

Development of an Yb-doped Fiber Laser System for an ERL Photocathode Gun

Isao Ito^{#,A)}, Norio Nakamura^{A)}, Dai Yoshitomi^{B)}, Kenji Torizuka^{B)}, Yosuke Honda^{C)}

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

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

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

Abstract

We are developing an Yb fiber laser system that drives an 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 developed a 10W preamplifier using an Yb doped photonic crystal fiber and demonstrated second harmonic generation by the conversion efficiency of 49%. In addition, we have been developing an Yb fiber laser oscillator with a high repetition rate up to 1.3 GHz that is equaled to the RF frequency of a superconducting accelerating cavity. We report our recent progress in this development.

ERL 光陰極電子銃のための Yb ファイバーレーザーシステムの開発

1. はじめに

ERL では電子ビームはリング内を多数回周回しないので、放射光、ビーム内散乱、マイクロウェーブ不安定性などの影響をほとんど受けない。そのため電子源で生成されたビームの特性が放射光の品質に大きく反映される。ERL の電子源として NEA 光陰極を用いた 500kV 直流型電子銃の開発が進められている^[1]。表 1 に ERL の光陰極電子銃とドライブレーザーの主なパラメータを示す。ERL に必要な超低エミッタンス・大電流電子ビームを光陰極電子銃で実現するためには、現在到達しうる最先端の技術水準がドライブレーザーに要求される。

表 1. 電子銃とドライブレーザーのパラメータ

光陰極電子銃	ビーム電流	10-100mA
	繰り返し周波数	1.3GHz
	パルス長	10-20ps
	規格化エミッタンス	0.1 - 1.0mm mrad
	量子効率	1%
ドライブレーザー	繰り返し周波数	1.3GHz
	平均パワー	15W
	パルス長	1ps (10ps に整形)
	波長	800nm(可変)

図 1 にドライブレーザーシステムの概略図を示す。ドライブレーザーシステムは MOPA(Master Oscillator and Power Amplifier)方式であり、パルス列を生成する Yb ファイバーレーザー発振器と、パルス列を増幅する Yb ファイバーレーザー増幅器で構成される。Yb ファイバーレーザーは高い安定性と高い出力が期待できる。一方で Yb ファイバーレーザーの波長は 1030nm 付近にピークを持つが、光陰極材料の NEA-GaAs のバンドギャップが 867nm であるため、MOPA のみではドライブレーザーとして使用することは出来ない。そこで Yb ファイバー

レーザーのパルス光を非線形光学結晶(LiB₃O₅)で第二高調波へ変換し、その第二高調波を光パラメトリック増幅の励起光とすることで 800nm のパルス光を生成する^[1]。

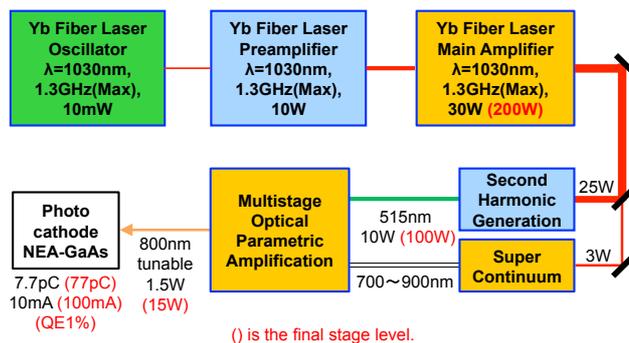


図 1. ドライブレーザーシステムの概略図

本発表ではレーザーシステム開発の一環として行ったレーザー増幅器の開発と、第二高調波発生の実証実験について報告する。さらに 1.3GHz ドライブレーザーシステムに向けたレーザー発振器の開発の進捗状況についても報告する。

2. レーザー増幅器

図 2 はレーザー増幅器の概略図である。シード光を増幅するために Yb イオンが添加されたフォトニック結晶ファイバーを使用する。フォトニック結晶ファイバーは Yb イオンが添加されたコアと周期的にエアホールが配列されたクラッドで形成された光ファイバーである。光ファイバー中を伝搬するパルス光は非線形光学効果の影響を受けるので、コア径を大きくしてパルス光のパワー密度を減少させる必要があるが、コア径が大きすぎるとパルス光がマルチモードで伝搬しパルスが劣化する。フォトニッ

[#] isao-maf@issp.u-tokyo.ac.jp

ク結晶ファイバーの場合、周期的に配列されたエアホールによってクラッドの屈折率がコアよりわずかに小さくなるため、非線形光学効果を抑制するためにコア径が大きくしても、パルス光をシングルモードで伝搬させることができる。

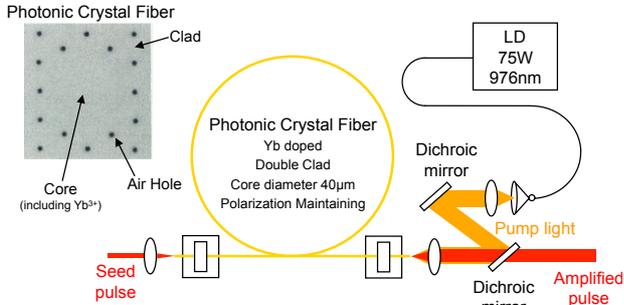


図 2. レーザー増幅器の概略図

レーザー増幅器の特性を評価するため、繰り返し周波数 85MHz、パルス幅 500fs のシード光の増幅し、増幅効率、スペクトル、パルス幅を測定した。図 3 はレーザー増幅器の増幅効率である。Slope Efficiency は 36% である。さらに、85MHz のパルス列を 13W まで増幅して、150nJ/pulse(=13W/85MHz) のパルスエネルギーを実現できた。これは 1.3GHz のシード光を 200W まで増幅した場合のパルスエネルギーと同程度である。

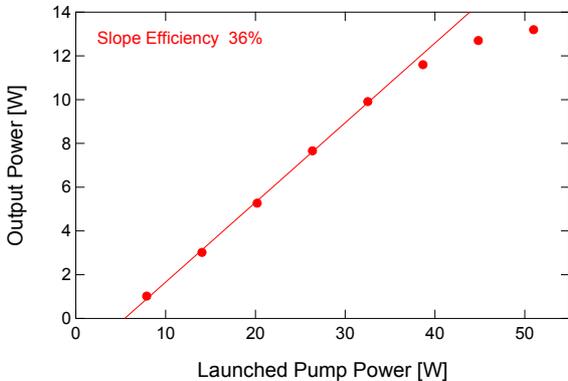


図 3. レーザー増幅器の増幅効率

図 4 はシード光と増幅光の光スペクトルである。1W から 10W までの増幅光のバンド幅(半値全幅)はおよそ 10nm であり、非線形光学効果によるバンド幅の顕著な広がりが現れていない。図 5 はシード光と増幅光の自己相関波形である。自己相関波形は 2 つに分けられたパルスの畳込みであり、パルス波形をガウス分布と仮定すると、パルス幅は自己相関波形の半値全幅の $1/\sqrt{2}$ に等しい。図 5 から 1W から 10W までの増幅光の自己相関波形の半値全幅は 1.4ps であり、よってパルス幅は 1ps のままで、増幅によるパルス幅の変化はほとんどない。以上より、Yb 添加フォトニック結晶ファイバーを用いたレーザー増幅器では非線形光学効果の影響を受けずにパルス光を増幅できることを確認できた。

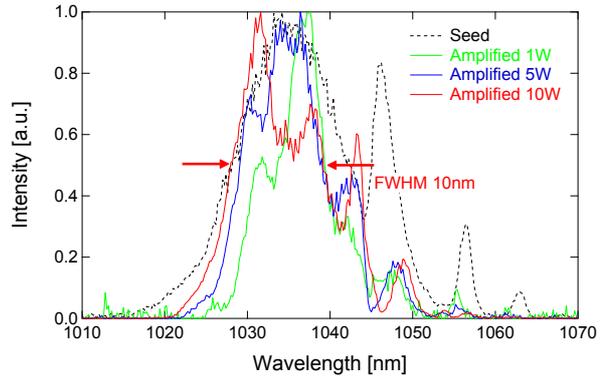


図 4. 光スペクトル

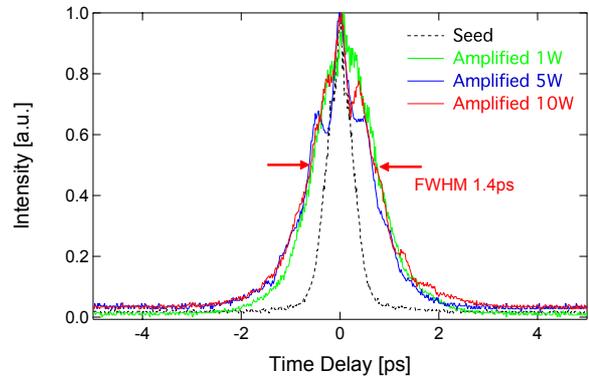


図 5. 自己相関波形

3. 第二高調波発生

レーザー増幅器によって ERL 電子銃に必要なパルスエネルギーを実現できたので、第二高調波変換の実証実験を行った。図 6 は第二高調波発生セットアップである。85MHz のレーザー発振器からのシード光をレーザー増幅器で 10W まで増幅し、レンズで集光させて LBO 結晶(LiB₃O₃)に入力する。LBO 結晶は厚さ 5mm で、入射光に対する角度を変えることで位相整合を行う(Type I phase matching)。

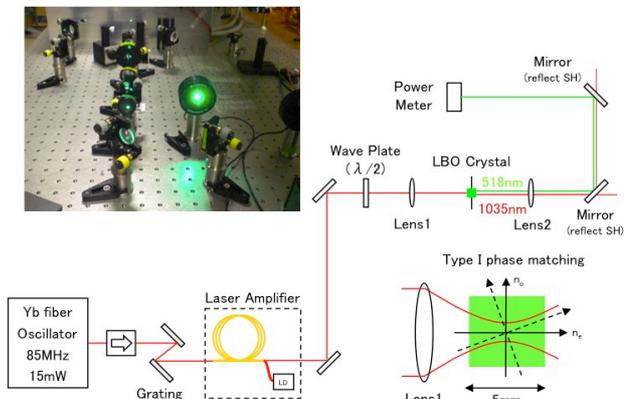


図 6. 第二高調波発生セットアップ

図 7 は基本光のパワーの関数として第二高調波のパワーおよび変換効率をプロットした。9.8W の基

本光を入力したときに発生する第二高調波は 4.8W であり、変換効率は 49%まで達した。4.8W の第二高調波の光スペクトルは図 8 の通り、中心波長が 516.5nm、バンド幅(半値全幅)は 1nm である。

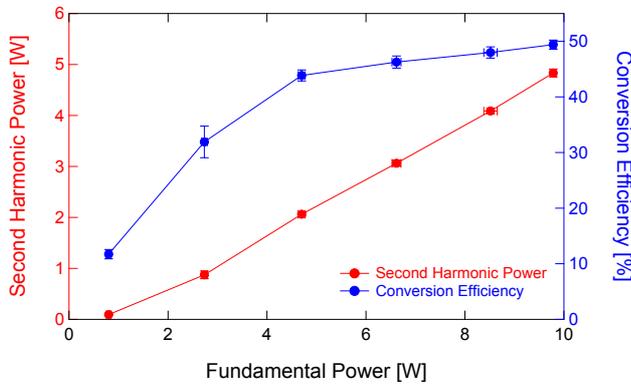


図 7. 第二高調波の変換効率

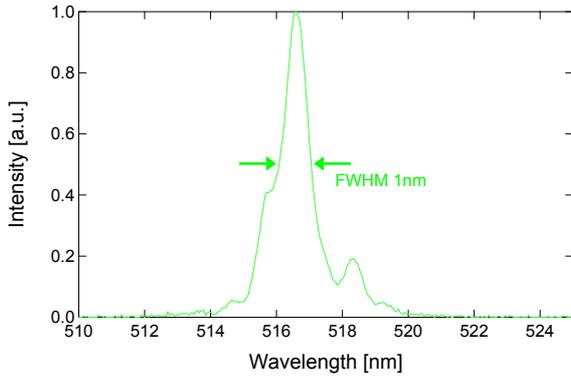


図 8. 第二高調波の光スペクトル

EO 変調器が挿入されている。EO 変調器とは外部電界の一乗に比例して屈折率が変化するポッケルス効果を利用して、外部電界で CW 光に強度変調をかける変調器である。このレーザー発振器では、EO 変調器によりリング型共振器で発振した CW 光に基本繰り返しの整数倍の周波数で強度変調を加えることで、能動的にモード同期を行う^[4]。

レーザー発振器で 421MHz モード同期パルスを発振させることができた。図 11 に 421MHz モード同期パルスの RF スペクトルを示す。421MHz にピークが立ち、パルスが発生していることが確認できる。421MHz のピークの周りに 22MHz 間隔のサイドピークを確認できるが、このサイドピークはリング型共振器の 22MHz 縦モードの組み合わせから生じる周波数成分であり、スーパーモード雑音と呼ばれている。このスーパーモード雑音は強度の不安定性を引き起こす。繰返し周波数を 1.3GHz まで上げるためにはスーパーモード雑音を抑制する必要がある。

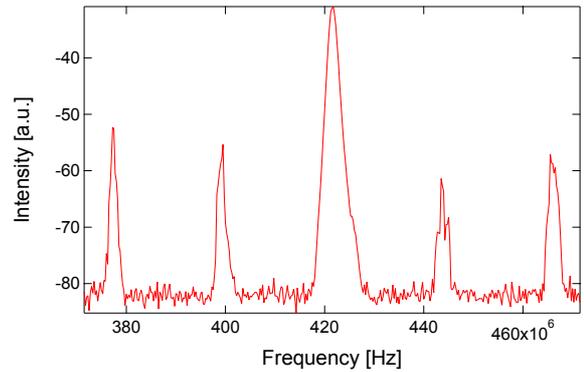


図 11. RF スペクトル

4. 1.3GHz レーザーシステムに向けて

我々は Yb ファイバーレーザーで 1.3GHz の繰り返し周波数を実現することを目標としていくつかの異なるタイプのレーザー発振器を開発している^[2,3]。その一つとして電気光学(EO)変調器で能動的にモード同期を行う Yb ファイバーレーザー発振器がある。

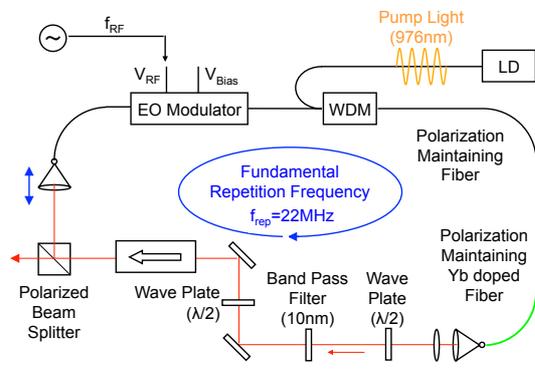


図 10. 能動モード同期レーザー発振器の概略図

図 10 に能動モード同期 Yb ファイバーレーザー発振器の概略図を示す。基本繰り返し周波数 22MHz の Yb ファイバーレーザーのリング型共振器の中に

図 12 は 421MHz モード同期パルスの光スペクトルである。スペクトルの中心波長は 1029.3nm、バンド幅(半値全幅)は 0.2nm 程度(0.06THz)である。図 13 は 421MHz モード同期パルスの自己相関波形である。自己相関波形の半値全幅が約 30ps であるから、パルス幅は 21ps(=30ps/√2)である。TB 積(=0.06THz×21ps)は非常に大きいため、パルス光はフーリエ限界まで到達しておらず、よってパルス圧縮によりさらに短くできる。

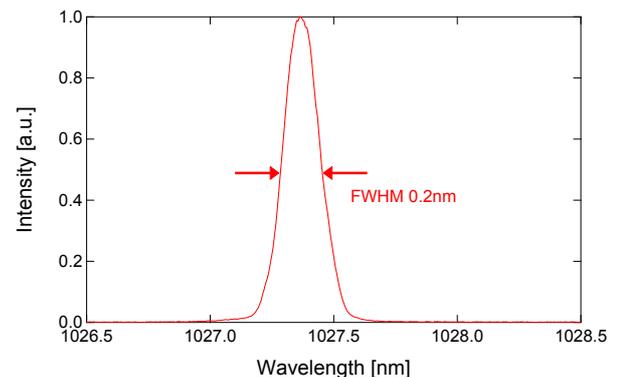


図 12. 光スペクトル

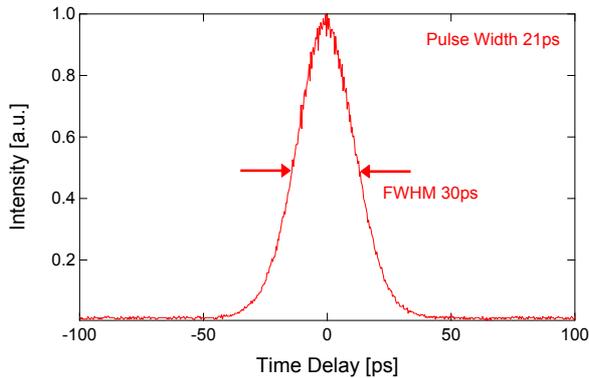


図 13. 自己相関波形

5. まとめ

ERL 電子銃ドライブレザーのために、Yb 添加フォトニック結晶ファイバーを使って 10W 級のレーザー増幅器を開発した。このレーザー増幅器で 150nJ/pulse (=10W/ 85MHz) のパルスエネルギーを実現することができた。さらに非線形光学効果によるパルス波形の劣化はほとんどなかった。

レーザー増幅器で第二高調波発生の実証実験を行った。厚さ 5mm の LBO 結晶に繰り返し 85MHz、パワーが 9.8W の基本光を入力して 4.8W の第二高調波が得られ、変換効率は 49% まで到達できた。

1.3GHz レーザーシステムに向けて、能動モード同期 Yb ファイバーレーザー発振器を開発している。421MHz の繰り返し周波数でバンド幅 0.2nm、パルス幅 21ps のパルスを発振できた。さらに繰り返し周波数を 1.3GHz まで上げるためにはスーパーモード雑音を抑制する必要がある。

参考文献

- [1] R. Hajima et al. (ed.), KEK Report 2007-7/JAEA-Research 2008-032 (2008) (in Japanese).
- [2] T. Kawasaki et al., Proc. the 5th annual meeting of Part. Acc. Soc. of Japan (2008) 586 (in Japanese).
- [3] D. Yoshitomi et al., CLEO CMA2 (2009).
- [4] M. Nakazawa et al., Electron. Lett., 30, 1603 (1994).