

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

Taisuke Kawasaki^{A)}, Norio Nakamura^{A)}, Yohei Kobayashi^{B)},

Dai Yoshitomi^{B)}, Kenji Torizuka^{B)}, Masao Kuriki^{C)}, Hiroshi Kawata^{D)}

^{A)} University of Tokyo, 5-1-5 Kashiwa-no-ha, Kashiwa-shi, Chiba-ken, 277-8581

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

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

^{C)} Hiroshima University, 1-3-1 Kagamiyama, Higashi-Hiroshima-shi, Hiroshima-ken, 739-8530

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

Abstract

A laser for driving a photocathode electron gun is important for an ERL (Energy Recovery Linac), because quality of an ERL electron beam is closely connected with the laser performance. We started to develop a Yb-doped fiber laser for an ERL photocathode gun to achieve high stability and low emittance of the ERL electron beam, and then we succeeded in oscillating a Yb-doped fiber laser oscillator at 100MHz with a ring cavity. Furthermore, we are trying to increase the repetition rate of the laser oscillator with the developed 100MHz ring cavity and an additional 1.3GHz external cavity that has the same repetition rate as an ERL superconducting RF cavity. We could already detect generation of a 1.3 GHz pulse train in this oscillator system.

ERL光陰極電子銃励起用Ybファイバーレーザーオシレータの開発

1. はじめに

エネルギー回収型ライナック(ERL)は、現行の放射光源用加速器と異なり放射光を発生させる際、電子ビームがリング内を複数回周回することはない。ダンピングによる平衡状態を待つことなく放射光を取り出すことになるため、放射光の性質は電子源の性能に大きな影響を受ける。そのため、電子銃の光陰極を励起するレーザーの性能は非常に重要な要素となる。

ERL用の電子銃ドライブレーザーに必要とされる性能は、以下の様なものが挙げられる。

- 1) 電子銃の光陰極を励起するため、そのバンドギャップより短い波長であること。また、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こと。
- 2) 電子ビームのバンチ長に比して十分立ち上がり

電子銃	パルス長	10~20ps
	電流/パルス	3.9~7.7A
	エミッタンス(規格化)	0.1~1.0 μ rad
電子銃、レーザー	繰り返し周波数	1.3GHz
レーザー	レーザー出力/パルス	10nJ
	レーザー出力パワー	16W
	レーザー波長	800nm、可変

表1 ERL用電子銃および光陰極励起用レーザーの主なパラメータ

の早いパルスであること。

- 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こと。
- 4) 高周波空洞の性能を最大限に利用するために繰り返し周波数が高周波空洞の共振周波数(あるいはその整数分の1)と等しいこと。

実際にERLにおいて想定されている電子銃、レーザーのパラメータを表1に示した。

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。Ybファイバーレーザーは安定性やパルス長の側面から、このMOPA用マスターオシレータの有力候補として考えられている。Ybを利用したレーザーは波長が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。この場合、Ybファイバーレーザーからの1.3GHzパルスにYbファイバーアンプで増幅し、その後2倍波に変換、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、といった方法が考えられている[1]。

現在、Ybファイバーレーザーの安定性、パルスの立ち上がり等は良好であるものの、繰り返し周波数に関しては十分ではない。今回我々は高繰り返しを達成する方法として、まず、100MHzでパルス発振するYbファイバーレーザーを製作した。さらに、そのオシレータからのパルス光を100MHzの整数倍(13倍)である1.3GHzの繰り返し周波数を持つ外部共振器に入射することで1.3GHzのパルス列を得ることを

試みた。これと同様な手法によって、Erファイバーレーザーにおいて高繰り返し化が達成されている[2]。

2. Ybファイバーレーザー発振器

今回の実験では1.3GHzの繰り返しを達成するために、100MHzのパルス光を発生させるYbファイバーレーザーオシレータをマスターオシレータとして利用した。そのセットアップを図1に示す。

まずレーザーダイオードにより、Ybのドープされたファイバーが励起される。Ybファイバーは1020nm-1100nm程度にゲインを持ち、976nmの光で励起できる。それにより発生した自然放光はファイバー内で誘導放出を繰り返し増幅された後、ファイバー端から空中に放出され、レンズでコリメートされて平行光となる。その後3枚の波長板、偏光ビームスプリッターを経てグレーティング対で分散を補償され再びYbファイバーに入る事で、リング共振器を構成して発振する。ファイバー中では一般的に偏光が回転していくが、偏光の回転が光の強度に依存する非線形偏波回転と呼ばれる現象がある。波長板と偏光ビームスプリッターは、この非線形偏波回転

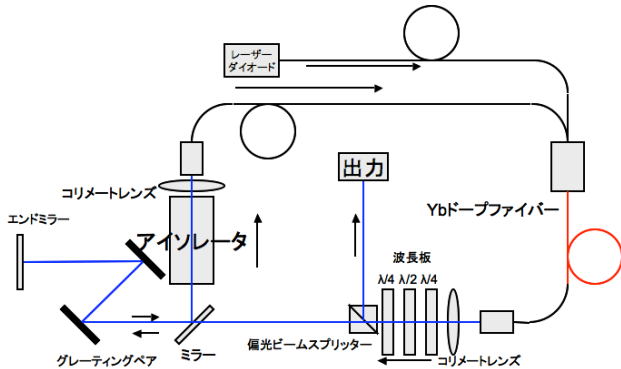


図1 100MHz Ybファイバーレーザーオシレータのセットアップ。ファイバー部分を黒および赤、空中部分を青のラインで示した。

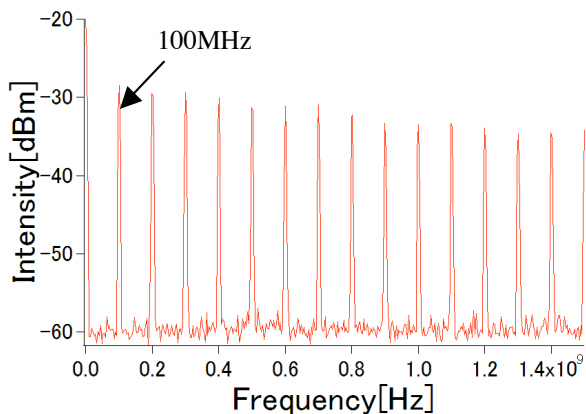


図2 100MHz Ybファイバーレーザーオシレータの周波数成分

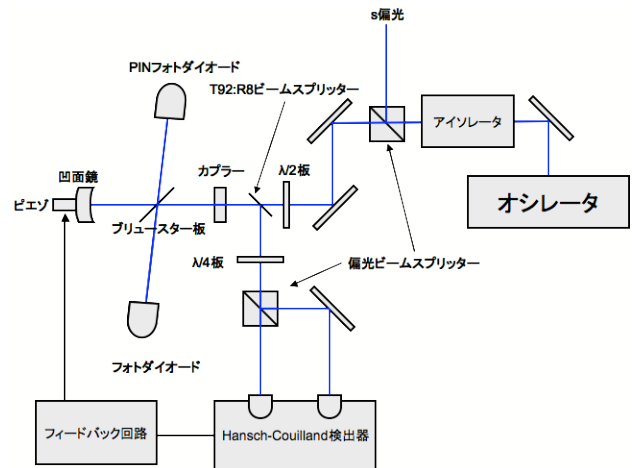


図3 1.3GHz外部共振器のセットアップ

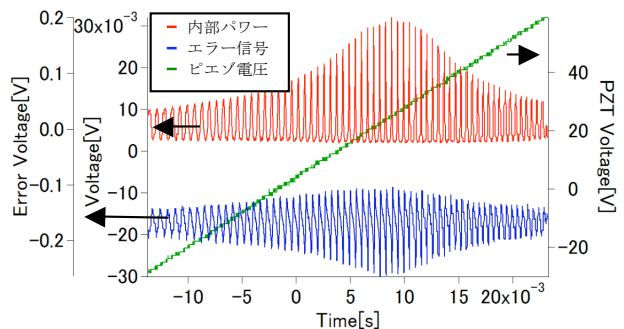


図4 共振器長スイープ時の内部強度とエラー信号の変化。フォトダイオードで検出した。

を利用し、パルス成分が強い場合に共振器のQ値が高くなる構成に設定することにより、レーザー光をパルス化する役割を果たしている。このオシレータでは励起用レーザーダイオードを320mWで励起すると40mWの出力で非常に安定な100MHzパルスが得られた。パルスの周波数成分を図2に示す。パルスの幅は未測定であるが、スペクトル幅から100fs程度まで圧縮可能であると予想される。

3. 外部共振器による高繰り返し化

上記構成のオシレータでの繰り返し周波数は、光パルスが共振器一周する時間の逆数で与えられる。そのため、1.3GHzの繰り返し周波数を達成するには、発振器の周長を約23センチメートルに抑える必要が有る。しかしながら、ファイバーの屈折率が1.5であること、Ybファイバーのみでも数センチの長さを有することなどから共振器の単純な小型化によりこれを達成することは非常に困難である。そのため、高繰り返し化の実現には他の手法を用いる必要が有る。

今回我々は100MHzのパルス列を1.3GHz相当の全長を持つ外部共振器にロックする事で繰り返し周波数を増加させる手法をとった。セットアップを図3に示す。外部共振器は約115.4mmの長さのリニア共振器で、98.4%カプラーとR=350mm凹面鏡から構成

されている。また、ピエゾ素子を用いて全長を数 μm 変化させる事が出来るようにした。外部共振器の中央付近にはレーザー光とのなす角がブリュースター角となる様にガラス板を置いた。このブリュースター板により、外部共振器内ではs偏光が外に蹴りだされ、p偏光のみが増幅される。これにより、カップラー部での外部共振器内からの透過光はp偏光が多くなり、カップラーでの反射光はs偏光が多くなる。この二つの偏光を $\lambda/4$ 板によって干渉させることでHansch-Couillaud法によるエラー信号を検出して共振器のロックを行うことができる。エラー信号は内部パワー変化を微分した形となる[2]。また、フィードバック回路は、Hansch-Couillaud干渉計によって得られたエラー信号の中の周波数成分の比率を、ミラーの運動に適した比率に整える役割を持つ。

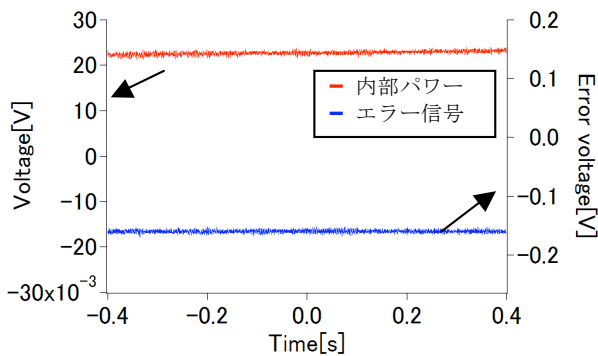


図5 ロック状態の外部共振器内部パワーとエラー信号

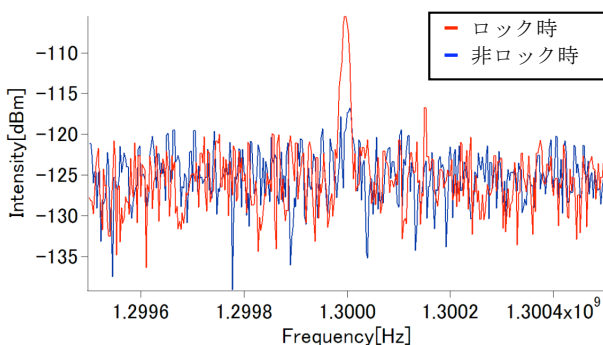


図6 外部共振器内の1.3GHz成分 PINフォトダイオードで検出した。

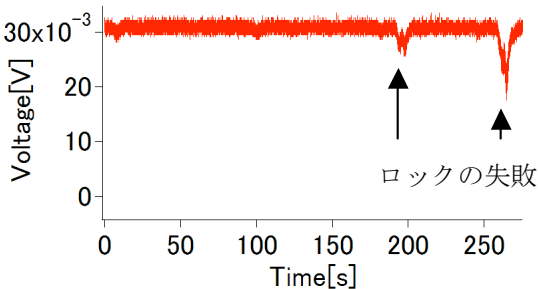


図7 外部共振器の長時間ロック (外部共振器の内部パワー。フォトダイオードで検出)

まず我々は、ピエゾ素子に10Hzの三角波の電圧を加えることで共振器長を数 μm スイープした。結果を図4に示す。オシレータからの100MHzパルス列と外部共振器に閉じ込められたパルスの中の波長の位相が合うと外部共振器の内部パワーが増幅されている。また、Hansch-Couillaud干渉計でとらえたエラー信号は、その内部パワーの微分形になっている。

次にピエゾ素子にフィードバック回路を接続する事により、外部共振器をオシレータからの100MHzパルス列にロックした。そのときの内部パワーとエラー信号を図5に示す。エラー信号が一定となり、内部パワーも高い状態のまま安定している。また、ロック時、非ロック時の1.3GHz成分を図6に示す。ロック時には、1.3GHz成分が増加しており、1.3GHzのパルス列が生成されている事が確認できた。また、ロック状態は現状でも最大200秒程度まで続いた(図7)。

4. まとめと今後の課題

ERL光陰極電子銃励起用のYbファイバーレーザーオシレータを開発してきた。最初に、100MHzオシレータの安定な発振に成功し、さらに1.3GHzのオシレータを100MHzのYbファイバーレーザーオシレータと1.3GHzの外部共振器を用いて製作した。そこで、1.3GHz成分の増幅を確認することができた。その継続時間は200秒程度であった。

今回の実験では、パルス列を直接観測できるだけの出力が得られなかった。これを解決するためには、100MHzパルスと外部共振器のカップリング効率を更に増強するとともに、外部共振器の凹面鏡部分をアウトプットカップラーに交換すること、外部共振器の形状をリング構造にすること等のセットアップの改良を検討していく必要がある。さらに、カップラーの選定、アライメントの調整により、外部共振器のフィネスを向上させ、より理想的な1.3GHzパルス列の生成を行っていく。また、加速器の連続運用は10時間以上にも及ぶため、現在の連続ロック時間では不十分である。それを改善するために更にノイズの少ない環境を作ることに努める必要がある。

参考文献

- [1] 羽島良一、中村典雄、坂中章悟、小林幸則 (編) “コンパクトERLの設計研究” KEK Report 2007-7, JAEA-Research 2008-032, February 2008 A
- [2] Jian Chen, et al., “Generation of low-timing-jitter femtosecond pulse trains with 2 GHz repetition rate via external repetition rate multiplication” OPTICS LETTERS, Vol. 33, No. 9 May 1, 2008
- [3] T. W. Hansh and B. Couillaud, “Laser Frequency stabilization by polarization spectroscopy of a reflecting reference cavity” Opt. Commun, 35, 441(1980)