

FREE ELECTRON LASER EXPERIMENT USING A COMPACT LINAC

K. Emura, T. Haga, T. Shinzato and H. Takada

Harima Research Laboratories, Sumitomo Electric Industries LTD.
1431-12, Harima Science Garden City, Kamigori, Hyogo, 678-12 Japan

ABSTRACT

A compact linac installed in our Harima Research Laboratories has already completed, thus routinely supplies an electron beam of 100MeV-100mA into a superconducting compact SR ring "NIJI-III". The linac has an accelerating gradient of 22 MeV/m, which is in the world's highest class for commercial linac. Also, the linac has another significant feature of long-pulse operation (10 μs) suited for a free-electron laser (FEL) oscillation. At present, we proceeded with studies of FEL in an infra-red region utilizing the linac's ability.

小型ライナックを用いた赤外FEL実験

1. はじめに

住友電気工業(株)播磨研究所の小型ライナックは、93年8月に建設を始め同年11月に50MeVでのビーム加速に成功、94年10月には加速管ならびにクライストロン系を1ユニット増設し100MeVでのビーム加速に成功した^{1,2,3}。現在では、超電導小型SRリングNIJI-IIIへの電子入射器として、100MeV-100mAの条件で安定に稼働している。

近年、次世代の光源として自由電子レーザー(FEL)が注目され、多くの研究機関で精力的に研究開発が進められている。当社でもこの小型ライナックを用いたFEL実験を鋭意進めている。本稿では、装置性能と発振実験条件を中心に報告する。

2. 小型ライナック

2-1. 概要

ライナックの主要パラメータを表1に示す。使用しているクライストロンはThomson-CFSのTH2146で、4.5 μsと12.5 μsの2モードのパルス幅(-3dB)で動作可能である。クライストロン電源のPFNの段数切り替えによって、パルス幅が1 μsと10 μsの電子ビームを発生する。1 μsはSR入射用に、10 μsはFEL発振用に供している。

FEL発振には、良質の電子ビームが必要である。とりわけ、(1)低エミッタンス化、(2)マイクロパルスの大電流化、(3)エネルギー幅の狭帯域化、が要求されており、これらに対する取り組みを下記に記す。

2-2. 低エミッタンス化 (電子銃開発)

熱陰極方式においてA-K間電圧の高電圧化による低エミッタンスの実現を目指し、電子銃システムを開発した⁴。SF₆加圧と電界集中部の構造最適化により直流200kV印加を達成し、規格化エミッタンス7 π mmmradを実現している。

2-3. ミクロパルス大電流化 (SHPBシステム)

476MHzの定在波型のSHPBを採用している。RF電源の負荷軽減のためには、短いfilling timeならびに高いshunt impedanceが要求されるが、一般的に両者は相反の関係にある。そこで、ステンレス鋼製のSHPBキャビテーターの空洞外軸のみ無酸素銅メッキを施し、shunt impedanceやQ-valueの最適化を図っている。RF電源は全半導体回路方式で、最大4.6kWの出力が可能である。

表1 主要パラメータ

Electron gun	cathode	EIMAC Y646B
	voltage	200kV-DC
	emission current	1.5A
	normalized emittance	7 π mmmrad
SHPB	type	
	frequency	476MHz
	input power	4.6kW
Prebuncher	type	standing-wave
	frequency	2856MHz
	input power	5kW
Buncher	type	traveling-wave
	frequency	2856MHz
	input power	8MW
Accelerator	type	traveling-wave (3m)
	mode	2 π /3
	frequency	2856MHz
	beam energy	100MeV (short pulse) 76MeV (long pulse)
	macro-pulse current	100mA
	energy spread	0.5%
	normalized emittance	60 π mmmrad
	repetition rate	20pps
accelerating gradient	22MeV/m	

2-4. エネルギー幅狭帯域化

加速管の温度安定化とクライストロン電源の出力パルス安定化が重要である。

まず前者に対し、当社では住友電設(株)の協力を得て光ファイバ試験用高精度温調水システムを開発した実績があり、このノウハウを活かして温度安定度 ± 0.02 度以下の温調水システムを開発した。クライストロンが最大定格で動作した場合でも温度安定度 ± 0.02 度以下を保つ。

一方後者に対し、21段のPFNを2並列化し、そのコンデンサには残留インダクタンスが小さいもの($0.1\mu\text{H}$ 以下)を採用した。アルミ円筒挿入によるPFNインダクタンスの精密調整は、短パルス/長パルスを切り替え度に自動的に行っている。単体試験において電圧平坦性が0.3%以下、電圧安定度0.5%/Hr以下を達成している。

3. FEL実験システム

FEL実験システムのレイアウトを図1に示す。ここでは各コンポーネントについて詳細に記す。

3-1. ビーム輸送システム

当社では既にFEL用のビーム輸送システムの開発実績があり⁵⁾、それをベースに設計開発した。FEL用のビーム輸送システムに要求されることは、アンジュレータ部において(1)色収差の抑制(double achromaticの実現)、(2)非等時性の抑制(quasi-isochronousの実現)、(3)小さいビーム径の実現(filling factorの確保)が挙げられる。これらを考慮し、シミュレーションコードTRANSPORTを用いて光学設計を行った。ビームサイズの計算結果を図2に示す。アンジュレータ部ではdouble achromaticが実現されており、非等時性は $0.64\text{ps}/\%$ であり問題にはならない。

ライナックからアンジュレータまでは"S"字型のシケインで、2台の偏向電磁石と5台の四極電磁石で構成さ

れている。偏向電磁石の偏向角は 25.0 度で、エッジフォーカスが無いセクター型である。水平方向にビームサイズが大きな位置にビームスリットを設け、エネルギー分布のテール部分を除去している。ビームモニターとして、コアモニター、デマルケスト、OTRを導入している。特にアンジュレータ部でのビーム位置モニター(3台)はすべてOTRを採用しており、光共振器のアライメント作業を精密に正確にするためにOTRプレートの中心部にピンホールを開けている。

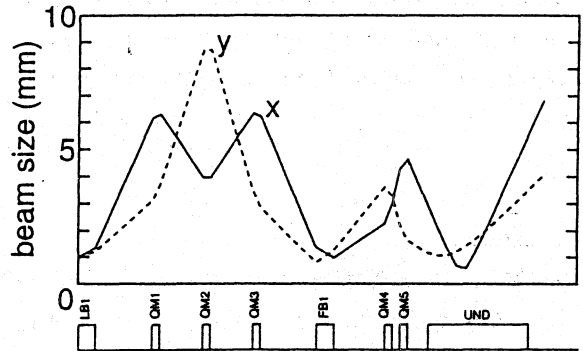


図2、ビームサイズ計算結果

3-2. アンジュレータ

アンジュレータの主要パラメータを表2に示す。磁場が水平方向を向いたHalbach型である。永久磁石はNd-Fe-B(信越化学製)を使用している。ガウスメータBell9900による精密磁場測定を行い、ピーク磁場のばらつき $\text{dB}/\text{B} < 1.0\%$ 、二階積分値 $< 5.4 \times 10^5 \text{Gmm}^2$ を確認した。

表2、アンジュレータ主要パラメータ

type	Halbach
magnet material	Nd-Fe-B
period length	4.0 cm
number of periods	50
total length	2.0 m
gap width	16~32 mm
magnetic field	0.62~0.18 T
K parameter	2.4~0.7

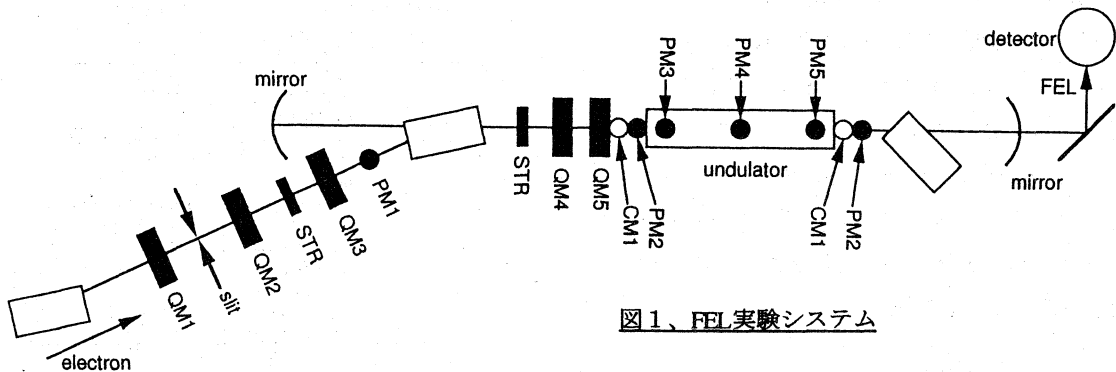


図1、FEL実験システム

3-3.光共振器

光共振器の主要パラメータを表3にまとめる。光共振器は対向ミラー間距離約7.6mの共焦点球面共振器である。アンジュレータ長とRayleigh rangeの比はほぼ2である。ミラーは金コートの無酸素銅製で、反射率は99.2%以上である。光取り出しミラーには1.0φのピンホールを開けている。また、現在使用していないがBrewster Plateによる光の取り出し機能も具備している。ミラー微調整システムは全5軸から成り、1台は分解能10nmのピエゾアクチュエータによる遠隔自動制御が可能で、もう1台は最小目盛0.01mmのマイクロヘッドによる全手動方式である。

表3、光共振器の主要パラメータ

length	7.5576 m
Rayleigh range	1.0 m
g-factor	-0.82 / -0.71
mirror curvature	4.15 / 4.42
mirror material	Au coated OFHC
reflectance of mirror	99.2 %
hole of extraction mirror	1 mm φ

3-4.光計測システム

赤外光測定用受光素子として、真性型検出素子であるInAsと、不純物型検出素子であるCu-doped-Geのふたつを1台のクライオスタットの中に装着して使用している。前者は77K冷却で1~3μm、後者は4K冷却で2~32μmの測定が可能である。クライオスタットの周囲を鉛ブロックで覆ったうえで、光共振器の光取り出し口の近傍に設置している。光伝送路は特に設けていない。

3-5.実験条件とゲイン計算

現在進めている実験の条件を表4にまとめる。ビームエネルギー50MeVで、約3μmの発振を目指している。ゲイン計算は文献6)に基づいて行った。Small signal gainはおおよそ10%と見積もっている。この計算コードでは5個の修正係数を計算するが、我々の実験条件ではエネルギー幅に起因する修正係数Ccが最も小さく0.5程度になる。ただし、これ以上のエネルギー幅狭帯域化は困

難と考えており、ゲインをより向上させる方策としてSHPB調整によるマイクロパルスの大電流化に取り組んでいる。

FEL実験は95年1月より始めており、SR入射の合間をぬって行っている。現在(95/7/E)のところまだ発振には至っていないが、約1mWの自発放射光の観測には成功した。

表4、FEL実験条件

beam energy	50 MeV
peak current	25 A
K parameter	0.84
magnetic field	0.23 T
FEL wavelength	2.8 μm
gain	10 %

4、まとめと今後の展開

小型ライナックを自社開発し、FEL発振に取り組んでいる。今後もFELをはじめとする魅力ある量子放射光源の開発に取り組む。

謝辞

FEL発振実験を進めるにあたり非常に有益な御意見を頂戴しました(株)自由電子レーザー研究所の富増所長に感謝致します。

参考文献

- 1) K. Emura et al., Proceedings of the 19th Linear Accelerator Meeting in Japan, JAERI-Conf 94-003, 1994
- 2) K. Emura et al., Sumitomo Technical Review, No.39, 1995
- 3) T. Haga et al., in this meeting
- 4) M. Moriguchi et al., Proceedings of the 19th Linear Accelerator Meeting in Japan, JAERI-Conf 94-003, 1994
- 5) K. Emura et al., Proceedings of the 15th Linear Accelerator Meeting in Japan, 1990
- 6) P. W. van Amersfoort et al., The FELIX project status report April 1988, Rijnhuizen Report 88-176