

Present Status of FEL Oscillations at IR- and Visible-range, UV-FEL Facility and Light Transport Systems

Tomimasu T., Oshita E., Okuma S., Wakita K., Miyauchi Y., Zako A., Nishihara S., Koga A., Suzuki T., Wakisaka K., Tongu E., Nagai A., Saeki K.*, Kobayashi A.** and Yasumoto M.***

Free Electron Laser Research Institute, Inc. (FELI)
4547-44, Tsuda, Hirakata, Osaka 573-01, Japan

Abstract

Present status of IR- and Visible-FEL oscillations at 0.6 GW intrapeak power achieved on Oct. 31, 1994 and Feb. 27, 1995 and efforts done before FEL oscillations are reported. An UV-FEL facility and light transport systems under construction are also reported.

FEL研での赤外～可視域FEL発振と紫外域FEL装置や光伝送系の現状

1. はじめに

昨年10月から今年2月に成功したFEL装置1と2による赤外～可視域FEL発振と紫外域FEL装置や光伝送系の現状を報告する。図1にFEL装置1と2、紫外域FEL装置(FEL装置3)や伝送系を示す。

2. 可視～中赤外域FEL発振に至るまでの経緯

(1) FEL装置1 (5～20 μm)での発振

1994年7月上旬には、5～20 μmをカバーするFEL装置1(5～20 μm域用)の光共振器(ミラー間隔6.72m)が設置され、中旬以後ステアリングコイルの取り付け、配線を行い、モード2での加速管のRFエージングと電子ビームの加速テストを続けて、7/27には科技厅による電子リニアック低エネルギー部の施設検査を受けた。

8月前半はFEL装置1のアンジュレータ1(周期長32mm, 周期数58, K=1.55)に電子ビームを通して、32MeV電子ビームのエネルギー測定とビーム集束実験を行った。しかし、当時の電子ビーム量が平均電流が0.1 μAと少なく、自発放出光の検出器の感度も低くて、自発放出光の観測はできなかった。この原因は後に述べるように、電子銃(EIMA C646B)と約15cm下流のコリメータ孔の軸が約2mmずれていたことによる。8月後半には、1～6 μmをカバーするFEL装置2の光共振器2が設置され、同時に電子銃とコリメータの軸合わせを行い、モード2(マイクロパルス幅10ps, 22.3125MHz, マクロパルス幅12.5 μs, 10Hzで運転して32MeVで42Aの電子ビーム量(平均電流で約1 μA)を得る。

光共振器2の調整は9月上旬までかかり、中旬から発振実験を再開したが、8月下旬からの光共振器2の据付作業等で加速器室の湿度が上がり、150kV電子銃高圧電源が9/12に接続端子部で放電して壊れた。予備の新電源で実験を再開したところ9/16にまた壊れて、9/19はクライストロンパルサーパルス・ストロンスの高圧部が放電で壊れた。幸い

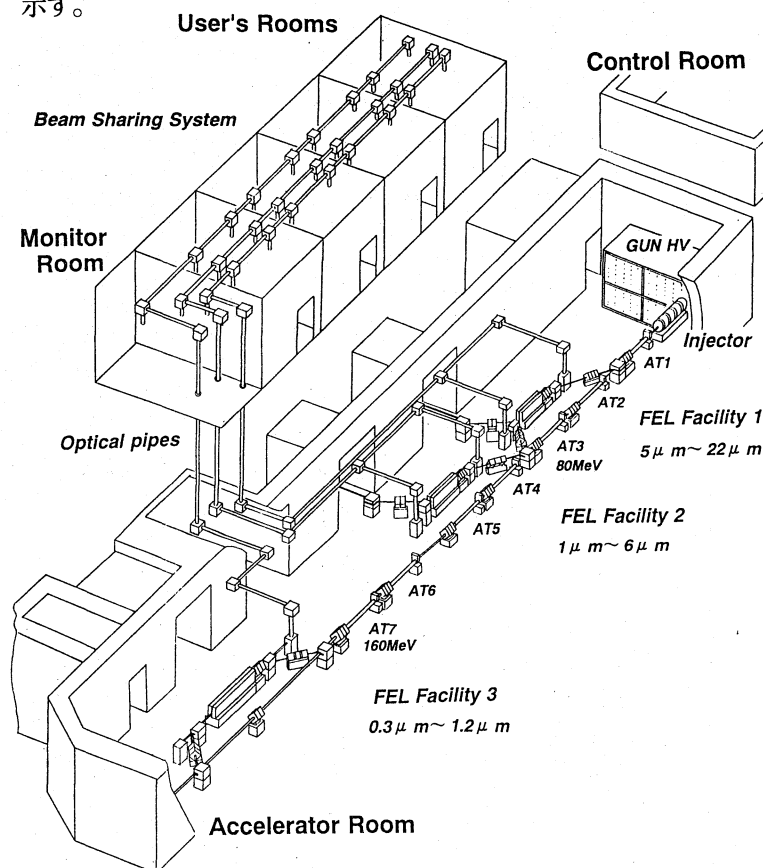


図1 FEL研のFEL装置1～3及び伝送系

* Matsushita Electric Industrial Co., Ltd.: 2-7, Matsuba-cho, Kadoma, Osaka 571, Japan

** Kobe Steel, Ltd.: 1-5-5, Takatsukadai, Nishi-ku, Kobe 651-22, Japan

*** Osaka National Research Institute: 8-31, Midorigaoka, Ikeda, Osaka 563, Japan

これらの修理は9月中に終了し、10/3からやっと本格的なFEL実験がやれるようになった。

アンジュレータ1を通る電子ビームを絞り、光共振器1の光軸に合わせるのに約1週間かかったが、この間に高感度の光検出器も間に合って、自発放出光の出力は20倍以上に上がった。その結果、10/12には約1万倍に増幅されたFELを観測することができたが、光共振器長を調整しても発振には至らなかった。その後約2週間、電子ビームをアンジュレータ1の全長2mにわたってビーム径を1mm近くに絞り、ステアングコイルを追加するなど、やれることはすべてやった。10/31(月)には光共振器長を予想値以上に覚えて約6 μ mで無事発振した。

11月以後は、出力の増強に努め、32MeV-42Aの電子ビームも2m長のアンジュレータにわたって1mm径以下に絞れるようになり、電子ビームの規格化エミッタンスは26 π mm \cdot mradとなった。モード1(マクロパルス幅24 μ s、10Hz)で運転できるようになったのは、1月になってからで平均電流は約2 μ Aとなった。

現在までFEL装置の出力は、32MeV-42Aのとき6~9 μ mで自発放出光の数億倍で、共振器内には0.6GWが、光共振器1の金コートミラーの0.5mm径から約3MW、平均出力140mWが得られるようになった。このピーク出力はRenieri limitの約60%である。集光した赤外FELを紙や爪に照射するとパチパチと発光するので、アブレーションや超音波の実験も可能である。図2に示すように、26MeV~21MeV電子ビームによる10 μ mから20 μ mのFEL出力が十分でなく、これからの課題である。

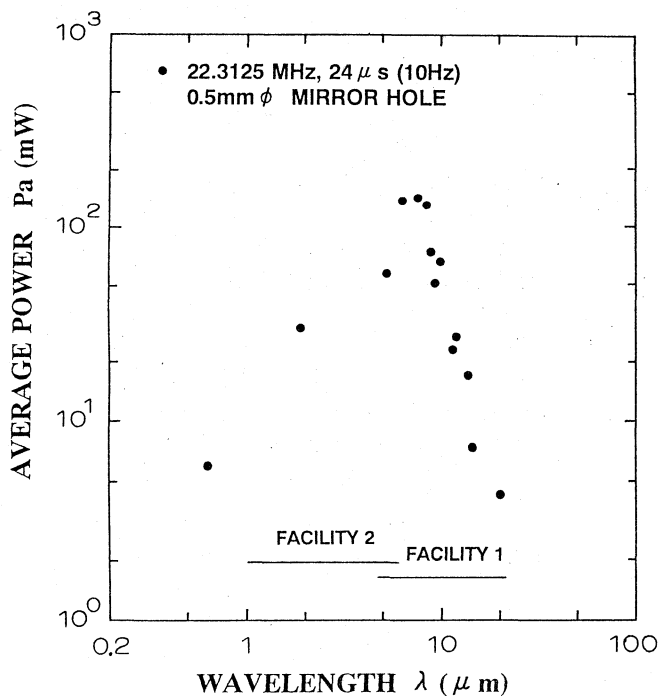


図2 可視~中赤外域でのFEL平均出力
(1995年6月15日現在)

(2) FEL装置2(1~6 μ m)での発振

FEL装置2の光共振器2は、当初グリッドパルサーの178.5MHzが簡単に動作するものとして、共振器長を8.4mに設計したが、178.5MHzドライバーがメーカーの手違いもあって遅れたため、急遽共振器長を6.72mに改造することになった。

12月から改造設計を始め、実際の改造は1月から2月にかけて行った。アンジュレータ2(周期長38mm, 周期数78, K=1.4)の光共振器を6.72mにするということで、アンジュレータ下流の四極電磁石は従来のものの1/2以下の小型にした。

発振実験が始まったのは2月中旬からで、68MeVで42Aの電子ビームも規格化エミッタンスが26 π mm \cdot mrad近くなので3m長のアンジュレータ2中で0.5mm径近くに絞れるようになり、2/27(月)に約1.9 μ mで無事発振した。2/28には3次高調波の0.63 μ mの赤色FELも観測した。これは熱陰極電子銃ビームによる可視域FELとして数少ない成功例である^{1,2)}。

その後、FEL装置2での実験は約10日間しかやられておらず、ピーク出力も1.9mmで約2MW、0.63 μ mで0.3MWしか得られていない。1.9 μ mでの2MWは、Renieri limitの約1/7に当たる。これは、当初電子ビーム径が3m長のアンジュレータ2にわたって0.5mmに絞られると予想できなかったため、光共振器2の光ビームのウエスト径を波長1 μ mで1.5mmになるようにミラー面の曲率を選択し、電子ビームと光ビームのfilling factorが小さくなったためである。7月下旬にはミラーを交換し、ウエスト径を1mm以下にしてピーク出力の増強をめざしている。

表1、表2にFEL発振時の電子リニアック、アンジュレータ、光共振器、FEL発振特性を示す。

Table 1 Characteristics of FELI linac beams and undulators

Accelerator	30-MeV BT Line	80-MeV BT Line
Energy E	33.2MeV	68.0MeV
Peak current I _p	42A	42A
Macropulse duration	24 μ s	24 μ s
Macropulse separation	0.1s	0.1s
Micropulse duration	10ps	10ps
Micropulse separation	44.8ns	44.8ns
Energy spread(FWHM)	1.0%	1.0%
Emittance(normalized)	26 π mm \cdot mrad	26 π mm \cdot mrad
Undulator	No.1	No.2
Type	Halbach	Halbach
Length Lu	2m	3m
Number of periods N	58	78
Period length lu	3.4cm	3.8cm
Gap	>14mm	>20mm
Magnetic field(peak)	0.49T	0.40T
Parameter K	0.5-1.55	0.5-1.4

Table 2 Characteristics of optical cavities and lasings

Optical cavity	No.1	No.2
Type	optical mode	optical mode
Length	6.72m	6.72m
Rayleigh length	1.0m	0.36m
g-parameter	-0.93	-0.80
	-0.76	-1.19
Mirror curvature	3.490m	3.734m
	3.827m	3.062m
Mirror type	Au on Cu	Au on Cu
Aperture of an extraction mirror	0.5mm ϕ	0.5mm ϕ
<u>Lasing on the fundamental</u>		
Wavelength λ	5.5 μm	1.88 μm
Spectral width $\Delta\lambda/\lambda$ (FWHM)	0.5%	0.3%
Small signal gain	20%	14%
Total cavity loss	0.8%	2.7%
Peak power at the aperture	3MW	2MW
Date of first lasing	Oct. 31, '94	Feb. 27, '95
<u>Lasing on the third harmonics</u>		
Wavelength	0.63 μm	
Net gain	3.3%	
Peak power at the aperture	0.3MW	
Parameter k	1.27	

3. 電子リニアック高エネルギー一部の運転

高エネルギー部の4本の加速管(AT₄, AT₅, AT₆, AT₇)にRFを供給するSバンドクライストロン(Toshiba E3729)とクライストロンパルサー2の据付調整とRF導波管の据付は1995年1月から3月にかけて行われたが、テスト中にパルストランスの故障、RF導波管ではRF窓のリークが相次いで生じた。

1月から5月までは高エネルギー部のBT系とアンジュレータ3用のBT系が据え付けられた。5月下旬には高エネルギー部加速管の80°C温水によるガス出し後、RFエージングが始められたが、5/31クライストロンパルサー2のパルストランスのバイアス電流電源が故障して、RFエージングの再開は修理完了の6月下旬となった。さらに、6/7と6/19には電子銃高圧電源が故障、バンチャー用サーキュレータも破損して、電子ビーム加速再開は7/19となった。

7/19からモード2運転で電子ビームを加速しながら加速管のエージングを行い、7/23にはモード2で6 μs ビームながら電子ビームのエネルギーは約170MeV、平均電流は0.4 μA となった。7/25には使用変更に伴う科技庁の検査を受けた。

4. FEL装置3 (0.3~1.2 μm)の立ち上げ

アンジュレータ3と光共振器3の据付調整は6月から7月にかけて行われた。アンジュレータ3(周期長40mm、周期数67、K=2.0)の永久磁石は高エネルギー

電子ビームによる放射線損傷も考慮に入れてSmCoにしたが、組み立てに時間を要し完成したのが7/23であるが、磁場分布がK=1.2で、 $\Delta B/B$ は $\pm 0.15\%$ 以内である。

光共振器は、0.3 μm から1.2 μm をカバーするというので、6.72m離れたミラー槽には7種類のミラーがマウントできる回転台があり、ミラー槽全体を位置制御できる構造となっている。

5. 光伝送系の現状

各FEL装置からのFELビームは、光伝送系の光パイプによって一階の加速器室から3階のレーザモニタ室に伝送され、さらに4つの利用実験室で同時に利用できるように分配される。よく絞られたレーザビームの分配にはZnSeなどのミラーが使われるが、分配率を任意に変えられない欠点がある。FEL研で考案したFEL分配方式は、各FEL装置からのFELビームを数cm径の太めのビームで利用実験室に分配する。さらに各利用実験室には2台の利用実験台が設置されるので、FELビームは8台の利用実験台で同時に利用できるように実験台のミラー槽内にFELビームの中心にミラー中心をそろえたミラーで、ミラー中心を頂点とする扇形状の穴あきミラーを用いて90°偏向し、実験台上で集光して利用する。

このような光分配装置は8月上旬に設置され、FEL装置1と2からのFELが各実験台に分配される予定。FEL装置3用の光伝送系は、紫外域FEL発振後設置される。

6. おわりに

予定ではFEL装置3が6月末に完成し、紫外域FEL発振までの経緯を多少なりとも報告できと思っていたが、クライストロンパルサー、RF窓、電子銃高圧電源、バンチャー用サーキュレータの破損、アンジュレータ3の真空ダクトの破損等が続々と続くなかでのFEL装置1と2の出力増強とFEL装置3の立ち上げの報告書となった。昨年9月から今年6月までに4台の高圧電源が破損したが、その原因は加速器室が月曜日の朝、特に高湿度になるためで、加速器室の低湿化対策の一端を本研究会のポスターセッションで報告する。

紫外域FELの発振には電子ビームのマクロパルス幅が24 μs のモード1での運転が必要であり、これには電子ビームによる加速管のエージングが必須である。できれば、9/6の研究会でFEL装置3での自発放出光の報告が加えられることを願っている。

参考文献

- 1) T. Tomimasu, et al., PAC'95 (DALAS, May 1-5, 1995) FAA30
- 2) E. Oshita, et al., PAC'95 (DALAS, May 1-5, 1995) TAQ35