

高繰り返し CW-FEL 用のレーザーヒータ LASER HEATER SYSTEM FOR HIGH REPETITION RATE CW-FEL

本田洋介 *^{A)}、赤木智哉 ^{A)}、小菅淳 ^{A)}

Yosuke Honda*^{A)}, Tomoya Akagi^{A)}, Atsushi Kosuge^{B)}

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

Abstract

A high repetition rate and high averaged power short wavelength FEL based on an ERL scheme has been discussed as a future machine beyond the established SASE-FEL. One of the concern is controlling instabilities arising in the injector. The laser heater system is an established technique to suppress instabilities and improving FEL gain. It requires a high peak power laser to modulate energy distribution in an electron bunch. At a high repetition machine of ~ 100 MHz repetition, it is difficult to produce such a high peak power laser. We propose to apply a cavity based technique to realize a high averaged and a high repetition rate laser.

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源が既に実用段階にある。将来的に ERL-FEL の構成として高平均出力化できれば、利用実験も期待されている^[1]。これは、超伝導加速空洞を用いた線形加速器の構成で、FEL 発振後のビームを減速位相で加速空洞に通過させてからダンプすることで、ビームのエネルギーを回収し、RF 源に必要なとされる電力を抑え、連続 (CW) 運転を可能にしようというものである。

現存の、とくに光陰極電子銃を使用した SASE-FEL 施設では、低エネルギー部にレーザーヒータと呼ばれる装置が導入されている^[2]。これは、バンチの初期状態に生じた時間的な電荷密度の非一様性が、ビームの伝搬に従って成長する、いわゆるマイクロバンチ不安定性を回避し、後段でうまくバンチ圧縮が出来るようにして、FEL 発振の性能を確保するための対策である。

パルス運転の施設であれば、シングルショットの高強度パルスレーザーによるレーザーヒータが可能であるが、 ~ 100 MHz の繰り返しの CW 運転で全てのパルスについて同様のレーザーパルスが必要とすると、高平均出力のレーザーが必要で、技術的に困難である。そこで、高繰り返し CW-FEL に応用可能な共振器型のレーザーエネルギー変調システムの検討を行っている^[3]。

ビーム繰り返しに一致した周長をもつ光共振器にレーザーパルスを蓄積し、高強度かつ高繰り返しのレーザーパルスを共振器内部に実現する。現実的な市販のレーザー光源を仮定しても、共振器の内部で $\sim 10^3$ 倍に強度増大できると考えると、ピーク強度で 100 MW クラスのレーザー光が使用できる。共振器の内部で電子ビームとレーザー光を相互作用させ、ビームにエネルギー変調を与える。レーザー電場は、電子ビームにエネルギー変調を与えるだけなので、全体でのエネルギーの負荷は無く、共振器内部のレーザーのエネルギーは消費されず、蓄積された状態は連続的に維持されるはずである。

ここでは、高次横モードレーザー加速の原理を仮定

して議論するが、アンジュレータと組み合わせた横電場によるエネルギー変調の方式でも同様の議論が出来る。

ここではまず、高次横モードレーザー加速の原理についてまとめ、既存のシステムを利用した共振器蓄積の簡単な実証試験について報告する。

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。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があれば、進行方向の電場が存在する^{[4][5]}。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が出来る。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。通常の高スラットの基本モードでは無く、Figure 1 にプロファイルを示すような、高次横モード (TM₁₀) モードを考える。

このモードの x 方向電場 E_{10}^x は、

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

$\phi(z)$ 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 Figure 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。

*yosuke@post.kek.jp

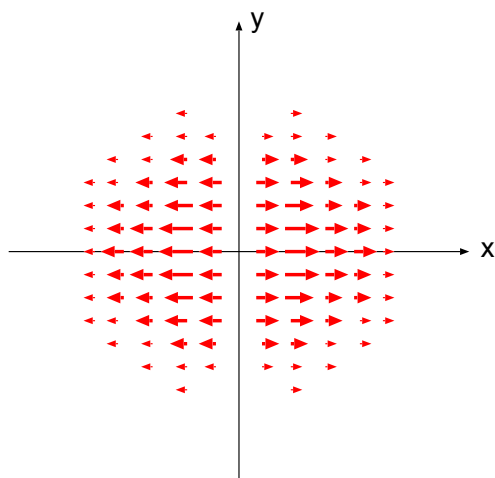


Figure 1: Field profile of a higher order transverse mode.

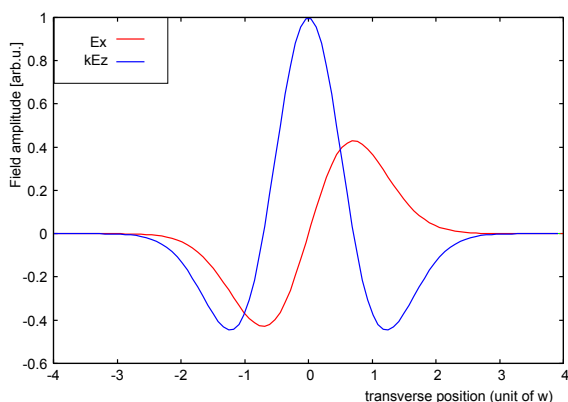


Figure 2: Transverse and longitudinal component of the higher order mode.

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。これが光の速度で伝搬する。ただし、レーザー光は、 z_0 程度の距離で拡がり、また Gouy 位相の効果で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 $2z_0$ となる。光の速度でレーザーと重なって進行する電子にたいして、エネルギーゲイン G は、

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

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。

3. システムの構成

光共振器に高強度の高次モードレーザー光を発生し、そこに電子ビームを同一方向に通過させる。この様子を Figure 3 に示す。レーザー波長の周期で繰り返す加減速方向の電場によって、電子ビームのバンチ内にレーザーの波長の周期のエネルギー変調がかかることになる。

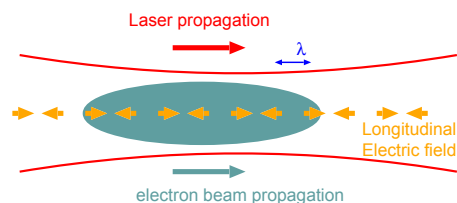


Figure 3: Energy modulation by the longitudinal electric field.

Figure 4 のような全体の構成が考えられる。高次横モード加速では、電子ビームがレーザー光と相互作用する間に位相関係がずれてはいけない。このため、十分に光の速度に達した位置に設置するのが良く、波長 $1 \mu\text{m}$ のレーザーを仮定すると、150 MeV 程度のエネルギーが適していると考えられる。30 keV の振幅でエネルギー変調をかけると、通常想定する元々のエネルギー拡がりと同程度のエネルギー変調を与えることができる。(なお、アンジュレータ型のレーザーヒータの場合でも、波長とアンジュレータ周期の検討から、同じ程度のエネルギーの位置が適していると思われる。)そこで、主加速部を2つに分け、2段階の構成とした ERL を想定した。入射器からのビームを、1つめのループで 150 MeV まで加速し、レーザーヒータでエネルギー変調を与え、引き続きアーク部の分散で電流密度を平坦化する。2つめのループの主加速部で ~ 600 MeV までエネルギーを上げ、アークで圧縮してアンジュレータを通過させ FEL 発振する。ビームは2つのループのそれぞれの主加速空洞を逆位相で通過して減速し、ダンプに導かれる。

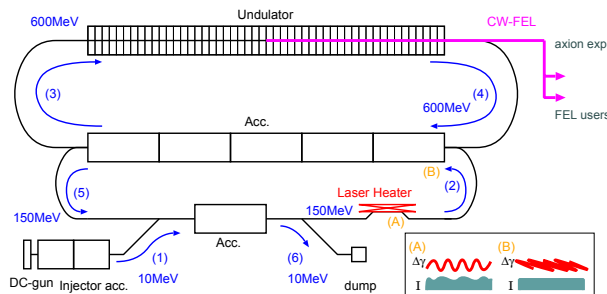


Figure 4: Layout of the machine.

4. 実証試験

cERL では、レーザーコンプトン散乱光源 (LCSS) の開発の目的で光共振器の開発がなされている [6]。電子ビームの繰り返しは 162.5 MHz で、光共振器も基本周波数が 162.5 MHz に相当するものが開発されている。そこに、繰り返し 162.5 MHz、時間幅 6 ps(RMS)、平均出力 45 W のレーザー光を入力し、共振器内平均パワーとして 10 kW を実現している。

ここでは、このシステムを利用して、高次モード蓄積の実証試験を行った。Figure 5 に、共振器のセットアップを示す。Figure 6 は、 TM_{10} モードが最大に結合する条件にしたとき、共振器長をスキャンしてモードの分布を測定したものである。共振器の透過光をフォトダイオードで計測しており、この強度が共振器内パワーに比

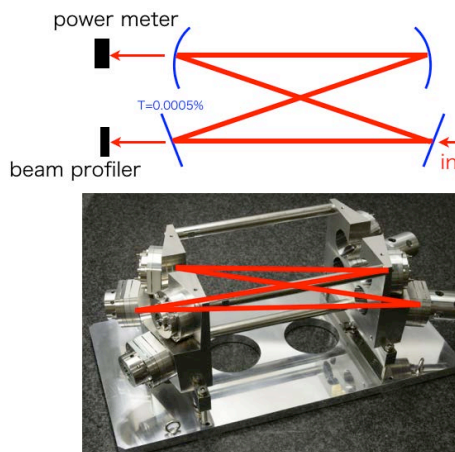


Figure 5: LCSS optical cavity used for this test.



Figure 7: Result of cavity locking.

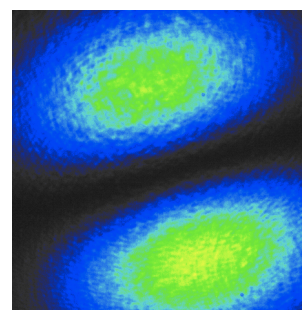


Figure 8: TM₁₀ mode stored in the cavity.

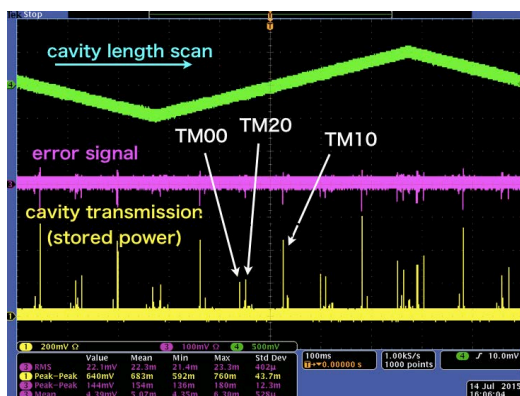


Figure 6: Tuning of cavity injection coupling.

例する。スパイク状に見えるものが共振器の個々のモードに対応している。通常はガウス型の基本モードである TM₀₀ が最大で、他のモードがゼロになるように調整するところを、ここでは、TM₁₀ を最大化するように入力光の光軸をシフトしている。

この条件で、TM₁₀ モードのピークを維持するように共鳴制御を行った結果を Figure 7 に示す。安定に共振器内にパワーが蓄積されていることが分かる (図では 10 秒のデータだが、十分長時間の維持が可能である)。このとき、共振器を構成する鏡からの透過光のプロファイルを確認したものが、Figure 8 である。2 山のプロファイルが観測されており、確かに 1 次の高次モードが蓄積されていることを示す。透過光の一つをパワーメータで測定したところ、28 mW であった。この測定を行った共振器鏡の透過率は 0.0005% であることから、共振器内平均蓄積パワーは、5.6 kW と評価できる。パルス時間幅は 6 ps (RMS) で、パルス間隔が 6 ns (162.5 MHz) であることから、ピーク強度はおよそ 500 倍と考えると、ピーク強度 2.8 MW ということになり、想定したエネルギー変調を与えるのに十分なパワーであることが分かる。

5. まとめ

共振器に蓄積したレーザー光を利用して、高線り返し電子ビームにエネルギー変調を与えるシステムを検討することが出来る。高次横モード加速に限らず、アンジュレータと組み合わせた方式も可能である。また、レーザーヒータに限らず、シード化に応用することも可能である。

なお、本研究の一部は、光・量子融合連携研究開発プログラム、および、JSPS 科研費 25600146 の助成を受けたものである。

参考文献

- [1] Y. Honda, "Feasibility of new particle search at future light source accelerators", 第 11 回加速器学会年会プロシーディングス.
- [2] Z. Huang *et al.* "Suppression of micro bunching instability in the linac coherent light source", Phys. Rev. ST-AB. 7, 074401 (2004).
- [3] Y. Honda, "A laser based energy modulator for high repetition rate seeded FEL", 第 11 回加速器学会年会プロシーディングス.
- [4] M. O. Scully, et al., "Simple laser accelerator: Optics and particle dynamics", Phys. Rev. A, vol. 44, pp2656 (1991).
- [5] F. Caspers, et al., "Particle acceleration with the axial electric field of a TEM10 mode laser beam", CERN/PS 89-60 (RF/OP) (1989).
- [6] 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.