

FEL-SUTにおけるKHI-FELの性能

横山 稔^{1A)}、小田史彦^{A)}、傍島正朗^{A)}、小池英仁^{A)}、能丸圭司^{A)}、三浦秀徳^{A)}、河合正之^{A)}、黒田晴雄^{B)}

^{A)} 川崎重工業株式会社 技術研究所

〒278-8585 千葉県野田市二ツ塚 118

^{B)} 東京理科大学 総合研究所 赤外自由電子レーザー研究センター

〒278-8510 千葉県野田市山崎 2641

概要

東京理科大学赤外自由電子レーザー研究センターにおいて川崎重工業が設計・製作し、調整を行ってきた40 MeVリニアックを用いた赤外自由電子レーザー装置の4-16 μm におけるFEL飽和発振が確認された。本装置の調整で重要となるマイクロバンチのバンチング調整はストリークカメラでビームのマイクロバンチをモニターして行われ、約2-3 psに調整された。発振したFEL光の1ショットあたりのエネルギーは最大50 mJであった。

1. はじめに

川崎重工業ではリニアックを用いた赤外域の自由電子レーザー装置(KHI-FEL)の開発を行ってきた。リニアックにはRFガンと α 電磁石を用いた初段加速部と3m加速管の主加速部で構成されるMARK-IIIタイプが採用されている^[1-4]。(装置概略図1参照)また、RFガンはエネルギーが約2 MeVで、空洞の基本構造として2つの加速空洞の間に結合空洞を持つOn-axis coupled structure(OCS)が採用されている^[5]。装置の設計製作は99年度までに完了し、製作された装置は、東京理科大学に開設された赤外自由電子レーザー研究センター(FEL-SUT)に設置された。2000年1月よりビームの調

整運転を開始し、2000年7月6日に約9 μm で初発振に成功している^[6]。その後RFガンの交換及び改良を行うことにより7.9 μm においてFEL飽和出力を確認している。このタイプでのFEL飽和出力の達成は国内で初めてである。2001年6月より、波長4-16 μm のFEL光をユーザーへ供給するユーザー運転がスタートしている。ここでは、バンチ長とRF位相調整、そしてFELのエネルギー、波長幅等KHI-FELの性能を報告する。

2. ビーム調整

2.1 バンチ長調整

RFガン及び α 電磁石を用いたFEL装置においてマイクロバンチ長を調整することはピーク電流を向上させ高いゲインを得ることにおいて非常に重要である。本装置ではビームをアルミターゲットに衝突させ発生するOTR光をストリークカメラ(Hamamatsu FESCA-200)へ導いてバンチ長を測定し、バンチ長調整を行った。調整結果を図3に示す。測定上は4 ps程度であるが、信号が弱く積算していることに加えて測定レンジの誤差を考慮すると2-3 psにバンチングされていると考えられる^[6]。

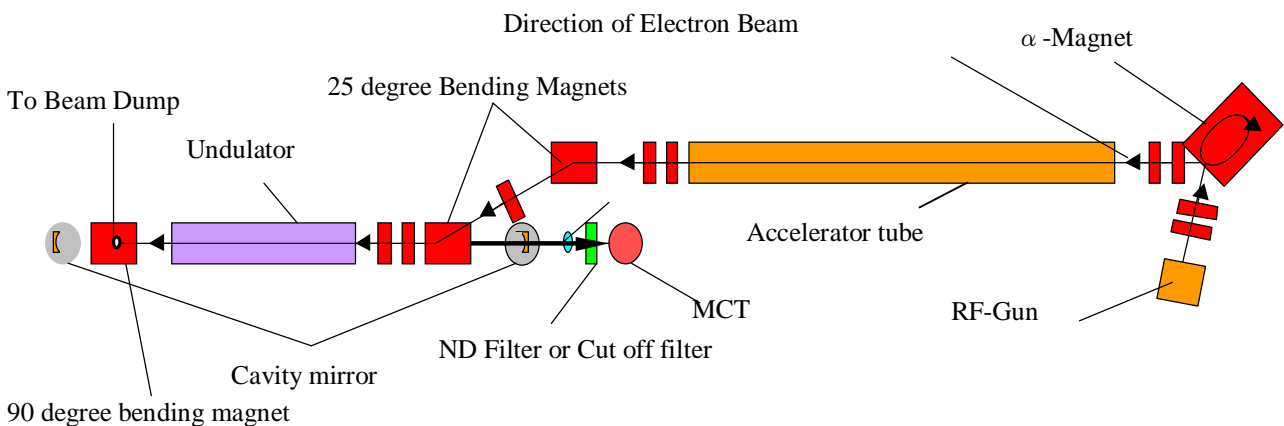


図1 : KHI-FEL概略図

¹ E-mail: yokoyama_minoru@khi.co.jp

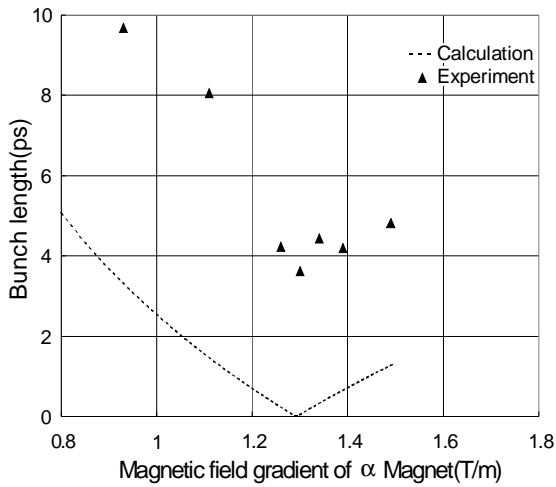


図 2 : バンチング調整結果

このバンチング調整の最適点はRFガンからのビームエネルギーの時間発展を考慮した計算結果と一致している^[7]。

2.2 ビームエネルギー分散

ビームエネルギー分散の測定はRF位相調整（加速管とRFガン間）に平行して行われた。2.5度偏向電磁石後にビームプロファイルモニタを設置し、ビームサイズを小さくなるようにRF位相を調整した。調整結果を図3に示す。本測定において2.5度偏向により、測定点では $\eta = 0.1\text{ m}$ となっており、この結果からビームサイズがすべてエネルギー分散によって決まっているともしエネルギー分散は0.7%以下であることがわかる^[7]。

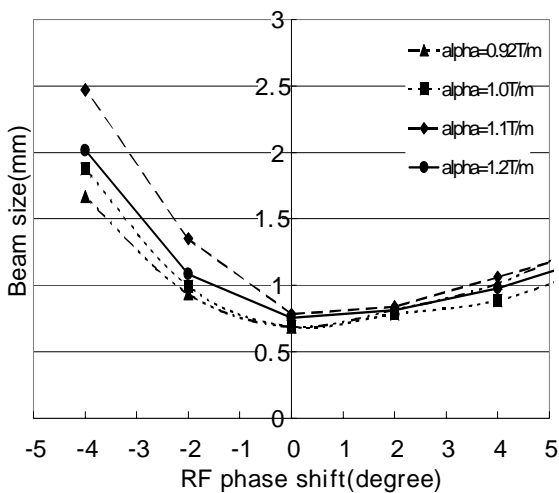


図 3 : RF位相調整結果

3. FEL光の性能測定

3.1 出力波形

FEL発振調整には微弱な自発放出光から測定可能なMCT検出器が用いられた。発振により出力が大きくなるため最終的に 10^{-10} のNDフィルターをセットして出力波形を測定した。図4に典型的な飽和出力波形を示す。立ち上がりに $3\ \mu\text{s}$ を要し約 $1.2\ \mu\text{s}$ のフラットトップがあることがわかる。この上昇から平均ネットゲインは1.6%であることがわかる。また、減衰カーブから損失は5%程度であることがわかる。

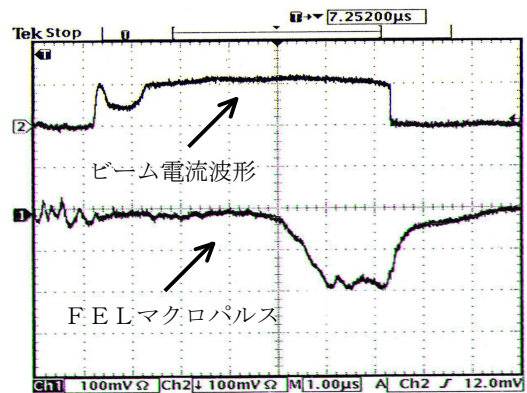


図 4 : FEL出力波形及びビーム波形

3.2 波長

波長測定は、グレーティングと検出器（MCT）から構成される一般的な分光器（分光計器製）を用いて行われた。波長測定結果例を図5に示す。

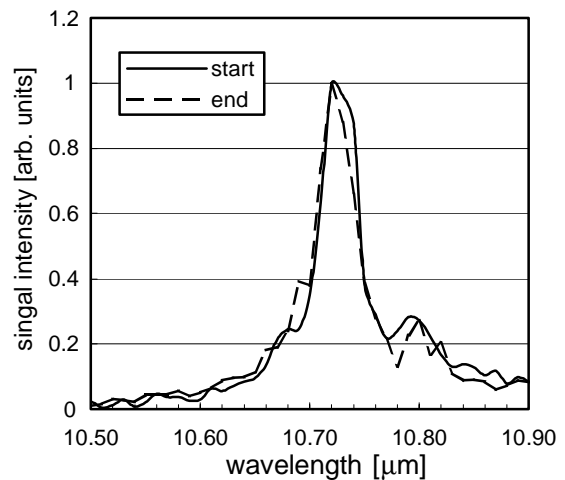


図 5 : 波長測定結果

波長幅 $\Delta\lambda/\lambda$ は以下の(1)式で表される。

$$\Delta\lambda/\lambda = \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{\lambda}{N\sigma_z}} \quad (1)$$

ここで σ_z はバンチ長 (標準偏差)、 N はアンジュレータ周期数である。(1)式を用いた値は 0.8~0.9% となるが、測定結果では 0.5% 程度であり小さくなっている。これは、共振器長がデチューニングされているため、デチューニングにより 0.4% 程度まで波長幅を小さくできることも確認されている。また、図 5 中の 2 つの波形はユーザー供給時と約 5 時間後のユーザー供給終了時のものであり、波長安定性が非常によいことがわかる。

3.3 出力・エネルギー

FEL 光のショットごとのエネルギーは gentec 社製ジュールメータ (ED500) を用いて ZnSe 窓を通して測定された。4-16 μm の FEL 光を供給するためにリニアックは 3.2 MeV 及び 4.0 MeV の 2 モード運転を行っている。図 6 に各モードの波長ごとのマクロパルスの FEL 光エネルギーの典型的な測定結果を示す。長波長側でエネルギーが極端に落ちるのは、回折損失が増加し、飽和出力が小さくなるためと考えられる。これまでの最大マクロパルスエネルギーは、8 μm で記録された約 50 mJ である。

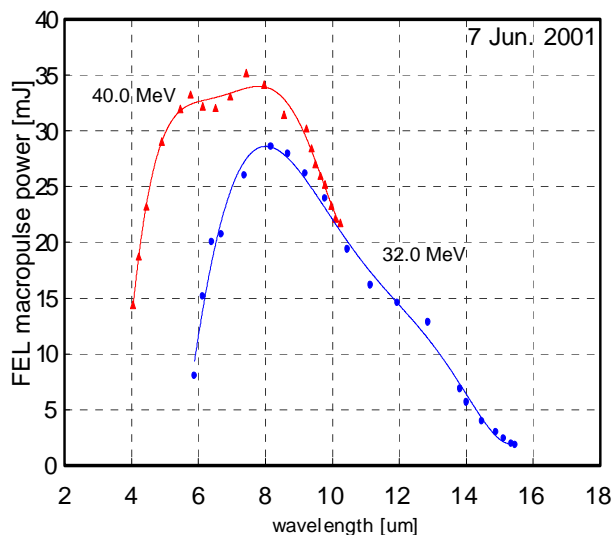


図 6 : 波長 vs. マクロパルスエネルギー

4. まとめ

東京理科大学赤外自由電子レーザー研究センターにおいて川崎重工業が設計・製作し、調整を行ってきた 4.0 MeV リニアックを用いた赤外自由電子レーザー装置の 4-16 μm における FEL 飽和発振が確認された。本装置の調整で重要となるマイクロバンチのバンチング調整はストリークカメラでビームのマイクロバンチをモニターして行われ、2-3 ps に調整された。発振した FEL 光の 1 ショットあたりのエネルギーは最大 50 mJ で、波長幅は 0.5% であった。本文のまとめとして KHI-FEL のビーム性能及び FEL 性能を表 1 に示しておく。

赤外自由電子レーザー研究センターでは 2001 年 6 月よりユーザー運転が開始されている。

表 1 : KHI-FEL の主要パラメータ

KHI-FEL		Unit
Accelerator		
Beam macropulse length	5.5	μs
Beam micropulse length	2-3	ps
Beam energy from the rf-gun	1.95	MeV
Beam energy in the undulator	32 or 40	MeV
Micropulse peak current	~20	A
Energy spread(FWHM)	< 0.7	%
*Normalized emittance	11	$\pi\text{ mmmrad}$
Repetition rate	1-5	Hz
Laser		
Wave length	4-16	μm
Energy/shot	50 (Max)	mJ
Macropulse length	~1	μs
Micropulse length	~2	ps
Micro-pulse repetition rate	2856	MHz
Cavity length	3.36	m

* Normalized emittance のみ計算値で、それ以外は測定により得られた値である。

参考文献

- [1] H. Kuroda, A. Iwata and M. Kawai the proceedings of 12th Russian Synchrotron Radiation Conference SR98, Novosibirsk(1998).
- [2] M. Yokoyama, F. Oda, A. Nakayama, K. Nomaru and M. Kawai, Nucl. Instr. and Meth. A429 (1999)269
- [3] S.V.Benson, J. M.J. Madey, J. Schmaltz, M. Marc, W. Wadensweiler, and G. A. Wesrenskow, Nucl. Instr. and Meth. A250, 39(1986).
- [4] S.V.Benson, W. S. Fann, B. A. Hooper, J. M.J. Madey, E. B. Szarmes, B. Richman, and L. Vintro, Nucl. Instr. and Meth. A296, 110(1990).
- [5] F. Oda, M. Yokoyama, M. Kawai, A. Nakayama, E. Tanabe, Nucl. Instr. and Meth. A429 (1999)332
- [6] M. Yokoyama, F. Oda, K. Nomaru, H. Koike, M. Sobajima, H. Miura, H. Hattori, M. Kawai and H. Kuroda, to be published Nucl. Instr. and Meth. A
- [7] F. Oda, M. Yokoyama, H. Koike, M. Sobajima, M. Kawai and H. Kuroda, to be published Nucl. Instr. and Meth. A