

[1 a - 4]

## Free Electron Laser Oscillation in Infrared Region using Compact Linac

Tsuyoshi SHINZATO, Tsuyoshi HAGA, Katsuji EMURA and Hiroshi TAKADA

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

### Abstract

We achieved free electron laser (FEL) oscillation in infrared region with our compact linac installed in Harima Research Laboratories in April 9, 1996. Electron beam for FEL needs some features such as long pulse, small emittance and small energy spread. The linac has been developed to generate not only high-brightness electron beam for FEL but also for SR injection. We have succeeded to obtain electron beam with normalized emittance of  $60 \pi$  mmmrad, energy spread of 0.5%(FWHM), which thoroughly exceeds the guide line of electron beam quality for FEL oscillation shown in some criterion. Moreover we reached to high peak current of 30A with SHPB system, increasing the gain of amplification. In recent experiment, we observed 14- $\mu$  m FEL oscillation with 25-MeV electron beam well-focused in the undulator part, and estimated FEL power is about 1mW.

### 小型ライナックを用いた赤外 FEL 発振

#### 1. はじめに

住友電気工業(株)播磨研究所では去る96年4月、国内産業界初の小型ライナックを用いた赤外 FEL 発振(波長 14  $\mu$  m)に成功した。

本ライナックは、22MeV/mの高加速勾配を持つ3m加速管2本を用いた全長約10mのコンパクトな構成であり、超電導小型SRリングNIJI<sup>TM</sup>-IIIへの電子入射装置として100MeV-100mAの電子ビームを安定に供給している。今回のFEL発振を達成するためには、電子ビームの質の向上を主眼とした装置の高度化を進めてきた。その結果、特性の異なる2種類の電子ビーム発生が可能な、世界初のSR/FEL両用のライナックシステムとして完成した。

本稿では当社FELシステムにおける高輝度電子ビームの発生・制御技術および発振実験の結果について報告する。

#### 2. 高輝度電子ビーム発生

FEL発振のためには大電流、低エミッタンス、長パルスの電子ビームが必要とされる。FEL発振に必要な電子ビームのエミッタンスとエネルギー広がりに関しては、Sprangleら<sup>1)</sup>によるガイドラインが示されており、当社小型ライナックでは発振可能とされるエミッタンス  $100 \pi$  mmmrad以下、エネルギー広がり1%以下を目標とした開

発を行ってきた<sup>2)</sup>。表1に小型ライナックの設計パラメータを示す。

規格化エミッタンスで  $60 \pi$  mmmrad と、先のガイドラインを十二分に満足する値が得られた。また、マクロパルス(10  $\mu$  s)の全長にわたって

表1. ライナック設計パラメータ

Electron gun	Cathode	EIMAC Y646B
	Voltage	200 kV - DC
	Emission current	1.5 A
	Normalized emittance	$7 \pi$ mm mrad
SHPB	Type	Standing wave
	Frequency	476 MHz
	Input power	4.6 kW
Prebuncher	Type	Standing wave
	Frequency	2,856 MHz
	Input power	5 kW
Buncher	Type	Traveling wave
	Frequency	2,856 MHz
	Input power	8 MW
Accelerator	Type	Traveling wave
	Mode	$2\pi/3$
	Frequency	2,856 MHz
	Beam energy (Maximum)	100 MeV( short pulse ) 76 MeV( long pulse )
	Macropulse current	100 mA
	Energy spread	0.7 %
	Normalized emittance	$60 \pi$ mm mrad
	Repetition rate	2 pps
Accelerating gradient	22 MeV/m	

FEL 共鳴条件を満たすエネルギーを持つ電子ビームが必要であり、マクロパルスのショット毎のエネルギー変動を低減させることが FEL 発振の安定化につながる。クライストロン出力電圧のパルス平坦度 0.3%、時間安定度 0.5%/Hr の実現、および温度安定度  $\pm 0.02^\circ\text{C}$  の加速管温調水システム導入により、エネルギー広がり  $\Delta E/E(\text{FWHM})$  で 0.7% を達成した。

これらの結果、アンジュレータ部で長時間連続運転に際しても軌道の変動が見られない安定なビームが得られている。また、アンジュレータ長 2m にわたってビーム直径 2mm を達成し、高い干渉効果が得られるビーム収束が可能となった。

さらに SHPB を導入し、ピーク電流の増大を図った。マイクロパルス構造はチェレンコフ光を用いた計測で確認しており<sup>3)</sup>、SHPB 導入によるピーク電流の増倍率は約 4.5 倍である。現在エネルギー 25MeV においてピーク電流 30A を達成している。

### 3. FEL 実験システム

#### 3-1. ビームトランスポート

ライナックからの低エミッタンス電子ビームを損失なく輸送し、かつアンジュレータ部でのビーム収束を実現するために、図 1 に示すように、2 台の偏向電磁石と 5 台の四極電磁石とで構成された S 字型のトランスポートシステムを採用している。偏向電磁石の偏向角は  $25.0^\circ$  で、エッジフォーカス効果のないセクター型である。また、振り分け電磁石下流の、水平方向ビームサイズが極大となる位置にスリットを設けて、エネルギー広がり裾を除去している。

#### 3-2. 電子ビームモニタリング

アンジュレータ部でのビームの挙動を詳細に観測するために、ビーム電流モニタとしてコアモニタ 2 台、ポジションモニタとしてセラミック蛍光

板および 1mm 厚アルミニウムの OTR プレートを各 3 台設置している。

OTR プレートには電子ビーム軌道ならびに光共振器光軸の調整が効率良く行えるよう、中心部に 3mm 径のピンホールを穿孔している。

#### 3-3. アンジュレータ

アンジュレータとしては、永久磁石を用いて、磁場が水平方向を向いた Halbach 型を採用した。主要パラメータを表 2 に示す。永久磁石には、Nd-Fe-B 系を用いている。

表 2. アンジュレータパラメータ

Type	Halbach
Magnet material	Nd-Fe-B
Period length	40 mm
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

アンジュレータ磁場は磁極間ギャップ 25mm 時にピーク磁場  $B_0 = 0.33[\text{T}]$  であり、磁場のばらつき  $\text{dB}/B_0$  は 0.25% 以下に抑止している。また、電子軌道の横方向変位に関係する量である磁場の 2 階積分値は  $6.4 \times 10^5 [\text{G} \cdot \text{mm}^2]$  である。 $\text{dB}/B_0$  の低減は、個々の磁極間のギャップ調整により行った。差分法を用いて単一磁石の位置変化による周辺磁場の変動を計算し、アンジュレータ全長にわたって  $\text{dB}/B_0$  が最小になるようなギャップ間変位の組み合わせを算出する。計算結果と実際のギャップ間調整を約 10 回繰り返すことで、 $\text{dB}/B_0$  を収束させた。また、2 階積分値の成分による電子蛇行の重心軌道の変位を補正するため、4 組のステアリング電磁石を導入した。これによ

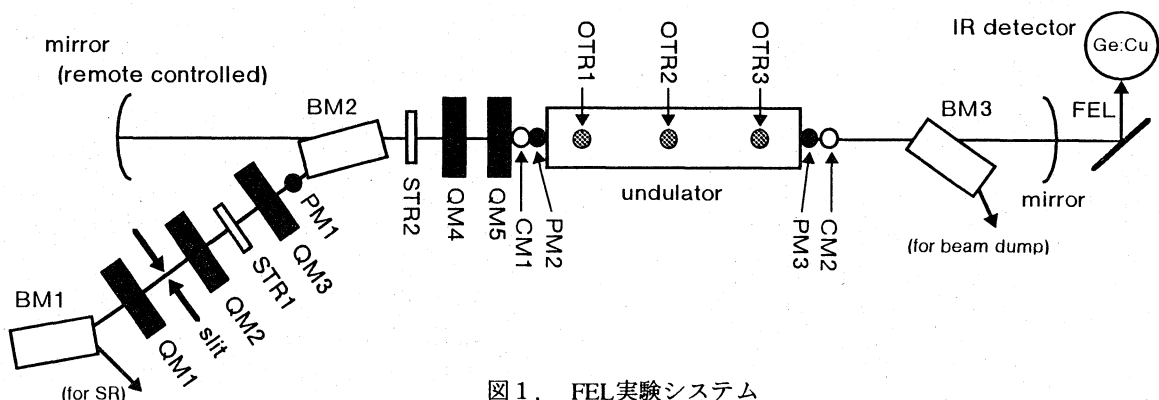


図 1. FEL 実験システム

りアンジュレータ全長にわたって、電子ビームの重心軌道を光共振器光軸上に合致させることが可能である。

### 3-3. 光共振器

共振器長 7.5579m に対して、下流側のミラーを固定し、上流側のミラーをステップモータとピエゾ素子を併用した駆動装置で遠隔操作により調整する。ミラーは軸方向 (x, y, z) およびあおり角 ( $\theta_x, \theta_y$ ) 併せて5軸で調整し、共振器長を決める z 軸方向の駆動については、ピエゾアクチュエータによって、10nm の高精度での制御が可能である。

ミラーの曲率は上流側 4.42m, 下流側 4.14m, であり、アンジュレータ長とレーリ長との比 $\sim 2$ となるように設計した。ミラーは金コーティングを施した無酸素銅製で、単体の反射率は99.2%以上であり、下流側ミラーには光取り出し用の口径 0.5mm  $\phi$  を穿孔している。

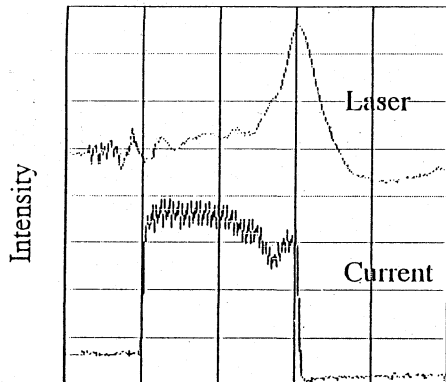
### 3-4. 光計測システム

赤外光測定には、クライオスタット内に装着した Ge:Cu 光起電力素子 (検出波長域 2 ~ 32  $\mu\text{m}$ ) からの出力を、プリアンプを通してオシロスコープで観測する。また、光伝送路による観測光の減衰を避けるため、測定器は光共振器下流側の光取り出しポート近傍に設置した。

## 4. 実験結果

ビームエネルギー 25MeV における FEL 出力波形を図2に示す。電子ビームの後半部 8  $\mu\text{s}$  付近から出力の増幅が見られる。出力波形の立ち上がり、および立ち下がりから、ゲインとロスそれぞれ 7%, 3% である。また、マイクロパルス長を 10ps として、マイクロパルス当たりのピークパワーは約 1mW と見積もられる。

発振出力が最大となる点の近傍で、共振器長を



Time (5  $\mu\text{s}$  / div)  
図2. FEL 出力波形

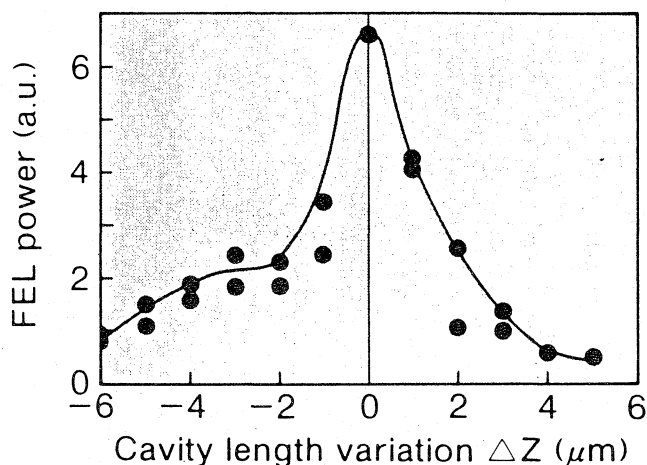


図3. 共振特性

微小変化させたときの出力変化を図3に示す。半値全幅はおよそ 2  $\mu\text{m}$  であり、共振特性は共振器長の変化量が負となる領域に肩部をもつという傾向が現れている<sup>4)</sup>。

発振出力波形から求めた小信号ゲイン 7% に対して、FELIX で開発されたゲイン計算手法<sup>5)</sup>からは、約 20% と大きく見積もられる。14  $\mu\text{m}$  の光のエンベロープがアンジュレータ部真空ダクト内壁に近接する程度の広がりを持つため、回折損失を生じ、実測された出力が小さくなっていると考えられる。

## 5. まとめ

小型ライナックを用いた赤外 FEL システムの開発を行い、14  $\mu\text{m}$  の FEL 発振を観測した。従来、FEL 発振の鍵となる電子ビームの質は、SR 入射に比べてより長パルス、大電流化が必要とされるため、それぞれ専用のライナックの建設が行われてきたが、今回、世界で初めて1台のライナックで SR リングへの電子ビーム入射と FEL 発振とを共に実現した。

### 参考文献

- 1) P.Sprangle et al., Nucl. Instr. & Meth. **A331**(1993)6
- 2) K.Emura et al., Proc. 20th Linear Accelerator Meeting in Japan, Osaka, 1995, p. 63
- 3) T.Haga et al., Proc. 10th Symp. Accelerator Sci. & Tech., Hitachinaka, 1995, JAERI-conf 95-021 (1995) p. 58
- 4) R.Prazeres et al., Nucl. Instr. & Meth. **A331**(1993)15
- 5) P.W. van Amersfoort et al., Nucl. Instr. & Meth. **A296**(1990)217