=0.19 W/2 W) であった。現段階で ERL の仕様を満たす波長を生成できたが、光陰極材料作製の都合でバンドギャップが 700 nm 近辺になる可能性もあるので、SC 光の中心波長をより短波長側にシフトさせることが今後の課題である。

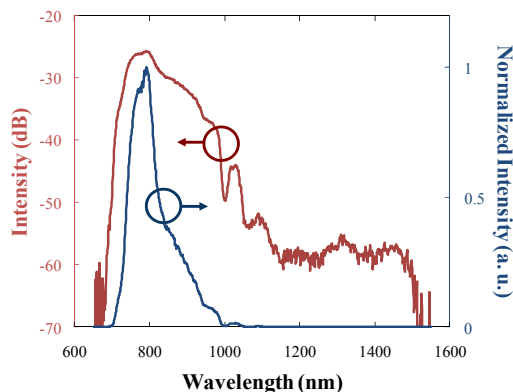


図 3: SC 光(800 nm)のスペクトル

## 3. 前置増幅器の導入実験

我々は大口径(40  $\mu\text{m}$ )の Yb 添加 PCF によりレーザー増幅器(以下、主増幅器)を開発し、85 MHz、15 mW のシード光を 10 W まで増幅することができた<sup>[2]</sup>。今回はさらに増幅効率を上げるため、前置増幅

器(図 4)を開発した。前置増幅器には利得媒質として長さ 5 m、コア径 5  $\mu\text{m}$  の Yb ファイバーを使用する。図 5 は繰り返し周波数 85 MHz の Yb ファイバーレーザー発振器から出力された平均パワー 15 mW のパルス光を増幅して得られた増幅光のスペクトルである。増幅に伴うスペクトルの広がりがほぼないことから、自己位相変調の影響の少ない増幅ができていたことが確認できた。また、パルス幅は 11 ps となった。

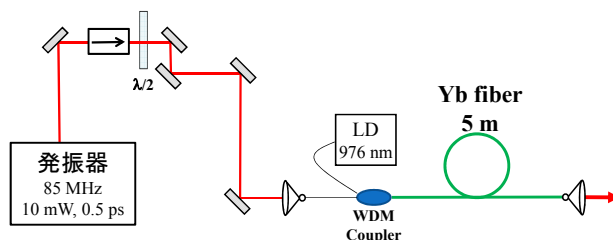


図 4: Yb ファイバー前置増幅器

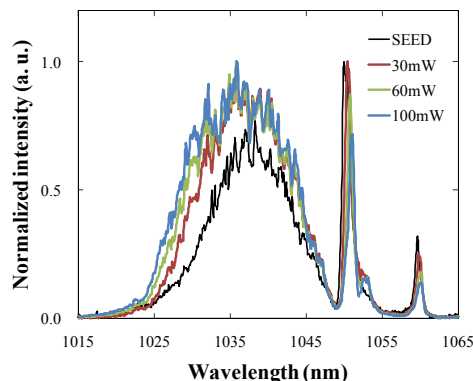


図 5: Yb ファイバー前置増幅器のスペクトル

次に、レーザーシステムへの前置増幅器の導入実験を行った。図 6 に実験装置を示す。発振器から繰り返し周波数 85 MHz のシード光を前置増幅器で増幅し、平均出力パワー 60 mW の増幅光を主増幅器に入射する。

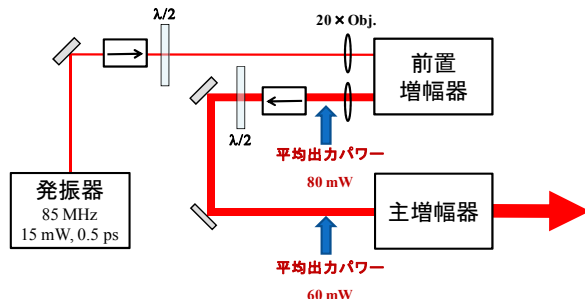


図 6: 85 MHz レーザーシステム (前置増幅器と主増幅器)

図 7 にレーザーシステムの入出力特性を示す。今回、前置増幅器の導入に加えて、主増幅器の温度制

御に関して改善を行った。まず、これまで 10 W 以上増幅すると主増幅器の励起用 LD の温度が上がりポンプ光の中心波長が 976 nm からずれて増幅器の出力が飽和状態になっていたので、励起用 LD の温調システムを強化し、常に 976 nm の励起光を発振できるようにした。さらに PCF の励起光入射部分周辺で発熱していたので、冷却システムを導入した。前置増幅器の導入と主増幅器の冷却効率の向上によって、平均出力パワー31 W まで増幅できた。

図 8 に増幅光のスペクトルを示す。増幅に伴うスペクトルの広がりほとんどないことから、自己位相変調の影響の少ない増幅が確認できた。

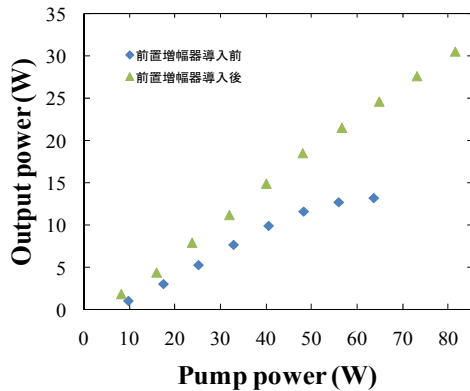


図 7: 85 MHz レーザーシステムの入出力特性

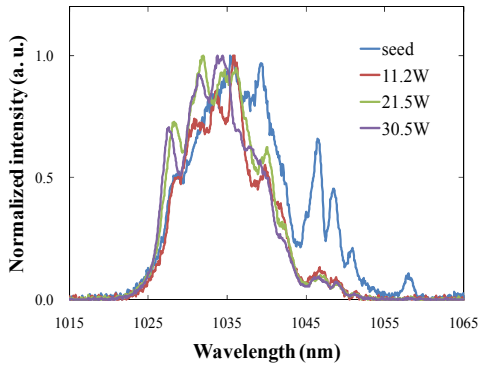


図 8: 85 MHz レーザーシステムのスペクトル

#### 4. 1.3 GHz レーザーシステムに向けて

我々は 1.3 GHz のレーザーシステムを実現するため Nd:YVO<sub>4</sub> を用いたレーザー発振器を開発した。

Nd:YVO<sub>4</sub> 発振器の実験装置を図 9 に示す。中心波長 808 nm に設定したファイバー結合レーザーダイオード(Laser Diode, LD)を励起光源に用いた。ファイバーのコア径は 105 μm である。また、LD は温度に依存して中心波長が変化するため Nd:YVO<sub>4</sub> の吸収波長である 808 nm を LD の中心波長にするために温度を一定にする温調器を開発した。

レンズ( $f=25$  mm)は Nd:YVO<sub>4</sub> 結晶に励起光を集光するために使用した。Nd:YVO<sub>4</sub> 結晶は添加濃度

0.5%で結晶長 8 mm のものを用いた。二色性ミラー(Dichroic mirror, DM)は無反射(Anti-Reflective, AR):808 nm と高反射(High-Reflective, HR):1064 nm のコーティングが施されている。出力カップラ(Out Coupler, OC)には、反射率 99%, 透過率 1%, 曲率半径 50 mm の凹面鏡を用いた。また、モード同期を行うために半導体過飽和吸収鏡(Semiconductor saturable mirror, SESAM)を設置した。

LD によって励起された Nd:YVO<sub>4</sub> 結晶からの放光は DM と SESAM により共振器内に閉じ込められ共振器内を往復しながら誘導放出を起こし増幅され、OC より 1%の光を取り出す構成となっている。

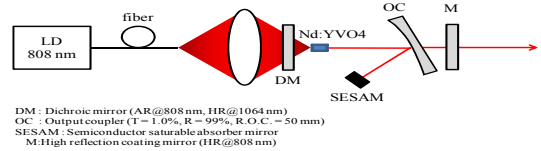


図 9: 1.2 GHz の Nd:YVO<sub>4</sub> 発振器

図 10 に Nd:YVO<sub>4</sub> 発振器のスパン 100 kHz の RF スペクトルを示す。RF スペクトルより 1.2 GHz にピークを確認することができることより、パルスが発生していると考えられる。

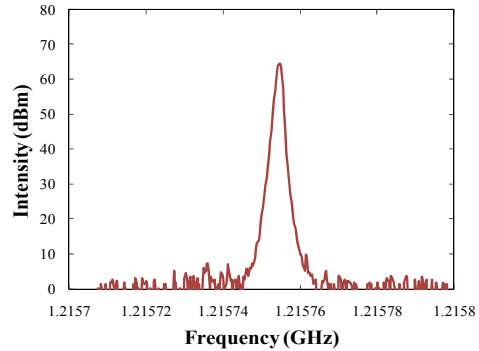


図 10: 1.2 GHz レーザーシステムの RF スペクトル

Nd:YVO<sub>4</sub> 発振器のシード光(0.16 W)を電子銃励起用レーザーシステムの主増幅器を用いて 1 W に増幅した後、光スペクトルとパルス幅を測定した。実験装置を図 11 に示す。

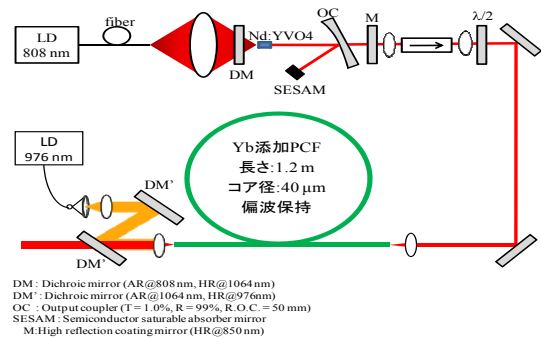


図 11: 1.2 GHz レーザーシステム

増幅後のパルス幅と光スペクトルを図 12, 13 に示す。光スペクトルは中心波長 1063.9 nm となり、スペクトル幅は 0.067 nm であり、分光器の分解能 0.05nm と同程度になっている。自己相関波形は、相関幅が 42 ps であり、これに  $\text{sech}^2$  型パルスをフィッティングし、パルス幅が 27 ps と見積もられた。図 14 に 1.2 GHz レーザーシステムの入出力特性を示す。LD の励起パワー 33 W において平均出力パワー 8 W を得ることが出来た。

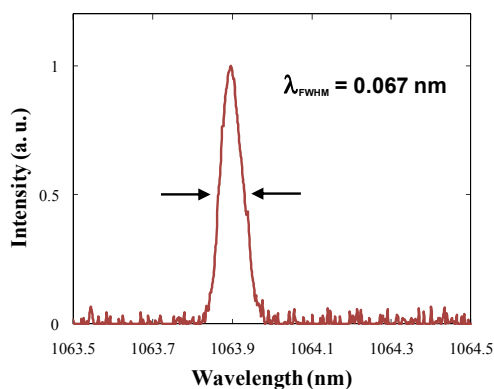


図 12: 1.2 GHz レーザーシステムのスペクトル

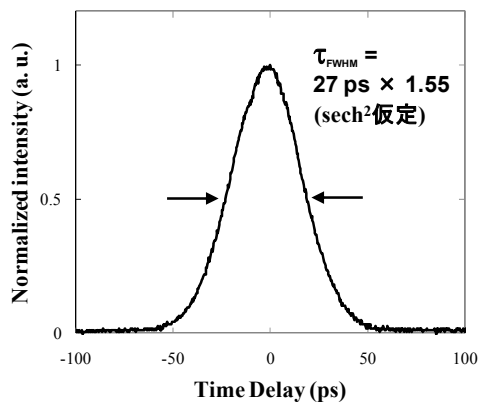


図 13: 1.2 GHz レーザーシステムの自己相関波形

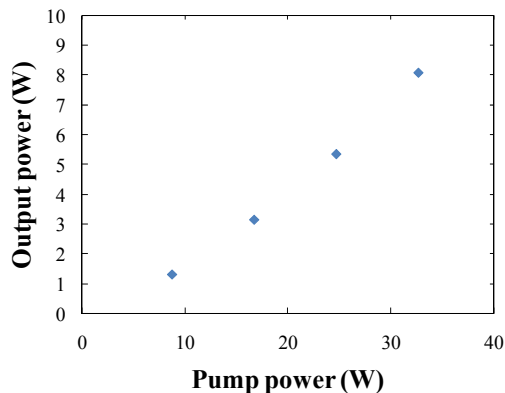


図 14: 1.2 GHz レーザーシステムの入出力特性

## 5. まとめ

我々は次世代放射光源 ERL の光陰極電子銃に用いるためのレーザーシステムの開発を行っている。

SC 光の発生実験においては、波長 1030 nm、平均出力パワー 2.0 W を 0.85 m の PCF に入射して、中心波長 800 nm、バンド幅 85 nm、平均出力パワー 0.19 W の SC 光が得られた。今後の課題は、光陰極材料の設計変更に合わせて 700 nm 付近まで SC 光の中心波長をシフトさせることである。

増幅システムの開発では、主増幅器に前置増幅器を導入し、さらに LD と PCF の温度制御を改善することで、85 MHz のシード光に対して目標値である 30 W を超える平均出力パワー 31 W の増幅光を得た。

1.3 GHz 発振器の開発において、Nd:YVO<sub>4</sub> を用いた発振器で繰り返し周波数 1.2 GHz を達成した。主増幅器を用いて 1 W に増幅し、スペクトル幅 0.067 nm、パルス幅 27 ps が得られた。さらに、最大平均出力パワー 8 W を得ることが出来た。

今後の予定は、1.2 GHz の電子銃励起用レーザーシステムの平均出力パワーを 30 W まで増幅することを目指す。

## 参考文献

- [1] R. Hajima et al. (ed.), "コンパクト ERL の設計研究" KEK Report 2007-7 / JAEA-Research 2008-032 (2008).
- [2] I. Ito et al., "Development of an Yb-doped fiber laser system for an ERL photocathode gun" Proceedings of IPAC10, 2141-2143 (2010).