

Development of a linear cavity Yb-doped fiber laser oscillator for driving an ERL photocathode gun

Taisuke Kawasaki^{A)}, Isao Ito^{1,A)}, Norio Nakamura^{A)}, Dai Yoshitomi^{B)}, Yohei Kobayashi^{B)},
Kenji Torizuka^{B)}, Takashi Aoki^{C)}, Hiroshi Kawata^{D)}

^{A)} Institute for Solid State Physics (ISSP), University of Tokyo, 5-1-5 Kashiwanoha, Kashiwa, Chiba, 277-8581

^{B)} National Institute of Advance Industrial Science and Technology (AIST),

1-1-1 Umezono, Tsukuba, Ibaraki, 305-8568

^{C)} Shibaura Institute of Technology, 3-7-5 Toyosu, Koto-ku, Tokyo 135-8548

^{D)} High Energy Accelerator Research Organization (KEK), 1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801

Abstract

A Yb fiber laser is expected to have both high stability and high output power required for the drive laser of an ERL photocathode gun. We have been trying several approaches to develop a Yb fiber laser oscillator with a high repetition rate up to 1.3 GHz, which is the RF frequency of a superconducting accelerating cavity. One of them is a linear cavity fiber laser oscillator that performs mode locking by SESAM (Semiconductor Saturable Absorber Mirror). A pulse train with a fundamental repetition rate higher than 400MHz was obtained in this oscillator. We report specifications and performance of the developed linear cavity fiber laser oscillator.

ERL電子銃励起用リニアキャビティ型 Ybファイバーレーザーオシレータの開発

1. はじめに

ERLでは電子ビームがリング内を多数回周回することがないので、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、電子源で生成したビームの特性・品質が放射光の特性・品質に大きく反映されることになる。ERLでは電子源として光陰極電子銃を使用するが、電子銃励起用レーザーは、ERL放射光源の性能を決める非常に重要な開発要素になる。

ERL用の光陰極電子銃励起用レーザーに必要なとされる性能は、以下の様なものが挙げられる。

- ① 超伝導空洞の性能を最大限に利するために繰り返し周波数が高周波空洞の共振周波数と等しい。
- ② 最終的に光陰極に入射する10~30psの矩形波に整形することが可能な、短いパルス幅である。
- ③ 要求される電子ビームを作り出すのに十分な出力を持つ。
- ④ 光陰極から出てきた電子のエミッタンスを最小限にとどめるために、光陰極のバンドギャップにできるだけ近い波長である。

実際にERLにおいて想定されている電子銃とレーザーのパラメータを表1に示す。ERLではこれらの要求を満たすため、パルス列を生成するマスターオシレータとそれを増幅するアンプから構成されるMOPA(Master Oscillator and Power Amplifier)方式が採

用されている。安定性やパルス長の面からMOPA用マスターオシレータの有力候補としてYbファイバーレーザーが考えられている。光陰極の材料としてバンドギャップが867nmのNEA-GaAsが採用されているが、Ybファイバーレーザーは波長が1030nm付近にピークを持つため、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からの1.3GHzパルスをYbファイバーアンプで増幅した後に2倍波へ変換し、OPA(Optical Parametric Amplification)の励起光とすることにより、800nmの1.3GHzパルスを生成する方法が考えられている^[1]。

電子銃	パルス長	10 - 20ps
	ピーク電流/パルス	0.77 - 7.7A
	規格化エミッタンス	0.1 - 1.0mm mrad
レーザー	繰り返し周波数	1.3GHz
	マイクロパルス長	10 - 30ps (矩形)
	レーザー出力パワー	15W
	レーザー波長	800nm(可変)

表1.ERL用光陰極電子銃および光陰極励起用レーザーの主なパラメータ。

これまで一般に使用されてきたYbファイバーレーザーの繰り返し周波数は100MHz程度が上限であり、ERLの超伝導加速空洞の共振周波数1.3GHzに対して十分ではない。我々はYbファイバーレ

¹ E-mail: isao-maf@issp.u-tokyo.ac.jp

ザーで1.3GHzの繰返し周波数を実現することを目標としていくつもの異なるタイプのオシレータを開発している^{[2][3]}。その1つとしてSESAM(半導体可飽和吸収鏡)を用いてモードロックを行う直線型のコンパクトなオシレータがある。本発表ではオシレータとその特性について報告する。

2. セットアップ

セットアップを図1に示す。まず、レーザーダイオードからの励起光(波長: 976nm)をコリメートレンズにより平行にして、Ybファイバー(Yb-Doped Fiber)に入射する。Ybファイバーはコア径4 μ m、ドープ量 1.3×10^4 ppm、長さ23cm程度のものを用いている。Ybファイバーの入射側には波長依存性のあるダイクロミックカップラーをファイバー端面に密着してある。このカップラーは、励起光である976nmの光をファイバー内部へと透過し、Ybファイバーから放出される1030nmの光を反射する。さらにモード同期を行うための素子としてSESAMを片方のファイバー端面に密着させている。SESAMとはSemiconductor Saturable Absorber Mirrorsの略で、あるしきい値を超える強度の光が入射したときのみ反射率が上昇する性質を持つ特殊なミラーである。図2にSESAMの飽和特性を示す。SESAMは1040nm付近に帯域を持ち、飽和フルエンス(飽和に必要なエネルギー密度) $F_{sat}=90 \mu$ J/cm²、モジュレーションデプス(飽和時と非飽和時の反射率の差) $\Delta R=0.6\%$ 、ノンサチュラブルロス(完全に飽和している状態で反射した場合のロス) $A_{ns}=0.4\%$ のものを用いた。また、このSESAMはアウトプットカップラーも兼ねており、1.5%の光を透過するようになっている。

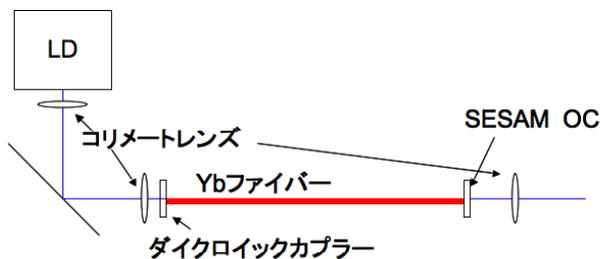


図1.リニアキャビティ型Ybファイバーレーザーオシレータのセットアップ

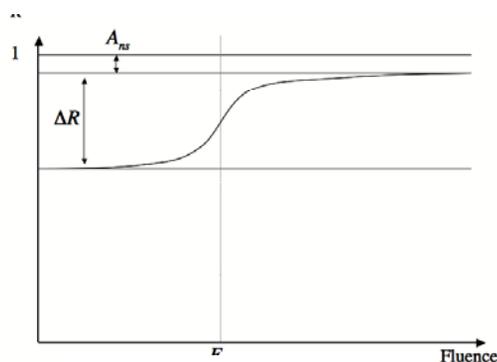


図2.SESAMの飽和特性

レーザーダイオードによって励起されたYbファイバーからの放出光は、ファイバー両端に取り付けられたカップラーとSESAMによりキャビティ内に閉じ込められファイバー内を往復しながら誘導放出を繰り返し増幅される。通常ではキャビティ内でCW発振が起るが、ファイバー端にあるSESAMはCW発振では飽和しない。一方でパルス発振では、CW発振と比較して何桁も高いピーク強度を持つため、パルスがSESAMに入射したときのみSESAMが飽和する。そのため、キャビティ内ではCW成分のロスが大きく、パルス成分のロスが小さくなる状態が作り出され、パルス発振が起る。

3. 実験結果

800mWの励起光でYbファイバーを励起して、5mW、425.5MHzの繰返し周波数のパルス発振が得られた。図2にアナログオシロスコープで測定したオシレータの出力を示す。測定は1GHzの帯域を持つPINフォトダイオードと600MHzの帯域を持つオシロスコープを使ったのでパルス形状は精確ではないが、パルス列がはっきりと観測できる。

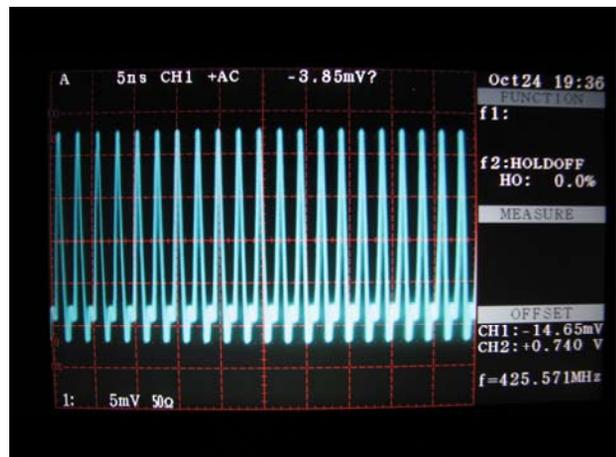


図2. 425.5MHzのモード同期パルス列

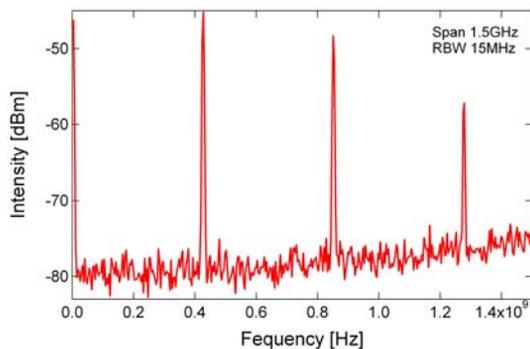
図3にスペクトルアナライザーで計測したパルスのRFスペクトルを示す。(a)はSpan 1.5GHz、Resolution Band Width 15MHzで計測を行い、(b)はSpan 100kHz、Resolution Band Width 1kHzで計測を行い、基本周波数425.5MHz近傍を観測している。(a)から425.5MHzごとに等間隔でピークが立ち、パルスが発生しているのが分かる。さらに(b)で基本周波数425.5MHzのピーク近傍でスプリアス(設計上意図していない周波数成分)がないことが確認できる。

図4は光スペクトルアナライザーで測定したモード同期パルスの波長スペクトルである。スペクトルは長方形に似た形状をしており、中心波長が1085nm、広がり半値全幅で5nm程度であった。

図5に帯域10GHzのMSMフォトダイオード検出器とサンプリングオシロスコープで見積もったパルス幅を示す。図5の赤線がMSMフォトダイオード検出

器に425.5MHzオシレータのパルスを入射した場合の応答で、青線はフェムト秒パルスを入射した場合の応答である。青線の半値全幅は測定の分解能を示している、およそ90psである。青線のピークの半値全幅(測定の分解能)に対して赤線で示された425.5MHzオシレータのパルスの半値全幅の方が大きく、およそ120psであることから、パルス幅は $\sqrt{(120\text{ps})^2 - (90\text{ps})^2} = 80\text{ps}$ となる。ERL電子銃励起用レーザーとしては最終的に光陰極に入射する20psの矩形波に整形することが可能なほどパルス幅が短くなければならない。分散補償などによりパルス幅をさらに短くする必要がある。

(a) Span 1.5GHz, Resolution Band Width 15MHz



(b) Span 100kHz, Resolution Band Width 1kHz

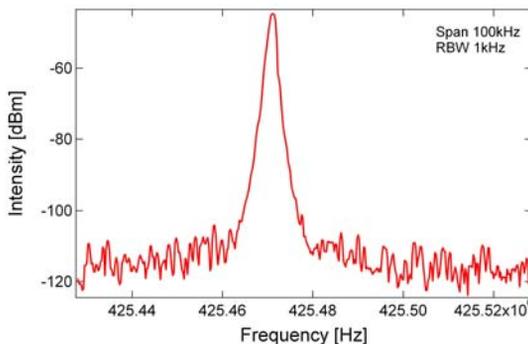


図3. 425.5MHzのパルス列のRFスペクトル

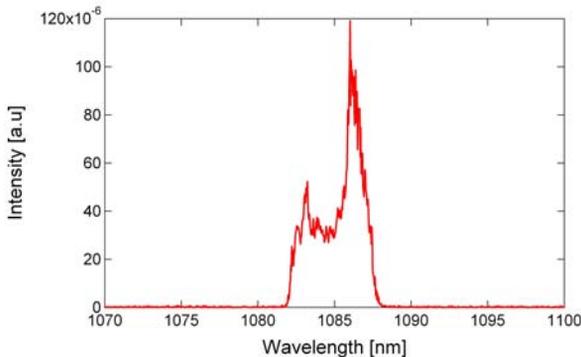


図4. 425.5MHzのパルス列の波長スペクトル

ERLでは1.3GHzの高繰り返しが要求されるため、

1.3GHzの半分の650MHzを想定したキャビティ長のオシレータも製作した。各部品は425MHzオシレータと同じものを用い、Ybファイバーの長さのみを変更した。このオシレータから得られたパルス列は波高値に変調が見られるものの、677MHzにおいてもパルス発振に成功した。図6にスペクトルアナライザーで計測したパルスのRFスペクトルを示す。Span 3GHz、Resolution Band Width 30MHzで、677MHzごとにピークが立ち、パルス光が発生していることが分かる。

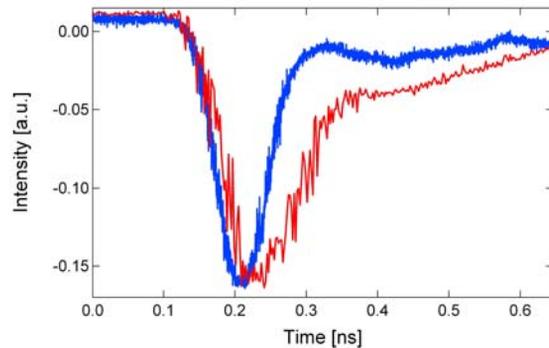


図5.パルスの時間波形

赤：425.5MHz オシレータからのパルス
青：別のオシレータからのフェムト秒パルス

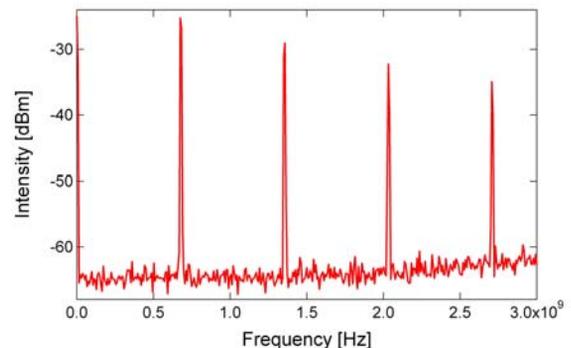


図6. 677MHzのパルス列のRFスペクトル

4. まとめ

今回我々はSESAMを用いたコンパクトなリニアキャビティ型モード同期Ybファイバーレーザーのパルス発振に成功した。425.5MHzの繰り返し周波数で安定な発振に成功し、その出力は5mW、パルス幅は80psであった。さらに677MHz程度の繰り返し周波数で安定な発振にも成功した。

参考文献

- [1] 羽島良一 et.al, コンパクトERLの設計研究(KEK Report 2007-7, JAEA-Research 2008-032)
- [2] 川崎泰介, 「ERL電子銃励起用ファイバーオシレータの開発」, 修士論文, 東京大学, 2008
- [3] Taisuke Kawasaki, et al., Proceedings of the 5th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan and the 33rd Linear Accelerator Meeting in Japan, p586-588