

Characteristics of the LEBRA FEL

Ken hayakawa^{1,A)}, Isamu Sato^{B)}, Toshinari Tanaka^{A)}, Yasushi Hayakawa^{A)}, Kyoko Nogami^{A)}, Keisuke Nakao^{C)},
Takeshi Sakai^{B)} and Manabu Inagaki^{B)}

^{A)} Laboratory for Electron Beam Research and Application, Inst. of Quantum Science, Nihon Univ.

7-24-1 Narashinodai, Funabashi, 274-8501

^{B)} Advanced Research Institute for the Sciences and Humanities, Nihon Univ.

12-5, Goban-cho, Chiyoda-ku, Tokyo 102-8251

^{C)} Graduate School of Science and Technology, Nihon Univ., 1-8-4 Kanda-Surugadai, Chiyoda-ku, Tokyo, 101-8301

Abstract

The FEL of wavelength from 1 to 6 μm has been supplied to users experiments at LEBRA. Output energy per macro pulse becomes a peak at wavelength of around 2 μm . The peak energy is about 2mJ per macro pulse and about 4 MW of estimated peak power. Measured pulse width of the FEL is about 60 μs at 1.5 μm of wavelength. Detuning effect is observed. The FEL gain is maximized at the detuning length of two wavelength of the FEL and output energy is maximized at one wavelength detuning. We have attempted to apply phase modulation to the master oscillator of the linac to increasing FEL power. By using this method, output power is increased roughly double.

日大LEBRA FELの特性

1. はじめに

日本大学電子線利用研究施設(LEBRA)では、波長1～6 μm の赤外FELを発生させ、共同利用実験に供している。このFELは広帯域であることの他にも、短パルスで、ピーク出力が大きい等の特徴を持っている。入射器とFEL発生装置について、第2章で説明し、第3章では、現在のFELの特性について報告する。また、リニアックの加速マイクロ波を位相変調することにより、バンチ間隔を変化させ、FEL出力を増大させる実験について報告する。

2. 日大LEBRA FELの構成

2.1 入射器

LEBRA FELの入射器はDC電子銃を使用し、プレバンチャー、バンチャーと4m加速管3本からなる通常のSバンド・パルスリニアックで、サブハーモニックバンチャーなどは使用していない。このため、2856MHzの全バンチがFELの発生に寄与する。FEL発生に使用するため、長パルス(～20 μs)化、安定化を実現させる改良を行った[1, 2, 3]。

2.2 アンジュレータ及び光共振器

アンジュレータはハルバックタイプで、周期48mm、周期数50である。最小ギャップサイズは24mmで、この時のK値(rms)は1.4である。光共振器長はバンチ間隔の64倍で、6718mmである[4]。共振器鏡は、始め石英基板に誘電体多層膜や金をコーティングしたものを使用していたが、FELの高出力化につれて、容易に破損するようになった。鏡の表面で発生する熱

がコーティング層を痛めていると考えられるので、基板材料に銅を用い、可視光領域でも反射率の高い銀をコーティングした鏡を使うことにした。この鏡も1年ほどで、使用に耐えないほど損傷を受けたため、一度交換した。定期的な交換が必要なのである。この鏡では、光の取出しは上流側鏡の中央に開けられた穴を介して行っている。図1に損傷を受けた鏡の写真を示す。穴周辺は特に損傷が激しく、銅基板が溶解して、地肌が剥き出しになっている。

上流の共振器鏡後方185mmの位置に光輸送系の最初の鏡(振分ミラー)が置かれている。この鏡はガラス表面にアルミニウムコートをした全反射鏡であるが、この位置ではFEL光のスポットサイズが小さく、特に短波長の光はエネルギー密度が高いため、損傷を受け、部分的に反射率が低下している。光の当たる場所を少しずつ変えながら運用しているが、いずれ破綻するので、この鏡も銅基板のものに変更する予定である。

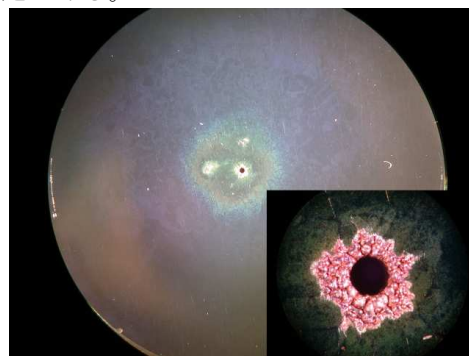


図1. 上流側銀コート鏡の全表面とFEL取出し用の穴(直径0.3mm)周辺の拡大図。中央付近が変色している他、スポット状の斑点が所々に見られる。

¹ E-mail: hayakawa@lebra.nihon-u.ac.jp

3. FELの特性

3.1 発振可能波長範囲

FELの発振波長は電子ビームの特性、アンジュレータ及び、光共振器のパラメータによって制約を受ける。一般的に、FELのゲインは波長が短くなるほど小さく、電子ビームの特性（スペクトル、ビームサイズ等）に対する要求が厳しくなるので、発振が難しくなる。これに加えて、LEBRAでは共振器鏡の中心に貫通穴をあけて光を取出しているため、波長が短くなるほど取出される光の割合が増えるため共振器損失が大きくなり、正味のゲインをさらに低下させる。また、一次元の計算では、波長を固定すると、ゲインは K の値が1.1~1.2の辺りにピークを持ち、これから外れると減少する。LEBRA LINACは、現在許可を受けている最大加速エネルギーが100MeVであるため、1 μm より短い波長領域では、 K 値の小さい所で運転せざるを得ず、さらにゲインを小さくしている。現在、発振が確認されている波長は1 μm を切っているが、この波長では飽和には至っていない。飽和を達成し、比較的安定な光を供給できるのは1300nmより長い波長の領域である。

長波長側は短波長側に比べれば、制約は少ない。光共振器の回折損による限界は10 μm 以上になり、この辺りの波長まで可能であるかのように思えるが、実際には、電子ビームエネルギーに低い方の限界があって、6 μm 辺りが限界であると考えられる。この時の電子ビームエネルギーは55MeVである。低エネルギーになると、電子ビームの質が悪化し、発振を維持することが難しくなるのである。電子ビームの質に関しては、加速器の整備と調整によって克服できる可能性は高いが、長波長の光は、取出される光の割合が小さくなるので、実用的ではない。ゲインは大きいので、取出し穴径を大きくすれば良いのだが、そうすると短波長における発振が難しくなる。この穴径（0.3~0.5 μm ）では波長範囲1~5 μm が適当と思われる。

3.2 出力レベル

FELの発振レベルは電子ビームの電荷密度、エミッタンス、エネルギー幅、蓄積光との重なり具合

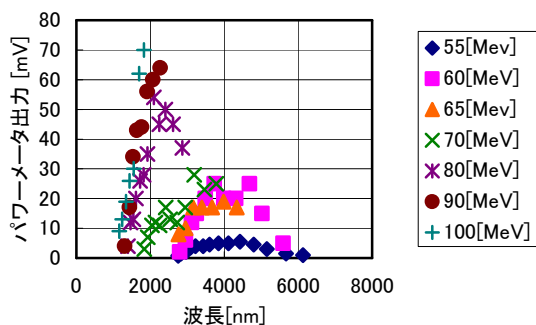


図2. FEL波長と出力レベル。波長2000nmあたりにピークを持つ。

などがゲインに影響するため、加速器及び共振器鏡の調整によって変化する。また、取出し穴の位置は蓄積光の光軸と一致しているとは限らないので、発振レベルは同じでも、出力レベルが異なる場合もありうる。事実、図1では、鏡の中心から外れた位置に光が蓄積された痕跡が見られる。一次元の計算で、電子のシンクロトン波長がアンジュレータ長に等しくなるレベルを飽和レベルとすると、飽和レベルを概算することができる。 N をアンジュレータ周期数、 Z_R をレーリー長、 λ_R を発振波長、その他の記号は通常の定義に従うとすると、飽和電力 p_s はおよそ

$$p_s = \frac{\pi^2 c \epsilon_0 Z_R}{8 \lambda_R} \left(\frac{mc^2 (1 + K^2)}{N^2 e K} \frac{1}{J_0(\xi) - J_1(\xi)} \right)^2 \quad (1)$$

である。LEBRA FELにおいて、 $K(\text{rms}) = 1.2$ 、共振器鏡の曲率半径 $R = 5$ [m]として、評価すると、

$$p_s = 2 / \lambda [\mu\text{m}] \text{ [GW]}$$

となる。結合穴を介して取出されるエネルギーの割合は波長によって異なるが、蓄積光の中心が結合穴と一致している場合、その比率は概ね波長の逆数に比例する。従って、取出される光のパワーは波長の二乗に逆比例する。すなわち、

$$p_{out} \propto \lambda^{-2}$$

である。従って、波長が短いほど、大きなパワーが取出されることになるが、波長が短くなるほどFELのゲインが小さくなるので、この通りにはならない。現在は波長2 μm あたりで最大出力が得られ、マクロパルス当たり20mJ程度である。後述のパルス幅を考慮すると、ピーク出力はおよそ4MWになる。電子ビームのエネルギーとアンジュレータのギャップを変化させ、様々な波長で、発振させ、マクロパルスあたりのエネルギーを測定した例を図2に示す。縦軸はパワーメータの出力電圧で、エネルギーに比例する。この図でも、波長2 μm あたりに出力のピークがあり、これより長波長側も短波長側も出力は減少している。この測定量はマクロパルスあたりのエネルギーであって、パワーレベルではないが、長波長側は概ね波長の2乗に反比例して減少しているように見える。短波長側でも出力が急激に減少している。短波長側のゲインは相対的に小さいが、1.3 μm あたりまで発振は飽和しており、ここでは示さないがパルス幅も長波長側に比べ、際立って狭くなっているわけではない。この現象理由については、前述の振分ミラーの劣化により、短波長の光に対して反射率が低下しているため、下流に到達する光量が減少していること、蓄積光の光軸が穴とずれた位置でないと発振が飽和しない可能性等が考えられる。

3.3 パルス構造

FELのパルス構造を測定する手段としては、ストリークカメラを使うのが一般的である。しかし、

LEBRA FELに対しては現存のストリークカメラでは、時間分解能が不十分だと予想されるので、他の手段を用いた。FELはコヒーレントな光なので、その自己相関波形はパルス構造を反映した形をしているはずである。我々はマイケルソン型の干渉計を組み立て、自己相関波形の測定を行った。図3に波長 $1.5\mu\text{m}$ の場合の測定例を示す。横軸は可動鏡の相対的な位置、縦軸は検出した光の相対強度である。この測定法では、パルスの細かい構造についての情報は失われてしまうが、パルス幅は計測することができる。この例では、半値全幅でおよそ $60\mu\text{m}$ である。時間のスケールでは 200fsec となる。

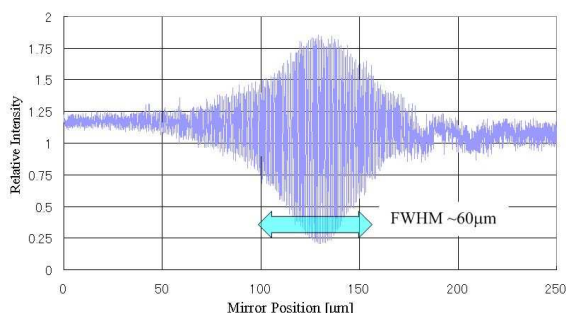


図3. 波長 $1.5\mu\text{m}$ のFEL光の自己相関波形、光パルスの半値幅（FWHM）はこの図からおよそ $60\mu\text{m}$ と見積もられる。

3.4 デチューニング特性

バンチした電子ビームを使ってFELを発生させる場合、共振器長はバンチ間隔の整数倍よりもわずかに短い時、ゲインが最大になる事が知られている。また、バンチ間隔の整数倍からのずれをデチューニングと呼ぶことにすると、出力が最大になるのはデチューニングがゼロとなる長さと、ゲインが最大となる長さの中間にある。図4に、デチューニングによってFELの信号波形の変化の様子を示す。デチューニングが2波長程度のところでゲインが最大になり、立ち上がりも最も早くなっている。デ

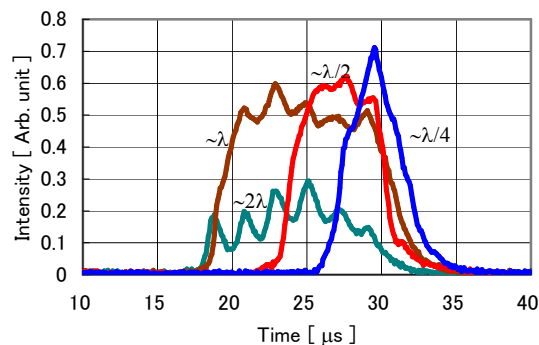


図4. デチューニングによるFEL波形の変化。デチューニングが 2λ 程度の場合、ゲインは大きく立ち上がりは早いが出力レベルは低い。デチューニングが小さい場合、出力レベルは高くなるが、立ち上がりが遅れ、パルス幅は狭くなる。

チューニングが1波長あたりで、出力最大になり、さらに長くすると、立ち上りが遅れ、ピーク値は大きくなるが、パルス幅が狭くなり、出力としては小さくなる。この現象は、デチューニングが小さいところではアンジュレータ下流域で、電子と光のパルスが重畳しなくなり、実効的にアンジュレータの周期数が少なく見えるためである。式(1)で示したように、飽和レベルは概ね、アンジュレータ周期数の4乗に反比例するため、わずかな変化でも、効果は大きい。

3.4 位相変調

前節で述べたように、ゲインが最大になるデチューニングでは出力は最大にはならない、そこで、飽和するまでは、ゲインの高い状態を維持し、飽和に至った後に共振器長を変化させれば、ピーク値が大きく、パルス幅も広い出力が得られると考えられる。マクロパルスの途中で共振器長を変えることは困難であるが、加速周波数を変化させて実効的に同じ効果をもたせることは可能である。すなわち、加速器のマスターオシレータを周波数変調すればよい。しかし、周波数変調の場合、位相連続を保証することが難しいので、実際には位相変調を使った。線形な位相変調は、周波数変調と等価である。図5に示したのは位相変調有無に対応する波形である。位相変調によって、通常の状態に比べ、およそ2倍程度の出力が得られる。

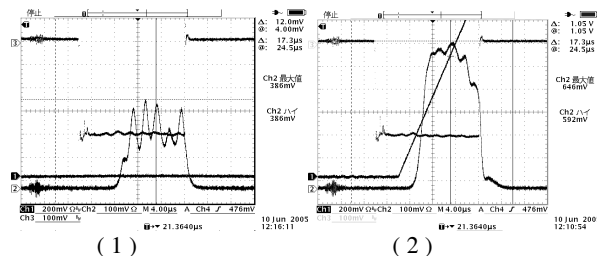


図5. 位相変調による出力の増加。変調なし(1)と変調あり(2)。負極性のパルスは電子ビーム波形、(2)で、途中から斜めに立ち上がっている直線は変調信号。

参考文献

- [1] T.Tanaka, K.Hayakawa, Y.Hayakawa, et al, Proc. of the 23rd Liner Accelerator Meeting in Japan(September 16-18, 1998, Tsukuba, Japan) 163-165
- [2] I.Sato, I.Kawakami, K.Sato, et al, Proc. of the 25th Linear Accelerator Meeting in Japan (2000.7)24-28.
- [3] K.Yokoyama, I.Sato, K.Hayakawa, et al., Nucl. Instr. and Meth. A507(2003)357-361
- [4] K.Hayakawa, T.Tanaka, Y.Hayakawa, et al., Proceedings of the 25th Linear Accelerator Meeting in Japan (2000.7)56-58.