

高繰り返しシード型自由電子レーザーのためのレーザーエネルギー変調器 A LASER BASED ENERGY MODULATOR FOR HIGH REPETITION RATE SEEDED FEL

本田洋介 *A)

Yosuke Honda*^{A)}

^{A)}High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

Abstract

In order to realize a high repetition rate seeded coherent radiation source, it is necessary to develop a seeding system which works in a continuous mode. Utilizing the longitudinal electric field in a higher transverse mode laser stored in an optical cavity, it is possible to introduce an energy modulation in an electron bunch. Through acceleration and dispersion handling, the modulation at laser wavelength can be converted into a finer density structure. It can be used as the seed of coherent radiation. We are developing a laser system to be used in the laser modulator system.

1. はじめに

近年、電子線形加速器の性能が飛躍的に向上し、高輝度でエネルギー幅の狭いビームが実現されるようになった。これを利用して、SASE型FELなどのコヒーレント放射光が実用段階にある。次の段階で期待される光源性能は、時間コヒーレンスと平均強度であろう。時間コヒーレンスはシード化の手法で、ビームの平均強度についてはERL等の超伝導技術による連続動作加速器で、実現可能である。これらを組み合わせるうえで問題になるのは、シードシステムの高繰り返し動作である。通常は、低繰り返しでしか動作できない高強度レーザーを用い、その高次高調波を利用して行われるが、ここでは、高繰り返し連続動作を可能にするため、光共振器を利用し、レーザーの光電場で直接に電子ビームに変調をかけることを検討する。

2. レーザー電場による加速

z 方向に進行する TM 波のレーザー光を考える^{[1][2]}。即ち、電場は x 方向で、磁場は z 方向成分を持たない。この場合、マックスウェル方程式より直ちに、

$$ikE_z = \frac{\partial E_x}{\partial x} \quad (1)$$

の関係が得られる。つまり、横方向の電場の空間変化により、進行方向の電場が存在する。電子ビームにレーザー光を重ねて伝搬させ、この進行方向電場で電子ビームを加減速して、バンチ内に密度変調構造を導入することを考える。レーザースポットの中央付近で、横方向の電場が空間的に大きく変化する場合に、大きな進行方向電場が得られる。通常のガウス型の基本モードではなく、高次横モードである TEM_{01} モード (Fig. 1) が、これに相当する。

このモードの x 方向電場 E_{10}^x は、

$$E_{10}^x = A \cdot x \exp\left(-\frac{x^2}{\omega^2}\right) \exp(i(\omega t - kz + 2\phi(z))) \quad (2)$$

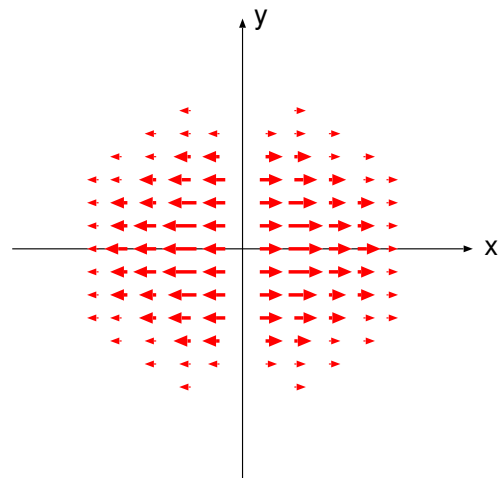


Figure 1: 高次横モードレーザー光の電場プロファイル。

$\phi(z)$ は Gouy 位相で、 $\phi(z) = \tan^{-1}\left(\frac{z}{z_0}\right)$ 、 z_0 はレーリー長 ($z_0 = \frac{\pi \omega_0^2}{\lambda}$) である。つまり、簡単に書くと、横方向電場 E_x は

$$E_x = x e^{-x^2} \quad (3)$$

したがって、進行方向電場は、

$$E_z = \frac{(1 - 2x^2)e^{-x^2}}{k} \quad (4)$$

の分布である。これを Fig. 2 に示す。スポットの中心付近では、横方向電場はゼロになり、進行方向電場が最大になる。

レーザーパワー P で表すと簡単に、

$$E_z = \frac{1}{2z_0} \sqrt{\frac{P}{c\epsilon_0}} \quad (5)$$

と書ける。レーザー光は、 z_0 程度の距離で拡がり、また位相がずれてしまうので、実効的に加速に使用できる距離は $2z_0$ とすると、エネルギーゲイン G は、

$$G = E_z \times 2z_0 = e \sqrt{\frac{P}{c\epsilon_0}} \quad (6)$$

*yosuke@post.kek.jp

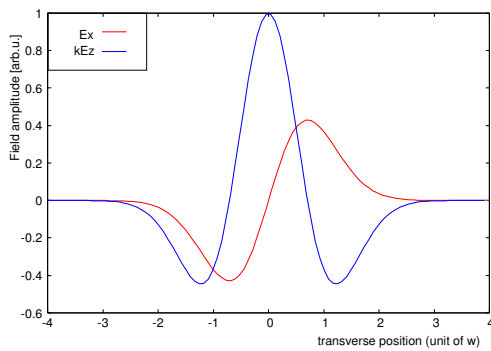


Figure 2: 横方向と進行方向の電場分布の比較.

となり、 z_0 あるいは w_0 に依らない事が分かる。 $P = 1$ MW で、 $G = 20$ keV が得られる計算である。これは、100 MeV クラスのビームに、そのエネルギー拡がりと同程度以上のエネルギー変調を与えるのに十分である。

最近、特にレーザーコンプトン散乱光源 (LCSS) で開発されている光共振器^[3]では、共振器内部に、162.5 MHz 繰り返しの時間幅 10 ps のレーザーパルスを連続的に平均パワー 100 kW で実現する設計で開発を行っている。これは、ピークパワーで言うと 60 MW であるから、ここで議論したレーザー電場は技術的には問題無いことが分かる。また、TEM₀₁ モードの共振器蓄積も、既に確立した技術である^[4]。

3. 密度変調の生成

KEK では、ERL 試験加速器が建設され、現在コミッションングを行っている。将来的には、2ループ型の 200 MeV クラスに増強する構想もあった。ここでは、この将来的な構成を仮定し、共振器に蓄積した高次モードレーザーのレーザー電場加速によるエネルギー変調器を設置することを考える。

Fig. 3 にレイアウトを示す。1 周目の周回部にレーザー共振器を設置する。共振器内部には、ビームの進行方向と同じ向きに、バンチと同期したレーザーパルスが周回する。高次横モードの電場の進行方向成分による加減速により、バンチ内にレーザー波長の周期でエネルギー変調が生じる。その下流の戻りアーク部の分散 $R_{56}^{(1)}$ を調整し、エネルギーと到達時間に相関をつけたうえで、2 周目に向けて加速部をオフクレストで通過させる。オフクレスト加速により、バンチ全体にエネルギーチャープがかかる。2 周目のアーク部の分散 $R_{56}^{(2)}$ を調整すると、バンチ全体を圧縮すると同時に、レーザーによって導入されたエネルギー変調が密度変調として発現するようになる。このとき、バンチ全体の圧縮の効果により、はじめにレーザー波長の周期で導入した変調が同時に圧縮されるので、レーザーの波長より細かい構造が実現出来る。

このときの位相空間分布の様子を Fig. 4 に示す。加速器部の周波数を 1.3 GHz、エネルギーゲインを 130 MeV/path とし、変調用レーザー波長を $\lambda = 1\mu\text{m}$ 、導入するエネルギー変調を $\Delta\gamma/\gamma = 1 \times 10^{-4}$ 、2 周目の加速位相は 60 度 (クレストから 30 度オフ) のオフクレストとした計算例である。レーザー加速で導入したエネルギー変調を、分散で一旦引き延ばしておいて、その後の

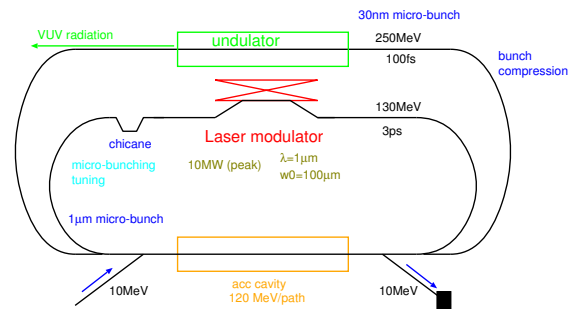


Figure 3: 2ループ ERL 加速器にレーザー共振器エネルギー変調器を設置するレイアウト.

オフクレスト加速と分散によるバンチ圧縮でこれが打ち消されて位相空間上で立ち上がる状態になる様子が分かる。この例では、最終的にレーザー波長の 1/5 の密度変調が得られている。

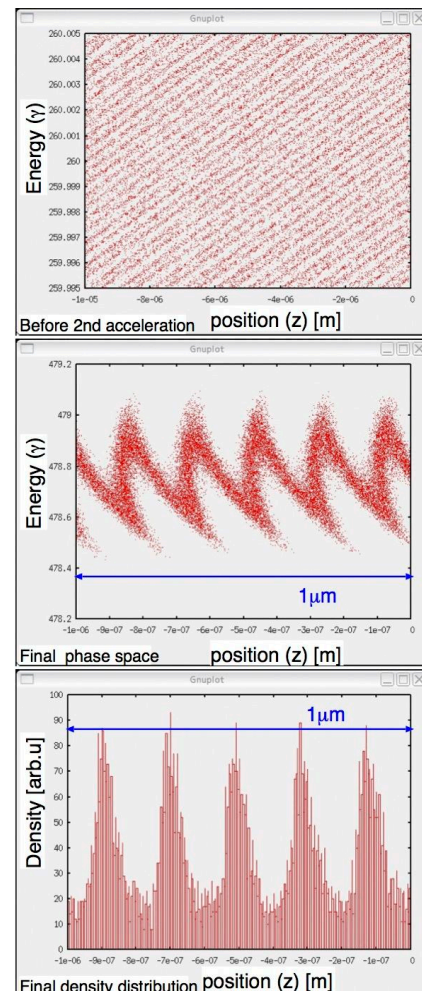


Figure 4: 位相空間の変化の様子 (圧縮率 1/5).

バンチ圧縮率を 1/9 で調整した例を、Fig. 5 に示す。これ以上の圧縮率を得ようとすると、加速 RF の丸みが残ってしまい、密度変調を実現するのが難しくなる。

より細かい構造を実現するために、Fig. 6 のようにレーザーエネルギー変調器を 2 段階にした。いわゆる

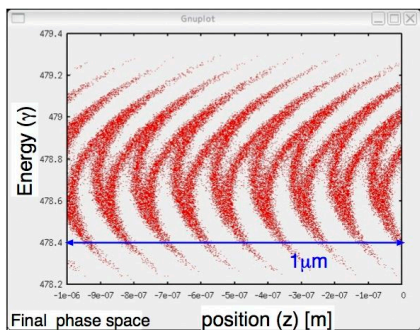


Figure 5: 位相空間の変化の様子 (圧縮率 1/9).

EEHG と同じである。分散の調整部が3箇所になるが、これらの調整によって、最終的に Fig. 7 のような位相空間分布が得られ、レーザー波長の 1/50 程度の構造を発現させることができる。

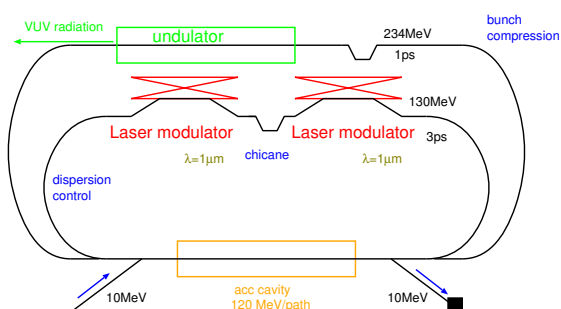


Figure 6: 2段階変調のレイアウト。

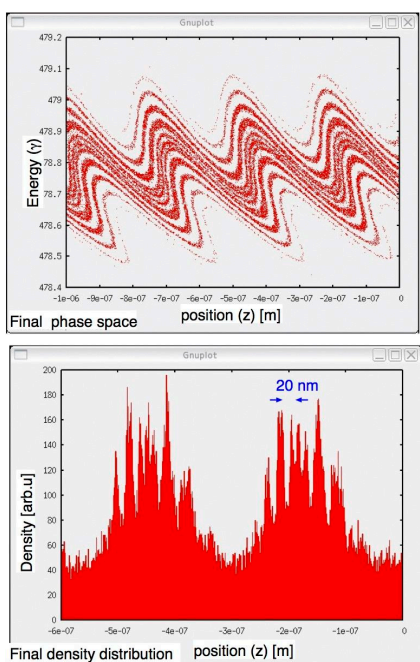


Figure 7: 位相空間の変化の様子 (2段階変調)。

4. レーザー変調器の開発状況

既に述べたように、レーザー変調器に要求されるレーザー強度は、既存の共振器のもので十分ではあるが、より高ピークパワーのレーザー光を実現するため、広帯域で短パルス化の可能性のある Yb レーザーのシステムを開発している。

まず、Fig. 8 および Fig. 9 に示す、Yb ファイバによるレーザー発振器を製作した。非線形偏波回転 (NLPR) によるモードロックレーザーである。可飽和吸収ミラー (SESAM) によるセルフスタートを導入している。また、外部共振器蓄積の高速制御を可能にするために、共振器内部に EO 位相変調器を導入している。繰り返しは 38 MHz、RMS パルス幅は 120 fs である。

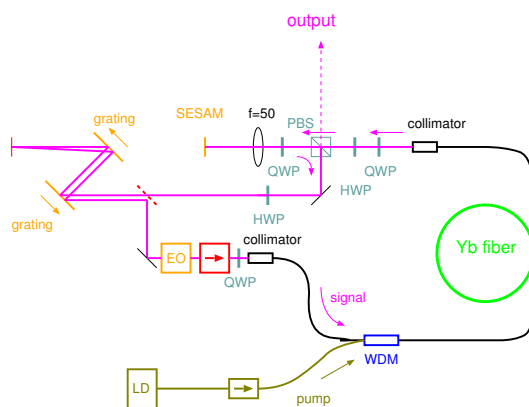


Figure 8: Yb ファイバモードロックレーザー発振器の構成。

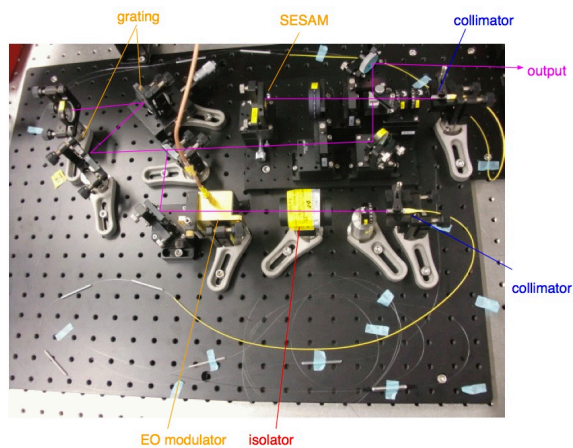


Figure 9: Yb ファイバモードロックレーザー発振器。

広帯域のレーザーパルスを外周共振器に蓄積する際に問題になるのは、キャリアエンベロープ位相オフセット (CEO) である。通常、共振器長をスキャンして共鳴状態を観測すると、波長の整数倍毎に共鳴ピークが見られるが、短パルスのレーザーを高い増大率で蓄積するほど、パルス全体の重なりへのずれの影響が大きくなる。1 波長分のずれでも顕著な効率の低下になる場合、もともとの発振器のパルス間に位相のずれがあると、外部共振器に理想的にパワーが蓄積されなくなってしまう (Fig.

10)。

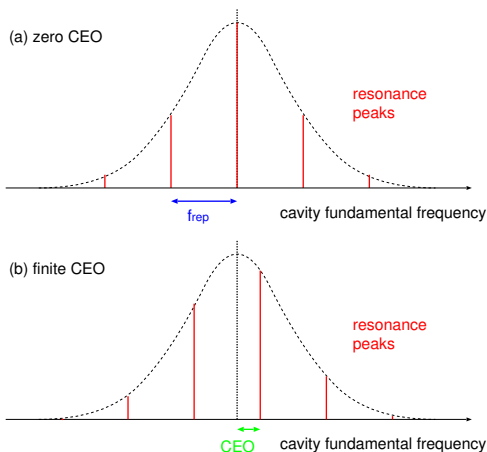


Figure 10: CEO の影響による共振ピークの様子。

この効果を補償するために、AOM による波長シフトを導入した。AOM で回折させることによって、パルス繰り返しは変化させずに波長をシフトすることができる。これは、CEO を人為的に調整することになる。発振器の直後に、Fig. 11 のような、ダブルパスの構成で AOM のシステムを設置した。そのうえで、Fig. 12 に示す 4 枚ミラー外部共振器に入射し、共振試験を行った。

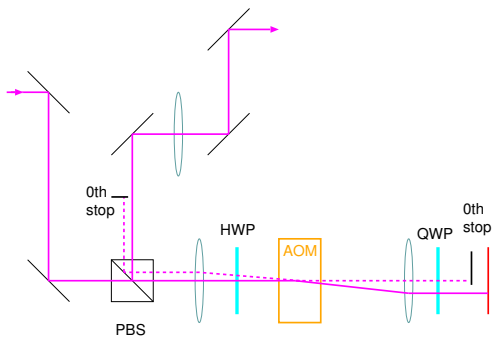


Figure 11: AOM による CEO 調整機構。

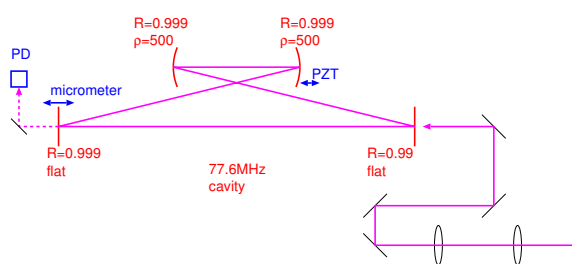


Figure 12: 外部共振器蓄積のセットアップ。

共振器長をピエゾミラーでスキャンしながら、共振器透過光をフォトダイオードで測定し、共振ピークを観測した結果を、Fig. 13 に示す。AOM の駆動周波数を変化させることで、共振ピークの構造が変化し、CEO をゼロに調整することが出来ることが確認できた。原理的に

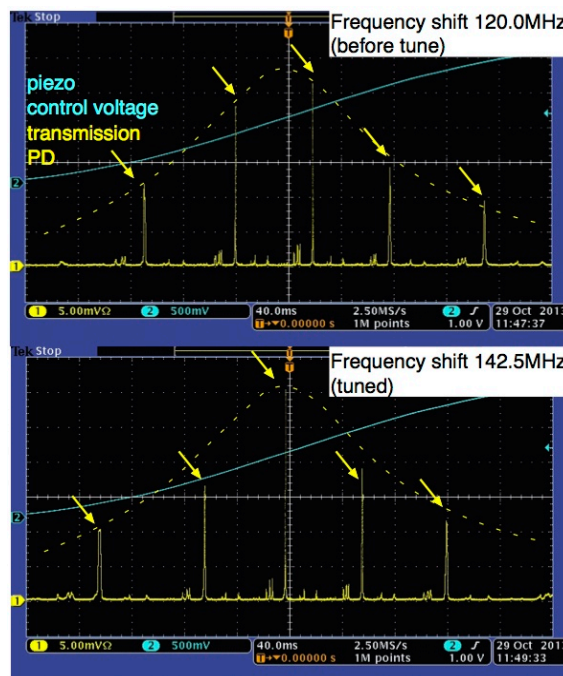


Figure 13: 共振ピークで CEO の変化を確認した様子。

は、この手法で CEO を調整したレーザー光を増幅し、高増大率の共振器に蓄積すれば良い。

5. まとめ

高次横モードレーザー光の進行方向電場を利用して、電子ビームにレーザー波長の構造でエネルギー変調を与える事が出来る。これをバンチ圧縮と組み合わせてより細かい密度変調に変換することが出来る。共振器の技術を応用することで、このシステムは連続動作が出来るので、高繰り返しのシード型コヒーレント光源に応用可能である。

参考文献

- [1] M. O. Scully, et al., "Simple laser accelerator: Optics and particle dynamics", Phys. Rev. A, vol. 44, pp2656 (1991)
- [2] F. Caspers, et al., "Particle acceleration with the axial electric field of a TEM10 mode laser beam", CERN/PS 89-60 (RF/OP) (1989)
- [3] T. Akagi, et al., "Development of optical cavities for the laser-compton scattering experiment at cERL", 第 11 回加速器学会年会プロシーディングス
- [4] Y.Honda, Kyoto university doctor thesis(2004)